



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

# IMT<sup>x</sup>: RPAS autónomo para la distribución de carga ligera

---

Miguel Gastón Cedillo Campos  
Carlos Daniel Martner Peyrelongue  
Bernardo Hernández Sánchez  
Ernesto Alonso Lagarda Leyva

Publicación Técnica No. 676  
**Sanfandila, Qro.**  
**2022**

ISSN 0188-7297



Esta publicación es el producto final del proyecto de investigación TE-23/21.

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Transporte Integrado y Logística del Instituto Mexicano del Transporte, como parte de las actividades de investigación del Laboratorio Nacional CONACYT en Sistemas de Transporte y Logística (SiT-LOG).

El SiT-LOG es una unidad estratégica de investigación cuya Responsabilidad Técnica está a cargo del Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos y la Responsabilidad Administrativa está a cargo del Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue. Cuenta con varias sub-sedes, dentro de las cuales, la localizada en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) en Ciudad Obregón, Sonora, está a cargo de la Responsabilidad Técnica del Dr. Ernesto Alonso Lagarda Leyva.

Una primera versión de este documento se expuso en el marco del Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro [CiLOG], por lo que se agradece la revisión y aportaciones de los tres revisores anónimos quienes, con sus observaciones, han contribuido a mejorar las aportaciones de este documento.



# Contenido

---

	Página
Sinopsis.....	vii
Abstract.....	ix
Resumen ejecutivo.....	xi
Introducción.....	1
1. Definiciones clave.....	3
1.1 ¿Qué es un dron? .....	3
1.1.1 Unmanned Aerial Vehicle (UAV) .....	3
1.1.2 Unmanned Air Systems (UAS) .....	3
1.1.3 Remotely Piloted Aircraft (RPA) .....	4
1.1.4 Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) .....	4
1.2 Aplicaciones.....	4
1.2.1 Sector privado .....	4
1.2.2 Sector público.....	5
1.3 Marco Normativo.....	5
2. Algunas aplicaciones actuales.....	7
2.1 Zookal .....	7
2.2 Workhorse Group.....	8
2.3 Amazon.....	8
2.4 DHL.....	9
2.5 Boeing.....	10
2.6 Aplicación agro logística para el Valle del Yaqui.....	10
3. Proyecto: IMT <sup>x</sup> .....	15
3.1 Procesos .....	15
3.2 Arquitectura del sistema.....	16
3.3 Componentes físicos .....	17

3.3.1	Armazón .....	17
3.3.2	Electronic Speed Control (ESC) .....	18
3.3.3	Motores .....	18
3.3.4	Hélices.....	19
3.3.5	Batería.....	20
3.3.6	Controlador de vuelo .....	20
3.3.7	Computadora de a bordo.....	21
3.3.8	GPS.....	23
3.3.9	Mecanismo de sujeción .....	23
3.3.10	Contenedor de carga .....	24
3.3.11	Sensor óptico de distancia .....	24
3.3.12	Sensor aterrizaje de precisión.....	25
3.3.13	Resultados de la integración .....	25
3.3.14	Infraestructura para la Operación.....	26
3.3.15	Componentes de Software.....	31
3.3.16	Aplicación móvil .....	34
3.3.17	Diagrama de clases .....	38
3.3.18	Módulo de rutas .....	38
3.3.19	Módulo de notificaciones.....	39
3.3.20	Módulo de asignación de servicios .....	40
3.3.21	Módulo de estado del RPAS .....	40
3.3.22	Módulo central del RPAS .....	42
3.3.23	Módulo de rutas del RPAS .....	42
3.3.24	Módulo de visión .....	43
3.3.25	Protocolo de comunicación MQTT .....	43
3.3.26	QGroundControl.....	44
	Conclusiones .....	47

## Índice de figuras

---

Figura 1.1 Drone Flirtey de Zookal. ....	7
Figura 1.2 Drone HorseFly de Workhorse Group . ....	8
Figura 1.3 Drone <i>Amazon Prime Air</i> . ....	9
Figura 1.4 <i>Parcelcopter 3.0</i> DHL. ....	9
Figura 1.5 Boeing prototipo eVTOL carga pesada. ....	10
Figura 1.6 Configuración de variables del plan de vuelo. ....	11
Figura 1.7 Fotografía del cultivo del trigo del ejido Morelos 2 . ....	12
Figura 1.8 Fluctuación de temperatura en el cultivo. ....	12
Figura 1.9 Interfaz dinámica del modelo de los resultados obtenidos . ....	13
Figura 3.1 Procesos del servicio. ....	16
Figura 3.2 Diseño de los pasos en el servicio. ....	17
Figura 3.3 Armazón TAROT T960. ....	17
Figura 3.4 Controlador Hobbywing XRotor. ....	18
Figura 3.5 Motor Tarot 5008. ....	19
Figura 3.6 Hélices fibra de carbono. ....	19
Figura 3.7 Batería LiPo. ....	20
Figura 3.8 Controlador de vuelo pixhawk2. ....	21
Figura 3.9 Computadora Intel Aero. ....	21
Figura 3.10 Cámara Intel RealSense LR200. ....	22
Figura 3.11 GPS Here. ....	23
Figura 3.12 Mecanismo de sujeción tipo shutter. ....	23
Figura 3.13 Contenedor de carga. ....	24

Figura 3.14 Sensor óptico LIDAR-Lite v3. ....	24
Figura 3.15 Sensor IR-LOCK y MarkOne Beacon v2.0. ....	25
Figura 3.16 Los componentes antes de la integración. ....	26
Figura 3.17 Hexacoptero IMTx. ....	26
Figura 3.18 Hangar principal IMT. ....	27
Figura 3.19 (b) Plataforma para despegue y aterrizaje. ....	28
Figura 3.20 Estación meteorológica. ....	28
Figura 3.21 Puerto de entrega y recolección. ....	29
Figura 3.22 Diseño del puerto de entrega y recolección. ....	29
Figura 3.23 Localización de puertos de entrega y recolección (IMT). ....	30
Figura 3.24 Localización de puertos de entrega y recolección (ITSON). ....	31
Figura 3.25 Esquema de la Base de Datos. ....	33
Figura 3.26 Sistema de Control y Operación. ....	34
Figura 3.27 Ejemplo invitación. ....	35
Figura 3.28 Ejemplo invitación para la descarga desde sitio autorizado. ....	35
Figura 3.29 Pantalla de inicio de sesión. ....	36
Figura 3.30 Pantalla del menú opciones. ....	36
Figura 3.31 Pantalla solicitud de servicio. ....	37
Figura 3.32 Pantalla confirmación de servicio. ....	37
Figura 3.33 Diagrama de clases. ....	38
Tabla 2. Descripción de Notificaciones. ....	40
Figura 3.34 Diagrama de clases. ....	41
Figura 3.35 Diagrama de comunicación MQTT. ....	44
Figura 3.36 Interfaz de software mission planner. ....	45

# Sinopsis

---

Este trabajo presenta un estudio acerca de los Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS, por sus siglas en inglés) o comúnmente llamados drones, y sus aplicaciones a las operaciones logísticas. La complejidad tecnológica, aunada a la complejidad de la tarea a la que se puede enfocar el uso de un RPAS, hace que actualmente haya pocas aplicaciones logísticas realmente efectivas.

El presente documento tiene por objetivo el exponer los primeros resultados en el desarrollo de un RPAS autónomo para la distribución de carga ligera desarrollado en el Laboratorio Nacional CONACYT en Sistemas de Transporte y Logística (SiT-LOG), adscrito a la Coordinación de Transporte Integrado y Logística, del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en colaboración con el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

Con base en la propuesta presentada por Cedillo-Campos (2017) al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), primero se desarrolló un análisis a nivel global de las actuales aplicaciones de los RPAS a tareas logísticas. Esto permitió la identificación de áreas potenciales para el desarrollo de una innovación. Segundo, se estableció un protocolo de desarrollo científico - tecnológico para el desarrollo de un RPAS, denominado IMT-X. Tercero, se diseñó un modelo para la operación del producto.



# Abstract

---

This paper presents a study about Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) or commonly called drones, and their applications to logistics operations. The technological complexity, coupled with the complexity of the task on which the use of an RPAS can be focused, means that there are currently few truly effective logistics applications.

The objective of this document is to present the first results in the development of an autonomous RPAS for the distribution of light cargo developed in the CONACYT National Laboratory in Transport and Logistics Systems (SiT-LOG), attached to the Coordination of Integrated Transport and Logistics, of the Mexican Institute of Transportation (IMT), in collaboration with the Technological Institute of Sonora (ITSON).

Based on the proposal presented by Cedillo-Campos (2017) to the National Council of Science and Technology (CONACYT), a global analysis of the current applications of RPAS to logistics tasks was first developed. This allowed the identification of potential areas for the development of an innovation. Second, a scientific-technological development protocol was established for the development of an RPAS, called IMT-X. Third, a model was designed for the operation of the product.



## Resumen ejecutivo

---

A continuación, se presenta un estudio sobre la viabilidad de la incorporación de la tecnología de los RPAS en tareas de logística. De forma específica, para el transporte de cargas ligeras. Ante ello, se diseñó y sometió a consideración del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), una propuesta que permitió al Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística (SiT-LOG), contar con el apoyo financiero para avanzar hacia el desarrollo y uso de tecnología de drones. Lo anterior con los objetivos de desarrollar nuevas líneas de investigación con potencial para incrementar las capacidades tecnológicas en logística, favorecer la formación de recursos humanos en áreas de visible desarrollo y mejorar la transferencia tecnológica al sector productivo.

La originalidad de la investigación se ubicó en el diseño del modelo de trabajo para la creación de una nueva aplicación tecnológica no existente en el mercado. De hecho, los primeros resultados arrojaron tanto experiencias para el equipo de desarrollo, como un prototipo completamente funcional. La principal limitante de la investigación está vinculada al hecho de que el producto no se ha probado aún a un ambiente de operaciones fuera del Campus de Investigación del IMT. Finalmente se exponen conclusiones de utilidad para el desarrollo de RPAS en colaboración público-privada y se mencionan futuras líneas de investigación y desarrollo.

Los *RPAS* son esencialmente un conjunto de hardware y dispositivos electrónicos especializados que, en conjunto, tienen la peculiaridad de volar y poder flotar en el aire, dar giros, piruetas y son capaces de operar suavemente y con precisión a través de espacios pequeños. Los *RPAS* cuentan con capacidades únicas y muy flexibles, por ejemplo, pueden brindar ayuda humanitaria, pueden ser desplegados como armas de guerra y ser usados en seguimiento, monitoreo y trabajo de vigilancia. Actualmente se puede afirmar que los *RPAS* revolucionarán la forma en que los humanos realizan algunos trabajos o tareas peligrosas.

A menudo, los drones se asocian con propósitos militares porque originalmente en ese contexto se iniciaron, sin embargo, su uso se ha expandido más allá de las aplicaciones originales, a otras áreas de la aviación civil. Sus usos varían de acuerdo con su aplicación. Las entidades gubernamentales y las organizaciones del sector privado y académico, están lanzando drones para una amplia variedad de propósitos.

