

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

INTEGRACION DE UN SISTEMA UAV CON CONTROL
AUTÓNOMO EN UN EQUIPO AÉREO PARA AGRICULTURA DE
PRECISIÓN

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Danna Zuleyka Rabanal Carretero

ASESORES: Donato Andrés Flores Espinoza

Gonzalo Cucho Padín

Lima, Febrero del 2011

RESUMEN

En la presente tesis se realizó la integración de un sistema UAV con control autónomo en un equipo aéreo existente para agricultura de precisión, la cual forma parte del proyecto que viene realizando la Pontificia Universidad Católica del Perú y el Centro Internacional de la Papa “Agricultura de Precisión para la Producción de Cultivos de Seguridad Alimentaria y de Agro Exportación”.

En primer lugar se presenta la aplicación del aeromodelismo en la agricultura de precisión, cuya función es la toma georeferenciada de imágenes para su posterior procesamiento. El proyecto antes indicado emplea control por radiofrecuencia que presenta algunos inconvenientes. Por lo que se hace necesaria la implementación de un sistema UAV con control autónomo.

En el segundo capítulo, se presentan los conceptos generales así como la teoría aplicable a los vehículos aéreos no tripulados UAV con control autónomo como herramienta tecnológica orientada a la agricultura de precisión. En este contexto se realizó un estudio de los diferentes sistemas comerciales para la selección del más adecuado para el proyecto, concluyendo que el sistema ArduPilot Mega cumple con los objetivos trazados en ésta tesis.

En el tercer capítulo, se abordan los temas de planteamiento y estudio de la implementación del sistema ArduPilot Mega, especificando y definiendo los requerimientos del sistema, sus características, así como la implementación del mismo incluyendo el montaje del hardware, la adecuación del software al sistema y la programación de los planes de vuelo.

Finalmente, se desarrollan las pruebas y resultados del sistema integrado, obteniéndose que el sistema UAV con control autónomo: ArduPilot Mega cumple con las necesidades del proyecto, consecuentemente se constituye en una alternativa para el control de los aeromodelos aplicados en la agricultura de precisión, resolviendo los inconvenientes del control por radiofrecuencia.

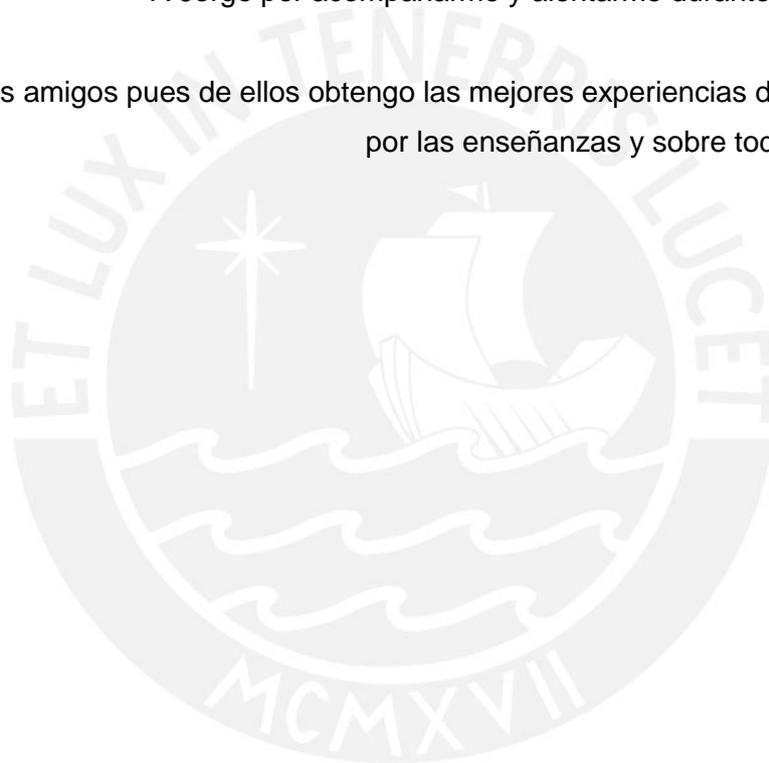
Esta tesis está dedicada a las tres personas más importantes en mi vida, mis dos padres y mi hermana; porque son el mejor ejemplo a seguir. Gracias por su apoyo, amor incondicional, sus alientos. Siempre serán mi inspiración.

Mis mayores agradecimientos al Ing. Andrés Flores, Ing. Gonzalo Cucho y Aurelio Rodríguez por su conocimiento, apoyo y paciencia en todo momento.

A mi familia por su apoyo constante, por enseñarme que se puede lograr todo sí es que en verdad se desea.

A Jorge por acompañarme y alentarme durante todos estos años

A mis amigos pues de ellos obtengo las mejores experiencias de mi vida, gracias por las enseñanzas y sobre todo por su amistad.



INDICE

INTRODUCCION	1
CAPITULO 1: AEROMODELISMO EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN	2
1.1. Entorno general	2
1.2. La agricultura de Precisión	3
1.3. Problemática	4
1.3.1. Características de los equipos aéreos radio controlados	4
1.3.2. Consideraciones para la adquisición de un sistema UAV	5
1.3.2.1. La necesidad de que el sistema UAV adquirido sea compatible con el equipo existente	5
1.3.2.2. Analizar las características en conjunto con el precio	6
1.3.2.3. Equipos importados	6
1.4. Declaración del marco problemático	6
CAPITULO 2: VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULABLES CON CONTROL AUTÓNOMO PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	7
2.1. Generalidades	7
2.2. Vehículos Aéreos no tripulados con control autónomo	7
2.2.1. Sensores en los UAV	9
2.2.1.1. Giroscopio	9
2.2.1.2. Acelerómetro	10
2.2.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	11
2.2.3. Estación de Control en Tierra (GCS)	12
2.2.4. Servomotores	13
2.3. Vehículos Aéreos no tripulados con control autónomo comerciales	13
2.3.1. Proyecto Paparazzi	14
2.3.1.1. Sensores Infrarrojos	15
2.3.2. ArduPilot Mega	16
2.3.3. UAV Navigator	16
2.3.4. Micropilot	16
2.3.5. Gentlenav	17
2.3.6. Kestrel Autopilot	18

2.3.7.	UNAV	18
2.4.	Síntesis sobre el asunto de estudio	21

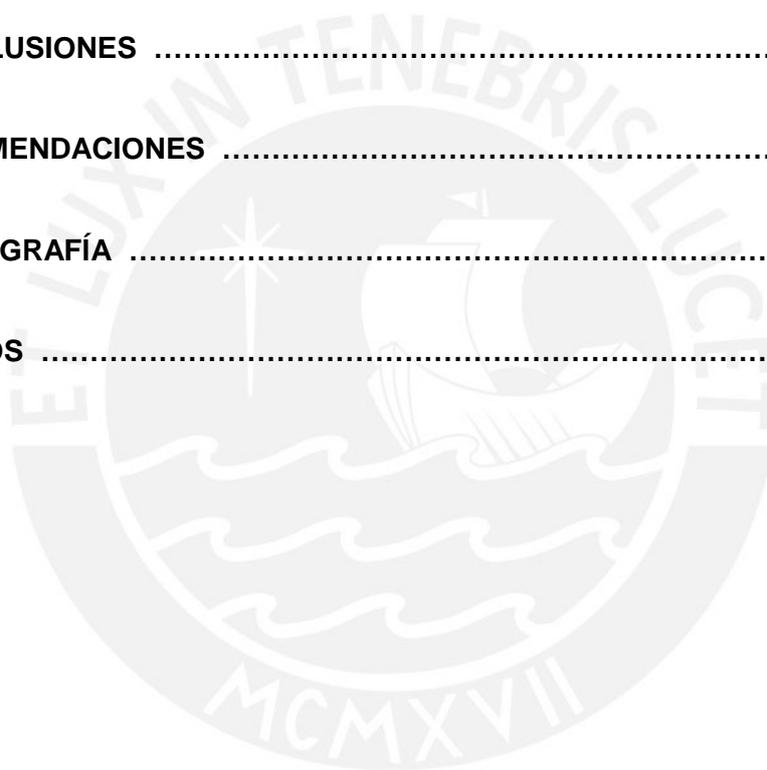
CAPITULO 3: PLANTEAMIENTO Y ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA UAV: ARDUPILOT MEGA 22

3.1.	Hipótesis de la investigación.	22
3.2.	Objetivos de la investigación.	22
3.2.1.	Objetivo general.	22
3.2.2.	Objetivos específicos.	22
3.3.	Requerimientos del Sistema	23
3.4.	Descripción del Sistema a implementar	23
3.4.1.	Descripción del Aeromodelo	23
3.4.2.	Integración del Sistema ArduPilot Mega	25
3.4.2.1.	Hardware	25
3.4.2.1.1.	APM Tarjeta Principal	26
3.4.2.1.2.	APM IMU	27
3.4.2.1.3.	GPS	28
3.4.2.1.4.	Xbee	28
3.4.2.1.5.	Ardustation	28
3.4.2.2.	Montaje del Hardware	30
3.4.2.3.	Software	33
3.4.2.3.1.	Arduino IDE	33
3.4.2.3.2.	Ardupilot Mega Planner	34
3.4.2.3.3.	Ground Control Station	35
3.4.3.	Instalación del código en ArduPilot Mega	37
3.4.4.	Configuración del sistema	38

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS 40

4.1.	Antecedentes	40
4.2.	Pruebas en sitio	41
4.2.1.	Pruebas del RC	41
4.2.2.	Pruebas del GPS	43
4.2.2.1.	Recepción de datos en el CLI	43
4.2.2.2.	Comprobación del correcto funcionamiento del GPS	44

4.2.3.	Pruebas del IMU: Alabeo (Roll), Cabeceo (Pitch), Ladeo (Yaw).....	45
4.2.4.	Pruebas de los giroscopios y acelerómetro	47
4.2.5.	Prueba del sensor de presión del aire.	50
4.2.6.	Pruebas de los waypoints	51
4.2.7.	Pruebas de telemetría (XBee)	51
4.3.	Pruebas de los modos de vuelo	53
4.3.1.	Modo Manual	53
4.3.2.	Modo Automático	54
4.3.3.	Modo Estabilización	56
4.3.4.	Resultados de la recepción de datos del GCS del aeromodelo ...	57
CONCLUSIONES		58
RECOMENDACIONES		59
BIBLIOGRAFÍA		60
ANEXOS		64



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Fases de Agricultura de Precisión. (Fuente: [4])	3
Figura 1.2: Trayectoria del aeromodelo con el sistema actual (RC). (Fuente: GPSVisualizer)	5
Figura 2.1. Modelo Teórico de un Sistema UAV.	8
Figura 2.2. Giroscopio electrónico (Fuente: [11])	9
Figura 2.3. Esquema de acelerómetro capacitivo. (Fuente: [13])	10
Figura 2.4. Funcionamiento del acelerómetro piezoeléctrico (Fuente: [13])	11
Figura 2.5. Calculo de posición tridimensional (Fuente [15])	12
Figura 2.6. PWM y comportamiento de los servos. (Fuente: [17])	13
Figura 2.7. Paparazzi System overview (Fuente: [18])	14
Figura 2.8. Paparazzi IR Sensors IR & IRH (Fuente: [18])	15
Figura 2.9. Principio de Estabilización del IR (Fuente: [18])	15
Figura 3.1. Aeromodelo Squire modificado del proyecto tipo Horizontal Tail	24
Figura 3.2. Ángulos de rotación de un objeto en tres dimensiones. (Fuente: [27])..	24
Figura 3.3. Configuración de controles del aeromodelo. (Fuente:[8])	25
Figure 1.4. Tarjeta Principal del ArduPilot Mega. (Fuente: [19])	26
Figura 3.5. ArduPilot Mega IMU. (Fuente: [19])	27
Figura 3.6. ArduStation. (Fuente: [19])	29
Figura 3.7. Diagrama de Conexiones (Fuente: [19])	31
Figura 3.8. Orientación del ArduPilot Mega en el aeromodelo	32
Figura 3.9. Sistema ArduPilot Mega integrado en aeromodelo.	33
Figura 3.10. Entorno del ArduPilotMega Planner (Fuente: ArdupilotMegaPlanner)	34
Figura 3.11. Preprogramación del Plan de Vuelo para Uyuyuy	35
Figura 3.12. Información del puerto serial GCS (Fuente: HappyKillmore GCS)	36
Figura 3.13. Entorno gráfico HappyKillmore GCS (Fuente: [19])	36
Figura 3.14. Modificaciones en APM_Config	37
Figura 3.15. Aplicación del procedimiento “Setup” opción “reset” y “radio”	39
Figura 3.16. Aplicación del procedimiento “Setup” opción “modes”	39
Figura 4.1. Comparación de la tasa de accidentes (Fuente: [16])	40
Figura 4.2. Relación de pruebas del ArduPilot Mega	41
Figura 4.3. Conexión para prueba de radio. (Fuente: [19])	42
Figura 4.4. Datos obtenidos de la prueba “radio”	43
Figura 4.5. Datos obtenidos de la prueba “GPS”	44
Figura 4.6. Comprobación en Google Earth de datos obtenidos del “GPS”	45

Figura 4.7. Valores obtenidos de Alabeo (Roll), Cabeceo (Pitch) y Ladeo (Yaw) de la prueba “imu” con la tajeta APM hacia la derecha.	46
Figura 4.8. Valores obtenidos de Alabeo (Roll), Cabeceo (Pitch) y Ladeo (Yaw) de la prueba “imu” con la tajeta APM hacia la izquierda.	46
Figura 4.9. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tajeta APM inclinada hacia adelante.	47
Figura 4.10. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tajeta APM inclinada hacia atrás	48
Figura 4.11. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tajeta APM inclinada hacia izquierda	48
Figura 4.12. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tajeta APM inclinada hacia derecha	49
Figura 4.13. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tajeta APM en movimiento	49
Figura 4.14. Valores obtenidos de la prueba “airpressure” con la tajeta APM abajo.....	50
Figura 4.15. Valores obtenidos de la prueba “airpressure” con la tajeta APM arriba.....	50
Figura 4.16. Valores obtenidos de la prueba “waypoints”	51
Figura 4.17. Verificación del ID y Velocidad de Transmisión del Módulo XBee	52
Figura 4.18. Recepción de datos del módulo XBee	53
Figura 4.19. Despegue manual del UAV usando sistema Ardupilot Mega	54
Figura 4.20. Vuelo manual del sistema UAV usando ArduPilot Mega	54
Figura 4.21. Preprogramación del plan de vuelo para la simulación	55
Figura 4.22. Configuración del Simulador X-Plane	55
Figura 4.23. Entorno de simulación X-Plane	56

INTRODUCCIÓN

La ingeniería electrónica en la búsqueda de resolver problemas prácticos, utiliza el conocimiento científico y herramientas tecnológicas; que permiten a la humanidad ir más allá de sus límites, desarrollando inventos y aplicaciones en campos diversos. El tema que ocupa la tesis es la aplicación de tecnología electrónica en aeromodelos o UAV (Unmanned Aerial Vehicle) para agricultura de precisión.

La agricultura de precisión para la mejora de la productividad de los cultivos está empleando herramientas tecnológicas para la toma de imágenes georeferencias por medio de aeromodelos. En este contexto, el Centro Internacional de la Papa (CIP) y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) están trabajando en el proyecto “Agricultura de Precisión para la Producción de Cultivos de Seguridad Alimentaria y de Agro Exportación”, que tiene como herramienta de control un sistema de radio frecuencia (RC).

Al respecto, se ha encontrado que este sistema presenta dificultades en la toma de imágenes georeferenciadas haciéndolo ineficiente. Esta tesis se propone estudiar e implementar un sistema UAV (Ardupilot Mega) de control autónomo como objetivo general y el estudio de los sistemas UAV comerciales para decidir la adquisición del más adecuado; así como, de los componentes necesarios, integración en el equipo aéreo del proyecto y programar los planes de vuelo del aeromodelo, como objetivos específicos.

CAPÍTULO 1

AEROMODELISMO EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

1.1. Entorno general

Las aeronaves fueron creadas como una búsqueda del hombre por ir más allá de sus límites, no conformándose con el transporte terrestre y marítimo se emprendió en buscar métodos para poder volar. La creación del primer modelo práctico para volar se debe al trabajo de George Cayley, eminente científico e ingeniero quién en una serie de artículos presentados para el Nicholson's Journal entre 1809 y 1810 expuso los principios para la construcción de una máquina de vuelo moderna [1].

Pero fue en Diciembre del 1903 que se realizó el primer vuelo de una máquina de motor construida por los hermanos Wright, la cual despegó sin contratiempos, se mantuvo estable mientras voló y aterrizó sin problemas [1]. Así, cada vez más personas trataban de conquistar los aires entre los cuales se encuentran Clément Ader, los hermanos Voisin y Henri Farman, Jorge Chávez, etc. iniciándose una carrera vertiginosa en el desarrollo de las aeronaves.

Por otro lado se encuentran los aficionados, que mediante modelos a escala han desarrollado pequeñas naves de vuelo dando origen a lo que hoy en día conocemos como Aeromodelismo.

Según la Real Academia de la Lengua Española, Aeromodelismo es el deporte consistente en la construcción y prueba de pequeños modelos de aviones [2]. Esto significa que mediante el uso de diversos materiales como pueden ser la madera, la fibra de vidrio y mediante piezas mecánicas y eléctricas, se han desarrollado diversos tipos de equipos aéreos como; los aviones, helicópteros, cuadracópteros y otros.

La Robótica Aérea, un campo en actual crecimiento, permite muchas aplicaciones prácticas, como es el caso de inspecciones locales de servicios públicos, despliegue de herramientas en zonas inaccesibles, el monitoreo global que incluye la búsqueda y rescate, control de tráfico, entre otras [3]. A todo ello se agrega el Sensado Remoto de extensas áreas agrícolas con alto grado de precisión.

1.2. La Agricultura de Precisión

La Agricultura de Precisión tiene como finalidad, el empleo de tecnología para el mejoramiento de la productividad y calidad de los cultivos. Tecnologías que implican el uso de sensores, sistemas de posicionamiento global conocido como GPS, imágenes aéreas y otros más. Se entiende por productividad y calidad de los cultivos al uso eficiente de los recursos así como también de los medios utilizados para este fin y que llevan a una mejora en la agricultura, el cuidado del medio ambiente con eficiencia en la utilización de los recursos económicos.

Los agentes involucrados en el desarrollo y la adopción de las prácticas de Agricultura de Precisión suelen dividir este conjunto de tecnologías en tres fases [4]:

- 1) Recolección de datos.
- 2) Procesamiento e interpretación de la información.
- 3) Aplicación.

La Figura 1.1 muestra el desarrollo de esta tecnología en sus tres fases, aplicada en el Sensado Remoto de cultivos utilizando un tractor; se puede notar en la fase de recolección de datos que el tractor, durante su trayecto, obtiene información mediante un GPS, la envía a un computador para su respectivo análisis y el mismo proporciona la información en mapas de rendimiento/producción que será procesada en las siguientes dos fases. Esta forma de obtención de información está limitada por el recorrido del tractor ya que este no tiene acceso a toda el área de cultivos lo que lo hace lento e ineficiente.

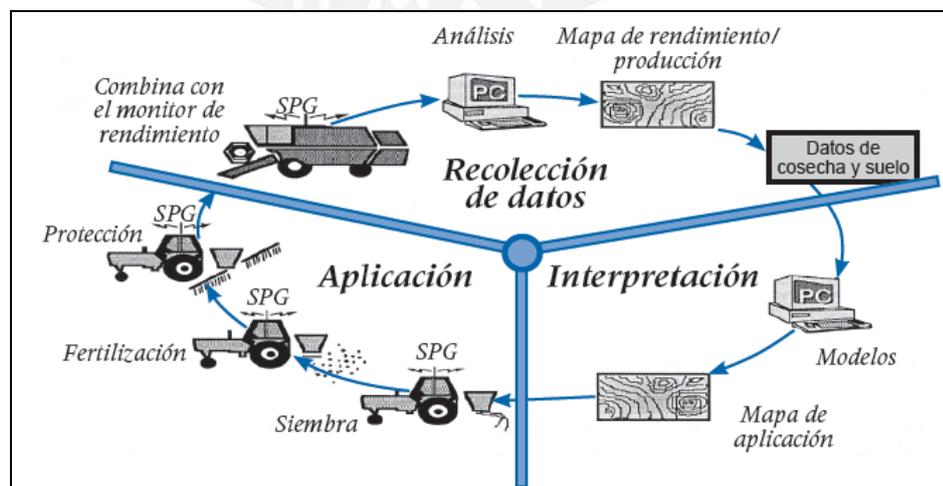


Figura 3.1: Fases de Agricultura de Precisión. (Fuente: [4])

Las fotografías obtenidas de aviones han sido la primera forma de Sensado Remoto y continúan siendo utilizadas hoy en día [5], solo que con este método resulta muy oneroso; por lo que en la actualidad con el auxilio de los aeromodelos y del avance de la electrónica en la miniaturización de sus sistemas y circuitos se puede mejorar y optimizar la fase de recolección de datos a un costo relativamente económico, obteniéndose igualmente fotografías de la totalidad de los campos de cultivo.

Es así como el Centro Internacional de la Papa (CIP) en conjunto con la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) vienen desarrollando tecnologías que integran los equipos aéreos con la electrónica para la toma de imágenes georeferenciadas utilizando aeromodelos de operación remota con mandos a distancia.

