

CONTROL DE ELEVACIÓN PARA CUADRICÓPTERO USANDO UN CELULAR INTELIGENTE

Pedro Luis Muñoz Murillo

pedro.munoz@correounivalle.edu.co



UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
Santiago de Cali
2017

CONTROL DE ELEVACIÓN PARA CUADRICÓPTERO USANDO UN CELULAR INTELIGENTE

Pedro Luis Muñoz Murillo
pedro.munoz@correounivalle.edu.co

Trabajo de grado dirigido al programa de Ingeniería
Electrónica

Director
Esteban Emilio Rosero

UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
Santiago de Cali
2017

Agradecimientos

Con este trabajo se encierra el final de una etapa de formación profesional y no la última, llena de aprendizaje constante, tanto personal como académico y que mejor manera de hacerlo que con la sensación indescriptible de ver literalmente volando un trabajo con el que has aprendido y aplicado conocimiento, con el que pasaste momentos de frustración pero opacados por los momentos satisfacción al ver funcionar algo salido de tu propio esfuerzo. Agradezco primeramente a Dios y a mis padres Yolanda y Pedro y al resto de mi familia por apoyarme en el transcurso de mi carrera, a mis compañeros y por siempre amigos por estar conmigo en tantos momentos dentro y fuera de la universidad, a Fredy por estar el transcurso de este trabajo apoyándonos en lo que fuera posible y en pruebas un poco “riesgosas”, a Mateo y Gustavo por aportar su granito de arena y locura en los momentos que alcanzamos a compartir. Agradezco a Alejandro Astudillo por aportar grandes ideas para culminación exitosa de este proyecto y por el tiempo dedicado a aportar y mejorar lo que fuera posible, al igual que agradezco mi director Esteban Rosero por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto y por los aportes realizados.

Resumen

En los últimos años, la creciente expansión de la telefonía móvil, ha hecho que los teléfonos celulares sean parte de la vida diaria de las personas. Adicionalmente, el gran desarrollo que estos equipos de comunicación han tenido en sus características hardware y software, extienden su uso para otras aplicaciones, incluso convirtiéndolos en herramientas de trabajo de gran utilidad en el día a día. Esta característica ha hecho que estos equipos de comunicación adquieran el nombre de celulares inteligentes.

Este trabajo se direcciona en un problema principal: utilizar las características hardware de procesamiento, sensado y comunicación de los equipos celulares inteligentes, para realizar el control de elevación de un cuadricóptero. Se realiza inicialmente un estudio de las características para adquisición de señales en equipos celulares. Se analizan las dinámicas de vuelo y el modelo del sistema para comprender el comportamiento del cuadricóptero y de las condiciones que deben cumplirse para generar un vuelo. Posteriormente, se realiza la integración del celular con el hardware del cuadricóptero y se diseñan las leyes de control para estabilización de postura y elevación. Por último, la validación de los resultados obtenidos en la elevación en cuanto a sostenimiento de vuelo en una referencia inicial, seguimiento en cambio de referencias y respuesta a disturbios.

Palabras clave: cuadricóptero, control, mando, elevación, empuje, postura, android, filtro, estimación.

Abstract

In recent years, the growing expansion of mobile telephony, has made cell phones part of people's daily lives. In addition, the great development that these communication equipment have had in their hardware and software features, extend their use for other applications, even turning them into work tools of great utility in the day by day. this characteristic makes these communication equipment to acquire the name of smartphones.

This work addresses a main problem: using the hardware features of processing, sensing and communication of intelligent cellular equipment, to perform the control of elevation of a quadcopter. Initially a study of the characteristics for signal acquisition in cellular equipment is carried out. The flight dynamics and system model are analyzed to understand the behavior of the quadcopter and the conditions that must be fulfilled to generate a flight. Subsequently, the integration of the cell phone with the quadcopter's frame is realized and the control laws are designed for stabilization of posture and elevation. Finally, the validation of the results obtained in the elevation in terms of sustaining a flight in an initial reference, change of references and response to disturbances.

Keywords: quadcopter, control, command, elevation, thrust, attitude, android, filter, estimation.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Abstract	III
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos del trabajo de grado	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
2. Descripción del cuadricóptero	5
2.1. Qué es un cuadricóptero	5
2.2. Dinámica de sustentación	6
2.3. Configuraciones básicas de los cuadricópteros	7
2.4. Dinámica de vuelo	7
2.4.1. Dinámica de vuelo configuración “+”	8
2.4.2. Dinámica de vuelo configuración “x”	10
2.5. Modelado teórico	11
2.5.1. Representación en variables de estado	14
2.5.2. Modelo lineal	14
2.6. Conclusiones	15
3. Teléfonos inteligentes	16
3.1. Sistema operativos	16
3.1.1. Android	17
3.1.2. iOS	17
3.1.3. Windows Phone	17
3.2. Capacidad de sensado	18
3.2.1. Sensores de movimiento	18
3.2.2. Sensores ambientales	19
3.2.3. Sensores de posición	20