Actualmente los drones operan en diversos entornos y funciones de alto riesgo, los cuales incluyen, sin ser limitativo: 1) investigación atmosférica, científica, oceanográfica y geofísica; 2) exploración mineral; 3) espectrometría de imágenes; 4) plataformas de retransmisión de telecomunicaciones; 5) vigilancia policial,

patrullaje y reconocimiento de fronteras; 6) estudio e inspección de líneas eléctricas y tuberías remotas; 7) vigilancia de tráfico y accidentes; 8) monitoreo de emergencias y desastres; 9) cartografía y mapeo; 10) búsqueda y rescate; 11) fumigación agrícola; 12) fotografía aérea; 13) promoción y publicidad; 14) reconocimiento meteorológico; 15) investigación de vuelo; y 16) monitoreo y gestión de incendios.

Siguiendo la tendencia mundial, el país ha establecido las bases normativas para la operación de RPAS en México. La Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC), dependiente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), ha impulsado el Proyecto de Norma Oficial Mexicana: PROY-NOM-107-SCT3-2016. La misma está fundamentada en el Reglamento de la Leyes de Aviación Civil, la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal y el Reglamento Interior de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Este marco normativo está basado en normas internacionales vigentes, como son: las circulares de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) y la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos de América (FAA), entre otras.

El proyecto de investigación IMT<sup>x</sup> buscó desde su inicio, el diseñar, construir, instrumentar y controlar un vehículo aéreo no tripulado para el servicio autónomo de transporte de mensajería ligera. Para ello se decidió establecer las bases para el desarrollo de una plataforma tecnológica multipropósito, la cual permitiera en un futuro desplegar aplicaciones específicas e integrales para su uso en logística.

En primera instancia se diseñó la lógica del servicio, la cual sirvió de eje transversal para otorgar el servicio de transporte de material ligero. Posteriormente se diseñó tanto la arquitectura del sistema, como los componentes físicos y de software necesarios para operarla. Además, se desarrolló una aplicación móvil para un uso más accesible. Cabe destacar el detallado diseño del sistema de ruteo que permite al aparato cumplir con sus misiones de forma efectiva.

Uno de los objetivos planteados inicialmente para el presente proyecto, consistió en lograr que el RPAS IMT<sup>x</sup> alcanzara un vuelo estable y sostenido, esto se logró gracias a la selección, adquisición y configuración de los componentes electrónicos y hardware probados en condiciones extremas de operación. Entre los componentes analizados se encontraron las computadoras de “a bordo”, el controlador de vuelo, los sensores para aterrizaje, etc. Así mismo, la calibración adecuada de los componentes y sensores instalados permitió lograr la manipulación mediante el sistema autónomo de vuelo sostenido y en posición estable sin oscilaciones ni perturbaciones visibles.

Se puede afirmar que se logró avanzar hacia una etapa avanzada en el diseño de la solución. Sin embargo, también es cierto que hay mucho trabajo por desarrollar, sobre todo en cuestión de mejoras y nuevas prestaciones de los RPAS. Se ha obtenido una solución que cumple los objetivos e inclusive se desarrollaron módulos que no estaban planeados al principio, los cuales mejoran con mucho el funcionamiento. Es el caso, por ejemplo, del sistema de aterrizaje preciso usando

sensores infrarrojos, el sistema LIDAR para el cálculo de distancia, el sistema meteorológico para medir las condiciones ambientales, contribuyeron a mejorar el sistema sustancialmente.

Algunas aplicaciones a futuro identificadas con el uso de RPAS incluyen, el servicio de monitoreo de autopistas de cuota, información sobre el estado del tráfico en tiempo real, asistencia en emergencias y tareas críticas. Además, el sistema de drones también se adapta muy bien a tareas de colecta automatizada de información en zonas afectadas por desastres naturales, para diseñar rutas de asistencia en caso de desastre, así como, aplicaciones en temas de la logística humanitaria y agro logística.



# Introducción

---

Los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) aparecieron comercialmente por primera vez en Japón en la década de 1980, cuando helicópteros no tripulados probaron ser un eficiente sustituto de los helicópteros convencionales operados por un piloto para fumigar campos de arroz. Mucho se ha progresado desde entonces en innovaciones tecnológicas, convirtiendo a los UAV en poderosas y flexibles herramientas de captura y procesamiento de datos con aplicaciones en diversos campos. Especialmente en las áreas de agricultura, construcción, seguridad, transporte, entretenimiento, telecomunicaciones y minería.

Debido a que cada industria tiene necesidades específicas, se requieren diferentes soluciones basadas en RPAS con diferentes funcionalidades para cubrir las necesidades de cada una de ellas. Algunas de estas soluciones ofrecen velocidad y autonomía de vuelo, otras hacen hincapié en la capacidad de carga y otras más, se destacan por su eficiencia en la captura y procesamiento de datos.

Con base en un amplio análisis de la literatura, se estableció la viabilidad de la incorporación de la tecnología de los RPAS en tareas de logística. De forma específica, para el transporte de cargas ligeras. Ante ello, se diseñó y sometió a consideración del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), una propuesta que permitió al Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística (SiT-LOG), contar con el apoyo financiero para avanzar hacia el desarrollo y uso de tecnología de drones. Lo anterior con los objetivos de desarrollar nuevas líneas de investigación con potencial para incrementar las capacidades tecnológicas en logística, favorecer la formación de recursos humanos en áreas de visible desarrollo y mejorar la transferencia tecnológica al sector productivo.

La originalidad de la investigación se ubicó en el diseño del modelo de trabajo para la creación de una nueva aplicación tecnológica no existente en el mercado. De hecho, los primeros resultados arrojaron tanto experiencias para el equipo de desarrollo, como un prototipo completamente funcional. La principal limitante de la investigación está vinculada al hecho de que el producto no se ha probado aún a un ambiente de operaciones fuera del Campus de Investigación del IMT. Finalmente se exponen conclusiones de utilidad para el desarrollo de RPAS en colaboración público-privada y se mencionan futuras líneas de investigación y desarrollo.

El resto del documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: En la Sección I se revisan definiciones clave que nos permitirá comprender mejor las implicaciones de la tecnología y sus aplicaciones. En la Sesión II se incluye la revisión de distintas aplicaciones. En la Sección III se describe a detalle la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto IMT<sup>X</sup>, se muestran los

componentes usados en la integración de la solución, la base de datos y el diseño de sus tablas, así como, el diseño de los diferentes módulos de software tanto del sistema de control y operación, como los módulos asociados al RPAS. Finalmente, en la Sección de Conclusiones, se incluyen análisis finales correspondientes, y las futuras aplicaciones identificadas.

# 1. Definiciones clave

---

Los *RPAS* son esencialmente un conjunto de hardware y dispositivos electrónicos especializados que, en conjunto, tienen la peculiaridad de volar y poder flotar en el aire, dar giros, piruetas y son capaces de operar suavemente y con precisión a través de espacios pequeños. Los *RPAS* cuentan con capacidades únicas y muy flexibles, por ejemplo, pueden brindar ayuda humanitaria, pueden ser desplegados como armas de guerra y ser usados en seguimiento, monitoreo y trabajo de vigilancia. Actualmente se puede afirmar que los *RPAS* revolucionarán la forma en que los humanos realizan algunos trabajos o tareas peligrosas.

## 1.1 ¿Qué es un drone?

El término drone es un nombre alternativo y comercial para designar a los vehículos aéreos no tripulados, este se ha popularizado en los últimos años y actualmente es muy usado. Sin embargo, para expresarlo de una manera más adecuada, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), ha introducido el término *RPAS* (Remotely Piloted Aircraft System - Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia). Esta definición incluye el que los aparatos sean capaces de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, además de ser propulsados por un motor de explosión, eléctrico, o de reacción. Los *RPAS* pueden variar en tamaño, forma, velocidad y una gran cantidad de otros atributos. Las siguientes son definiciones asociadas con la terminología de drones:

### 1.1.1 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Este concepto está actualmente en desuso, proviene del ámbito militar y se usa para referirse literalmente a los vehículos aéreos no tripulados. El mercado de UAV ha sido segmentado en función del tipo, aplicación, clase, sistema, modo de operación, rango, y punto de venta. Así por ejemplo, según el rango, el mercado se ha clasificado en Visual Line of Sight (VLOS), Extended Visual Line of Sight (EVLOS) y Beyond Light of Sight (BLOS). Este crecimiento puede atribuirse al uso cada vez mayor de VLOS UAV en aplicaciones comerciales y de consumo.

### 1.1.2 Unmanned Air Systems (UAS)

Es el término genérico para referirse al sistema de aeronaves no tripuladas. A diferencia del UAV que se refiere exclusivamente a la propia aeronave. El sistema integra el dispositivo, el enlace de comunicaciones y la estación de tierra.

### **1.1.3 Remotely Piloted Aircraft (RPA)**

Es el término usado para denominar a las aeronaves no tripuladas que son operadas mediante control remoto, y es aplicado principalmente a los dispositivos destinados a la aviación comercial. Se trata de una definición de reciente aparición propuesta por la OACI, y la cual tiene la intención de poner de relieve el hecho de que los sistemas implicados no son totalmente automáticos, sino que siempre tienen un piloto al mando responsable del vuelo del RPA.

### **1.1.4 Remotely Piloted Aircraft System (RPAS)**

Es el término utilizado para denominar al sistema completo: aeronave, enlace de comunicaciones y estación de tierra de las aeronaves no tripuladas que son operadas mediante control remoto.

## **1.2 Aplicaciones**

A menudo, los drones se asocian con propósitos militares porque originalmente en ese contexto se iniciaron, sin embargo, su uso se ha expandido más allá de las aplicaciones originales, a otras áreas de la aviación civil. Sus usos varían de acuerdo con su aplicación. Las entidades gubernamentales y las organizaciones del sector privado y académico, están lanzando drones para una amplia variedad de propósitos.

Actualmente los drones operan en diversos entornos y funciones de alto riesgo, los cuales incluyen, sin ser limitativo: 1) investigación atmosférica, científica, oceanográfica y geofísica; 2) exploración mineral; 3) espectrometría de imágenes; 4) plataformas de retransmisión de telecomunicaciones; 5) vigilancia policial, patrullaje y reconocimiento de fronteras; 6) estudio e inspección de líneas eléctricas y tuberías remotas; 7) vigilancia de tráfico y accidentes; 8) monitoreo de emergencias y desastres; 9) cartografía y mapeo; 10) búsqueda y rescate; 11) fumigación agrícola; 12) fotografía aérea; 13) promoción y publicidad; 14) reconocimiento meteorológico; 15) investigación de vuelo; y 16) monitoreo y gestión de incendios.