Con el uso de aeromodelos radio-controlados de planeadores, helicópteros y aviones además de globos aéreo-estáticos, se está ejecutando en el Perú el proyecto “Agricultura de Precisión para la Producción de Cultivos de Seguridad Alimentaria y de Agro Exportación”, mediante el cual se puede obtener información a partir de interpretar las imágenes tomadas a baja altura sobre las parcelas de cultivo. Dicho proyecto es financiado por el Programa de Ciencia y Tecnología (FINCyT), de la Presidencia del Consejo de Ministros (PCM) y tiene el cofinanciamiento del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y del Tesoro Público [6].

1.3. Problemática

1.3.1. Características de los equipos aéreos radio controlados

Los equipos aéreos radio controlados han llegado a un grado de especialización tal que se han construido múltiples modelos capaces de realizar acrobacias aéreas antes inimaginables. Cada vez existen más adeptos al aeromodelismo por la simplicidad y facilidad de uso.

Los equipos existentes en el proyecto “Agricultura de Precisión para la Producción de Cultivos de Seguridad Alimentaria y de Agro Exportación”; cuentan con sistemas de Sensado Remoto mediante el uso de radio control con auxilio de la capacidad de visualización del operador, que lo hace limitado no permitiendo cubrir extensiones

amplias de cultivos y en consecuencia no se cumple el propósito de la agricultura de precisión.

Uno de los problemas principales del sistema actual radica en que se tienen que desechar una gran cantidad de imágenes registradas, debido a la imprecisión ocasionada por el recorrido del avión, que en muchas maniobras de vuelo se sale de la posición correcta de la línea de cultivo, excediéndose en muchos casos de la extensión del área de cultivo. En la Figura 1.2 se aprecia la trayectoria del avión en color rojo donde además de lo anteriormente mencionado se observa que la trayectoria no es del todo recta, ni precisa y los intentos por posicionarse superan a aquellos donde la trayectoria es la adecuada. Además, al obtener resultados como este, por la falta de estabilidad del aeromodelo, las imágenes deben ser ortorectificadas.



Figura 1.2: Trayectoria del aeromodelo con el sistema actual (RC). (Fuente: GPSVisualizer)

1.3.2. Consideraciones para la adquisición de un sistema UAV

1.3.2.1. La necesidad de que el sistema UAV adquirido sea compatible con el equipo existente.

Se cuenta con aeronaves radio controladas, las cuales son provistas por el CIP(Centro Internacional de la Papa). Es necesario reutilizar el equipo electrónico existente en las aeronaves por lo que cualquier compra que se haga debe tener en consideración la compatibilidad con este material.

1.3.2.2. Analizar las características en conjunto con el precio.

Es importante considerar las características a detalle del equipo que se piensa importar. Diferentes fabricantes dan a sus productos las mismas características en hardware, sin embargo, es el software quién define la elección: mejores alternativas de edición del programa, simulación, compilación e inclusive interfaz gráfica determinan el compromiso producto-precio. Ejemplo de ello es la versión Papparazzi, que se verá más adelante, esta permite procesar la información recibida y controlar la aeronave en todo momento (antes y durante la navegación).

1.3.2.3. Equipos importados

Nuestro país carece de desarrollo tecnológico necesario para elaborar un sistema con equipo totalmente nacional; es por esto que importar un sistema con lo últimos avances en tecnología e implementarlo, adaptándolo a las necesidades de las aeronaves del proyecto es una alternativa.

1.4. Declaración del Marco Problemático

El sistema actual empleado por el proyecto “Agricultura de Precisión para la Producción de Cultivos de Seguridad Alimentaria y de Agro Exportación”, funciona a radiocontrol. Al ser el mismo operador humano el que maniobra el aeromodelo y en simultáneo envía la señal para la toma de imágenes, el producto es un resultado poco eficiente, pues las imágenes son registradas con errores de rotación e inclinación. Por consiguiente, muchas imágenes son descartadas.

Adicionalmente, al operar en zonas muy extensas de cultivo la visión del operador limita grandemente el radio control de los equipos; en consecuencia los sistemas Unmanned Aerial Vehicles (UAV) con control autónomo se constituyen en la alternativa más efectiva y eficiente para aplicaciones en agricultura de precisión.

CAPÍTULO 2

VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULABLES CON CONTROL AUTÓNOMO PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

2.1. Generalidades

El presente estudio muestra los avances tecnológicos de los diferentes fabricantes en el diseño de equipos aéreos sin mando a distancia, aplicados a tareas de sensado remoto de los cultivos. En ese sentido, en primer lugar se presentarán los vehículos aéreos no tripulados o más conocidos por sus siglas en inglés UAV (Unmanned Aerial Vehicle) y luego algunos modelos comerciales de UAV con control autónomo, describiendo sus características principales para hacer comparaciones entre ellos.

En nuestro país, la agroindustria está en un constante desarrollo y crecimiento, y para su sostenimiento, la agricultura de precisión se constituye como una herramienta fundamental, ya que ésta aportaría en gran medida una mejor productividad y calidad de los cultivos. Actualmente, la inversión en este Sector está en ascenso e intervienen capitales públicos y privados, promoviendo el desarrollo de nuevas tecnologías o la adaptación de éstas a las condiciones reales del país. [6]

A fin de obtener resultados más eficientes en el control de los equipos aéreos para agricultura de precisión, se evaluarán los sistemas UAV con control autónomo para integrarlos en los equipos ya existentes a fin de automatizar el sistema, buscando obtener un mejor control del avión, calidad y eficiencia de las imágenes tomadas además de poder definir previamente los planes de vuelo.

2.2 Vehículos Aéreos no tripulados con control autónomo

Los vehículos aéreos no tripulados, según OSD UAV tienen sus orígenes durante la Primera Guerra Mundial (1917), esta tecnología es ampliamente utilizada por los militares estadounidenses quienes han contribuido al desarrollo de los UAV [7]. Si bien es cierto su principal uso es militar, existen también aplicaciones civiles como menciona Kimon P. Valavanis en su libro “Advances in Unmanned Aerial Vehicles. State of the Art and the Road to Autonomy”: No sólo incluye el patrullaje aéreo,

búsqueda de petróleo y gas, sino que también se encuentran aplicaciones como la topografía, predicciones meteorológicas, ubicación de incendios, agricultura (Japón), etc. [8]

Los vehículos aéreos no tripulados, en adelante llamados UAV, también suelen ser conocidos como “drones”, que vendría a ser una máquina de volar sin piloto. Donde sus funciones de control se pueden clasificar de la siguiente manera:

- 1) On-board mediante Radio Control y Off-board mediante Control Remoto [8]
- 2) Controlados desde una ubicación remota (GCS) o controlados mediante planes de vuelo pre-programados.

La Figura 2.1, muestra la forma básica de los sistemas UAV.

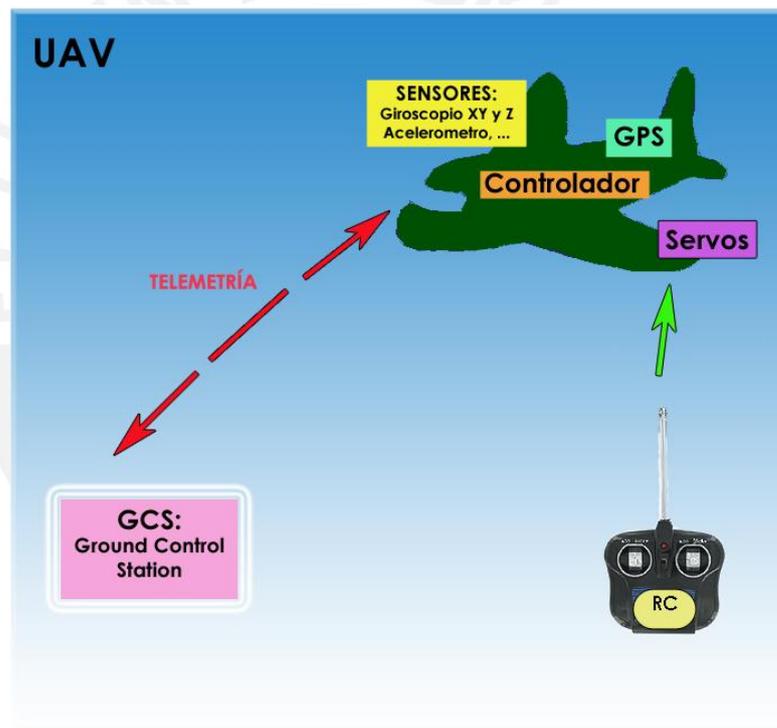


Figura 2.1. Modelo Teórico de un Sistema UAV.

En forma general, el modelo está constituido por la estación de control en tierra, el controlador, los sensores, el GPS, los servos, el control remoto (RC) y muchos elementos más. A continuación se describen los elementos principales de los sistemas UAV.

2.2.1. Sensores en los UAV

Los sensores del sistema UAV son aquellos que garantizan la estabilidad del aeromodelo, encontrándose entre los más resaltantes al giroscopio y al acelerómetro, su contribución más importante se da en los sistemas autónomos.

2.2.1.1. Giroscopio

Aparato mecánico ideado por Jean B. L. Foucault en 1852, basado en dos características fundamentales: inercia giroscópica y precisión. La inercia giroscópica es la tendencia de un cuerpo que gira a conservar su plano de rotación, o sea, que si al giroscopio se le cambia la posición o se le desplaza, el plano de rotación, mantiene inalterable su dirección original [9].

El funcionamiento de un giroscopio puede ser tanto mecánico, como electrónico u óptico. Para el caso de los UAV; estos cuentan con mayor agilidad de vuelo a través de giroscopios electrónicos, como el mostrado en la Figura 2.2, aquellos que consisten en sensores de velocidad angular empleando el método de Coriolis. El efecto de la aceleración de Coriolis se basa en dos masas oscilando radialmente en los extremos de fibras formando un diapasón. Al producirse alguna modificación en su orientación, las fuerzas de Coriolis generan pares proporcionales a las velocidades angulares de giro. Es así que para los giroscopios electrónicos basados en sensores de velocidad angular se realizan micro mecanizados del silicio configurando un anillo que se hace vibrar a una frecuencia de resonancia, donde el movimiento de rotación produce fuerzas de Coriolis dependientes de la velocidad de giro. La medida de la velocidad se obtiene determinando la diferencia de las vibraciones a diferentes ángulos [10].

Una de las ventajas de estos tipos de giroscopios es su pequeño tamaño, comercialmente existen algunos entre 2 y 3 milímetros los cuales tienen capacidad para medir hasta 100 grados por segundo.

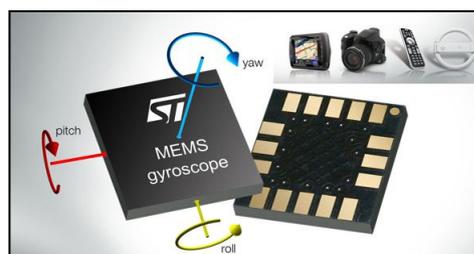


Figura 2.2. Giroscopio electrónico (Fuente: [11])

2.2.1.2. Acelerómetro

La estabilidad de un UAV es sumamente importante, no solamente por seguridad sino también por la precisión del vuelo. Es así como se emplean los acelerómetros en la robótica aérea, los cuales realizan mediciones en dos modos, ya sea en modo dinámico o modo estático. El primer modo de medición permite determinar el movimiento y las vibraciones a las cuales se encuentran sometidos los aeromodelos y el segundo permite medir la inclinación con respecto a la gravedad [12].

Existen dos tipos de acelerómetros construidos con tecnología MEMS: los capacitivos y los piezoeléctricos. El esquema de un acelerómetro capacitivo se observa en la Figura 2.3., el cual está integrado dentro de una estructura de silicio del orden de dimensión de los nanómetros. Al actuar una aceleración sobre la masa M se produce un movimiento de la misma en sentido opuesto lo que produce una variación sobre la capacidad eléctrica n . Con ese valor eléctrico se puede medir la fuerza que se ejerció sobre la masa. Existe en el esquema un amortiguador K que se encarga de atenuar la fuerza externa [13].

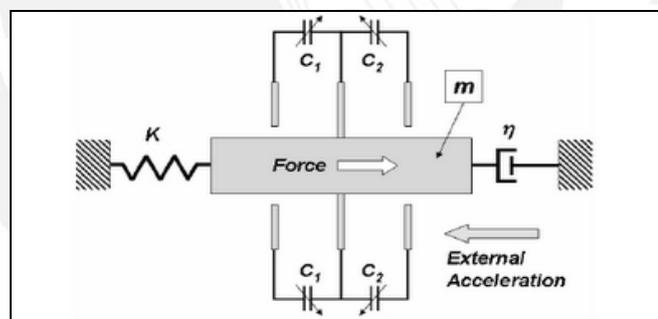


Figura 2.3. Esquema de acelerómetro capacitivo. (Fuente: [13])

Los acelerómetros piezoeléctricos son los más utilizados en los UAV para la medición de vibraciones y comercialmente existen algunos que se destacan por su pequeño tamaño y poco peso. Están formados por un elemento de cerámica piezoeléctrica polarizado artificialmente que al sufrir algún tipo de tensión mecánica (tracción, compresión o cortadura) entre sus caras aparece una tensión proporcional a la fuerza aplicada. Una masa se encuentra sobre el elemento piezoeléctrico, de manera que cuando el conjunto vibra, se aplica una fuerza sobre este elemento variando su resistencia eléctrica. Fuerza que es proporcional a la aceleración de la vibración según la ley de Newton $F=m \cdot a$ [14].

En la Figura 2.4 se observa el principio de funcionamiento descrito de un acelerómetro piezoeléctrico

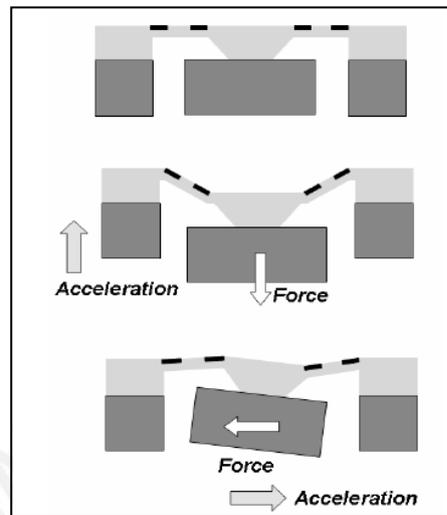


Figura 2.4. Funcionamiento del acelerómetro piezoeléctrico (Fuente: [13])

2.2.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de satélites usado en navegación que permite determinar la posición de un objeto las 24 horas del día, en cualquier lugar del planeta y bajo cualquier condición climatológica. Este sistema utiliza el método de esferas interseccionadas para determinar una posición tridimensional: latitud, longitud y altitud.

La Figura 2.5 muestra como las señales de sólo 3 satélites son suficientes para que un receptor calcule su posición tridimensional. Un cuarto satélite sería necesario para sincronizar el tiempo entre los relojes atómicos altamente preciso de los satélites y la pieza menos precisa del receptor. [15]

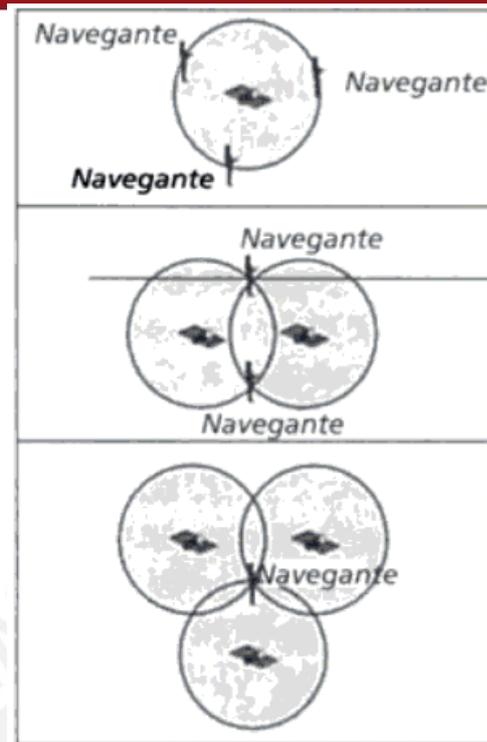


Figura 2.5. Cálculo de posición tridimensional (Fuente [15])

Un sistema GPS en un UAV se utiliza para poder conocer en todo momento la posición del aeromodelo, además, de tratarse de un UAV con control autónomo, ésta sería una manera de delimitar y de verificar la correcta trayectoria de la aeronave que seguiría planes de vuelo programados antes o durante el vuelo.

2.2.3. Estación de Control en Tierra (GCS)

Todo sistema UAV con control autónomo debe contar con un elemento fundamental de comunicación, éste elemento es la estación de control en tierra o también conocida como GCS por sus siglas en inglés Ground Control System.

El sistema de funcionamiento sigue fundamentalmente 3 etapas:

- 1) Recibe toda la información que es transmitida mediante telemetría desde el controlador en la aeronave y la muestra mediante una interfaz de usuario en la GCS
- 2) Transmite información de las posiciones de control del vuelo.
- 3) Monitorea constantemente el estado de la comunicación. [16]

2.2.4. Servomotores

Todo aeromodelo cuenta con dispositivos llamados servomotores o servos que son los responsables del movimiento mecánico del avión. Contienen en su interior pequeños motores con un reductor de velocidad y multiplicador de fuerza. Los servos poseen tres señales de entrada: Fuente de alimentación positiva (VCC), fuente de alimentación negativa (GND) y la señal de control (PWM).

La Figura 2.6 muestra su funcionamiento, donde para controlar un servo se debe aplicar un pulso de duración y frecuencia específicos que hará que el circuito de control diferencial interno ponga el servo en la posición indicada por la anchura del pulso. El control de la posición se realiza mediante un potenciómetro conectado mecánicamente al eje de salida, el que controla un PWM interno para así compararlo con la entrada PWM externa mediante un sistema diferencial, la posición del eje de salida se modifica hasta que ambos valores de PWM sean iguales y así el servo se encontrará en la posición adecuada [17].

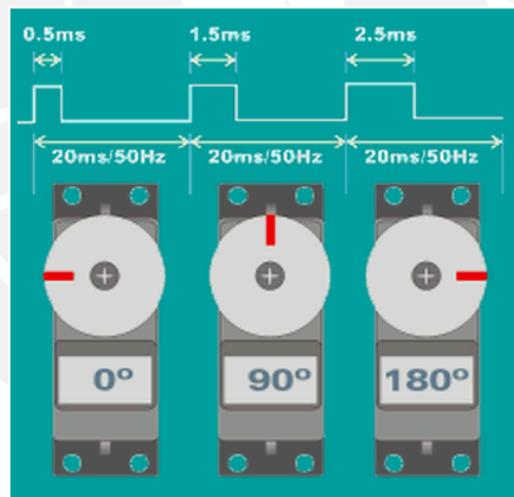


Figura 2.6. PWM y comportamiento de los servos. (Fuente: [17])

2.3. Vehículos Aéreos no tripulados con control autónomo comerciales

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) vienen siendo desarrollados tanto por empresas como por proyectos en el mundo. En este estado de la investigación se presentan algunos de los avances tecnológicos del Proyecto Paparazzi, Ardupilot, UAV Navigator, Micropilot, Gentlenav, Kestrel Autopilot y UNAV

2.3.1. Proyecto Paparazzi

El Proyecto Paparazzi es un sistema completo de hardware y software para aviones autónomos, así como la misión completa de vuelo y el monitoreo mediante software utilizando un enlace de datos bidireccional para la telemetría y control. [18]

Un esquema general del Proyecto Paparazzi se encuentra mostrado en la Figura 2.7, el cual cuenta con una Estación de Control en Tierra, enlace seguro con el avión y la comunicación bidireccional de datos con el mismo.

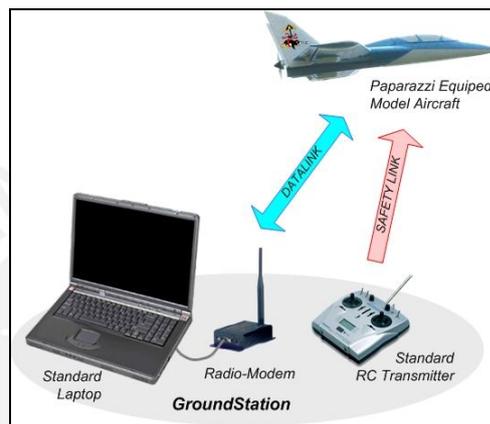


Figura 4.7. Paparazzi System Overview (Fuente: [18])

Según Paparazzi, los controladores han sido diseñados para ejecutar software de piloto automático utilizando microcontroladores ATMEL AVR o PHILIPS ARM7 LPC. Además incluye controladores de motores, sensores, receptores de RC, radio módem, entre otros.

La Estación Central de Control (GCS) está conformada por una laptop con sistema operativo Linux, donde según Paparazzi solo se debe instalar el software, el cual se encuentra gratuitamente en su página web. Además también menciona que: La GCS es altamente configurable y se le pueden agregar módulos que faciliten la programación del equipo aéreo. También cuenta con la opción de utilizar FAIL-SAFE, o enlace seguro mediante control remoto por pérdida de la señal y posible caída del equipo aéreo en vuelo

El hardware de este proyecto se puede conectar a cualquier sensor, pero es recomendable el conjunto ortogonal de 6 sensores infrarrojos que estiman la orientación de la aeronave en relación a la temperatura de su entorno, tanto el calor de la tierra como al frío del cielo.

2.3.1.1 Sensores Infrarrojos

Según la teoría de Paparazzi, la diferencia de temperatura entre los dos sensores debe ser igual a cero, considerando a 90° como máxima variación.

i) Consideraciones:

- Número mínimo de pares de sensores : 2
- Sistemas con sensores x-y requieren de calibración y no proveen un resultado preciso del ángulo.

En la Figura 2.8 se muestran los sensores infrarrojos recomendados y vendidos por el fabricante, por otro lado en la Figura 2.9 se aprecia el principio de estabilización de estos, que los hace inmunes a las vibraciones y desorientación en el despegue ocasionados por ráfagas de viento que puede confundir a los pilotos automáticos.



Figura 2.8. Paparazzi IR Sensors IR & IRH (Fuente: [18])

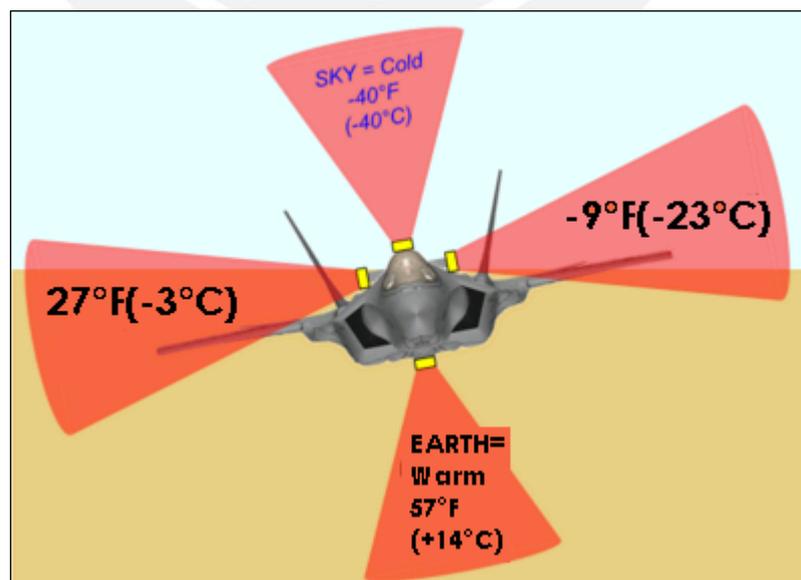


Figura 2.9. Principio de Estabilización del IR (Fuente: [18])

2.3.2. ArduPilot Mega

ArduPilot Mega es un piloto automático con código abierto, compatible con Arduino y capaz de proporcionar control total del UAV. Puede manejar waypoints en 3 dimensiones y permite la modificación de los comandos que posee su software además de contar con una estación de control estacionaria o GCS.

Hardware Necesario:

- Ardupilot Mega
- Ardupilot Mega IMU
- Conectores.
- Dos cabeceras 3x8 ángulo recto
- GPS MediaTek uBlox
- Dos modulos Xbee y dos adaptadores para telemetría inalámbrica
- Cable FTDI o Cable USB mini USB [19]

2.3.3. UAV Navigator

UAV Navigation tiene en su gama de productos de vehículos aéreos no tripulados como lo es el AP04R es capaz de despegar completamente en modo automático, seguir un plan de vuelo, y el aterrizar. Se puede configurar la aeronave para cada fase del vuelo, la adaptación de las aletas, o de bloqueo del timón [20].

2.3.4. Micropilot

Según el fabricante Micropilot, la serie MP2028 tiene algunas funciones básicas de los UAVs. Tienen la capacidad de mantener la velocidad aerodinámica, mantener la altitud y coordinación, navegación GPS, despegue y aterrizaje vertical (VTOL: Vertical Takeoff and Landing), además de un funcionamiento autónomo desde su lanzamiento hasta su recuperación [21].

Dentro de la serie MP2028, se mostrará dos de los dispositivos más utilizados, el primero en helicópteros y el segundo en aviones:

Según Micropilot, el MP2128HELI ofrece el tamaño más reducido y el menor peso de la serie MP2028 además de tener 50 veces la potencia de procesamiento y capacidad de despegue y aterrizaje vertical. Tiene las siguientes características:

Peso = 28 gramos

Incluye receptor GPS

Longitud = 10 cm

Ancho = 4 centímetros [22]

Además Micropilot informa que este equipo está basado en tecnología de piloto automático probada y que su modelo MP2128HELI puede volar tanto de ala fija como en UAV VTOL. Está equipado con un sensor de altura por ultrasonidos que apoya el despegue y el aterrizaje autónomo. Cuenta con un Procesador RISC de 150 mips. Una característica importante es que es compatible con la serie MP2028 de los pilotos automáticos. Tiene totalmente integrado los giroscopios de 3 ejes / acelerómetros, GPS, altímetro de presión y los sensores de la velocidad del aire, todos en una sola tarjeta de circuito.

Para Micropilot también existe otro modelo de la serie que es el MP2128g que contiene las mismas características del MP2128HELI con la diferencia de poseer el doble de memoria y el triple de canales de entrada / salida [23].

2.3.5. Gentlenav

Gentlenav es una marca dedicada al desarrollo de tarjetas de sistemas UAVs. Algunas de sus características más resaltantes son las siguientes:

- Compatible con los más nuevos y mejores GPS, según MatrixPilot ahora también con uBlox 5H GPS que proporciona datos muy precisos en 4Hz.
- Telemetría: Si agrega un radio XBee, o algo similar, se puede monitorear el estado de su avión desde la estación de control en tierra (GCS)
- UDB: Este formato permite visualizar los planes de vuelo en Google Earth.
- ArduStation: Es compatible con la estación de tierra ArduPilot, y el hardware de GCS de ArduStation.
- OSD_Remzibi: Permite ver video en directo de la aeronave si es que se tiene el sistema incluido. [24]

2.3.6. Kestrel Autopilot

Prestigiosas organizaciones militares y de investigación utilizan el piloto automático Kestrel como el componente principal de sus proyectos con UAV. Siendo uno de los más livianos y pequeños con 16,7 gramos y 2"x1.37"x0.47", posee según Processur Technologies, fabricante del sistema, las siguientes características:

- 12 entradas y salidas digitales (6 bidireccionales, 3 de entrada y 3 de salida).
- 3 entradas analógicas.
- Bajo consumo de energía 0.77 Watts.
- Modos de vuelo: Autónomo: Home, Loiter, Rally y Navegación por waypoints o puntos de referencia.
- Soporta despegue y aterrizaje autónomo.
- Enlace seguro en caso de pérdida de comunicación configurable.
- Determina pérdida de conexión del GPS.
- GCS con gráficas PID en tiempo real.
- Capacidad de estimación del viento para compensación durante el vuelo.
- Su Inertial Measurement Unit (IMU) contiene giroscopios de 3 ejes, acelerómetros, sensores diferenciales y absolutos de presión, además de sensores de temperatura. [25]

2.3.7. UNAV

UNAV provee sistemas electrónicos para UAV desde el 1995 y actualmente ofrece dos series de pilotos automáticos UNAV35xx y PICOPILOT, a continuación se muestran las características del modelo 3500FW:

- PCB: 4.0 "x 2.0" x 0.75 ", 35g
- Alimentación: 5.0V-7.0V @ 100mA
- Actitud lazo de control: 50 Hz
- AHRS: 5DOF IMU @ 1kHz, 360 grados de todos los ejes, con compensación de temperatura
- GPS: 32CH @ 5Hz
- 7 canales de entrada RC (compatible con receptores RC de 3v y 5v)
7 servos RC: 4 para el control de vuelo, 3 de carga útil
- Sensores a bordo: 8

- 5 Entradas A / D
- Durante el vuelo se pueden efectuar cambios en los puntos de referencia (waypoints) y en las ganancias de AP.
- Incluye módulos XBee-Pro (1 milla), USB @ GCS
- GCS: WINDOWS - cabina virtual, visualización del mapa, imágenes en tiempo real, configuración y acceso a datos de los sensores.
- Puntos de referencia (waypoints): 64 puntos de referencia programables (LON, LAT, ALT y SPD)
- Cuenta con enlace seguro por detección de pérdida de la comunicación.

[26]

Al ser UAVNavigator, Micropilot, Kestrel Autopilot y UNAV3500FW sistemas empleados principalmente en aplicaciones militares; sus costos son altos (entre 2000 y 5000 Dólares Americanos). Es por eso que a continuación, en la Tabla 2.1 se muestra un cuadro resumen de las tres alternativas restantes:



Tabla 2.1. Resumen de UAV comerciales

	PAPARAZZI	Ardupilot	Gentlenav
WAYPOINTS	3D aproximadamente 1000	3D Limitado solo por memoria aprox. 700	3D aproximadamente 1000
FAIL - SAFE (RC)	Si	Si	Si
MICROPROCESADOR	Atmel AVR o Philips ARM7 LPC	ATMEGA 1280 16MHZ	dsPIC30F4011 CPU
TAMAÑO	40.2 x 30.5mm (1.6" x 1.2")	30mm x 47mm	1.5 x 2.75 x 1.0"
FUENTE DE PODER	Batería externa	Batería externa o a través del receptor RC	Batería externa
PESO TOTAL	Menor a 80 gramos	menor a 80 gramos	34 gramos
USO	Aviones, quadrottero	Autos, Botes, Aviones	Avión estándar, Delta Wing, Avión con cola V y Helicóptero
INCLUYE	TWOG Autopilot con modulo LEA-5H GPS Kit XBee Pro RF PPZUAV FTDI Utility board (w/cable) XBee Pro RF module with RPSMA connector (GCS) XBee Pro RF module with wire antenna (aircraft) Cables Adaptador USB Kit de Sensores IR	- ArdupilotMega - ArdupilotMega IMU - conector GPS de 6 pines para el 4Hz uBlox5 1Hz o modulo GPS EM406 - GPS - Módulo de telemetría Xbee - ArduStation - XPlane	- UAV v2 Development Platform: dsPIC30F4011 CPU MMA7260 3 axis accelerometer 3 LISY300AL gyros - PICKit2 Debug Express - Polarized Header for Breadboard and ICSP - 50 Channel GS407 Helical GPS Receiver - ArduStation ground/laptop - MPLAB Compatible ICD2 with USB
SISTEMAS DE COMUNICACIONES	XBEE	XBEE	XBee radios: The 2.4GHz y 900MHz
COSTO (USD)	756.23	426.05	467.25
SENSORES	IR y si se desea también giroscopios	ARDUIMU: contiene giroscopio, acelerómetro y sensor de presión	MMA7260 acelerometro en 3 ejes 3 giroscopios LISY300AL
	PAPARAZZI	Ardupilot	Gentlenav
CONFIGURABILIDAD EN SOFTWARE	Si	Si	Si
FIRMWARE	Software en página web	Software en página web	Código en internet, solo se compra el quemador
HERRAMIENTAS DE DESARROLLO	Descarga del LiveCD de página Web	Descargar del código	Descargar del código
ENTRADAS Y SALIDAS	8 Entradas analógicas 8 Salidas PWM	16 entradas analógicas 40 entradas y salidas digitales para agregar sensores	5 entradas 6 salidas de los servos
SOFTWARE	Código libre en página web	Código libre en página web	Código libre en página web
SISTEMA OPERATIVO	Debian GNU/Linux. Con el LiveCD se puede utilizar en cualquier SO	WINDOWS	WINDOWS
EJEMPLOS DE APLICACIÓN	-2009 UAV Outback Challenge en Kingaroy Airport, EMAV09 -El Instituto de sistemas espaciales de la Universidad de Stuttgart	Gano un premio el 2009 de Sparkfun Autonomous vehicle Competition	Primer puesto en "2010 Taiwan Robot Aircraft Design and Photography Competition".

2.4. Síntesis sobre el asunto de estudio

Los vehículos aéreos no tripulados han sido estudiados y aplicados en el mundo hace más de 25 años, en el Perú su aplicación es escasa. Para contribuir a su desarrollo en el país, el presente estudio contempla su aplicación en agricultura de precisión utilizando aeromodelos existentes, para lo cual el desempeño de estos aparatos y su uso, que para el caso del proyecto es de importancia vital.

No todos los equipos poseen un sistema de recuperación o de enlace seguro, de perderse la comunicación del microcontrolador con el centro de mando. Esto podría originar daños materiales no sólo del hardware, que incluye la cámara que va dentro del vehículo para el sensado remoto de los cultivos, sino también del aeromodelo. Se observa que Ardupilot Mega y Paparazzi tienen incluido en su sistema un mecanismo de enlace seguro que sí se pierde la conectividad, esta se puede retornar con mando a distancia (RC).

El sistema Ardupilot Mega posee un adecuado sistema de seguridad, permite la modificación de su software libre, la integración con otros componentes y posee sensores integrados dentro de su tarjeta de circuito impreso y no por separado y además es el más económico en comparación con el del Proyecto Paparazzi.

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTOS Y ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA UAV: ARDUPILOT MEGA

3.1. Hipótesis de la investigación.

Debido a que en la agroindustria el monitoreo de cultivos del proyecto “Agricultura de Precisión para la Producción de Cultivos de Seguridad Alimentaria y de Agro Exportación” se viene realizando mediante el uso de Radio Control, se ha encontrado que este sistema presenta dificultades en la correcta toma de imágenes georeferenciadas haciéndolo ineficiente, entonces siendo este elemento fundamental para un eficiente monitoreo, se propone la implementación de un sistema UAV (Ardupilot Mega) de control autónomo.

3.2. Objetivos de la investigación

3.2.1. Objetivo general

El objetivo general de la presente tesis es la implementación de un sistema UAV con control autónomo, a bajo costo, en base a un equipo aéreo ya existente para mejorar su eficiencia en adquisición de información para agricultura de precisión.

3.2.2. Objetivos específicos

Entre los objetivos específicos se encuentran los siguientes:

- 1) Realizar un estudio sobre los sistemas UAV comerciales.
- 2) Decidir la adquisición del más adecuado así como de los componentes necesarios.
- 3) Integrar el equipo aéreo existente al nuevo sistema con control autónomo.
- 4) Reducir el número de imágenes desechadas tomadas por el aeromodelo por error de rotación.
- 5) Crear planes de vuelo más exactos que mejoren a aquellos realizados con un piloto manual.

3.3. Requerimientos del sistema

El sistema UAV a integrarse debe cumplir con los siguientes requisitos que garanticen su correcto funcionamiento y que sean acordes a las necesidades del sistema actual

- 1) Sistema UAV liviano y pequeño.
- 2) Integrable al aeromodelo existente provisto por el proyecto.
- 3) El sistema debe ser compatible para enlace seguro a través de un receptor Futaba 2,4GHz
- 4) Soportar telemetría bidireccional para monitoreo y programación durante el vuelo.
- 5) Estación de control en tierra(GCS) con interfaz gráfica de usuario, que permita la visualización proveniente de la telemetría en tiempo real, además de la modificación de sus valores.
- 6) Permitir la pre-programación de los planes de vuelo.
- 7) Garantizar la estabilización del aeromodelo antes y durante el vuelo.

Es fundamental la consideración de estos requerimientos, pues delimitan tanto las necesidades del sistema actual como las mejoras que se efectuarán luego de integrado al sistema.

3.4. Descripción del Sistema a implementar

El sistema a implementar no es un sistema aislado de circuitos electrónicos interactuando entre sí, este incluye el equipo aéreo donde se implementa y es de mucha importancia considerarlo para la correcta implementación del sistema UAV: Ardupilot Mega. Es por ello, que se comenzará por indicar los parámetros que rigen a este aeromodelo y sus características más importantes aquellas que interactuarán con el sistema UAV Ardupilot Mega que será descrito posteriormente.

3.4.1. Descripción del Aeromodelo

El aeromodelo utilizado en el proyecto se muestra en la Figura 3.1. es del tipo Horizontal Tail o cola horizontal. Entre sus características resalta su fragilidad y liviana estructura, elaborado de ésta forma para evitar peso en estructura y poder transportar fácilmente las cámaras que registran las imágenes de cultivos.



Figura 3.1. Aeromodelo Squire modificado del proyecto tipo Horizontal Tail

Para comprender mejor su funcionamiento, se ilustra en la Figura 3.2. la rotación de una aeronave con respecto a su centro de gravedad obteniéndose los diferentes ángulos de rotación en tres dimensiones.

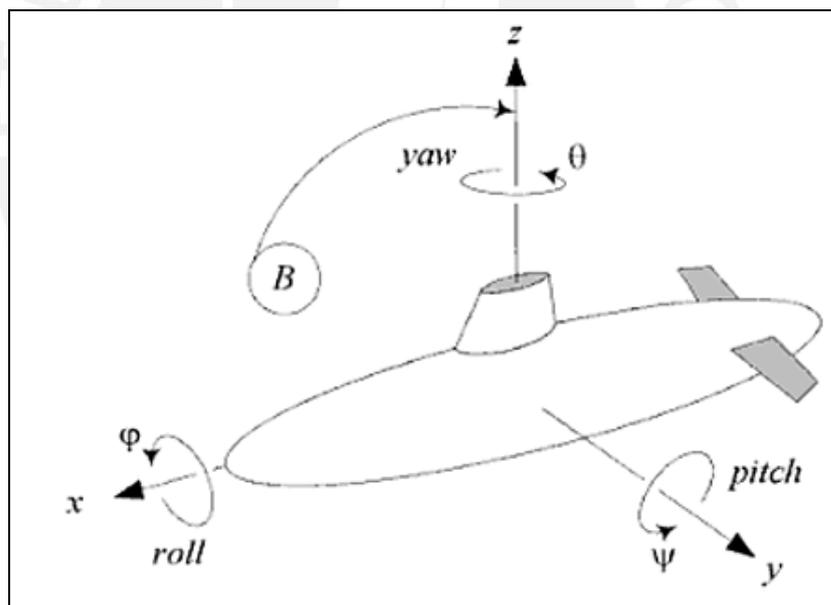


Figura 3.2. Ángulos de rotación de un objeto en tres dimensiones. (Fuente: [27])

El comportamiento del aeromodelo es controlado, mediante radiocontrol, manipulando los ángulos de las diferentes partes movibles en su superficie, las cuáles se muestran en la Figura 3.3.

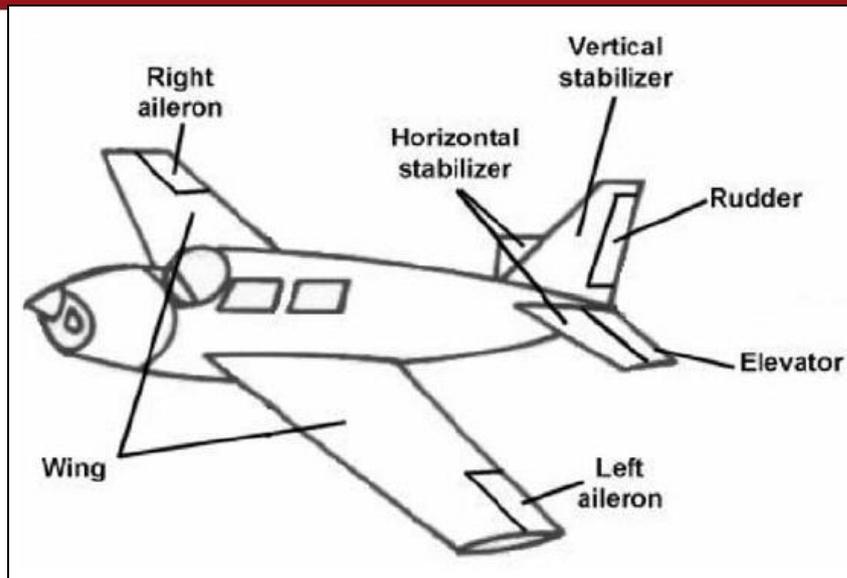


Figura 3.3. Configuración de controles del aeromodelo. (Fuente:[8])

Los cuatro principales controles en aeromodelos de este tipo son los siguientes:

- 1) Alerones (aileron) controlan el roll o alabeo
- 2) Estabilizador horizontal o elevador (elevator) controlan el pitch o cabeceo
- 3) Estabilizador vertical o timón (rudder) controlan el yaw o ladeo
- 4) Acelerador (throttle).

3.4.2. Integración del Sistema Ardupilot Mega

El sistema Ardupilot combina hardware y software para obtener control autónomo de un aeromodelo, basando el desarrollo de su tecnología en una fuente abierta de información. Esto permite la modificación de su software a las necesidades de los usuarios, pudiéndose compartir las soluciones que se pueden brindar al sistema. Ardupilot posee diversas versiones de pilotos automáticos, entre las que se encuentra Ardupilot Mega, al ser una de las últimas versiones es aún una herramienta en desarrollo permitiendo la experimentación con su código.

3.4.2.1. Hardware

El hardware requerido por Ardupilot Mega consta de lo siguiente:

- 1) APM Tarjeta Principal
- 2) APM IMU

- 3) GPS
- 4) Xbee
- 5) ArduStation

A continuación se detallan las características del hardware que se adquirió:

3.4.2.1.1. Tarjeta Principal ArduPilot Mega

La tarjeta principal del ArduPilot Mega se muestra en la Figura 3.4.