### **1.2.1 Sector privado**

Los drones podrían convertirse en una herramienta práctica para las empresas comerciales. Podrían usarse cotidianamente para servicios comerciales rentables tales como: 1) inspección de infraestructura; 2) servicios de comunicaciones y difusión; 3) relé de comunicación inalámbrica; 4) monitoreo de recursos naturales; mapeo digital; 5) gestión de tierras y vida silvestre, y 6) calidad del aire (gestión y control); servicios de cartografía. En la industria del entretenimiento se usan para filmación de anuncios y películas o podrían ser utilizados por agentes inmobiliarios para vender propiedades. Aparentemente, la lista de posibles propósitos en el sector privado está expandiéndose al mismo ritmo que la accesibilidad de la herramienta.

## 1.2.2 Sector público

En cuanto al sector público, en el corto plazo las fuerzas del orden representan un potencial usuario de aplicaciones RPAS, hay alternativas simples y rentable para las actividades policiales aerotransportadas. Las fuerzas policiales en Estados Unidos, el Reino Unido y Canadá informan del uso de drones para ciertas actividades de aplicación de la ley. De acuerdo con informes de estos países, sus fuerzas policiales usan drones para tomar fotos aéreas y videos en choques de vehículos o en escenas del crimen, también son usados como buscadores en el aire y en operaciones de rescate. Según estos informes, cuando se lanzan estos RPAS, lo hacen bajo condiciones muy estrictas, no pueden volar más allá del rango de 120 metros en línea de vista del operador y no pueden sobrevolar a personas no involucradas en los incidentes. Otros usos del sector público podrían ser: la recopilación de inteligencia de seguridad nacional, protección de la infraestructura crítica, seguridad pública y crisis, investigación ambiental y supervisión territorial fronteriza, entre otros.

## 1.3 Marco Normativo

El ritmo acelerado de crecimiento de la tecnología ha dado como resultado un aumento en el número de nuevas aplicaciones y usos para los RPAS. A su vez, esto ha creado la necesidad de contar con marcos regulatorios que faciliten la operación, fabricación, importación y comercialización de RPAS, que garanticen la seguridad de usuarios y ciudadanos.

Siguiendo la tendencia mundial, el país ha establecido las bases normativas para la operación de RPAS en México. La Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC), dependiente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), ha impulsado el Proyecto de Norma Oficial Mexicana: PROY-NOM-107-SCT3-2016. La misma está fundamentada en el Reglamento de la Leyes de Aviación Civil, la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal y el Reglamento Interior de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Este marco normativo está basado en normas internacionales vigentes, como son: las circulares de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) y la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos de América (FAA), entre otras.



## 2. Algunas aplicaciones actuales

---

Diversas compañías en todo el mundo están apostando por una novedosa modalidad para el reparto de sus productos, desarrollando y usando tecnología aplicada a su logística y a la optimización de sus sistemas de entrega usando RPAS. A continuación, se revisarán algunos casos emblemáticos.

### 2.1 Zookal

Zookal es una compañía con sede en Australia dedicada a la venta y renta de libros de texto a estudiantes. Ha sido la primera empresa en incorporar el uso de drones en su logística. Su trayecto como empresa inicia con el envío de libros a los estudiantes de la Universidad de Sídney usando drones, los cuales operan con baterías recargables de polímero de litio y son capaces de cargar paquetes de hasta 2 kg en un radio de 3 km. Utilizan GPS para localizar a los usuarios y pueden ser monitoreados por medio de teléfonos inteligentes en tiempo real.



Figura 2.1 Drone Flirtey de Zookal<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Fuente: <https://blogging-techies.com/compania-australiana-inicia-la-primera-entrega-del-mundo-por-servicio-de-drones/>

## 2.2 Workhorse Group

El *Workhorse Group*, es una empresa fabricante de camiones ubicada en Ohio EE.UU., la cual ha diseñado y desarrollado un dron de entrega de paquetes. Este aparato, se incluye como parte del sistema en un camión de reparto. Operativamente, el dron despegga del techo y transporta los paquetes a puntos de entrega a una milla de distancia, el dron es llamado "*HorseFly*". La empresa ha declarado que estos desarrollos tecnológicos pueden reducir los costos de combustible y aumentar la eficiencia para las empresas de reparto que decidan usar esta tecnología. Este dron fue desarrollado en colaboración con la Universidad de Cincinnati. Pesa 18 libras. Recarga su batería automáticamente cada vez que aterriza en su plataforma de aterrizaje.



Figura 2.2 Dron HorseFly de Workhorse Group <sup>2</sup>.

## 2.3 Amazon

La compañía estadounidense de comercio electrónico Amazon, está haciendo ensayos en tres países para lanzar una innovadora propuesta para optimizar la entrega de productos. Su apuesta consiste en cambiar todo el sistema de reparto de mercancías a través del uso de drones. Su "*drone repartidor*" o *Amazon Prime Air*, pesa 25 kilogramos, puede volar a 120 metros sobre el nivel de la tierra y recorrer hasta 19 kilómetros.

El *Amazon Prime Air*, tiene un software especial para aterrizar en zonas seguras, está equipado con sensores para disminuir la probabilidad de una colisión. Existen al menos 12 prototipos que están siendo probados en países como: Israel, Reino Unido y Estados Unidos.

---

<sup>2</sup> Fuente: <https://www.suasnews.com/2015/07/amazon-and-google-arent-the-only-ones-with-a-delivery-drone/>



Figura 2.3 Drone Amazon Prime Air<sup>3</sup>.

## 2.4 DHL

La empresa de logística DHL, anunció los resultados de la prueba de su *Parcelcopter* (sistema autónomo con dron). Dicha prueba, se llevó a cabo entre los meses de enero y marzo de 2016, en la comunidad bávara de *Reit im Winkl* donde los clientes fueron invitados a probar su sistema. Durante el período de prueba, podrían insertar sus envíos en el *Skyport*. La empresa reportó que se realizaron 130 ciclos de carga y descarga autónomos.



Figura 2.4 Parcelcopter 3.0 DHL<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Fuente: <https://www.turbosquid.com/es/3d-models/amazon-prime-air-delivery-drone-rigged-3d-model-1750492>

<sup>4</sup> Fuente: [https://gigazine.net/gsc\\_news/en/20160713-dhl-parcelcopter-3-0/](https://gigazine.net/gsc_news/en/20160713-dhl-parcelcopter-3-0/)

## 2.5 Boeing

La compañía *Boeing*, en un comunicado a inicios de 2018, presentó el prototipo de un nuevo vehículo eléctrico de despegue y aterrizaje vertical. En él, afirmó que está destinado a revolucionar el sector del transporte aéreo, precisó que este dron está equipado con ocho motores eléctricos y mide 4.57 metros de ancho, 5.49 metros de largo, pesa 339 kilogramos y es capaz de soportar más de 200 kilogramos de carga útil.



Figura 2.5 Boeing prototipo eVTOL carga pesada<sup>5</sup>.

## 2.6 Aplicación agro logística para el Valle del Yaqui<sup>6</sup>

La agricultura desempeña un papel importante en la economía de México, produciendo 750 cultivos diferentes y ocupando un 16% del total de hectáreas nacionales. Los principales cultivos son el maíz grano blanco, grano amarillo, maíz forrajero, sorgo forrajero, sorgo grano, frijol y trigo. Sonora es el llamado granero nacional, debido a las características de su suelo, clima e infraestructuras hidráulicas, cosecha grandes cantidades de cultivos siendo el principal productor de trigo en el país. Específicamente

---

<sup>5</sup> Fuente: <http://www.aviacionglobal.com/tendencias/boeing-revela-prototipo-drone-carga/>

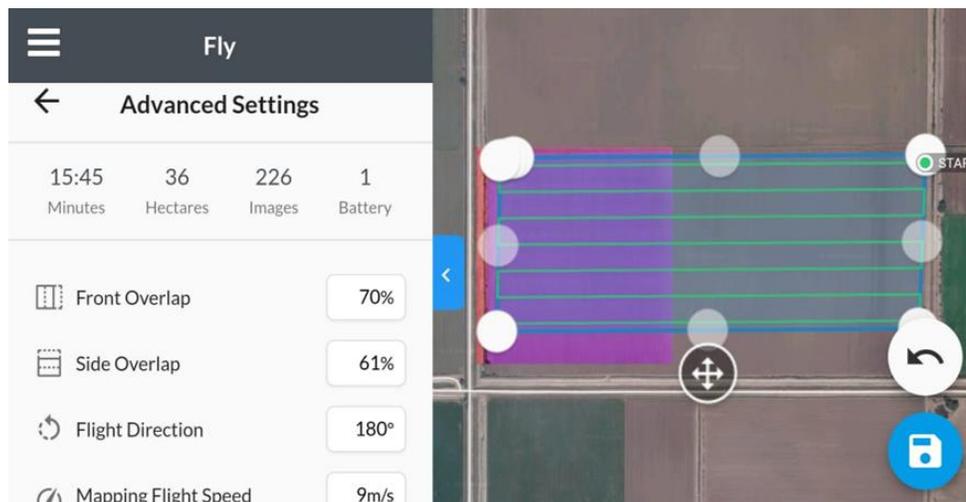
<sup>6</sup> Esquer, Ponce y Vega (2019) Tesis de Licenciatura, Departamento de Ingeniería Industrial, ITSON

en el Valle del Yaqui, donde las condiciones climatológicas favorecen y hacen susceptible a este cultivo.

Sin embargo, tras el paso de los años y debido a la variación en el precio del dólar, los costos de producción agrícola se elevaron haciendo que el método de cultivo tradicional resulte poco favorable para el productor minorista. Es así que, con la finalidad de identificar acciones para incrementar la eficiencia en la toma de decisiones, en el Instituto tecnológico de Sonora (ITSON), se diseñó un modelo de dinámica de sistemas para eficientar la toma de decisiones en el seguimiento y control de cultivos de trigos a través del uso de aeronaves no tripuladas.

La metodología utilizada creó y modeló escenarios con seis fases. Desde conceptualización hasta el desarrollo de una interfaz dinámica con el usuario. Cabe mencionar que se implementó la aplicación del Drone Phantom 4 (Drone) como técnica de precisión para el monitoreo y control de cultivos en la fase de conceptualización.

Tomando en cuenta parámetros vinculados con el trigo y la zona de estudio, se realizó la planeación del vuelo del Drone, siendo esto posible mediante la implementación de la aplicación “*DroneDeploy*”, programándose: la zona a volar, altura a sobre volar, velocidad del Drone al momento de realizar el vuelo, número de imágenes a capturar, traslape y dirección a seguir según el estado del viento en el momento del análisis (ver Figura 1.6).