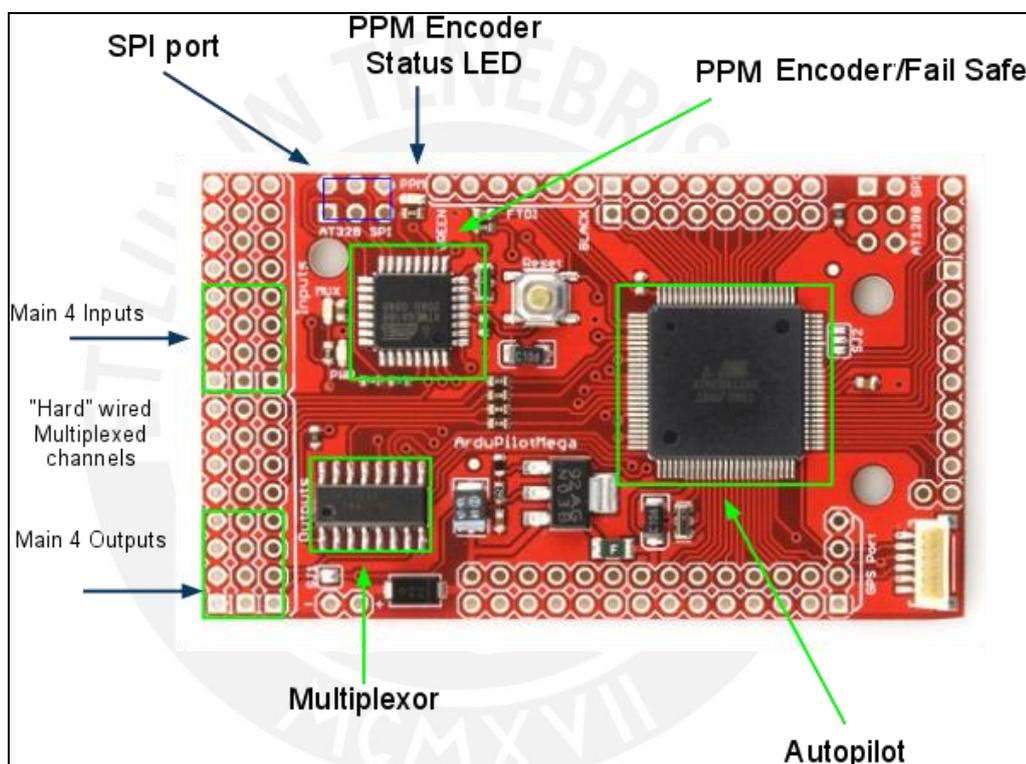


Figure 2.4. Tarjeta Principal del ArduPilot Mega. (Fuente: [19])

Posee las siguientes características:

- Está basado en un microcontrolador Atmega1280 de 16 MHz.
- Utilizando un Atmega328 y un multiplexor realiza la función de enlace seguro que transfiere el control del sistema autónomo al sistema RC y viceversa.
- Posibilidad de reiniciar el microcontrolador principal durante el vuelo.
- Dos procesadores de diseño con 32 MIPS de poder a bordo
- Soporta waypoints 3D los que están limitados por memoria

- Programa de 128k de memoria Flash, 8K de SRAM y 4K de EEPROM
- Tiene 16 entradas analógicas de repuesto (con ADC en cada una) y 40 entradas / salidas digitales para agregar sensores adicionales
- Cuatro puertos serie dedicados a la telemetría bidireccional
- Puede ser alimentada por el receptor RC o una batería independiente
- Posee ocho canales RC
- Cuenta con indicadores LED para la energía, el estado a prueba de fallos, el estado del piloto automático

3.4.2.1.2. ArduPilot Mega IMU:

La tarjeta principal del ArduPilot Mega IMU se muestra en la Figura 3.5.

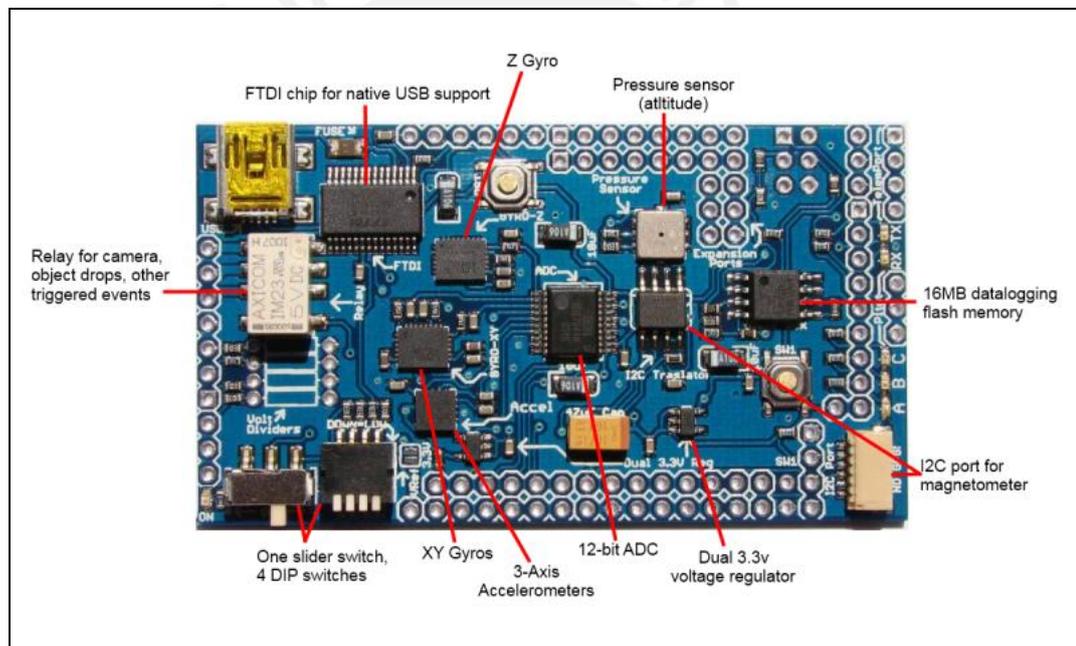


Figura 3.5. ArduPilot Mega IMU. (Fuente: [19])

El ArduPilot Mega Inertial Measurement Unit o APM IMU, es un dispositivo electrónico conteniendo los sensores necesarios para la estabilidad del UAV, entre sus características más resaltantes se encuentran:

- Relé de cámaras, luces o cargas
- ADC de 12-bits para una mejor resolución del giroscopio/ Acelerómetro / y Sensor del Aire.

- Posee interruptor DIP para revertir los servos o programarlos para otra función, delimitada por el usuario.
- Puerto de entrada I2C que le permite construir matrices de sensores.
- Puertos analógicos de expansión de 10 bits.
- Botón de reinicio.

Relación de Sensores dentro del IMU:

- Giroscopio XY: InvenSense IDG 500
- Giroscopio Z: InvenSense ISZ 500
- Acelerómetro de tres ejes: ADXL335
- Sensor de Presión Absoluta Bosch: BMP085

3.4.2.1.3. GPS

El Sistema de Posicionamiento Global o GPS cumple la función de determinar la posición tridimensional del UAV en todo momento, el sistema Ardupilot Mega requiere de un GPS para su correcto funcionamiento, a continuación se listan aquellos permitidos por el sistema:

- 1) GPS Mediatek
- 2) GPS Ublox

3.4.2.1.4. XBee

Los módulos XBee son responsables de la telemetría entre la estación de control en tierra (GCS) y el controlador en el aeromodelo. La adquisición de estos módulos, dependen de la correcta selección de frecuencia a la que trabajará. En consecuencia, es primordial conocer la frecuencia a la que trabaja el transmisor RC actualmente; el mismo que se empleará en el proyecto como medida de seguridad para la recuperación de señal en caso de pérdida de comunicación. Éste opera a 2,4GHz por lo que módulos XBee de 900MHz serían los más convenientes.

3.4.2.1.5. ArduStation

ArduStation es un tipo de estación de control en tierra (GCS) suministrado por DIY Drones [28], compatible con ArduPilot cuya función principal es exponer la telemetría en tiempo real desde el UAV en el aire. Representa una alternativa pequeña, ligera y resistente para llevar a la zona de vuelo en reemplazo de un

computador portátil o laptop. Además, entre sus características se encuentra lo siguiente:

- ATmega328 a 16Mhz con Arduino Bootloader.
- XBee Socket y 3.3V.
- Alimentación: Batería Lipo de 2 o 3 celdas.
- Gran pantalla LCD de 4 líneas con iluminación de fondo.
- Puerto FTDI para programación del ATmega328, a su vez permite programar el módulo XBee.
- Seis botones.
- Bocina de alarma de batería baja o baja altura.
- 6 pines E / S analógicas disponibles, incluyendo el puerto I2C.
- Puede controlar una antena direccional.
- Adicional de 3,3 V y 5V salidas voltios.
- LEDs de estatus.
- El software es libre. [28]

La Figura 3.6. muestra el hardware de ArduStation.



Figura 3.6. ArduStation. (Fuente: [19])

3.4.2.2. Montaje del Hardware

Una vez adquiridos todos los elementos hardware necesarios para la integración del sistema Ardupilot Mega, se procede al montaje de éste dividiéndose en dos etapas.

Etapas1: Montaje de los elementos a las tarjetas PCB

- 1) Montaje de los conectores hembra y macho en las tarjetas impresas ArdupilotMega y Ardupilot IMU.
- 2) Montaje de los componentes a la tarjeta PCB del ArduStation

Para mayor detalle en el montaje de las tarjetas PCB y ArduStation ver el Anexo 1 y Anexo 2 respectivamente.

Etapas 2: Montaje del sistema en el aeromodelo

En la Figura 3.7 se puede apreciar el diagrama de conexiones de todos los elementos que intervienen en el sistema UAV con control autónomo, el cual además de los componentes hardware requeridos y definidos previamente (ArduPilot Mega, Ardupilot IMU, GPS y Xbee) muestra también las conexión con el receptor RC dentro del aeromodelo como de las partes móviles del mismo o servos, las cuales serán controladas por transmisor RC desde tierra en modo manual o por el ArduPilot en modo automático.

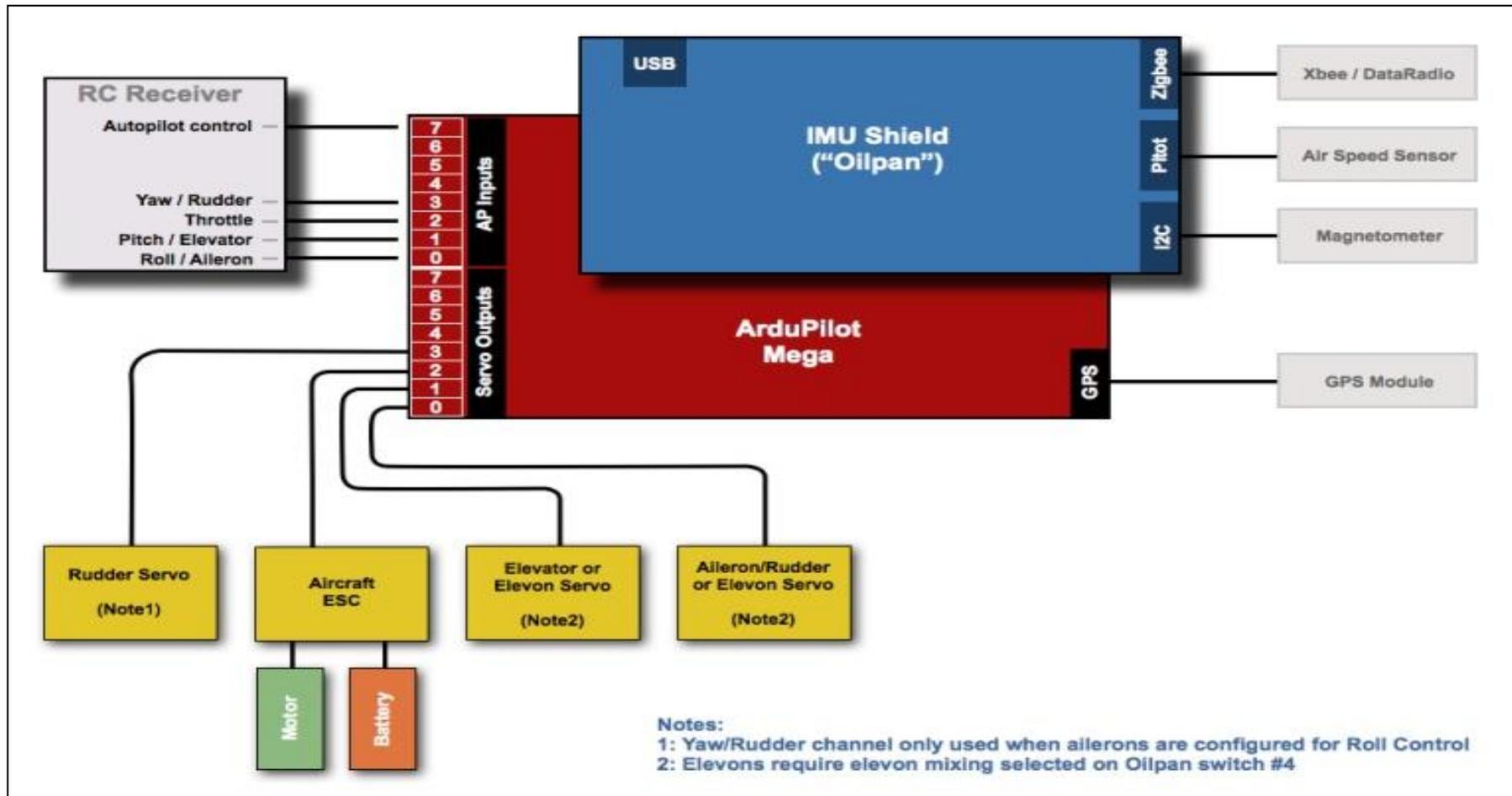


Figura 3.7. Diagrama de Conexiones (Fuente: [19])

La integración e instalación física del hardware requerido por el sistema Ardupilot Mega en el aeromodelo, trae consigo ciertas consideraciones.

- 1) El ArduPilot Mega IMU debe estar en una posición totalmente horizontal con respecto al avión y orientado de la manera mostrada en la Figura 3.8, donde la parte delantera del avión es el lado derecho de la figura. Además, debe ser asegurada de tal manera que se eviten movimientos de la tarjeta durante el vuelo.

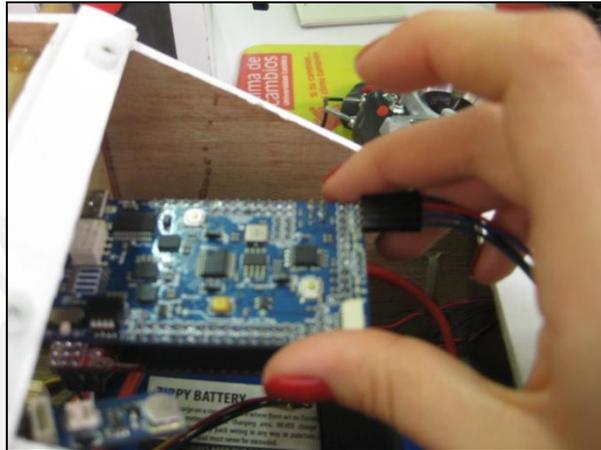


Figura 3.8. Orientación del ArduPilot Mega en el aeromodelo

- 2) El GPS debe ubicarse con la antena hacia afuera de la carcasa del aeromodelo, de esta manera se garantiza la correcta recepción de datos por parte de éste.
- 3) Es recomendable que el modulo Xbee, al igual que en el caso anterior, se ubique por fuera de la carcasa del UAV.

Finalmente, se obtiene la siguiente configuración, en la Figura 3.9 se aprecia el sistema integrado al UAV.

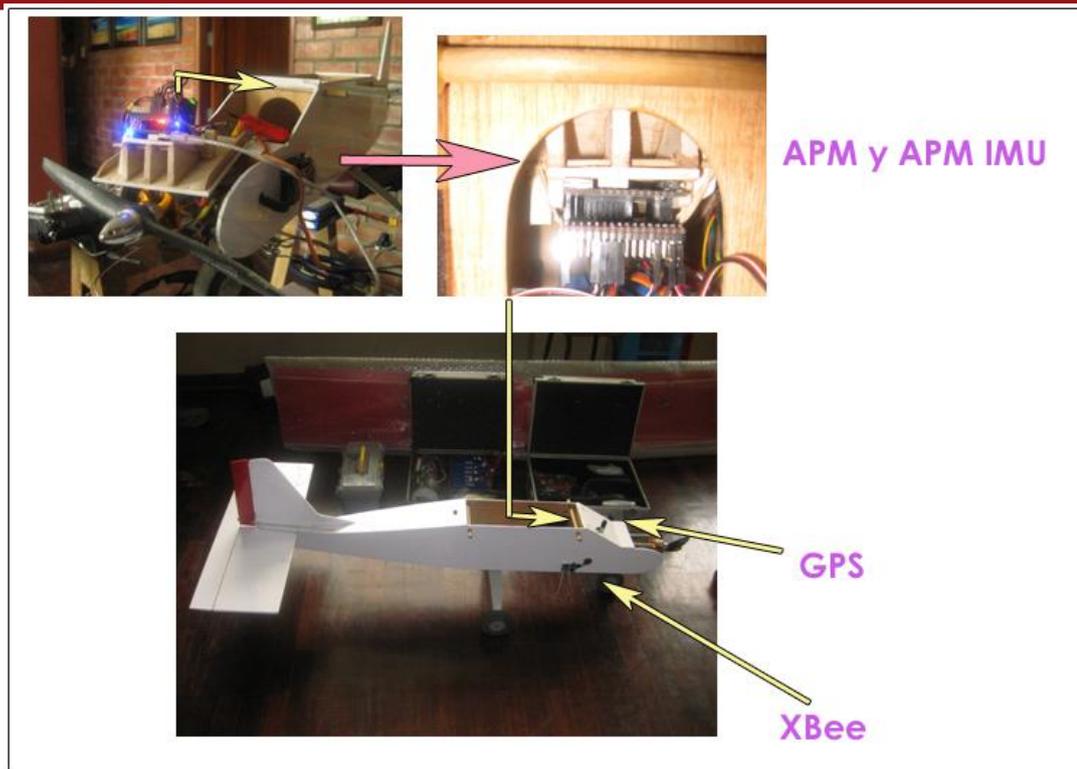


Figura 3.9. Sistema ArduPilot Mega integrado en aeromodelo.

3.4.2.3. Software

El software requerido por Ardupilot Mega consta de lo siguiente:

- 1) Arduino IDE
- 2) ArduPilotMega Planner
- 3) HappyKillmore GCS
- 4) Xplane

El desarrollo de la presente tesis fue factible gracias a la utilización de software libre disponible en la red, con excepción del simulador de vuelo X-Plane cuyo costo es de 29 dólares americanos.

3.4.2.3.1. Arduino IDE

El código del programa que se puede apreciar en el Anexo es compatible con la IDE de Arduino, que es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. El lenguaje de programación del Arduino está basado en C/C++ [29]

Se ha utilizado la última versión de Arduino 0021, en la cual se puede editar el código, compilar, grabar en la memoria del atmega además de poder tener acceso al monitor del puerto serial.

3.4.2.3.2. ArduPilot Mega Planner

El ArduPilot Mega Planner es un entorno diseñado en Visual Basic por Michael Osborne como el que se aprecia en la Figura 3.10 Esta aplicación cuya principal función es la pre programación de los planes de vuelo, está respaldada por Google Earth, haciendo más fácil la programación, pues basta con hacer clic en la imagen y se van agregando los waypoints.

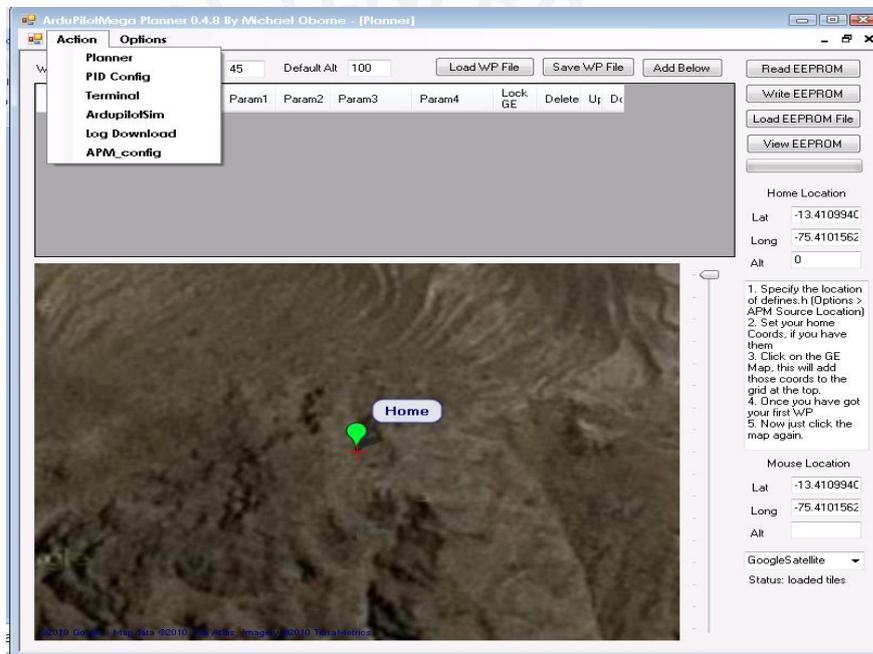


Figura 3.10. Entorno del ArduPilotMega Planner (Fuente: ArdupilotMegaPlanner)

Entre sus otras funciones se encuentra la configuración de los valores PID, los cuales pueden ser modificados y grabados en la memoria del microcontrolador del UAV fácilmente con solo colocar Write EEPROM, además posee la alternativa de simulación de los planes de vuelo con el apoyo en el software Xplane.