**Figura 2.6** Configuración de variables del plan de vuelo<sup>7</sup>.

Se seleccionó un área de 36 hectáreas, en donde el recorrido se realizó a una velocidad de 9 m/s, a una altura de 100 metros, capturando un total de 226 imágenes. Para ello se utilizó únicamente la carga de energía proporcionada por una batería. Se seleccionó un

<sup>7</sup> Fuente: Aplicación DroneDeploy

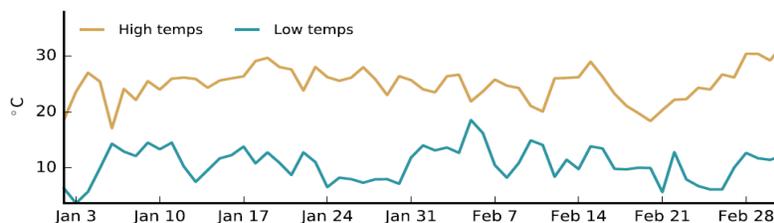
traslape *front overlap* del 70% y *side Overlap* del 61% (el recomendado por DJI) y una *flight direction* de 180 °. Esto se debió a la necesidad de volar en sentido contrario de la dirección del viento.

El sobrevuelo permitió capturar 226 imágenes por medio de la cámara de banda infrarroja montada en el Drone, siendo estas las que permitieron generar el ortomosaico de la zona en estudio (ver Figura 1.7).



**Figura 2.7** Fotografía del cultivo del trigo del ejido Morelos 2 <sup>8</sup>.

Con la generación del ortomosaico, se procedió al procesamiento del mismo a través de la plataforma de soporte “*FarmLens*”. Es así que se generó el análisis relacionado a la temperatura del cultivo, humedad y sanidad vegetal del mismo y obtener información de tipo cuantitativa para el desarrollo del modelo dinámico. Los análisis permitieron identificar la fluctuación de temperatura en el cultivo a través de máximos y mínimos (Ver Figura 1.8).



**Figura 2.8** Fluctuación de temperatura en el cultivo<sup>9</sup>.

Tomando en cuenta los datos mencionados anteriormente, así como otros análisis, fue posible generar resultados que permitieron calcular la cantidad de hectáreas a fumigar, rendimiento de trigo por hectárea, número de bolsas de semillas a adquirir, cantidad de

---

<sup>8</sup> Fuente: Cámara de banda infrarroja montada en el Drone.

<sup>9</sup> Fuente: Página de procesamiento *FarmLens*.

NH<sub>3</sub> a aplicar, total de requerimientos de diésel entre otros. Con el interés de facilitar todos los cálculos a los potenciales usuarios del Drone, se desarrolló una interface (ver Figura 1.9).



**Figura 2.9** Interfaz dinámica del modelo de los resultados obtenidos <sup>10</sup>.

Es así que, con base en los datos de entrada, fue posible determinar que para cultivar un total de 44 ha. se requiere la adquisición de 158.4 bolsas de semilla y aplicar 17,600 kilos de NH<sub>3</sub>. Igualmente, son necesarios 1,100 lts de Diesel generando costos totales por \$753,605 y por ende una utilidad de \$469,040. Los resultados mostraron las ventajas de utilizar la tecnología de drones en conjunto con el modelado en dinámica de sistemas para mejorar la toma de decisiones en la agricultura de precisión.

<sup>10</sup> Fuente: Elaboración propia con el programa Stella.



## 3. Proyecto: IMT<sup>x</sup>

---

El proyecto de investigación IMT<sup>x</sup> buscó desde su inicio, el diseñar, construir, instrumentar y controlar un vehículo aéreo no tripulado para el servicio autónomo de transporte de mensajería ligera. Para ello se decidió establecer las bases para el desarrollo de una plataforma tecnológica multipropósito, la cual permitiera en un futuro desplegar aplicaciones específicas e integrales para su uso en logística.

### 3.1 Procesos

En primera instancia se diseñó la lógica del servicio, la cual sirvió de eje transversal para otorgar el servicio de transporte de material ligero. Se establecieron ocho (8) procesos, los cuales se definen a continuación (ver Figura 3.1):

1. INICIO. Un usuario registrado en la base de datos del sistema, solicita el servicio mediante una aplicación en su teléfono móvil.
2. TRATAMIENTO DE LA PETICIÓN. El sistema recibe la petición y verifica la disponibilidad del RPAS, en caso de contar con disponibilidad, se envía la orden de salida e itinerario a seguir, al mismo tiempo que se envía un mensaje tanto al usuario remitente, como al usuario destinatario del paquete. En caso de no contar con disponibilidad, se avisa al solicitante, informándole, con base en la fila de espera, sobre una potencial hora de disponibilidad;
3. LANZAMIENTO DEL SERVICIO: El RPAS sale de su hangar principal hacia el puerto de recolección, enviando un mensaje sobre su estatus a los usuarios (remitente/destinatario);
4. COLECTA DEL PAQUETE: El RPAS llega al puerto de recolección, apaga sus hélices y manda un mensaje al usuario solicitante del servicio de envío, dando aviso sobre la disponibilidad del aparato en el puerto de recolección.
5. ENVÍO DEL PAQUETE: El usuario remitente coloca el contenedor de carga, posteriormente, usando la aplicación, "*libera*" al RPAS para que se traslade al destino.
6. ENTREGA DEL PAQUETE: El RPAS vuela hacia el puerto destino, aterriza, y deposita el contenedor de carga, y envía un mensaje de su estatus al usuario receptor.
7. CONFIRMACIÓN DE RECIBIDO: Una vez que el RPAS ha entregado el paquete, el usuario receptor confirma de buen recibo a través de la aplicación, con ello "*libera*" al drone para que este regrese a su hangar.
8. FIN. Al llegar a su hangar, el drone queda en espera de un nuevo servicio.

La telemetría del servicio, así como los mensajes del sistema, quedan registrados en la base de datos para futuros análisis, los cuales permitirían mejorar la calidad del servicio.



Figura 3.1 Procesos del servicio.

## 3.2 Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema es un elemento esencial del proyecto. La misma tiene como eje central un “*Sistema de Control y Operación*”, el cual tiene como función principal el ser la plataforma para que el resto de los componentes ejecuten las tareas programadas para proveer el servicio.

El componente “*Administrador del sistema*” es el software desarrollado para la operación del sistema. Es a través de él que el sistema recibe tanto las solicitudes de servicio desde las aplicaciones móviles, como la información meteorológica que permite evaluar si es posible prestar el servicio de transporte de mercancías ligeras ante determinadas condiciones climáticas. Igualmente, es a través de este componente que se lleva a cabo el control y seguimiento de las operaciones con drones.

El componente “*Aplicación móvil*” es un elemento clave de la interacción entre los usuarios y el sistema. Debido a que es el elemento que permite la recepción de las solicitudes de envío, así como el envío de información a los usuarios para dar seguimiento al traslado de las mercancías hasta la confirmación de conclusión del servicio, su mantenimiento y actualización fue catalogada con un criterio alto de criticidad.

El componente “*Base de datos*” es un elemento importante para los posteriores análisis que permiten incrementar la calidad del servicio ofertado a los usuarios. Este componente registra toda la información del desempeño de los componentes del sistema ante las variables del contexto, como es el caso del clima.

El componente “RPAS” es el elemento que ejecuta el servicio ofertado a los usuarios, de este modo, su mantenimiento y continua revisión de las medidas de seguridad en su operación, se establecieron como la prioridad fundamental de todo el sistema (ver Figura 3.2).



**Figura 3.2** Diseño de los pasos en el servicio.

## 3.3 Componentes físicos

### 3.3.1 Armazón

Para la estructura de soporte de los RPAS, se seleccionó el armazón TAROT T960. Este marco está fabricado en fibra de carbono de alta resistencia, tiene seis brazos plegables (seis motores), configuración que, de acuerdo a las especificaciones revisadas de forma comparativa, logra una mayor estabilidad en su vuelo en comparación a los modelos con cuatro brazos (ver Figura 3.3).



**Figura 3.3** Armazón TAROT T960.

### 3.3.2 Electronic Speed Control (ESC)

El controlador electrónico de velocidad usado en la integración: Hobbywing XRotor 40A-OPTO o ESC, en la revisión técnica, este componente resultó ser el más adecuado para el control en RPAS multi rotor. Puede recibir dos de los más importantes firmwares para drones: ArduPilot y Px4, estos ofrecen gran versatilidad, opciones de configuraciones e inclusión de hardware adicional, ambos firmwares utilizan código abierto disponible para su libre manipulación. Algunas de sus funciones son: i) control de la velocidad en el giro de los motores; ii) dirección del movimiento, y iii) frenado dinámico. Se ilustra en la Figura 3.4:



Figura 3.4 Controlador Hobbywing XRotor<sup>11</sup>.

### 3.3.3 Motores

Se usaron seis motores marca Tarot 5008, la razón principal para considerarlos fue su relación de potencia y eficiencia, así como también que, están diseñados para uso en RPAS multi rotor de 6 ó 8 brazos. De acuerdo a las especificaciones del fabricante, genera de 1.6 kg hasta 2.0 kg de fuerza de empuje en conjunción con hélices de 18 pulgadas. Lo anterior, al 50% de aceleración, este motor no usa escobillas para el cambio de polaridad y su alimentación es de corriente continua, se ilustra en la Figura 3.5:

---

<sup>11</sup> Fuente: <http://www.helipal.com/hobbywing-xrotor-40a-esc.html>



Figura 3.5 Motor Tarot 5008<sup>12</sup>.

### 3.3.4 Hélices

Las hélices, son uno de los componentes importantes de los RPAS multi rotor. De ellas depende la fuerza de empuje en cada propulsor. Las hélices usadas en la integración del RPAS IMTx están fabricadas en fibra de carbono de alta resistencia, por lo que ofrecen altas prestaciones y eficiencia en vuelo. Por supuesto son compatibles con el motor seleccionado para el proyecto. Cada par de hélices está balanceada con un ajuste fino, son muy ligeras y soportan mejor los golpes comparados con las fabricadas en plástico o madera. Ello se ilustra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Hélices fibra de carbono<sup>13</sup>.

---

<sup>12</sup> Fuente: <https://www.aliexpress.com/w/wholesale-tarot-5008-340kv.html>

<sup>13</sup> Fuente: <https://www.aliexpress.com>

### 3.3.5 Batería

Las baterías seleccionadas son de LiPo (Litio y Polímero), del tipo Zop Power Li-poly RC XT60 plug. Estas son usualmente utilizadas en sistemas eléctricos de radiocontrol: aviones, helicópteros y multicópteros. Tienen una capacidad de 10,000 mAh, voltaje de 22.2 v, tasa de descarga de 30C, 6 celdas (ver la figura 3.7).

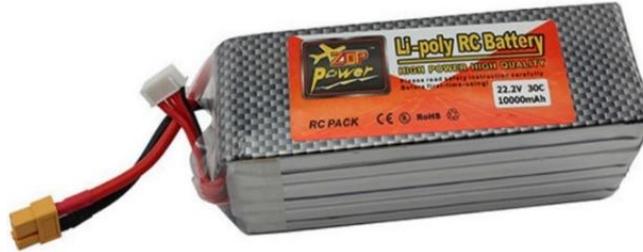


Figura 3.7 Batería LiPo<sup>14</sup>.