En la Figura 3.11 se muestra la programación de un plan de vuelo para la realización de un vuelo autónomo en la zona de Uyuyuy,

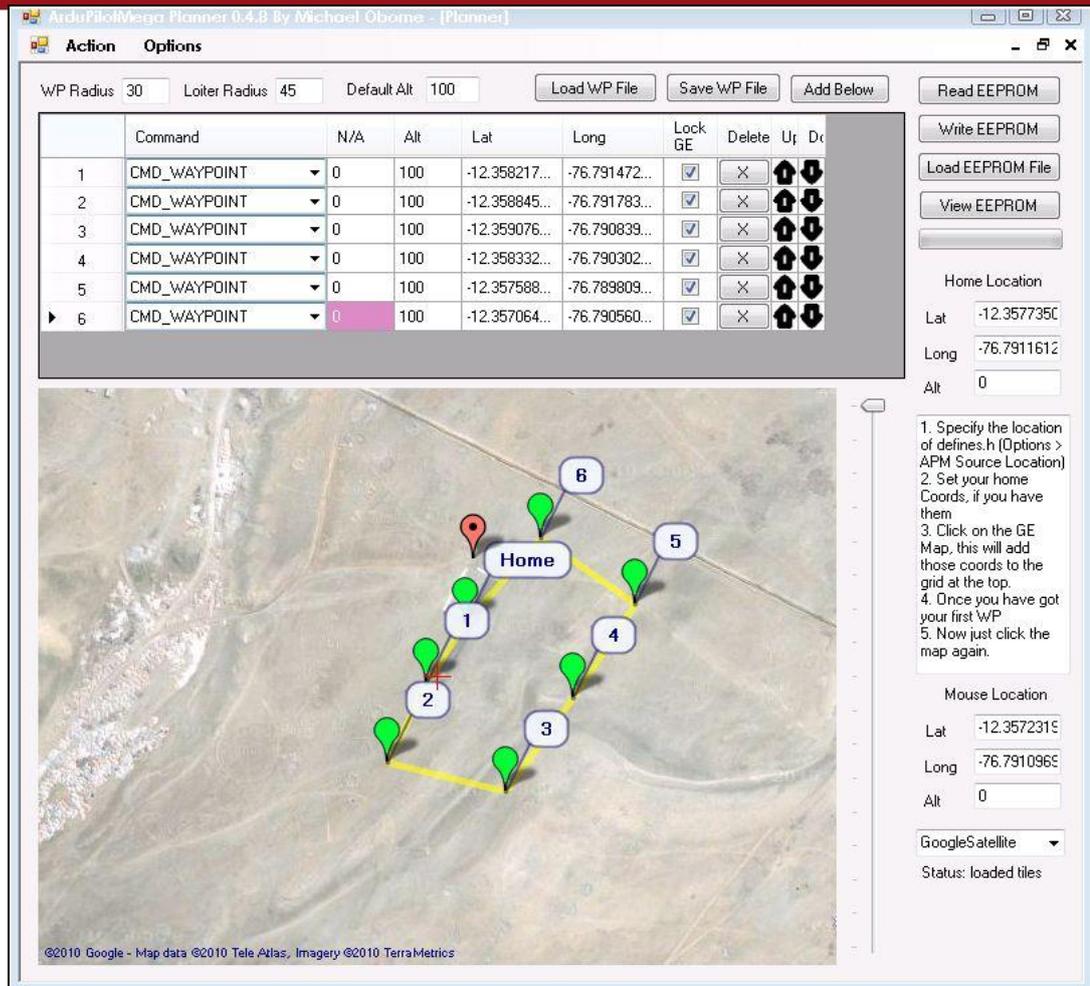


Figura 3.11. Preprogramación del Plan de Vuelo para Uyuyuy)

3.4.2.3.3. Estación de control en Tierra (GCS)

La alternativa de contar con una estación de control en tierra para el sistema ArduPilot Mega se basa en una interfaz gráfica de usuario llamada HappyKillmore GCS. Esta diseñada para trabajar en un sistema operativo Windows y posee las siguientes características:

- Visualización de un mapa en 3D, con diferentes opciones de vistas del UAV en vuelo
- Permite almacenar y reproducir los planes de vuelo
- De utilizarse una cámara de video en el UAV, integra imágenes de video en tiempo real.
- Proporciona una interfaz de línea de comandos para la configuración del ArduPilot Mega.
- Muestra datos en tiempo real de la performance y posición del UAV. [19]

En la Figura 3.12 se observa la información proveniente del puerto serial mientras que la Figura 3.13 muestra el entorno gráfico HappyKillmore GCS.

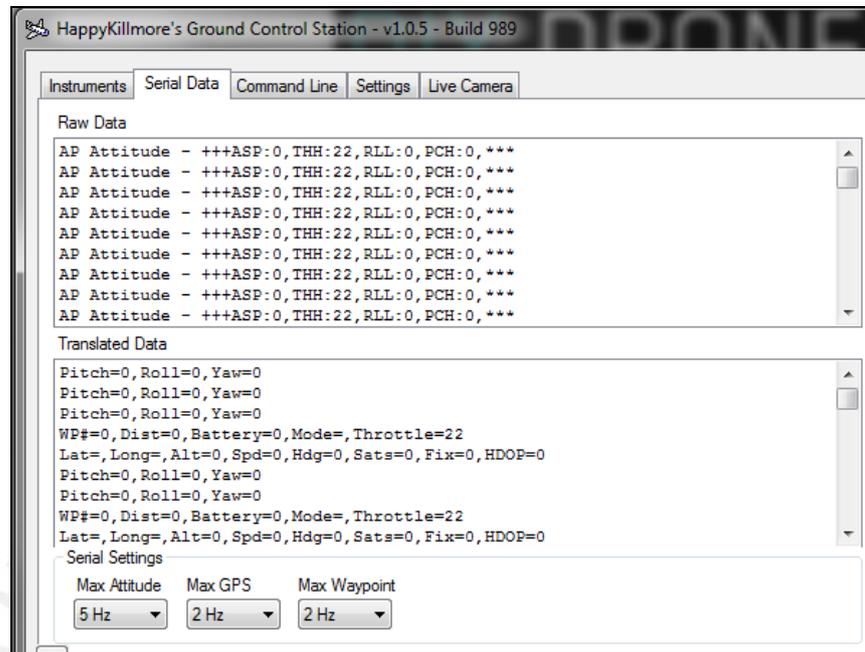


Figura 3.12. Información del puerto serial GCS (Fuente: HappyKillmore GCS)

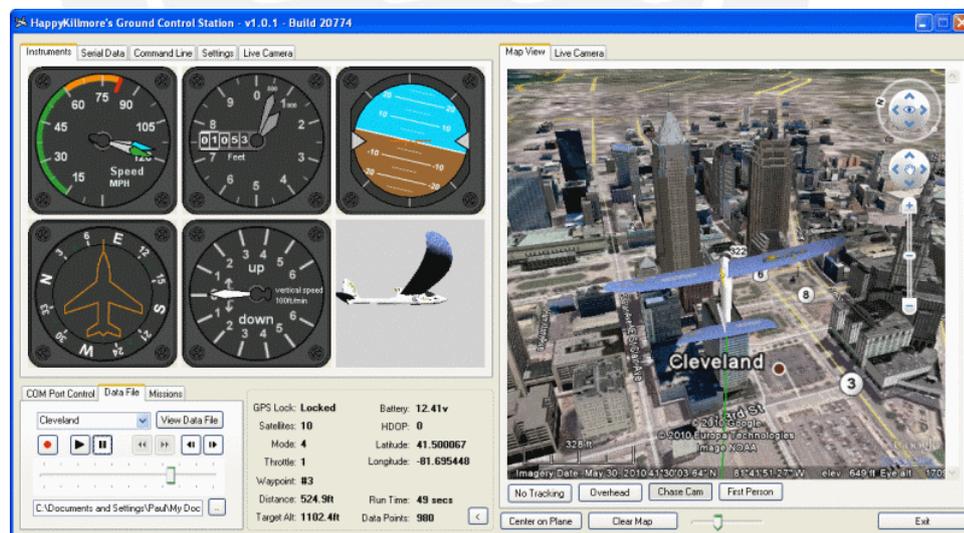
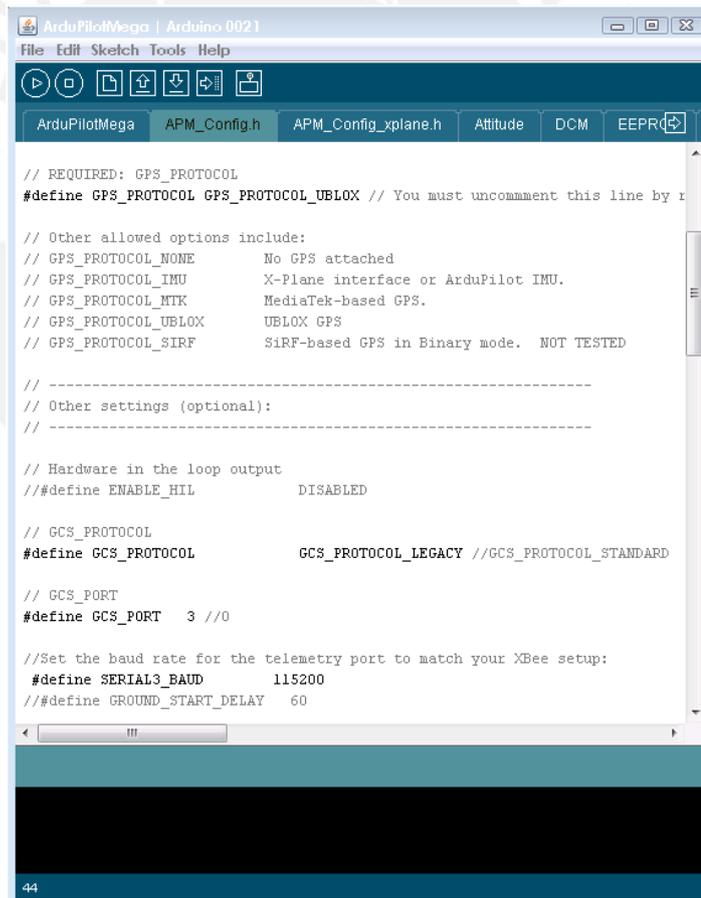


Figura 3.13. Entorno gráfico HappyKillmore GCS (Fuente: [19])

3.4.3. Instalación del Código en ArduPilotMega

La versión del código utilizado fue ArduPilotMega Beta 1.0, a continuación se describen el procedimiento secuencial para la instalación del código.

- 1) Se debe modificar al archivo APM_Config.h, definiendo el GPS a utilizar para el caso de esta tesis fue el UBlox. Si se desea trabajar con una estación de control en tierra como la de HappyKillmore, se debe seleccionar como protocolo de GCS el indicado en la Figura 3.14 y seleccionar su puerto como el 3 pues será el proveniente de la telemetría. Por consiguiente es fundamental definir la velocidad de transmisión de este puerto que es la correspondiente a los módulos Xbee utilizados para la telemetría, para ello escogemos 115200.



```

ArduPilotMega | Arduino 0021
File Edit Sketch Tools Help
ArduPilotMega APM_Config.h APM_Config_xplane.h Attitude DCM EEPROM

// REQUIRED: GPS_PROTOCOL
#define GPS_PROTOCOL GPS_PROTOCOL_UBLOX // You must uncomment this line by r

// Other allowed options include:
// GPS_PROTOCOL_NONE      No GPS attached
// GPS_PROTOCOL_IMU       X-Plane interface or ArduPilot IMU.
// GPS_PROTOCOL_MTK        MediaTek-based GPS.
// GPS_PROTOCOL_UBLOX     UBLOX GPS
// GPS_PROTOCOL_SIRF       SiRF-based GPS in Binary mode.  NOT TESTED

// -----
// Other settings (optional):
// -----

// Hardware in the loop output
// #define ENABLE_HIL      DISABLED

// GCS_PROTOCOL
#define GCS_PROTOCOL      GCS_PROTOCOL_LEGACY //GCS_PROTOCOL_STANDARD

// GCS_PORT
#define GCS_PORT          3 //0

//Set the baud rate for the telemetry port to match your Xbee setup:
#define SERIAL3_BAUD      115200
// #define GROUND_START_DELAY 60
  
```

Figura 3.14. Modificaciones en APM_Config

- 2) Se procede a la compilación del programa, verificándose la correcta codificación.

- 3) En el menú, “Tools” se selecciona el puerto serial “Serial Port” correspondiente al USB conectado al ArduPilot Mega.
- 4) Se selecciona la tarjeta o “board” Atmega 1280 dentro de “Tools” en el menú opciones.
- 5) Luego seleccionar la opción “Upload” con la que se graba el código en el microcontrolador.

3.4.4. Configuración del sistema

Para la configuración del sistema en el IDE del Arduino, se sigue el procedimiento establecido en el Anexo 1, cuyo resumen es el siguiente:

Se selecciona el monitor serial “Serial Monitor”, dentro del cual se encuentran los comandos “logs”, “setup” y “test”. Al colocar el comando “setup”, se accesan a las siguientes opciones:

- **“reset”**: Reinicia el APM.
- **“radio”**: Configura los parámetros del RC.
- **“modes”**: Configura los modos de vuelo.
- **“show”**: Muestra la información contenida en la EEPROM.

Para los modos de vuelo se definió lo siguiente:

- Pos 1: Modo de vuelo manual
- Pos 4: Modo de vuelo Stabilize
- Pos 6: Modo de vuelo Auto

La aplicación de este procedimiento se muestra en la Figura 3.15 y Figura 3.16.

```

setup] reset

Type 'Y' and hit Enter to perform factory reset, any other key to abort:
FACTORY RESET

setup]
setup] radio

Radio Setup:

Move both sticks to each corner. Hit Enter to save:

Radio Setup:

Move both sticks to each corner. Hit Enter to save: Saving:
CH1: 1302 | 1798
CH2: 1173 | 1881
CH3: 1099 | 1935
CH4: 1394 | 1812
CH5: 1000 | 2000
CH6: 1000 | 2000
CH7: 1000 | 2000
CH8: 1000 | 2000
setup]
 Autoscroll
  
```

Figura 3.15. Aplicación del procedimiento “Setup” opción “reset” y “radio”

```

setup] MODES

Move RC toggle switch to each position to edit, move aileron stick to select modes.Hit Enter to exit..

Pos 1: RTL
Pos 1: Loiter
Pos 1: Manual
Pos 1: Stabilize
Pos 1: FBW_A
Pos 1: FBW_B
Pos 1: Auto
Pos 1: RTL
Pos 1: Loiter
Pos 1: Manual
Pos 1: Stabilize
Pos 1: FBW_A
Pos 1: FBW_B
Pos 1: Auto
Pos 1: RTL
Pos 1: Loiter
Pos 1: Manual
Pos 1: Stabilize
Pos 1: FBW_A
Pos 1: FBW_B
Pos 1: Auto
Pos 1: RTL
Pos 1: Loiter
Pos 1: Manual
Pos 1: Stabilize
setup]
  
```

Figura 3.16. Aplicación del procedimiento “Setup” opción “modes”

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. Antecedentes

En la Figura 4.1 se muestra las estadísticas de accidentes de los UAV, puede observarse que los accidentes son cada vez mayores conforme se incrementa su demanda y uso. Muchos opinan que la solución a ello son los sistemas autónomos, sin embargo, es difícil prever todas las posibles contingencias que pueden ocurrir; así como, predecir la respuesta del vehículo a todos los eventos posibles [16].

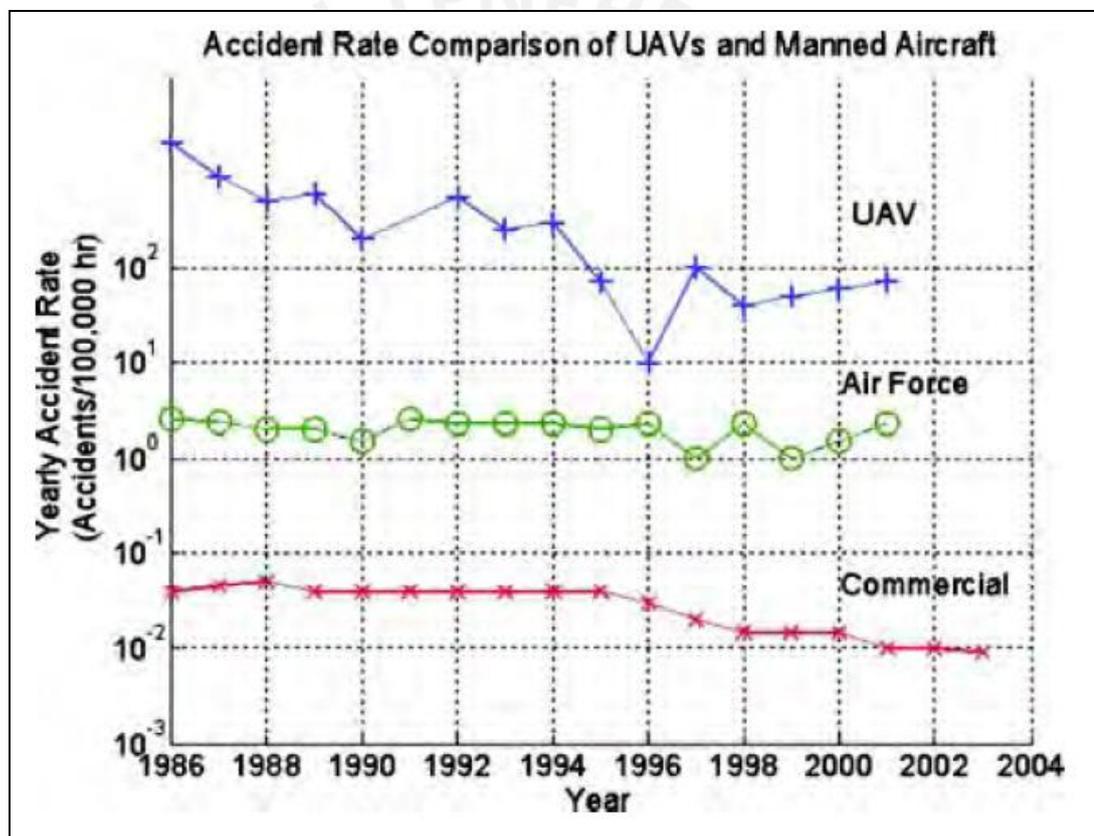
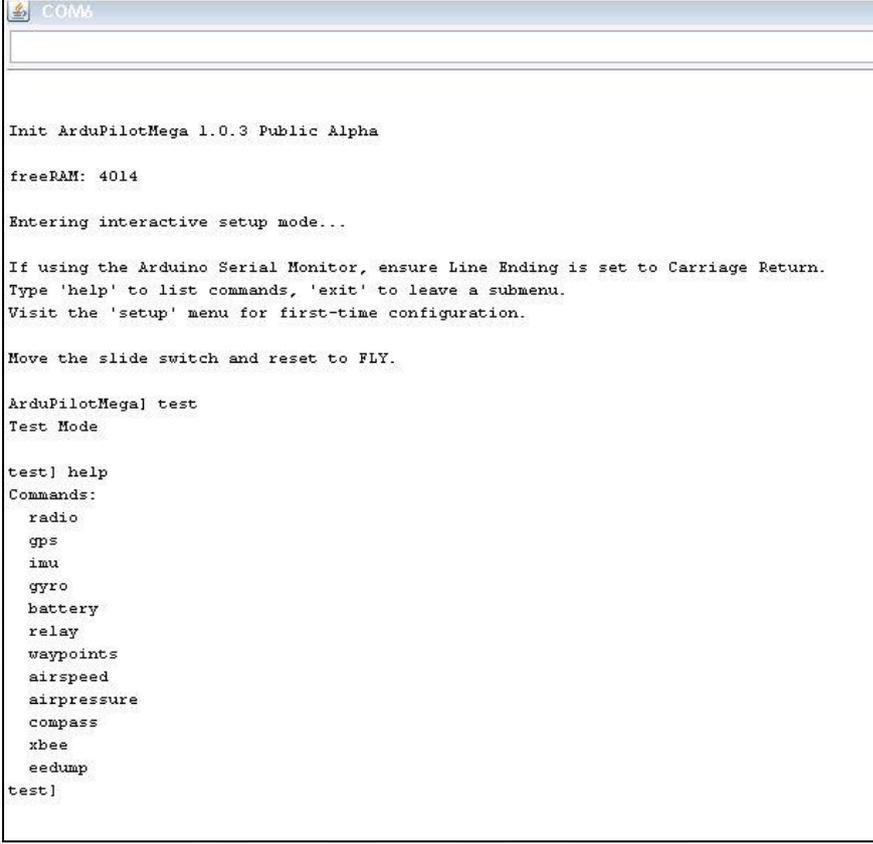


Figura 4.1. Comparación de la tasa de accidentes (Fuente: [16])

Es así que un sistema UAV con control autónomo, requiere asegurar su correcta operatividad antes de iniciar los vuelos; por lo que las pruebas son esenciales para el éxito de la aplicación antes indicada.

4.2. Pruebas en sitio:

Las pruebas en sitio son aquellas efectuadas luego de grabado el código en el Ardupilot Mega. Al abrir el monitor del puerto serial que llamaremos CLI por sus siglas en inglés Comand Line Interpreter, debe aparecer la siguiente información:



```

COM3

Init ArdupilotMega 1.0.3 Public Alpha

freeRAM: 4014

Entering interactive setup mode...

If using the Arduino Serial Monitor, ensure Line Ending is set to Carriage Return.
Type 'help' to list commands, 'exit' to leave a submenu.
Visit the 'setup' menu for first-time configuration.

Move the slide switch and reset to FLY.

ArdupilotMega] test
Test Mode

test] help
Commands:
  radio
  gps
  imu
  gyro
  battery
  relay
  waypoints
  airspeed
  airpressure
  compass
  xbee
  eedump
test]
  
```

Figura 4.2. Relación de pruebas del Ardupilot Mega

Para acceder al modo de pruebas, se escribe el comando test según se indica en la Figura 4.2.

4.2.1. Pruebas del RC

El transmisor RC es un dispositivo de radio control empleado en sistemas UAV con control autónomo, como alternativa de control manual en caso de pérdida de señal o para el despegue y aterrizaje del aeromodelo cuando no se realiza en modo autónomo.

Ésta prueba implica la conexión de las entradas y salidas como se muestra en la Figura 4.3, donde las entradas se conectan al receptor del RC y las salidas a los

servos. Se debe considerar que sólo los cuatro primeros canales son los manejados por el multiplexor del ArduPilot Mega.

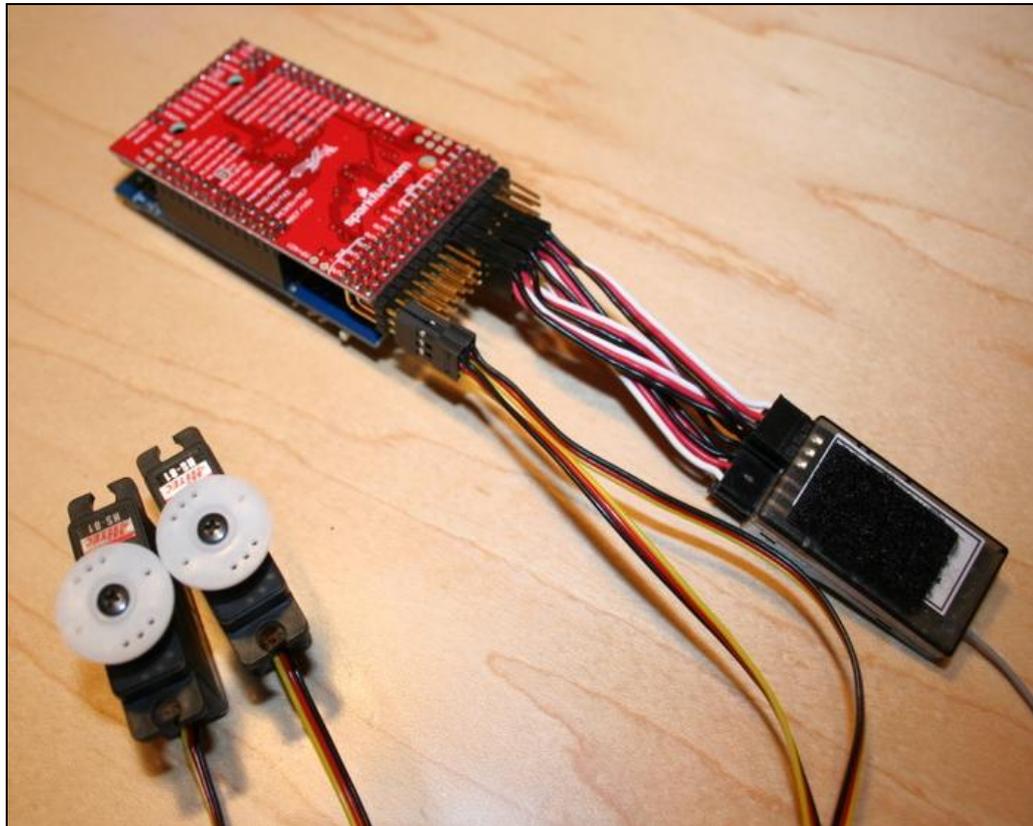


Figura 4.3. Conexión para prueba de radio. (Fuente: [19])

Luego, con el transmisor RC encendido, se ejecuta el comando "radio" en la CLI; al mover los controles, se deben obtener datos que correspondan al canal que se está moviendo. En la Figura 4.4. se muestran los valores de las entradas y salidas, donde los primeros corresponden a los valores PWM recibidos y las salidas a los ángulos de giro aplicados a los servos correspondientes. Se puede verificar la correcta transmisión entre el RC y los servos.

IN: 1: 1363	2: 1549	3: 1685	4: 1641	5: 1869	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: 16	2: -2	3: 70	4: -3
IN: 1: 1476	2: 1554	3: 1667	4: 1653	5: 1866	6: 1499	7: 1498	8: 900	OUT 1: 6	2: -2	3: 67	4: -4
IN: 1: 1549	2: 1571	3: 1626	4: 1655	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: 0	2: -4	3: 63	4: -4
IN: 1: 1589	2: 1575	3: 1609	4: 1652	5: 1867	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -3	2: -4	3: 61	4: -4
IN: 1: 1610	2: 1583	3: 1573	4: 1649	5: 1869	6: 1498	7: 1499	8: 900	OUT 1: -5	2: -5	3: 56	4: -3
IN: 1: 1654	2: 1589	3: 1555	4: 1646	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -9	2: -6	3: 54	4: -3
IN: 1: 1713	2: 1594	3: 1533	4: 1641	5: 1866	6: 1499	7: 1498	8: 900	OUT 1: -14	2: -6	3: 51	4: -3
IN: 1: 1740	2: 1656	3: 1528	4: 1648	5: 1869	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -17	2: -12	3: 51	4: -3
IN: 1: 1767	2: 1723	3: 1522	4: 1645	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -19	2: -18	3: 50	4: -3
IN: 1: 1794	2: 1747	3: 1522	4: 1664	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -22	2: -20	3: 50	4: -5
IN: 1: 1793	2: 1794	3: 1529	4: 1659	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -21	2: -24	3: 51	4: -4
IN: 1: 1795	2: 1816	3: 1528	4: 1662	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -22	2: -26	3: 51	4: -5
IN: 1: 1798	2: 1863	3: 1524	4: 1662	5: 1867	6: 1498	7: 1499	8: 900	OUT 1: -22	2: -30	3: 50	4: -5
IN: 1: 1795	2: 1877	3: 1513	4: 1669	5: 1866	6: 1498	7: 1499	8: 900	OUT 1: -22	2: -31	3: 49	4: -5
IN: 1: 1794	2: 1878	3: 1510	4: 1665	5: 1869	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -22	2: -32	3: 49	4: -5
IN: 1: 1790	2: 1881	3: 1499	4: 1662	5: 1866	6: 1498	7: 1499	8: 900	OUT 1: -21	2: -32	3: 47	4: -5
IN: 1: 1760	2: 1877	3: 1494	4: 1659	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -18	2: -31	3: 47	4: -4
IN: 1: 1662	2: 1875	3: 1489	4: 1643	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -10	2: -31	3: 46	4: -3
IN: 1: 1621	2: 1880	3: 1488	4: 1633	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: -6	2: -32	3: 46	4: -2
IN: 1: 1560	2: 1874	3: 1493	4: 1617	5: 1866	6: 1499	7: 1498	8: 900	OUT 1: 0	2: -31	3: 47	4: -1
IN: 1: 1546	2: 1823	3: 1487	4: 1617	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: 0	2: -27	3: 46	4: -1
IN: 1: 1549	2: 1752	3: 1485	4: 1615	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: 0	2: -20	3: 46	4: 0
IN: 1: 1545	2: 1623	3: 1462	4: 1612	5: 1867	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: 0	2: -9	3: 43	4: 0
IN: 1: 1536	2: 1576	3: 1453	4: 1605	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: 1	2: -4	3: 42	4: 0
IN: 1: 1538	2: 1529	3: 1448	4: 1600	5: 1869	6: 1498	7: 1499	8: 900	OUT 1: 0	2: 0	3: 41	4: 0
IN: 1: 1542	2: 1529	3: 1447	4: 1599	5: 1867	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: 0	2: 0	3: 41	4: 0
IN: 1: 1549	2: 1526	3: 1452	4: 1605	5: 1866	6: 1498	7: 1498	8: 900	OUT 1: 0	2: 0	3: 42	4: 0
IN: 1: 1549	2: 1526	3: 1449	4: 1598	5: 1866	6: 1498	7: 1499	8: 900	OUT 1: 0	2: 0	3: 41	4: 0

Figura 4.4. Datos obtenidos de la prueba “radio”

4.2.2. Pruebas del GPS

ArduPilot Mega en su modo automático, hace que el aeromodelo siga los waypoints preprogramados en él, el GPS provee información de latitud, altitud y longitud, información que luego será procesada para el seguimiento de los waypoints, por lo que el conocimiento la posición del aeromodelo en todo momento es de vital importancia. Las pruebas al GPS, aseguran su correcto funcionamiento y la validez de los datos obtenidos.

Para la prueba, el GPS debe encontrarse al exterior para garantizar la correcta recepción de la información satelital.

4.2.2.1. Recepción de datos en el CLI

Al ejecutar el comando GPS en el CLI, se ejecuta el programa de prueba del GPS; el cuál muestra información de latitud, altitud y longitud proveniente de este dispositivo. La Figura 4.5 muestra los datos obtenidos del GPS a través del puerto serial.

COM6			
Lat:-12.0732212066	Lon:-76.9651794433	alt 279m	#sats: 0
Lat:-12.0732259750	Lon:-76.9651794433	alt 280m	#sats: 0
Lat:-12.0732307434	Lon:-76.9651870727	alt 283m	#sats: 0
Lat:-12.0732316970	Lon:-76.9651870727	alt 283m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651870727	alt 284m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651870727	alt 284m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651794433	alt 284m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651794433	alt 284m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651794433	alt 284m	#sats: 0
Lat:-12.0732326507	Lon:-76.9651870727	alt 284m	#sats: 0
Lat:-12.0732326507	Lon:-76.9651870727	alt 285m	#sats: 0
Lat:-12.0732326507	Lon:-76.9651870727	alt 285m	#sats: 0
Lat:-12.0732316970	Lon:-76.9651870727	alt 285m	#sats: 0
Lat:-12.0732307434	Lon:-76.9651870727	alt 285m	#sats: 0
Lat:-12.0732307434	Lon:-76.9651870727	alt 285m	#sats: 0
Lat:-12.0732307434	Lon:-76.9651870727	alt 284m	#sats: 0
Lat:-12.0732326507	Lon:-76.9651794433	alt 282m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651794433	alt 282m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651794433	alt 282m	#sats: 0
Lat:-12.0732374191	Lon:-76.9651718139	alt 280m	#sats: 0
Lat:-12.0732374191	Lon:-76.9651718139	alt 280m	#sats: 0
Lat:-12.0732355117	Lon:-76.9651641845	alt 279m	#sats: 0
Lat:-12.0732345581	Lon:-76.9651641845	alt 279m	#sats: 0
Lat:-12.0732355117	Lon:-76.9651718139	alt 279m	#sats: 0
Lat:-12.0732345581	Lon:-76.9651641845	alt 279m	#sats: 0
Lat:-12.0732355117	Lon:-76.9651641845	alt 278m	#sats: 0
Lat:-12.0732345581	Lon:-76.9651641845	alt 278m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651641845	alt 278m	#sats: 0
Lat:-12.0732345581	Lon:-76.9651641845	alt 277m	#sats: 0
Lat:-12.0732355117	Lon:-76.9651641845	alt 277m	#sats: 0
Lat:-12.0732355117	Lon:-76.9651641845	alt 277m	#sats: 0
Lat:-12.0732355117	Lon:-76.9651641845	alt 277m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651641845	alt 277m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651718139	alt 277m	#sats: 0
Lat:-12.0732336044	Lon:-76.9651718139	alt 277m	#sats: 0
Lat:-12.0732288360	Lon:-76.9651718139	alt 276m	#sats: 0
Lat:-12.0732269287	Lon:-76.9651718139	alt 276m	#sats: 0
Lat:-12.0732250213	Lon:-76.9651641845	alt 275m	#sats: 0
Lat:-12.0732231140	Lon:-76.9651641845	alt 275m	#sats: 0
Lat:-12.0732240676	Lon:-76.9651641845	alt 275m	#sats: 0
Lat:-12.0732231140	Lon:-76.9651565551	alt 275m	#sats: 0
Lat:-12.0732221603	Lon:-76.9651565551	alt 275m	#sats: 0
test]			
test]			

Autoscroll

Figura 4.5. Datos obtenidos de la prueba “GPS”

4.2.2.2. Comprobación del correcto funcionamiento del GPS

La información obtenida por el GPS se ingresa al Google Earth, alternativamente pueden ingresarse a cualquiera de los entornos mencionado en el Capítulo 3 soportado por este software.

De corresponder la posición geográfica en Google Earth con aquella donde fue realizada la prueba; ello demuestra que el GPS tiene un correcto funcionamiento, ver Figura 4.6.

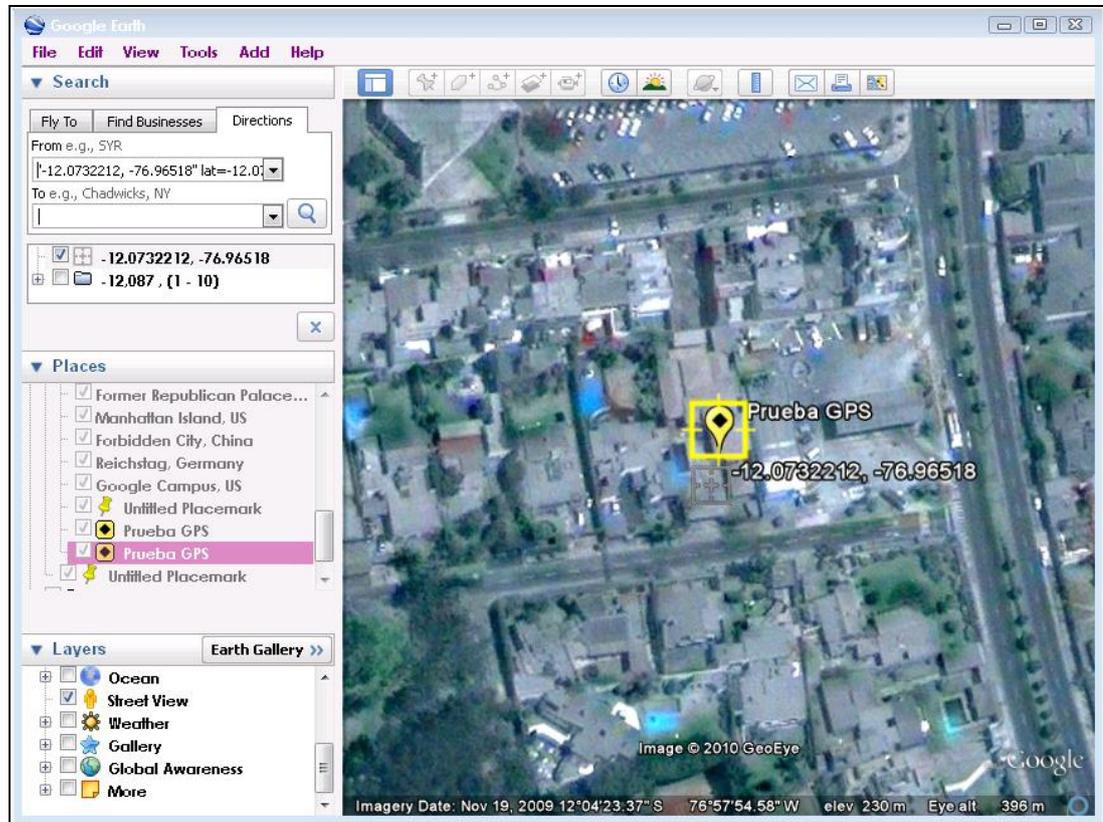


Figura 4.6. Comprobación en Google Earth de datos obtenidos del “GPS”

4.2.3. Pruebas del IMU: Alabeo (Roll), Cabeceo (Pitch), Ladeo (Yaw)

En éstas pruebas se verifican las salidas del algoritmo DCM conforme se va moviendo la tarjeta del ArduPilot Mega. Para efectos de prueba, al moverla hacia la derecha se obtienen valores de los ángulos de rotación en grados de roll, pitch y yaw mostrados en la Figura 4.7, y al moverla a la izquierda se obtiene lo indicado en la Figura 4.8.

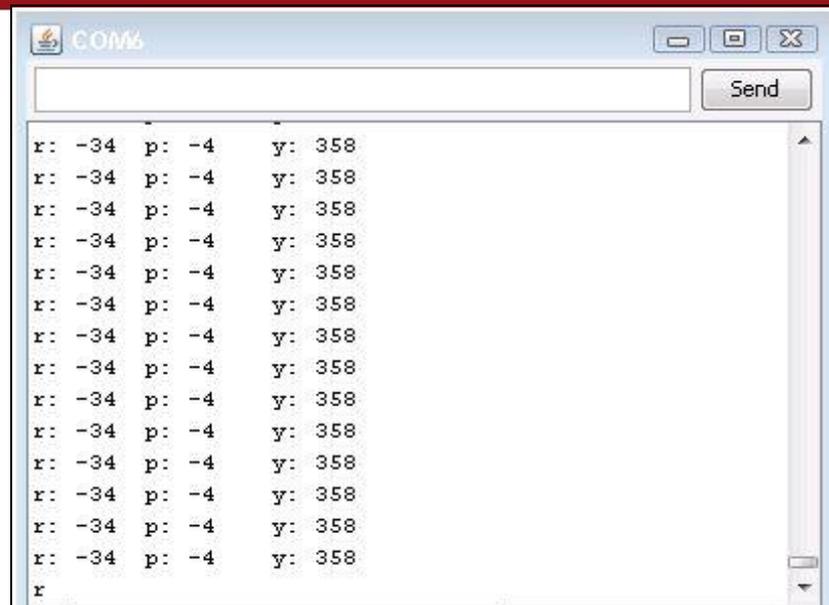


Figura 4.7. Valores obtenidos de alabeo (Roll), cabeceo (Pitch) y ladeo (Yaw) de la prueba “imu” con la tarjeta APM hacia la derecha.

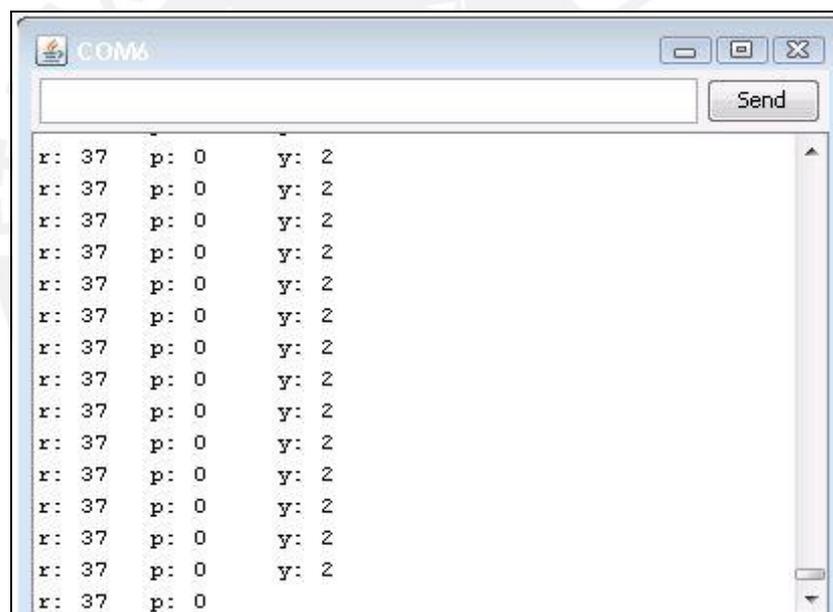


Figura 4.8. Valores obtenidos de alabeo (Roll), cabeceo (Pitch) y ladeo (Yaw) de la prueba “imu” con la tarjeta APM hacia la izquierda.

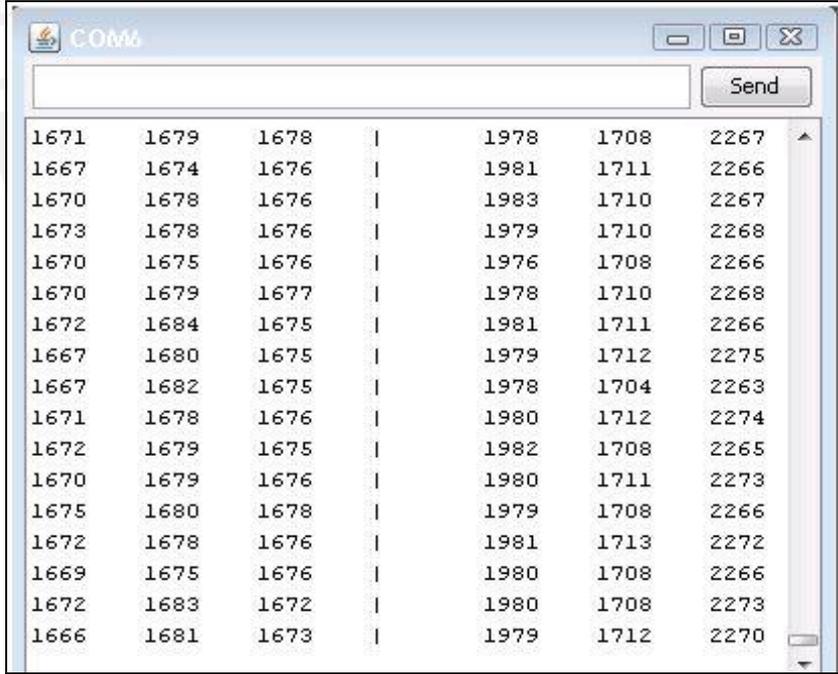
Resultados de la prueba “imu”:

Los valores de los ángulos de rotación roll, pitch y yaw no son constantes, en esta prueba se verifica este comportamiento con el movimiento de la tarjeta del ArduPilot Mega.