### 3.3.6 Controlador de vuelo

Se seleccionó el controlador de vuelo Cube Pixhawk2 de Ardu Pilot, para el proyecto, debido a que es una plataforma para el desarrollo de hardware libre que está pensada para proveer un autopiloto a las comunidades académicas, de entretenimiento y de industriales. El controlador maneja algoritmos para la altitud y posición, pero también provee algoritmos de guía, navegación y control para distintos tipos de drones multi rotor o de ala fija. El software que lo controla conecta con distintos sensores, extensiones de telemetría y otros accesorios periféricos. Este software es parte de la plataforma DroneCode y corre sobre plataformas Android, IOS, Mac, Windows y Linux.

Está equipado con una unidad de medición inercial o IMU (del inglés Inertial Measurement Unit). Los datos medidos por estos sensores se utilizan para alimentar el algoritmo de control acerca de la velocidad, la orientación y las fuerzas gravitacionales de un aparato. Para ello se usa una combinación de acelerómetros y giróscopos (ver Figura 3.8).

---

<sup>14</sup> Fuente: <https://www.aliexpress.com> |



Figura 3.8 Controlador de vuelo pixhawk2<sup>15</sup>.

### 3.3.7 Computadora de a bordo

La computadora de a bordo usada para la comunicación y control en el RPAS, fue la placa madre Intel Aero. Está diseñada específicamente para vehículos aéreos no tripulados, sus interfaces permiten conectar variedad de sensores y controladores. Sobre esta placa corren los programas que permiten la comunicación con el sistema de control y operación, así como el despliegue de la ruta para que los RPAS lleguen a su destino. Esta placa es compatible con el controlador de vuelo Pixhawk (ver Figura 3.9).



Figura 3.9 Computadora Intel Aero<sup>16</sup>.

<sup>15</sup> Fuente: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-thecube-overview.html>

<sup>16</sup> Fuente: <https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/drones/development-drones/intel-aero-computer-board-guide.pdf>

Algunas de sus características más relevantes son:

- Procesador Intel Atom® x7-Z8750
- LPDDR3-1600 de 4 GB
- eMMC de 32 GB
- Ranura de tarjeta de memoria microSD
- Conector M.2 PCIe, 1 línea para SSD
- Intel® Dual Band Wireless-AC 8260
- E/S reprogramable vía Intel® MAX® 10 FPGA
- Cámara RGB 8 MP (delantera)
- Cámara VGA, obturador global, monocromática (descendente)
- Código abierto, Linux\* integrado, Yocto Project\*
- InsydeH2O\* UEFI BIOS optimizado para Intel® Aero Platform for UAVs

La computadora Intel Aero se acompaña de un kit de cámaras. En el proyecto se usaron para el desarrollo de algoritmos que ayudan a la evasión de obstáculos en vuelo (ver Figura 3.10).



Figura 3.10 Cámara Intel RealSense LR200<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Fuente: <https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/drones/development-drones/intel-aero-compute-board-guide.pdf>

### 3.3.8 GPS

Se utilizó un sistema de posicionamiento y de navegación (GPS Here). Este cuenta con un módulo Global Navigation Satellite Systems (GNSS), una brújula digital, batería de respaldo, y luces LED para indicaciones de estado (ver Figura 3.11).



Figura 3.11 GPS Here<sup>18</sup>.

### 3.3.9 Mecanismo de sujeción

El mecanismo de sujeción de carga, tipo obturador, fue diseñado y fabricado para ser usado en conjunto con el contenedor de carga del RPAS IMT<sup>x</sup>. Este sistema tiene un componente de control de apertura y cierre del diafragma mediante un servomotor. El mecanismo es maquinado en aluminio de 2.8 mm de espesor con un peso de 450 gramos (ver Figura 3.12).

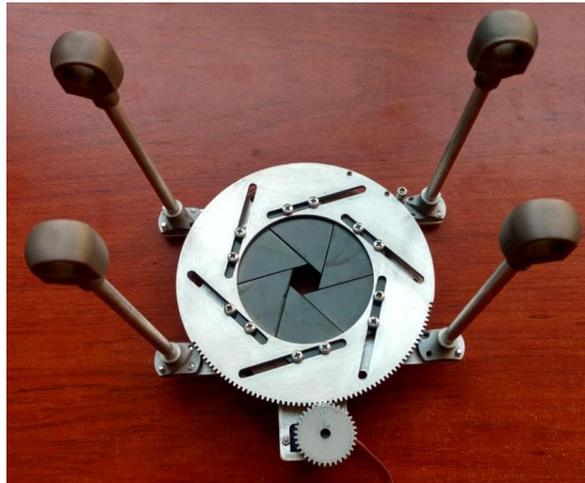


Figura 3.12 Mecanismo de sujeción tipo shutter.

<sup>18</sup> Fuente: <https://www.aliexpress.com/>

### 3.3.10 Contenedor de carga

Se diseñó y se fabricó un contenedor de carga de documentos para la atención del servicio de transporte de material ligero. Este es independiente del mecanismo de sujeción (ver Figura 3.13).

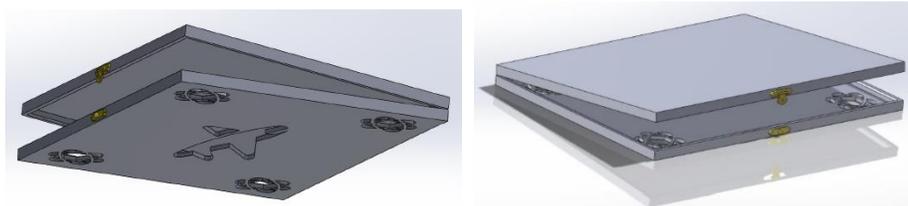


Figura 3.13 Contenedor de carga.

### 3.3.11 Sensor óptico de distancia

En el proyecto se usó el sensor óptico LIDAR-Lite v3 de GARMIN para la medición de la distancia vertical y en consecuencia, lograr un aterrizaje preciso en la plataforma de los puertos entrega recolección. El módulo mide 48 mm x 40 mm x 20 mm con un rango de medición de 40 metros, este sensor es ideal para drones, robots o vehículos no tripulados entre otras aplicaciones (ver Figura 3.14).



Figura 3.14 Sensor óptico LIDAR-Lite v3.

### 3.3.12 Sensor aterrizaje de precisión

Para lograr la precisión en el aterrizaje en la plataforma de entrega-recolección, se usó un sensor montado en el RPAS (IR-LOCK), el cual es compatible con el controlador de vuelo Pixhawk. También se colocó un beacon MarkOne v2.0 para marcar el punto de aterrizaje (ver Figura 3.15).



Figura 3.15 Sensor IR-LOCK y MarkOne Beacon v2.0.

### 3.3.13 Resultados de la integración

Los componentes utilizados para la integración del Hexacoptero RPAS IMTx fueron (ver Figura 3.16):

- 1x Armazón del RPAS, 6 brazos y 2 patas Tarot T960
- 6x Tarot 5008-340kv motor brushless
- 6x Tarot 1855 Propelas de fibra de carbono (Contrarreloj y con el reloj)
- 6x Hobbywing XRotor 40A-OPTO ESC
- 3x Storm Montaje auto-apretables de Propelas
- 1x Paquete de Cables Multi-Rotor
- 1x GPS Here
- 1x Pixhawk 2 Cube Controlador de Vuelo
- 1x FrSKY Taranis X9D Plus Radio Control
- 1x FrSKY XSR Radio Receptor
- 1x Batería de 6 celdas, 22.2V, 10000mah, LiPo.
- 1x Sensor IR-LOCK
- 1x MarkOne Beacon v2.0

- 1x Sensor óptico LIDAR-Lite v3



Figura 3.16 Los componentes antes de la integración.

El resultado de la integración se ilustra en la Figura 3.17:



Figura 3.17 Hexacoptero IMTX.

### 3.3.14 Infraestructura para la Operación

Para complementar la solución tecnológica, se diseñó y se construyó infraestructura para la operación completa del sistema, tal como: i) plataformas para el despegue

y el aterrizaje seguro de los RPAS IMTx; ii) hangar o puerto principal como base de operación; y ii) control del sistema. A continuación, se ofrece una breve descripción.

### 3.3.14.1 El puerto principal

El puerto o hangar principal, es el lugar físico donde los RPAS tienen su base de control y operación, está construido con una cubierta de arco techo reforzado con una estructura metálica, así como cubiertas frontales y posteriores de lámina de aluminio y una puerta principal automatizada. La instrumentación incluye, además: i) contactos polarizados de carga eléctrica en circuitos separados para la carga eléctrica y para los mecanismos; ii) sistema de comunicaciones; iii) estación meteorológica; y iv) plataforma metálica automatizada para el despegue y aterrizaje de los RPAS (ver Figura 3.18).



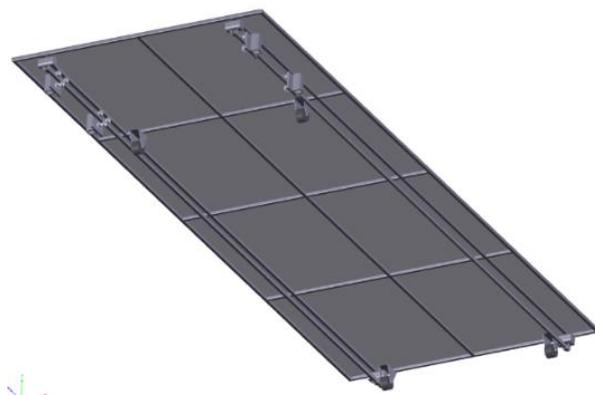
Figura 3.18 Hangar principal IMTx.

### 3.3.14.2 Plataforma de despegue y aterrizaje

La plataforma se diseñó para las operaciones de despegue y aterrizaje de los RPAS desde el hangar principal. Esto permite el desplazamiento fuera del hangar en forma segura, así como, la manipulación o movimiento directo de los RPAS (ver Figura 3.19 a y b).



**Figura 3.19 (a)** Plataforma para despegue y aterrizaje.



**Figura 3.19 (b)** Plataforma para despegue y aterrizaje.

### 3.3.14.3 Módulo meteorológico

En la instrumentación del hangar se instaló una estación meteorológica para la medición de las condiciones ambientales tales como: a) velocidad del viento; b) temperatura ambiente; y c) humedad, entre otras. Esta estación permite la transmisión de datos en forma inalámbrica con acceso desde una computadora, tableta electrónica o cualquier dispositivo móvil. El monitoreo permite tomar la decisión de autorización diaria de las operaciones con los RPAS, minimizando con ello los incidentes asociados a riesgos meteorológicos (ver Figura 3.20).