4.2.4. Pruebas de los giroscopios y acelerómetro

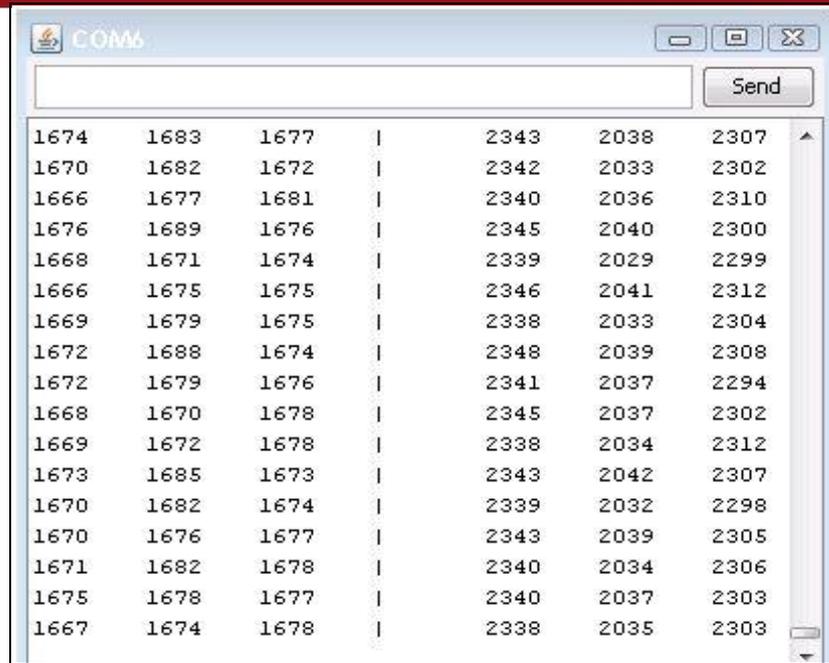
Los giroscopios y acelerómetros contribuyen a la estabilización del UAV durante el vuelo, es por ello que es necesario verificar su correcto funcionamiento. La prueba de los giroscopios y acelerómetro consiste en mover la tarjeta del ArduPilot Mega y comprobar que los valores obtenidos varían. La información de los giroscopios se ve en las tres columnas derechas; eje X, eje Y y eje Z respectivamente, mientras que la del acelerómetro en las tres columnas izquierdas; eje X, eje Y y eje Z respectivamente. Los giroscopios muestran el grado de rotación respecto a su eje, por lo que al dejar de moverse vuelven a su posición inicial. Mientras que los acelerómetros muestran el resultado de la inclinación.

La Figura 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 muestran los datos obtenidos cuando la tarjeta APM está inclinada hacia adelante, atrás, izquierda y derecha. Los giroscopios mantienen su valor pues se tomaron las imágenes cuando se dejó de rotar la tarjeta, mientras que los datos del acelerómetro cambian.



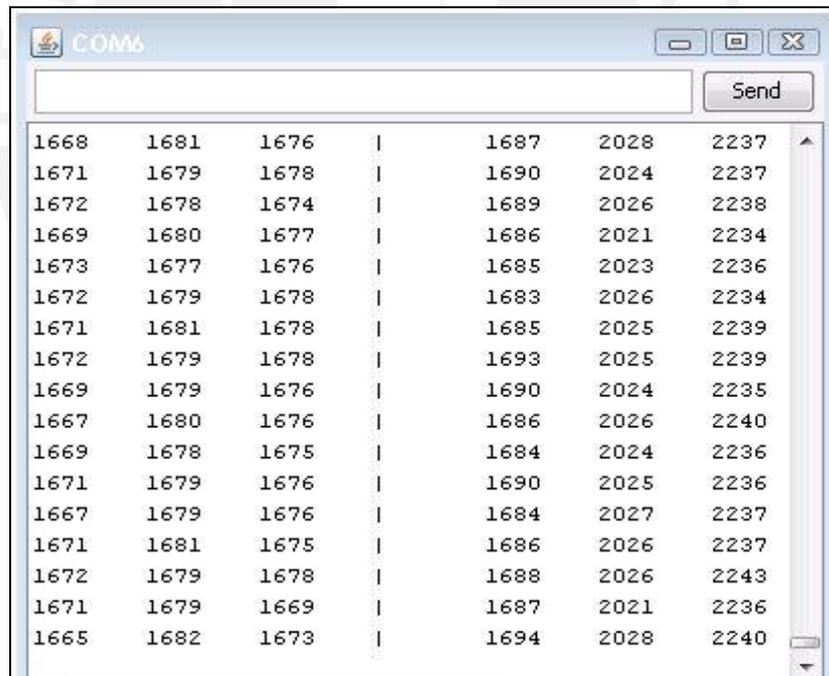
1671	1679	1678		1978	1708	2267
1667	1674	1676		1981	1711	2266
1670	1678	1676		1983	1710	2267
1673	1678	1676		1979	1710	2268
1670	1675	1676		1976	1708	2266
1670	1679	1677		1978	1710	2268
1672	1684	1675		1981	1711	2266
1667	1680	1675		1979	1712	2275
1667	1682	1675		1978	1704	2263
1671	1678	1676		1980	1712	2274
1672	1679	1675		1982	1708	2265
1670	1679	1676		1980	1711	2273
1675	1680	1678		1979	1708	2266
1672	1678	1676		1981	1713	2272
1669	1675	1676		1980	1708	2266
1672	1683	1672		1980	1708	2273
1666	1681	1673		1979	1712	2270

Figura 4.9. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tarjeta APM inclinada hacia adelante.



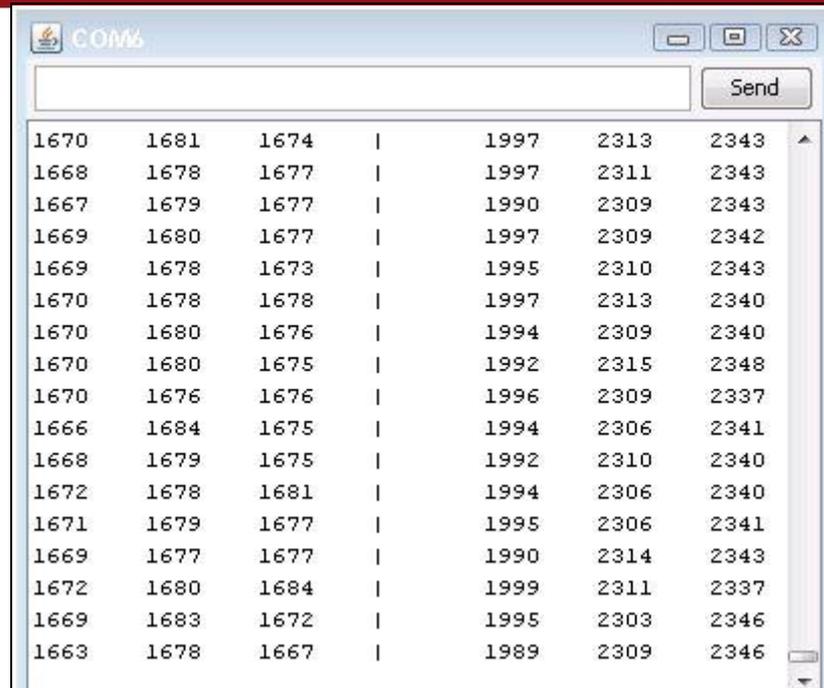
1674	1683	1677		2343	2038	2307
1670	1682	1672		2342	2033	2302
1666	1677	1681		2340	2036	2310
1676	1689	1676		2345	2040	2300
1668	1671	1674		2339	2029	2299
1666	1675	1675		2346	2041	2312
1669	1679	1675		2338	2033	2304
1672	1688	1674		2348	2039	2308
1672	1679	1676		2341	2037	2294
1668	1670	1678		2345	2037	2302
1669	1672	1678		2338	2034	2312
1673	1685	1673		2343	2042	2307
1670	1682	1674		2339	2032	2298
1670	1676	1677		2343	2039	2305
1671	1682	1678		2340	2034	2306
1675	1678	1677		2340	2037	2303
1667	1674	1678		2338	2035	2303

Figura 4.10. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tarjeta APM inclinada hacia atrás.



1668	1681	1676		1687	2028	2237
1671	1679	1678		1690	2024	2237
1672	1678	1674		1689	2026	2238
1669	1680	1677		1686	2021	2234
1673	1677	1676		1685	2023	2236
1672	1679	1678		1683	2026	2234
1671	1681	1678		1685	2025	2239
1672	1679	1678		1693	2025	2239
1669	1679	1676		1690	2024	2235
1667	1680	1676		1686	2026	2240
1669	1678	1675		1684	2024	2236
1671	1679	1676		1690	2025	2236
1667	1679	1676		1684	2027	2237
1671	1681	1675		1686	2026	2237
1672	1679	1678		1688	2026	2243
1671	1679	1669		1687	2021	2236
1665	1682	1673		1694	2028	2240

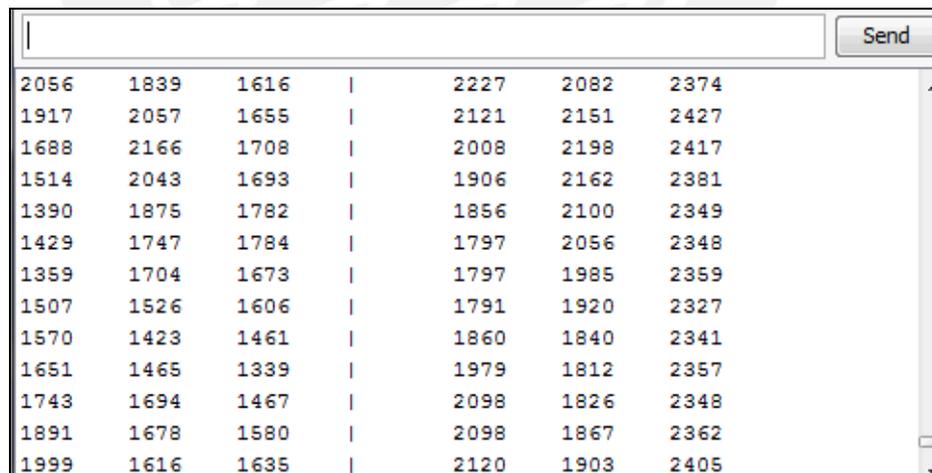
Figura 4.11. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tarjeta APM inclinada hacia izquierda.



1670	1681	1674		1997	2313	2343
1668	1678	1677		1997	2311	2343
1667	1679	1677		1990	2309	2343
1669	1680	1677		1997	2309	2342
1669	1678	1673		1995	2310	2343
1670	1678	1678		1997	2313	2340
1670	1680	1676		1994	2309	2340
1670	1680	1675		1992	2315	2348
1670	1676	1676		1996	2309	2337
1666	1684	1675		1994	2306	2341
1668	1679	1675		1992	2310	2340
1672	1678	1681		1994	2306	2340
1671	1679	1677		1995	2306	2341
1669	1677	1677		1990	2314	2343
1672	1680	1684		1999	2311	2337
1669	1683	1672		1995	2303	2346
1663	1678	1667		1989	2309	2346

Figura 4.12. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tarjeta APM inclinada hacia derecha.

La Figura 4.13 muestra los datos al hacer girar la tarjeta APM durante un periodo de tiempo mas prolongado, esto se efectuó con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del giroscopio, y como se observa varía su valor.

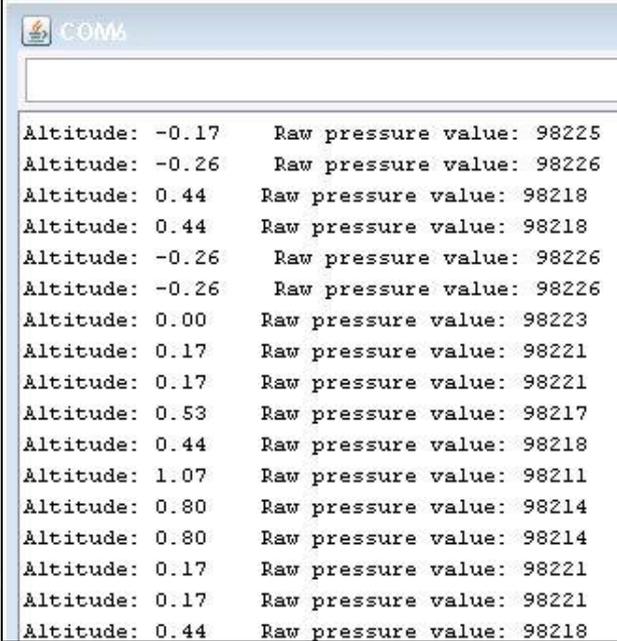


2056	1839	1616		2227	2082	2374
1917	2057	1655		2121	2151	2427
1688	2166	1708		2008	2198	2417
1514	2043	1693		1906	2162	2381
1390	1875	1782		1856	2100	2349
1429	1747	1784		1797	2056	2348
1359	1704	1673		1797	1985	2359
1507	1526	1606		1791	1920	2327
1570	1423	1461		1860	1840	2341
1651	1465	1339		1979	1812	2357
1743	1694	1467		2098	1826	2348
1891	1678	1580		2098	1867	2362
1999	1616	1635		2120	1903	2405

Figura 4.13. Valores obtenidos de la prueba “gyro” con la tarjeta APM en movimiento.

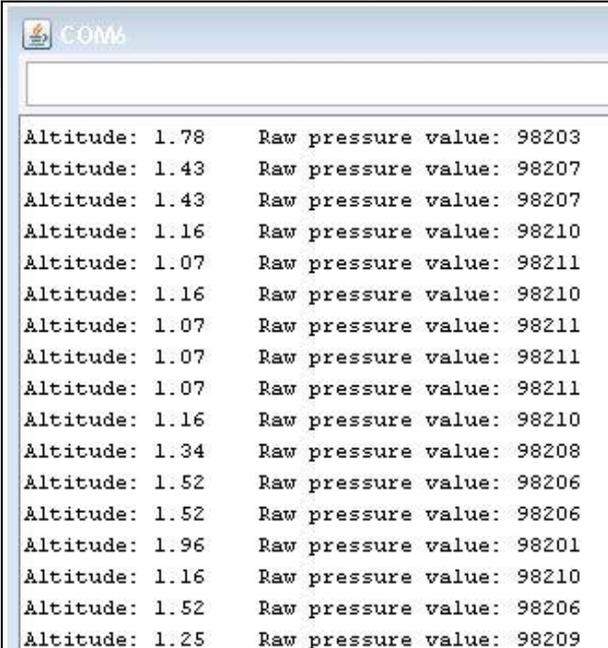
4.2.5. Prueba del sensor de presión del aire.

Con esta prueba se calibran los sensores de presión de aire a su altitud actual y a la altitud relativa de la salida, esto cuando se mueve la tarjeta del APM de abajo hacia arriba [19], como se muestra en la Figura 4.14 y 4.15 respectivamente. Al iniciar esta prueba la altitud será de cero (0) metros, los valores que se observan al mover la tarjeta del APM son referentes a esta posición inicial.



Altitude	Raw pressure value
-0.17	98225
-0.26	98226
0.44	98218
0.44	98218
-0.26	98226
-0.26	98226
0.00	98223
0.17	98221
0.17	98221
0.53	98217
0.44	98218
1.07	98211
0.80	98214
0.80	98214
0.17	98221
0.17	98221
0.44	98218

Figura 4.14. Valores obtenidos de la prueba “airpressure” con la tarjeta APM abajo.

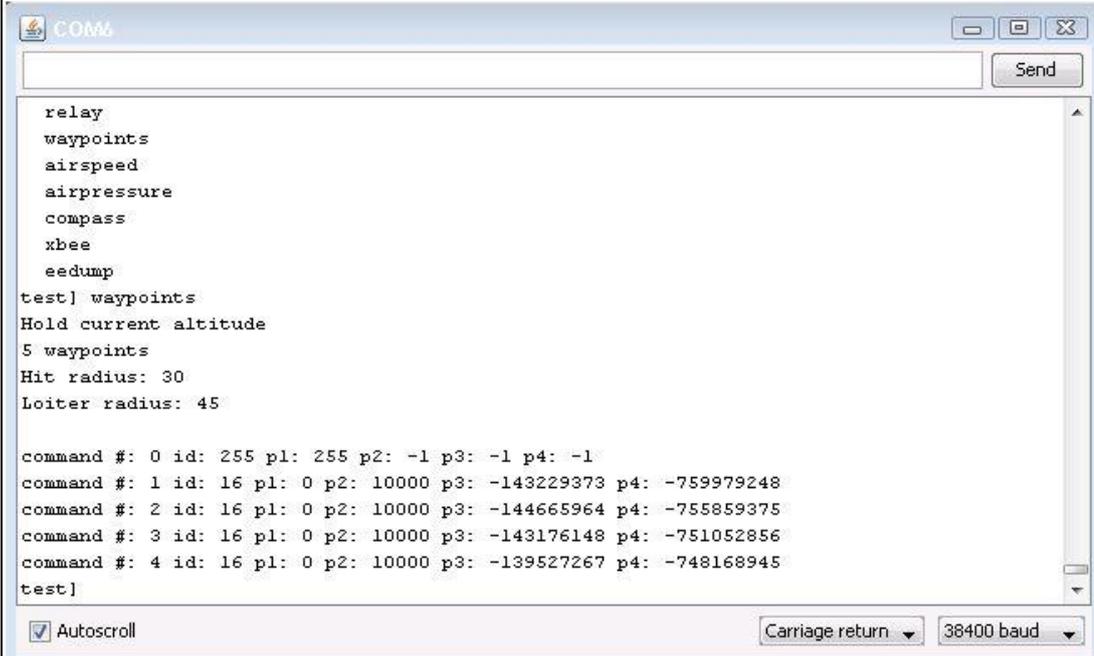


Altitude	Raw pressure value
1.78	98203
1.43	98207
1.43	98207
1.16	98210
1.07	98211
1.16	98210
1.07	98211
1.07	98211
1.07	98211
1.16	98210
1.34	98208
1.52	98206
1.52	98206
1.96	98201
1.16	98210
1.52	98206
1.25	98209

Figura 4.15. Valores obtenidos de la prueba “airpressure” con la tarjeta APM arriba.

4.2.6. Pruebas de los waypoints

Al igual que para la prueba del GPS, esta es una prueba fundamental pues está ligada al comportamiento en modo automático. Previamente en ArduPilot Planner se crearon los planes de vuelos basados en 4 puntos, los que fueron grabados en la memoria EEPROM del microcontrolador; por lo tanto, al ingresar el comando waypoint en el menú de pruebas se debe obtener esta información. Ver la Figura 4.16.



```

COM6
Send

relay
waypoints
airspeed
airpressure
compass
xbee
eedump
test] waypoints
Hold current altitude
5 waypoints
Hit radius: 30
Loiter radius: 45

command #: 0 id: 255 p1: 255 p2: -1 p3: -1 p4: -1
command #: 1 id: 16 p1: 0 p2: 10000 p3: -143229373 p4: -759979248
command #: 2 id: 16 p1: 0 p2: 10000 p3: -144665964 p4: -755859375
command #: 3 id: 16 p1: 0 p2: 10000 p3: -143176148 p4: -751052856
command #: 4 id: 16 p1: 0 p2: 10000 p3: -139527267 p4: -748168945
test]

 Autoscroll
Carriage return
38400 baud
  
```

Figura 4.15. Valores obtenidos de la prueba “waypoints”.

Los valores de “p2” corresponden a la altitud en metros multiplicada por 100, mientras que “p3” y “p4” son latitud y longitud multiplicada por 10’000,000. El comando número “0” es aquel llamado Home, sus valores serán aquel valor inicial registrado en la calibración del sistema previo al vuelo.

4.2.7. Pruebas de telemetría (XBee)

El control del UAV necesita contar con un sistema basado en telemetría tanto para medición remota de datos provenientes del aeromodelo como para el envío de información hacia éste. La prueba de telemetría se realiza para asegurar la conexión entre tierra y aeromodelo y su correcto funcionamiento. Esta prueba se

efectúa enviando una trama de un módulo XBee a su par correspondiente. Se seguirán los siguientes pasos:

- 1) Asegurarse que ambos XBee, el de tierra y el del UAV, posean el mismo ID y la misma velocidad de transmisión 115200, esto se verifica en el programa X-CTU de DIGI como se muestra en la Figura 4.17.

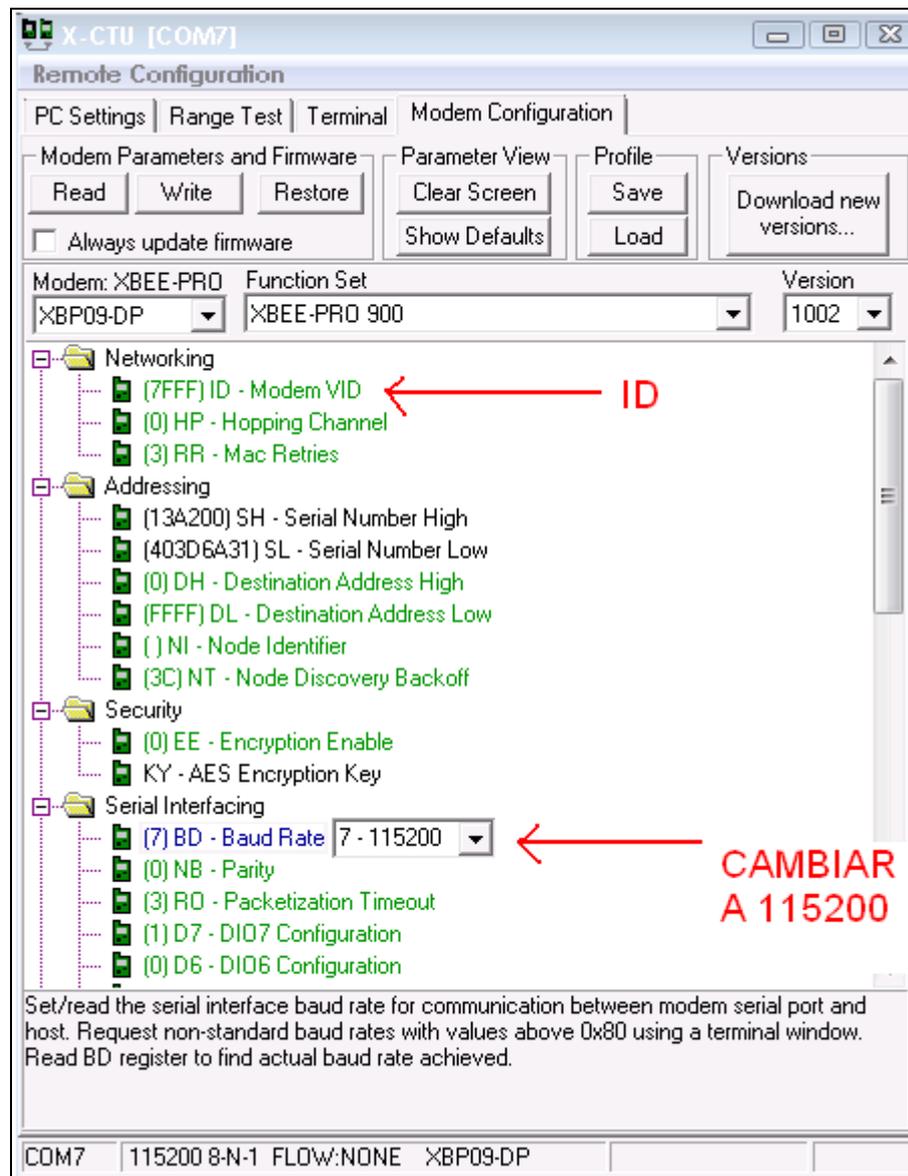


Figura 4.17. Verificación del ID y Velocidad de Transmisión del Módulo XBee

- 2) Conectar uno de los módulos XBee a la tarjeta del ArduPilot Mega, se llamará a éste: "XBee en aire".
- 3) Conectar el otro módulo XBee a otro puerto serial de la PC, con ayuda de un adaptador USB; al cuál se llamara "XBee en tierra".

- 4) Abrir el terminal en X-CTU, seleccionar el puerto serial correspondiente al XBee en tierra.
- 5) Ingresar el comando XBee en el CLI, eligiendo como puerto serial el correspondiente al APM conectado al XBee en el aire.

En la Figura 4.18 se muestra el resulta de una prueba de telemetría.

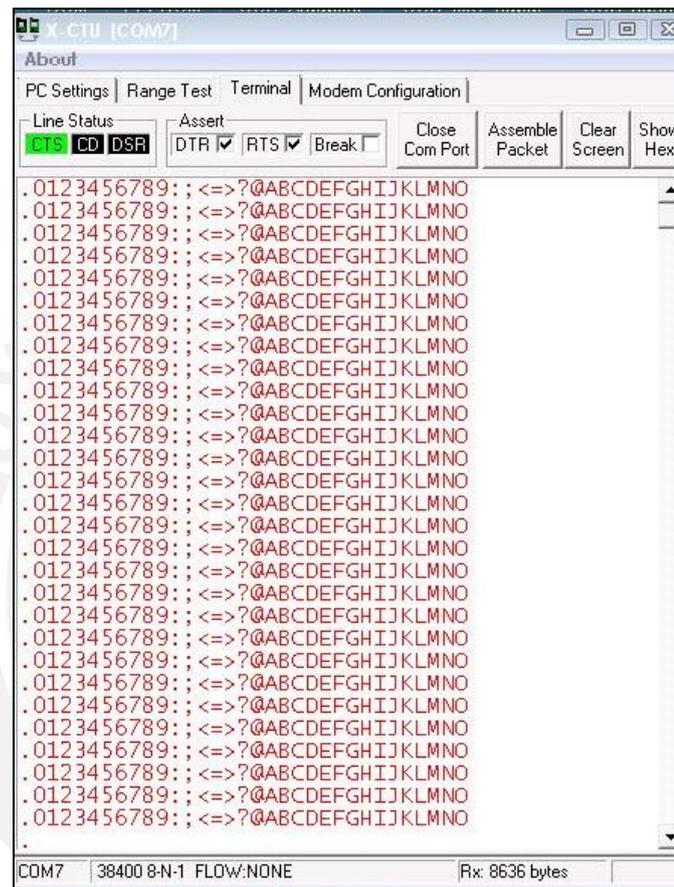


Figura 4.18. Recepción de datos del módulo XBee.

4.3. Pruebas de los modos de vuelo

4.3.1. Modo Manual

La aplicación del sistema UAV fue probado en modo manual cuyos resultados en vuelo fueron exitosos, obteniéndose los resultados esperados. La Figura 4.19 y 4.20 muestran la prueba de vuelo en modo manual.



Figura 4.19. Despegue manual del UAV usando sistema Ardupilot Mega



Figura 4.20. Vuelo manual del sistema UAV usando ArduPilot Mega

4.3.2. Modo Automático

Las pruebas en modo automático fueron simuladas con éxito con ayuda del programa X-Plane y ArduPilot Planner, debido a que trabajan en simultáneo. La Figura 4.21 muestra la preprogramación de los planes de vuelo, la figura 4.22 la configuración del X-Plane para la simulación mientras y finalmente la Figura 4.23 el entorno de simulación del vuelo en X-Plane.

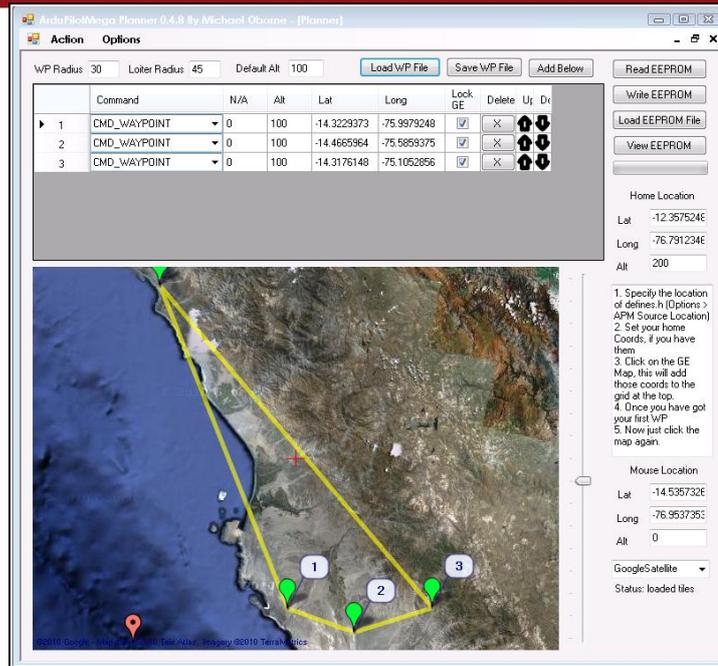


Figura 4.21. Preprogramación del plan de vuelo para la simulación

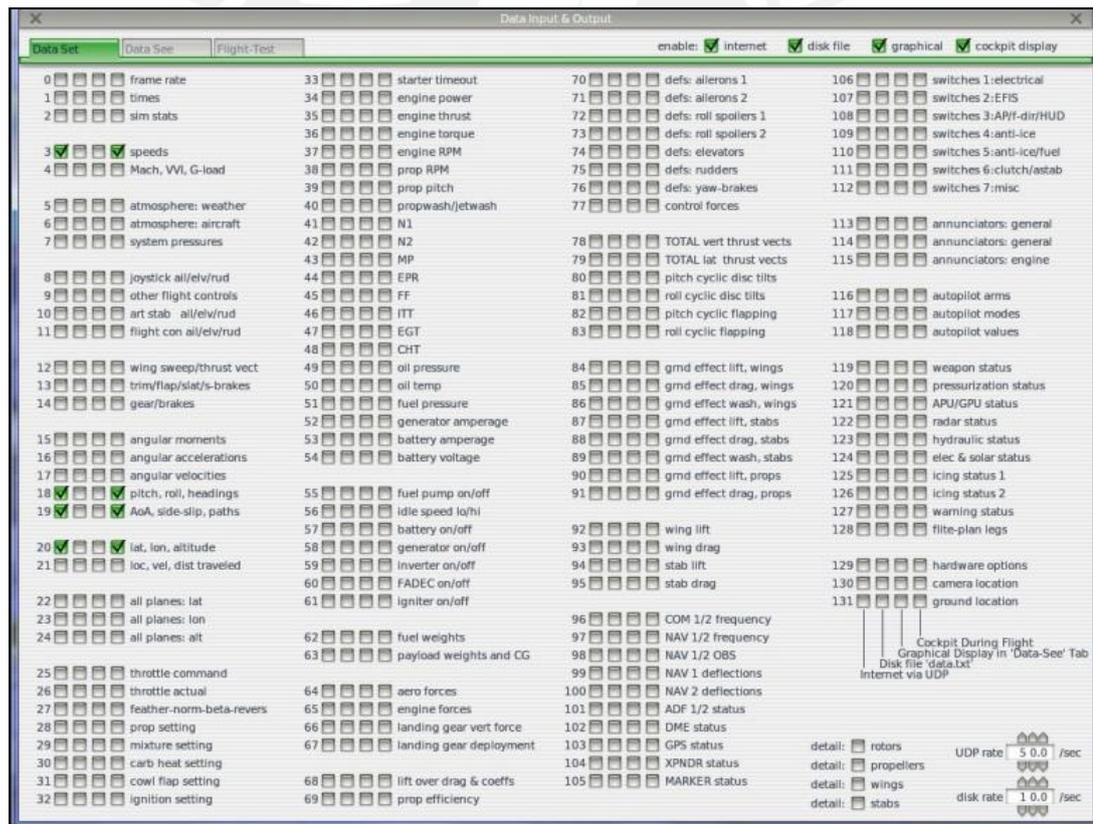


Figura 4.22. Configuración del Simulador X-Plane



Figura 4.23. Entorno de simulación X-Plane

4.3.3. Modo Estabilización

Las pruebas en modo de estabilización se realizan durante el vuelo manual, soltando los manubrios de accionamiento (joysticks) del RC. Pevio al vuelo se comprobó el correcto funcionamiento de este modo, donde al mover el aeromodelo en cualquier dirección se los servos buscan estabilizarlo a su posición horizontal.

Durante el vuelo, al realizar el cambio al modo estabilización se observa claramente la diferencia con el modo anterior manual, pues el aeromodelo comienza a seguir una trayectoria recta sin necesidad de emplear los manubrios de accionamiento del RC. Al ser uno de los objetivos del proyecto la toma de imágenes desde el aeromodelo, se garantiza la estabilización de este y por lo tanto las tomas serán tomadas con menores errores de rotación, obteniendo así menor número de imágenes descartadas.

4.3.4. Resultados de la recepción de datos del GCS del aeromodelo

Al realizar el cambio de modo de vuelo a través del switch de tres posiciones, configurado previamente para modo Manual, RTL y Auto en el transmisor RC, se registro en la GCS su correcta operación.

Los valores enviados por el GPS, se grafican en el GCS y corresponden a la posición del aeromodelo. Asimismo, se comprobó la correcta emisión de la data en vuelo de los sensores.

4.3.4. Resumen de Gastos Generales

Los gastos totales efectuados se resumen en la Tabla 4.1. mostrada a continuación, donde no sólo se aprecia el costo del equipo electrónico y software sino también el monto del transporte a zona de vuelos para las pruebas en aire.

Tabla 4.1. Resumen de Gastos Generales

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTO USD
1	EQUIPO ELECTRONICO	
1.1	ArduPilotMega - Arduino compatible con ATmega328	59
1.2	ArduIMU	159
1.3	uBlox GPS	85.9
1.4	Cable FTDI Oficial de Ardupilot	19.9
1.5	ArduStation ground/laptop side	57.3
1.6	XBee Pro 900 RPSMA WRL-09099	44.95
2	SOFTWARE	
2.1	X-Plane	29
3	TRANSPORTE A ZONA DE VUELOS	
3.1	Alquiler de Van	120
3.2	Combustible	60
COSTO TOTAL USD		635.05

CONCLUSIONES

- 1) La presente tesis presenta la aplicación práctica de la electrónica en los sistemas UAV con control automático en un equipo aéreo. Ésta opción es una mejor herramienta tecnológica para la agricultura de precisión respecto al sistema con radio control.
- 2) El presente estudio evalúa las diferentes alternativas tecnológicas de los fabricantes cuyos productos poseen las mismas características en hardware, siendo el software quién determina la mejor alternativa del sistema UAV.
- 3) El sistema UAV ArdupilotMega, brinda la mejor alternativa de edición del código del programa, simulación, compilación, interfaz gráfica(GCS) y control total del aeromodelo antes y durante el vuelo de trabajo.
- 4) Con pre programación de los planes de vuelo se puede visualizar la optimización de la trayectoria, con ella se demuestra la superioridad del sistema frente a los métodos convencionales de Radio Control.
- 5) En el presente estudio se empleó un sistema UAV Ardupilot Mega de bajo costo aproximadamente \$500, que lo hace accesible y competitivo frente a otros sistemas UAV comerciales (Micropilot, UAV Navigator, etc).
- 6) Se comprobó que mediante el modo estabilización se obtiene una trayectoria del aeromodelo recta y estable, lo que reduce los errores de rotación producidos en las imágenes registradas por el mismo y también reduce el número de imágenes desechadas por este motivo.

RECOMENDACIONES

- 1) Este sistema solo permite la utilización de 4 salidas de servos, y está diseñado especialmente para un aeromodelo básico con un aleron. En vista que la mayoría de aparatos UAV requieren el control para sus dos alerones, se recomienda en una futura tesis la modificación del código del programa.
- 2) El sistema puede ser fácilmente adaptado a un aeromodelo del tipo helicóptero; aún cuando, el manejo de este aparato requiere de mayor experiencia del aeromodelista sin embargo tiene la ventaja que no es necesario contar con una pista de aterrizaje, lo que beneficiaría al proyecto ya que su posicionamiento es más simple reduciendo el recorrido del aeromodelo. Además, permite su lanzamiento desde cualquier punto de los campos de cultivo.
- 3) Debido a que las pruebas y vuelos se realizan a intemperie, el empleo de laptop se ve dificultado por la autonomía de su batería y la falta de claridad de sus pantallas con luz de día; se recomienda emplear ArduStation, dispositivo electrónico portátil diseñado especialmente para estas aplicaciones.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Grahame-White y H. Harper Claude, *The airplane*. Londres, Inglaterra: T.C. & E.C. Jack, 1914.
- [2] Real Academia de la Lengua Española, *Diccionario de la Lengua Española*, 22ava Edición, España, 2001
- [3] A. Ollero e I. Maza, *Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles*, vol. 37. Berlin Heidelberg: Springer Tracts in advanced Robotics, 2007.
- [4] R. Bangiovanni, E. Chartuni, S. Best y A. Roel, *Agricultura de Precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna*. PROCISUR/IICA, 2006.
- [5] F. Sabins, *Remote Sensing: principles and interpretation*, 3era Edición. New York: W.H. Freeman, 1997.
- [6] (16 Febrero, 2010). "Utilizan aeronaves a control remoto para predicción de cosechas y tomas fotográficas de cultivos", ANDINA: Agencia peruana de noticias [en línea]. Disponible en:
<<http://www.andina.com.pe/Espanol/Noticia.aspx?id=CHSQjrNz6+U=>>
[Consultado el 06/10/2010].
- [7] OSD UAV Roadmap, *Office of the Secretary of Defense (Acquisition, Technology, & Logistics)*. Air Warfare, 2002.
- [8] K. Valavanis, *Advances in Unmanned Aerial Vehicles. State of the Art and the Road to Autonomy*, vol. 33. Florida, USA: Springer, 2007
- [9] M. Estruch, *Topografía para minería subterránea*, Barcelona, España: Universidad Politecnica de Cataluña (UPC) Ediciones, 2002
- [10] A. Ollero, *Robótica: Manipuladores y robots móviles*. Barcelona, España: Marcombo Boixareu Editores, 2001

- [11] M. Faerna. (2009). "Giroscopios MEMS de uno y dos ejes", Noticias IT [en línea]. Disponible en:
< <http://noticiasit.tincan.es/giroscopios-mems-de-uno-y-dos-ejes/>>
[Consultado el 01/11/2010]
- [12] E. Carletti. (2009), "Sensores-Acelerómetros, sensores de vibración: Descripción y funcionamiento", Robots Argentina [en línea]. Disponible en:
< http://robots-argentina.com.ar/Sensores_acelerometros.htm>
[Consultado el 01/11/2010]
- [13] U. Nicolini. (2010), "Tecnología detrás de giróscopos y acelerómetros", Aero Club Tornquist [en línea]. Disponible en: [Consultado el 01/11/2010]
< http://aerotornquist.blogspot.com/2010_08_01_archive.html>
[Consultado el 01/11/2010]
- [14] P. Floría, *Gestión de la Higiene Industrial en la Empresa*, 7ma Edición. Madrid, España: Editorial Fundación Confemetal, 2007
- [15] L. Letham, *GPS fácil: Uso del Sistema de Posicionamiento Global*. Barcelona, España: Editorial Paidotrivo, 2001
- [16] K. Valavanis, *Unmanned Aircraft Systems: International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles, UAV '08*, vol. 54. Florida, USA: Springer, 2009
- [17] X-Robotics. (2010) "Servos" [en línea]. Disponible en:
< <http://www.x-robotics.com/motorizacion.htm>>
[Consultado el 16/11/2010]
- [18] Paparazzi Project, Enac University Toulouse, France. (2010). "System Overview: General Overview of the Paparazzi System" [en línea]. Disponible en: < <http://paparazzi.enac.fr/wiki/Overview>>
[Consultado el 02/04/2010]
- [19] ArduPilot Mega (2010). "Project Home" [en línea] Disponible en:
< <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/>>
[Consultado el 10/06/2010]

- [20] UAV Navigation. (2009). “Unmanned products” [en línea]. Disponible en:
<http://www.uavnavigation.com/uavprod/uavprod_03.htm>
[Consultado el 02/04/2010]
- [21] Micropilot. Manitoba, Canada (2010). “About US” [en línea]. Disponible en:
<<http://www.micropilot.com/about.htm>>
[Consultado el 02/04/2010]
- [22] Micropilot. Manitoba, Canada (2010). “MP2128HELI Versatile Helicopter Control” [en línea]. Disponible en:
<<http://www.micropilot.com/products-mp2128heli.htm>>
[Consultado el 02/04/2010]
- [23] Micropilot. Manitoba, Canada (2010). “MP2128G Small Size Big Possibilities” [en línea]. Disponible en:
<<http://www.micropilot.com/products-mp2128g.htm>>
[Consultado el 02/04/2010]
- [24] Gentlenav. (2010). “Gentlenav: MatrixPilot” [en línea]. Disponible en:
<<http://code.google.com/p/gentlenav/wiki/MatrixPilot>>
[Consultado el 02/04/2010]
- [25] Procerus Technologies. (2010). “Kestrel Autopilot” [en línea]. Disponible en:
<<http://www.procerusuav.com/productsKestrelAutopilot.php>>
[Consultado el 22/11/2010]
- [26] UAV, LLC. Washington, USA (2010). “3500sUAS Autopilot” [en línea]. Disponible en:
<<http://www.u-nav.com/3500fw.html>>
[Consultado el 22/11/2010]
- [27] R. Jazar, *Theory of applied robotics: Kinematics, Dynamics and Control*. New York, USA: Springer, 2010.
- [28] ArduStation. (2010). “Arduino Ground Station for ArduPilot systems” [en línea]. Disponible en:
<<http://code.google.com/p/ardu-station/>>

[Consultado el 22/11/2010]

[29] Arduino (2010) “Home Page” [en línea]. Disponible en:

<<http://www.arduino.cc/es/>>

[Consultado el 24/11/2010]



ANEXOS

Anexo 1: Manual de ArduPilot Mega

Anexo 2: Manual de ArduStation

Anexo 3: Código completo del sistema ArduPilot Mega

Anexo 4: Hoja de datos técnicos de Giroscopio XY: InvenSense IDG 500

Anexo 5: Hoja de datos técnicos de Giroscopio Z: InvenSense ISZ 500

Anexo 6: Hoja de datos técnicos de Acelerómetro de tres ejes: ADXL335

Anexo 7: Hoja de datos técnicos: Sensor de Presión Absoluta Bosch: BMP085

Anexo 8: Hoja de datos técnicos del XBee-Pro 900

Anexo 9: Hoja de datos técnicos del GPS: GS407 U-Blox5 GPS 4Hz