**Figura 3.20** Estación meteorológica.

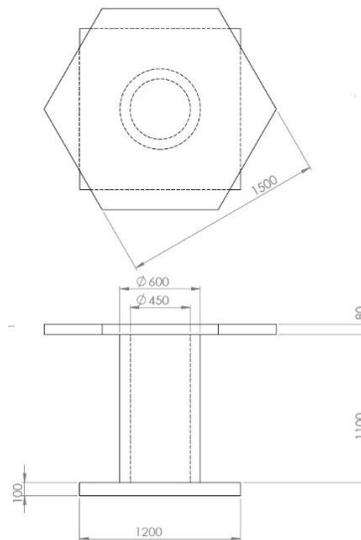
### 3.3.14.4 Puertos de entrega y recolección

Los puertos de entrega y recolección son específicamente plataformas para el despegue y el aterrizaje seguro de los RPAS, así como para realizar las entregas y recolección de paquetes, en puntos específicos (ver Figura 3.21).



**Figura 3.21** Puerto de entrega y recolección.

Su diseño es una base hexagonal montada sobre una columna de 110 cm de altura y un diámetro exterior de 60 cm. Incluye una canastilla metálica de seguridad, esto garantiza que las hélices del RPAS no entran en contacto directo con el usuario (ver Figura 3.22).



**Figura 3.22** Diseño del puerto de entrega y recolección.

### 3.3.14.5 Ubicaciones

Se instalaron cuatro puertos de entrega y recolección a lo largo del campus de investigación del IMT localizados en: 1) terraza del edificio de administración; 2) frente al laboratorio de Infraestructura; 3) un costado del laboratorio de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural; y 4) a un costado del Laboratorio de Ingeniería Portuaria (ver Figura 3.23).



**Figura 3.23** Localización de puertos de entrega y recolección (IMT).

Como parte del plan integral se planeó la instalación local en la sub-sede del Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística dentro del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) en Ciudad Obregón, Sonora. En donde se localizan dos puertos de entrega y recolección y un puerto principal para su operación (ver Figura 3.24).



Figura 3.24 Localización de puertos de entrega y recolección (ITSON).

## 3.3.15 Componentes de Software

### 3.3.15.1 Base de Datos

La base de datos es un componente fundamental para el desarrollo de las aplicaciones de software. En este sentido, la elección del motor de la base de datos y el modelo que se usó para el almacenamiento de los datos resultó fundamental, por este motivo, se seleccionó el motor Oracle Database 11g. Otro motivo es que es un motor potente y robusto, que permite realizar análisis de una gran cantidad de datos, fácilmente escalable y de gran eficiencia. En este apartado se presenta el diseño y se ofrece una breve descripción de las tablas que conforman la base del proyecto:

**PROFILE.** Esta tabla guarda la relación de los usuarios que se encuentran registrados en el sistema. Entre los datos que guarda se encuentran el nombre, correo, contraseña, fecha de nacimiento y fecha de registro.

**PERMISSION.** Define permisos, cada permiso tiene un nombre y una descripción. Un permiso se define como una acción restringida a ciertos usuarios, donde dicha acción va desde el inicio de sesión, hasta la solicitud de servicios.

**PROFILE\_ROLE.** Un rol se define como un conjunto de permisos a cierto nivel de acceso. Los roles van ligados a un perfil y permiten definir el comportamiento y el nivel de acceso al sistema de un cierto usuario.

**ROLE\_DETAIL.** Esta tabla establece la relación entre los roles y los permisos.

**SIGNUP\_INVITE.** Contiene las invitaciones que envía el administrador o un usuario (con este permiso) para agregar usuarios al sistema.

**APP\_SESSION.** Esta tabla permite definir y consultar las sesiones del sistema, también es posible definir el comportamiento de la sesión mediante la columna EXPIRE\_DATE, si se define este parámetro es posible fijar fechas de expiración de la sesión. También es posible consultar las sesiones activas del sistema y los dispositivos que se encuentren dentro (coloquialmente expresado como: “logueados”) al sistema.

**TRAVEL.** Cuando un usuario solicita un servicio lo que está ocurriendo en realidad es la generación de un registro en esta tabla, el cual se encontrará inicialmente en un cierto estado, y avanzará según se vayan despachando/procesando las rutas. Esta tabla guarda campos importantes como el origen y el destino, la fecha de solicitud, los niveles de carga de la batería del RPAS al inicio y fin del viaje, y el usuario que solicitó el servicio, entre otros.

**ROUTE.** Una ruta se define como un conjunto de trayectorias necesarias para llegar de un puerto a otro. Cada ruta está ligada a un viaje, sin embargo, un viaje puede tener una o más rutas.

**DRON.** Esta tabla guarda la relación de los drones con los que cuenta el sistema, es posible darlos de alta y capturar su modelo, número de serie, descripción, y estado, entre otros.

**DRON\_STATS.** El objetivo de esta tabla es guardar las estadísticas de los viajes, como la velocidad del dron, los niveles de carga de la batería, la señal, y sus coordenadas de localización, entre otros.

**DRON\_PORT.** Un puerto se define como un lugar seguro donde el dron puede realizar despegues y aterrizajes, existen dos tipos de puertos, el puerto principal difiere al puerto entrega-recolección (secundario), en que mientras que éste último solamente es ocupado para cargar o entregar documentos el puerto principal sirve como base primaria donde el RPAS puede recargar baterías, y espera que se le asignen nuevas tareas/servicios.

**TRAVEL\_REQ.** La tabla de requerimientos de viaje, guarda la información de las rutas conocidas y los requisitos que deberá cumplir el dron para que se le pueda asignar una ruta.



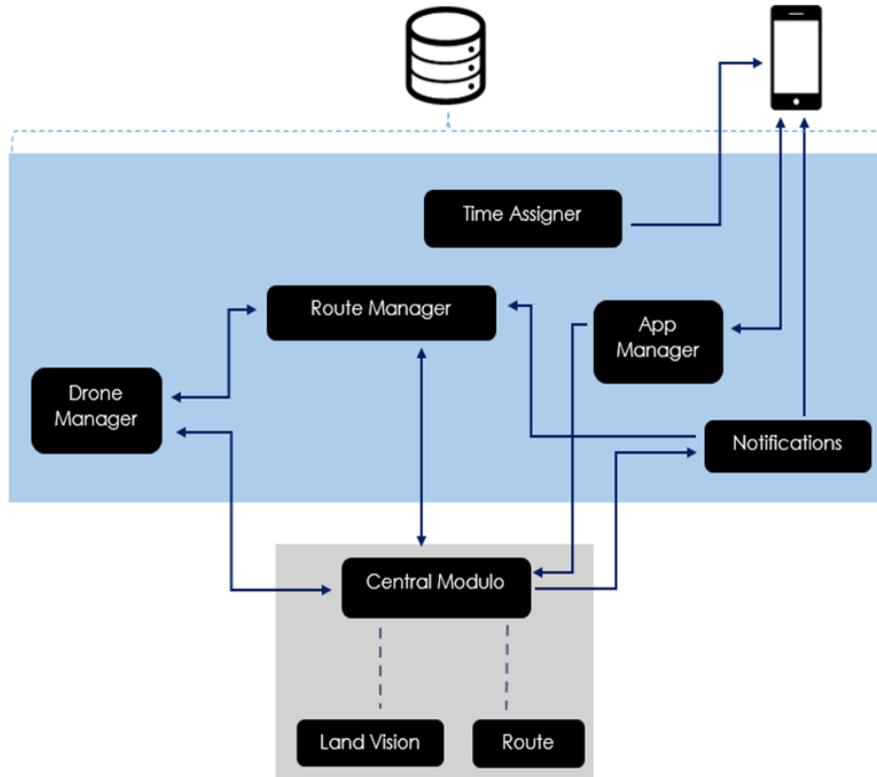


Figura 3.26 Sistema de Control y Operación.

### 3.3.16 Aplicación móvil

Para la codificación de la aplicación móvil se utilizó el entorno de desarrollo integrado Android Studio versión 3.1.2 en conjunto con JRE versión 1.8.0. La aplicación móvil se desarrolló para ser ejecutada en teléfonos inteligentes con Sistema Operativo Android. Se implementaron las siguientes funcionalidades:

- Autenticación de usuario;
- Solicitud de servicio;
- Selección de “Estación de Recolección”;
- Selección del usuario receptor;
- Avisos: Instrucciones para cargar o descargar documentos al contenedor del RPAS;
- Cierre de sesión del sistema.

Información Adicional:

- Tamaño del archivo: 2.8 MB;
- Requerimiento: Android 5.0 (Lollipop) y versiones posteriores;
- Versión actual: 1.0.

La aplicación se distribuye a los usuarios autorizados para su registro en la base de datos ya que, con esta, solicitan los servicios de transporte de mensajería ligera.

### 3.3.16.1 Instalación de la aplicación

Los usuarios autorizados se definen previa autorización por cada una de los diferentes Coordinaciones del IMT. Siguiendo los protocolos de la institución, son en principio los únicos autorizados para solicitar los servicios. Ellos reciben una invitación por parte del administrador del sistema a través de correo electrónico, esta invitación contiene un código de registro único, personalizado e intransferible; y un enlace para la descarga de la aplicación móvil (ver Figura 3.27 y 3.28).



Figura 3.27 Ejemplo invitación.



Figura 3.28 Ejemplo invitación para la descarga desde sitio autorizado.

### 3.3.16.2 Proceso de registro

Una vez instalada la aplicación y realizado el registro de usuario, se inicia sesión con el correo electrónico y la contraseña registrada (ver Figura 3.29).



**Figura 3.29** Pantalla de inicio de sesión.

Al ingresar se muestra un menú de opciones con acciones que se pueden realizar. Para solicitar un viaje se selecciona el botón “Solicitar un servicio” (ver Figura 3.30).



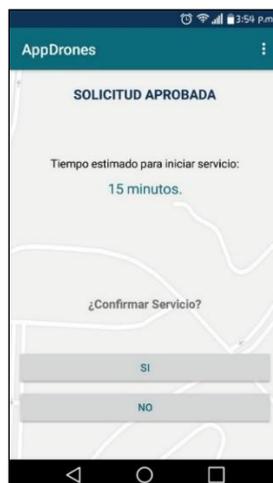
**Figura 3.30** Pantalla del menú opciones.

Para solicitar un servicio, se selecciona: origen, destino y destinatario (ver Figura 3.31).



**Figura 3.31** Pantalla solicitud de servicio.

El sistema envía un tiempo aproximado en el que va a iniciar el servicio, dando la opción de confirmar o cancelar el servicio (ver Figura 3.32).



**Figura 3.32** Pantalla confirmación de servicio.

### 3.3.17 Diagrama de clases

En el desarrollo de la aplicación móvil se crearon 14 clases, de las cuales, dos de ellas corren como servicios que se ejecutan todo el tiempo. A continuación, se muestra un diagrama de clases que describe la estructura del sistema, sus atributos, operaciones, y relaciones que existen entre ellas (ver Figura 3.33).

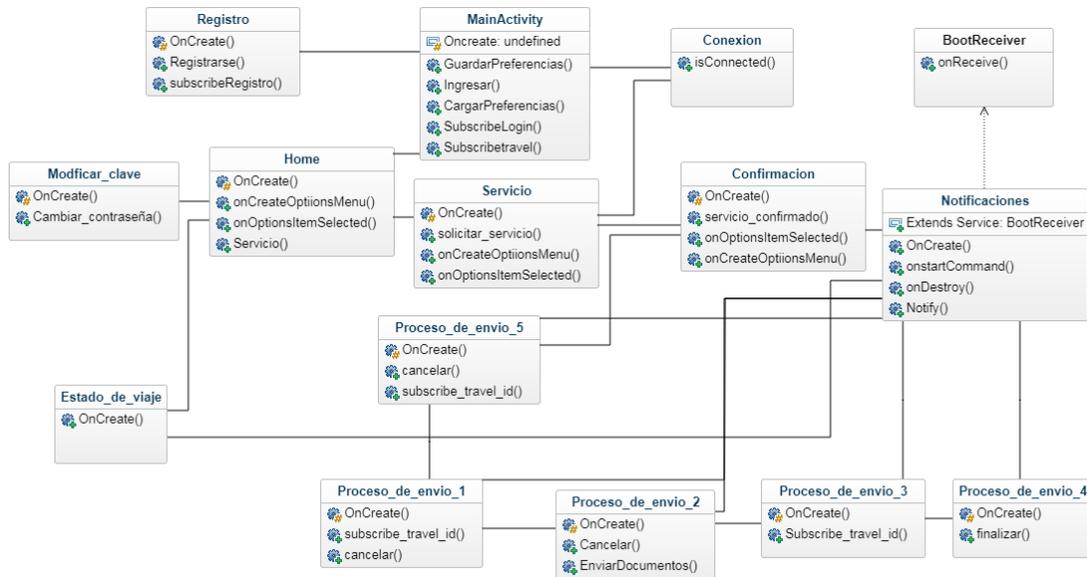


Figura 3.33 Diagrama de clases.

### 3.3.18 Módulo de rutas

El módulo de rutas es el encargado de enviar la ruta final generada hacia el RPAS, de acuerdo con los siguientes criterios:

- Disponibilidad de los RPAS;
- Distancia de la ruta requerida;
- Estado de la batería del RPAS;
- Estado general de funcionamiento del RPAS.

El código está desarrollado en lenguaje Python, “*routemanager.py*”. En la Tabla 1 se ilustra la comunicación dentro del módulo de rutas.

Tabla 1. Comunicación del módulo de rutas.

Módulo	Descripción
<b>Notificaciones</b>	Llegan las notificaciones y el módulo de rutas se encarga de actualizar el estado del viaje en la base de datos.
<b>Módulo central del RPAS</b>	El módulo de rutas envía al módulo central del RPAS la ruta del viaje.
<b>Módulo de estado del RPAS</b>	EL módulo de rutas avisa al módulo de estado del RPAS, cuando un RPAS no cumple con el nivel de batería necesario para realizar un viaje; de esta manera el módulo de estado pregunta constantemente al RPAS su nivel de batería para actualizarlo en la base de datos.
<b>Base de Datos</b>	Recibe consultas de viajes y actualizaciones de estado.

### 3.3.19 Módulo de notificaciones

Este módulo se encarga del enrutamiento, notificaciones, mensajes y alertas provenientes de los módulos del sistema hacia los usuarios.

Envía notificaciones “*Push*” (mensajes) de forma directa a los dispositivos móviles. Esto sucede cada vez que se presenta un evento importante con respecto al servicio solicitado, para informar el estado actual del RPAS. Así mismo envía comunicación al módulo de rutas para actualizar la base de datos y tener la posibilidad de un seguimiento en tiempo real respecto al servicio en marcha.

Además, tiene un enlace directo con el módulo de la aplicación móvil para que este publique la notificación en el dispositivo móvil. El código está desarrollado en lenguaje Python: “*notificaciones.py*”. Las notificaciones están ordenadas de acuerdo con un clasificador numérico con intervalo de 1 a 5, de acuerdo con su valor se envía el mensaje al emisor o al receptor. En la Tabla 2 se muestra dicha clasificación.

**Tabla 2.** Descripción de Notificaciones.

Notificación	Descripción	Actor
1	El RPAS llego al origen	Emisor
2	El RPAS va camino al destino	Receptor
3	Servicio finalizado	Emisor
4	Servicio finalizado	Receptor
5	Iniciando servicio	Emisor

### 3.3.20 Módulo de asignación de servicios

Este módulo trabaja bajo el nombre de “*Service Manager*” y es el encargado de administrar las peticiones de servicio que realizan los usuarios a través de las aplicaciones. Está desarrollado en Python y utiliza librerías de comunicación como son “*cx\_Oracle*” para la conexión con la base de datos y “*paho.mqtt.client*” para la conexión con las aplicaciones.

Este módulo realiza las siguientes funciones:

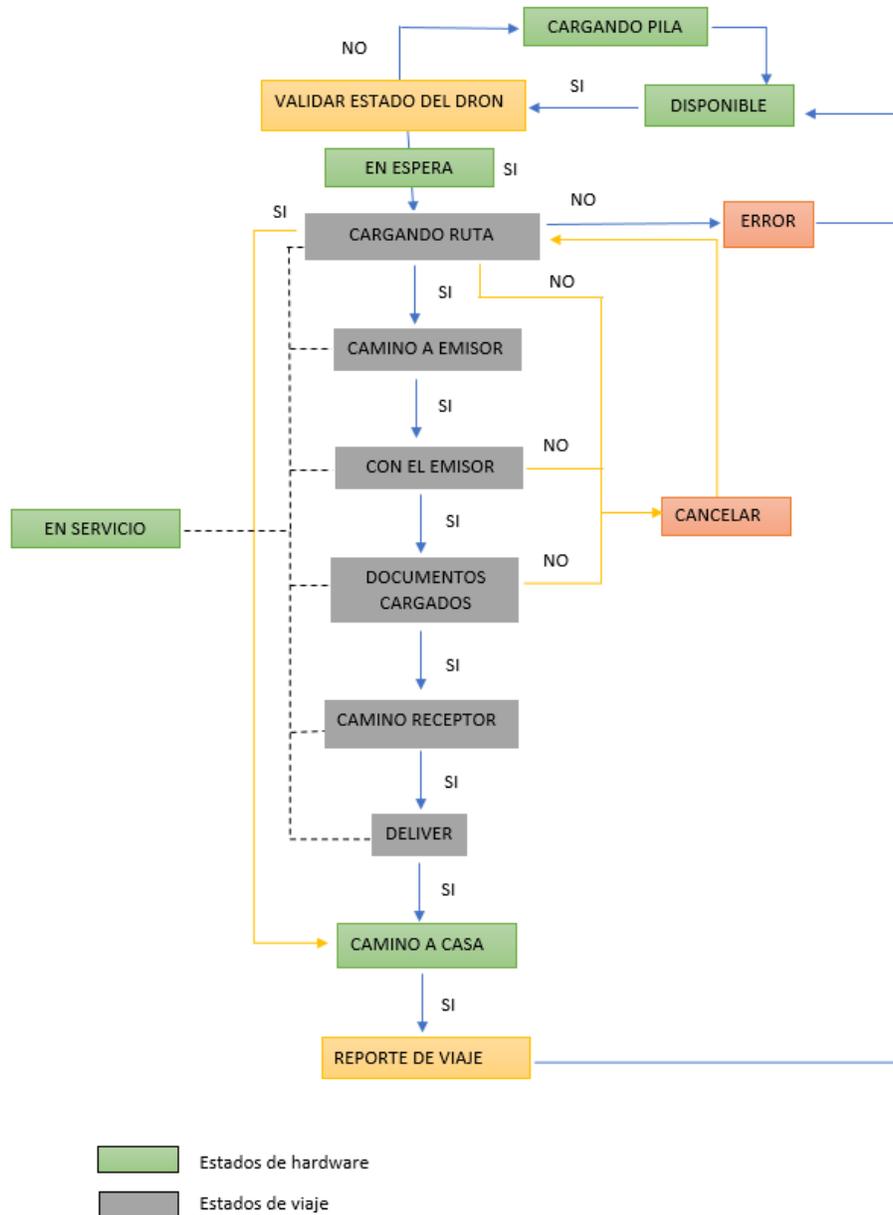
- **Estimación de tiempos:** Con base en la cantidad de servicios que estén pendientes en el servidor, estima sus tiempos de inicio de servicio solicitado;
- **Alta de servicios:** Una vez que el usuario remitente acepta la estimación de tiempo de su viaje, para iniciar el proceso se da de alta el servicio;
- **Asignación de Id de Viajes:** Cuando el servicio es dado de alta, se asigna un “*Id de viaje*”, con el que se podrá hacer el seguimiento y monitoreo del servicio;

El código está desarrollado en lenguaje Python: “*ServiceManager.py*”.

### 3.3.21 Módulo de estado del RPAS

Este módulo se activa cada vez que el módulo de rutas reporta que un RPAS o varios, no cumplen con el nivel de batería necesaria para realizar un determinado viaje. Tiene una comunicación directa con el módulo central del RPAS y cada determinado periodo de tiempo, lanza una solicitud para conocer el nivel de carga de energía de la batería, actualizando esta información en la base de datos. Cuando se cumple con el nivel adecuado de batería, califica al drone con un estado de “*Disponible*” en la base de datos, por lo que el módulo de rutas puede disponer de ese drone para realizar un viaje.

El código está desarrollado en lenguaje Python: “*dronemanager.py*”. En la Figura 3.34 se muestran las relaciones de los estados que puede tener el viaje y el RPAS:



**Figura 3.34** Diagrama de clases.

### 3.3.22 Módulo central del RPAS

El módulo central del RPAS, es el responsable de orquestar a los módulos de software que se comunican con el controlador de vuelo, las cámaras, los componentes mecánicos del RPAS y la comunicación con el servidor. Su función principal es la de escuchar las peticiones del servidor que realizan los usuarios o el administrador y con base en esto ejecuta las funciones siguientes:

- Realizar un servicio
- Informar su estado
- Regresar a su punto de origen por emergencia

El módulo central trabaja en un entorno de sistema operativo Linux con librerías especiales, *Intel RealSense* e *Intel PyRealSenses*. Combinándose con otras librerías de *ArduPilot* para ejecutar los vuelos autónomos o la administración de las cámaras.

El módulo central, entre otras cosas, tiene programada una serie de criterios de seguridad para prever posibles mal funcionamientos en el servicio, como son:

- Comprobación de la carga de batería, antes de realizar un servicio;
- Cancelación de viajes solicitados por el administrador o por el usuario solicitador del servicio;
- Aterrizaje fino, apoyándose en sus cámaras, para optimizar el punto de llegada y evitar llegar a cualquier lugar no autorizado.

### 3.3.23 Módulo de rutas del RPAS

El módulo de rutas se encarga de procesar la ruta que se recibe del servidor el RPAS, cuando un viaje es asignado. La ruta está formada por una serie de campos, los cuales le indican al controlador de vuelo la instrucción que tiene que realizar al ejecutar los comandos. Existen ciertas consideraciones de distancia y altura que indican al módulo central cuando una ruta es alcanzada, y así pueda ejecutar la siguiente ruta que tiene en memoria. El módulo de ruta procesa la ruta recibida y ejecuta en secuencia de comando por comando hasta terminar la ruta, las funciones básicas se dividen en:

- **Medición de Altitud:** Lo realiza a través de funciones del *Dronkit*, para poder medir las alturas en la que se encuentra el RPAS, apoyándose con el Satélite.

- **Cálculo de Velocidad:** Lo realiza a través de su sensor acelerómetro, el cual puede calcular la velocidad a la que está volando.
- **Ejecución de Comando:** Ejecuta comando utilizando la función “*Vehicle*” para poder realizar el proceso de ruta.

### 3.3.24 Módulo de visión

El módulo de visión en los RPAS hace principalmente, el reconocimiento del puerto principal y de los puertos de entrega-recolección para realizar su aterrizaje fino. Este módulo, se apoya en el uso de la cámara *RealSense R200* que está instalada y configurada en uno de los puertos de la computadora de vuelo, al mismo tiempo que usa el protocolo de envío de tramas *Mavlink* para la comunicación con el controlador de vuelo. El módulo de visión se orquesta con el módulo central del RPAS y el módulo de rutas.

Se usan las siguientes tecnologías:

- **Opencv:** Se usó la librería *Opencv* para el análisis de imágenes del puerto Principal y Secundario, haciendo el *tracking* de dicha imagen;
- **Python:** El módulo se programó con la versión de *Python 2.7*;
- **Mavlink:** Se utilizó para la comunicación con el controlador de vuelo;
- **Dronkit:** Se hizo uso de la librería de *Dronkit* en *Python 2.7* para el manejo de comandos que se desencadenaran al llegar al *Waypoint de Landing*.

### 3.3.25 Protocolo de comunicación MQTT

El protocolo de comunicación utilizado para enlazar todos los módulos que trabajan para el funcionamiento del dron es el “*Telemetría de Transporte de Mensajería por Colas*” (*Message Queue Telemetry Transport, MQTT*), utilizado para el internet de las cosas (IoT). El siguiente diagrama muestra la manera en que se comunican cada uno de los módulos principales del sistema de control y operaciones. (ver Figura 3.35)

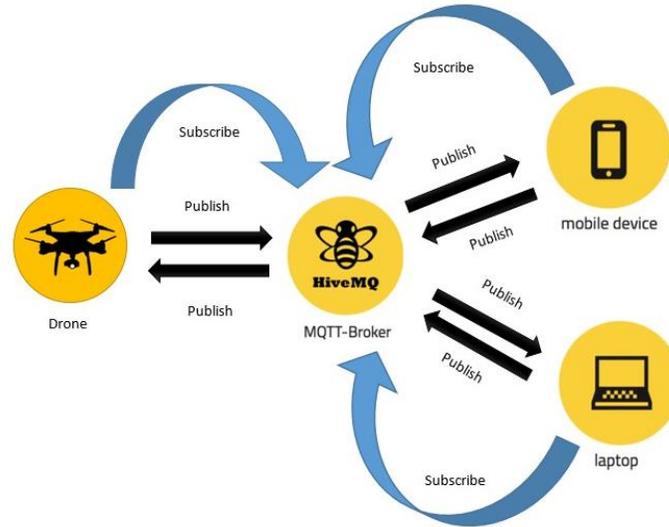


Figura 3.35 Diagrama de comunicación MQTT.

### 3.3.26 QGroundControl

*QGroundControl* proporciona control total de vuelo y planificación de misiones para cualquier RPAS habilitado con *Mavlink*. Provee configuración para vehículos propulsados con *ArduPilot* y *PX4 Pro*. Su objetivo principal es facilitar el uso para principiantes y profesionales. El código es abierto, por lo que se puede evolucionar como se desee. Esta herramienta se utiliza a la par de *Mission Planner* en la configuración y calibración del controlador de vuelo y del control remoto, así como en su utilización para un entorno de simulación.

Cada prueba es simulada en computadora antes de su ejecución en un ambiente real, para ello se utiliza el simulador *Mission Planner*, bajo las siguientes actividades:

- Marcar objetivos y hacer referencia hacia un punto, usando *Google Maps* / *Bing* / Abrir mapas de calles / *WMS* personalizado;
- Seleccionar los comandos de misión de los menús desplegables;
- Descarga de archivos de misión;
- Configure APM para su fuselaje;
- Interfaz con un simulador de vuelo de PC para crear un simulador de UAV completo de hardware en el circuito;
- Ver la salida del terminal serie de APM.

Posteriormente se ejecuta una secuencia de comandos:

Comando que sitúa al RPAS en su punto de origen o su *HOME*, contiene su posición en latitud y longitud.

```
dronekit-sitl copter
--home=20.5924468,-100.3948756,0,0
```

Se hace la conexión de *mavproxy*, la cual es la conexión al controlador de vuelo virtual del *Mission Planner*, se hace referencia a la IP que está conectado.

```
mavproxy.py
--master=tcp:127.0.0.1:5760
--out udp:127.0.0.1:14551
--out udp:192.168.86.228:14550
```

Una vez que se han corrido los comandos anteriores se puede ver en el *Mission Planner* un RPAS en la posición de latitud y longitud que se elige (ver Figura 3.36).



Figura 3.36 Interfaz de software mission planner.



## Conclusiones

---

Uno de los objetivos planteados inicialmente para el presente proyecto, consistió en lograr que el RPAS IMTx alcanzara un vuelo estable y sostenido, esto se logró gracias a la selección, adquisición y configuración de los componentes electrónicos y hardware probados en condiciones extremas de operación. Entre los componentes analizados se encontraron las computadoras de “a bordo”, el controlador de vuelo, los sensores para aterrizaje, etc. Así mismo, la calibración adecuada de los componentes y sensores instalados permitió lograr la manipulación mediante el sistema autónomo de vuelo sostenido y en posición estable sin oscilaciones ni perturbaciones visibles.

Un requisito de diseño importante planteado en las especificaciones iniciales, fue el considerar que el RPAS debería tener una capacidad de carga útil, de al menos 1.5 kg, sin considerar su propio peso instrumentado. Esto se logró montando y configurando seis rotores y seis hélices en una estructura de fibra de carbono, obteniendo una fuerza de empuje vertical de 2 Kg por cada brazo.

Se puede afirmar que se logró avanzar hacia una etapa avanzada en el diseño de la solución. Sin embargo, también es cierto que hay mucho trabajo por desarrollar, sobre todo en cuestión de mejoras y nuevas prestaciones de los RPAS. Se ha obtenido una solución que cumple los objetivos e inclusive se desarrollaron módulos que no estaban planeados al principio, los cuales mejoran con mucho el funcionamiento. Es el caso, por ejemplo, del sistema de aterrizaje preciso usando sensores infrarrojos, el sistema LIDAR para el cálculo de distancia, el sistema meteorológico para medir las condiciones ambientales, contribuyeron a mejorar el sistema sustancialmente.

Se ha adquirido conocimiento avanzado sobre los temas alrededor del desarrollo de RPAS, lo cual permite al equipo de trabajo estar en posibilidad de proveer de conocimiento y experiencias a las agencias públicas y empresas privadas que requieran el desarrollo de RPAS. Tres de las contribuciones del presente trabajo son:

1. El diseño e implementación de una plataforma tecnológica de RPAS con base en un sistema autónomo y funcional, su instrumentación, documentación e infraestructura para su operación;
2. El desarrollo de un conjunto de RPAS para operaciones especializadas en la entrega de mensajería ligera, el cual puede ser personalizado para otro tipo de tareas, como la supervisión y vigilancia de autopistas.

3. El desarrollo de una base de conocimientos y experiencias en la línea de investigación del desarrollo de vehículos aéreos no tripulados y sistemas autónomos con aplicación a la logística.

Algunas aplicaciones a futuro identificadas con el uso de RPAS incluyen, el servicio de monitoreo de autopistas de cuota, información sobre el estado del tráfico en tiempo real, asistencia en emergencias y tareas críticas. Además, el sistema de drones también se adapta muy bien a tareas de colecta automatizada de información en zonas afectadas por desastres naturales, para diseñar rutas de asistencia en caso de desastre, así como, aplicaciones en temas de la logística humanitaria y agro logística.

## Bibliografía

---

Cedillo-Campos, M. (2017). *Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística, Etapa Consolidación*. Documento interno. Instituto Mexicano del Transporte, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México.

European RPAS Steering Group [ERSG] (2013). Roadmap for integration of civil RPAS into de European Aviation System. Final Report Publicación en línea. Recuperado de: <https://uvs-international.org/european-rpas-roadmap-2013/>

European Commission (2012). Towards a European Strategy for the development of civil applications of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), document SWD (2012) 259 final. Publicación en línea. Recuperado de: <http://register.consilium.europa.eu/pdf/en/12/st13/st13438.en12.pdf>

Government Accountability Office [GAO] (2012). Unmanned Aircraft Systems: Measuring Progress and Addressing Potential Privacy Concerns Would Facilitate Integration into the National Airspace System. Report to Congressional Requestors, GAO-12-981. Publicación en línea. Recuperado de: <http://www.gao.gov/assets/650/648348.pdf>

Halldórsson, À y Arlbjörn, J.S. (2005). *Research Methodologies in Supply Chain Management- What Do We Know?* Research Methodologies in Supply Chain Management. Editorial Physica-Verlang. Pag.107-122.

Kovács, G. y Spens, K. (2005). Adductive reasoning in logistics research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 35 (2), 132-144

López Inclán, R. (2017). Drones, nueva era en materia logística. Revista T21. Publicación en línea. Recuperado de: <http://t21.com.mx/opinion/ruta-dinero/2017/08/14/drones-nueva-era-materia-logistica>

McNeal, G. (2012). A Primer on Domestic Drones: Legal, Policy, and Privacy Implications. Forbes, April. Publicación en línea. Recuperado de: <http://www.forbes.com/sites/gregorymcneal/2012/04/10/a-primer-on-domestic-drones-and-privacy-implications>

PWC (2017). Clarity from above: transport infrastructure. Publicación en línea. Recuperado de: <https://www.pwc.pl/pl/pdf/clarity-from-above-transport-infrastructure-pwc-report.pdf>

Quinn, J. (2013). Police drones sparks debate over personal privacy. The Toronto Star. Publicación en línea. Recuperado de: [https://www.thestar.com/news/world/2013/02/05/privacy\\_vs\\_security\\_when\\_does\\_the\\_use\\_of\\_drones\\_cross\\_the\\_line.html](https://www.thestar.com/news/world/2013/02/05/privacy_vs_security_when_does_the_use_of_drones_cross_the_line.html)

Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT] (2017). Aviación mexicana en cifras 1991-2016. Subsecretaria de Transporte, Dirección General de Aeronáutica Civil. Publicación en línea. Recuperado de: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo5/amc-2016-i.pdf>





# COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



**Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”**  
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,  
Querétaro, México. C.P. 76703  
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610  
Fax: +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>