3.3. Comunicación	21
3.3.1. Bluetooth	21
3.3.2. WiFi	22
3.3.3. WiFi P2P	22
3.3.4. Red móvil	22
3.3.5. NFC	23
3.3.6. USB	23
3.4. Celular como controlador de vuelo	24
3.5. Conclusión	24
4. Implementación del control de elevación del cuadricoptero	25
4.1. Diagrama general del sistema implementado	25
4.2. Descripción del hardware	27
4.2.1. Frame	28
4.2.2. Motores brushless	28
4.2.3. Controlador Electrónico de velocidad: ESC	29
4.2.4. Batería tipo LiPo	30
4.2.5. Hélices	31
4.2.6. Arduino Mega ADK	32
4.2.7. Celular LG Nexus 4	32
4.2.8. Parámetros mecánicos del cuadricóptero	33
4.3. Descripción general del sistema implementado	34
4.4. Funcionamiento general del sistema	35
4.5. Conclusiones	37
5. Control del cuadricóptero usando un teléfono inteligente	38
5.1. Caracterización de los motores	38
5.2. Selección del tiempo de muestreo	40
5.3. Estimación de altura mediante fusión sensorial	41
5.4. Diseño del controlador	43
5.5. Control del cuadricóptero	44
5.5.1. Control de postura: ángulos yaw, pitch y roll	45
5.5.2. Control de posición	46
5.5.3. Control de elevación	46
5.5.4. Control general del sistema	47
5.6. Simulación en MatLab	48
5.6.1. Control general del sistema	49
5.6.2. Control de postura	50
5.6.3. Control de elevación	54
5.7. Conclusiones	57

6. Implementación de las aplicaciones para el control de elevación	58
6.1. Descripción de las aplicaciones para el control, mando, comunicación y monitorización	58
6.2. Desarrollo de las aplicaciones de control y cliente	60
6.2.1. Aplicación de control	60
6.2.2. Aplicación cliente	63
6.3. Conclusiones	65
7. Validación y pruebas de las aplicaciones desarrolladas	66
7.1. Plataforma de pruebas	66
7.2. Verificación del tiempo de muestreo	67
7.3. Estimación de altura y velocidad	68
7.4. Controladores de postura: <i>yaw, pitch y roll</i>	69
7.4.1. Parámetros de los controladores	70
7.4.2. Respuesta a disturbios	71
7.5. Control de elevación	75
7.5.1. Parámetros de los controladores	76
7.5.2. Prueba de estabilización en elevación	76
7.5.3. Respuesta al escalón	78
7.5.4. Respuesta a disturbios	79
7.6. Sistema final implementado	81
7.7. Conclusiones	82
Conclusiones	83
Trabajos futuros	85
Publicaciones	86
A. Balanceo de hélices	87

Índice de figuras

2.1. Cuadricóptero	6
2.2. Configuraciones básicas	7
2.3. Sistema de coordenadas y descripción de ángulos de rotación	8
2.4. Ejes en la configuración “+”	9
2.5. Dinámica de vuelo configuración “+”	9
2.6. Ejes en la configuración “x”	10
2.7. Dinámica de vuelo configuración “x”	10
2.8. Marcos de referencia del cuadricóptero	12
4.1. Diagrama general de los componentes del sistema	27
4.2. Diagrama general del sistema	27
4.3. Frame implementado: S500	28
4.4. Motor Brushless 2212 de 920 KV	29
4.5. ESC Simonk de 30A	30
4.6. Batería LiPo 4500mAh 30C	31
4.7. hélices 1045 CCW/CW 254x114MM	31
4.8. Arduino Mega ADK	32
4.9. Celular LG Nexus 4	33
4.10. Descripción general del sistema implementado	34
4.11. Descripción general del Equipo controlador - Equipo base	36
4.12. Interfaz con los variadores de velocidad	36
5.1. Medición del empuje generado	39
5.2. Relación empuje - ancho de pulso	39
5.3. Variación del tiempo de lectura de sensores en el celular	40
5.4. Diagrama de control general en lazo cerrado	45
5.5. Control en cascada postura	45
5.6. Acción de los motores con los controles de postura	46
5.7. Control de elevación	47
5.8. Diagrama de control general del cuadricóptero	48
5.9. Integración de las correcciones de control	49
5.10. Esquema de control general en simulación	49
5.11. Esquema para sintonización de controladores	50

5.12. Respuesta deseada para los ángulos <i>yaw, pitch y roll</i>	51
5.13. Respuesta a disturbios ángulo <i>yaw</i>	52
5.14. Respuesta velocidad angular <i>yaw</i>	52
5.15. Respuesta a disturbios ángulo <i>pitch</i>	52
5.16. Respuesta velocidad angular <i>pitch</i>	53
5.17. Respuesta a disturbios ángulo <i>roll</i>	53
5.18. Respuesta velocidad angular <i>roll</i>	53
5.19. Respuesta deseada en elevación	54
5.20. Respuesta al escalón en elevación	55
5.21. Respuesta de la velocidad de elevación	56
5.22. Respuesta ante disturbios en elevación	56
5.23. Respuesta de la velocidad ante disturbios en elevación	57
6.1. Diagrama de navegación aplicación de control	60
6.2. Diagrama de navegación aplicación cliente	61
6.3. Pantallas de inicio	62
6.4. Interfaz de la aplicación de control	62
6.5. Interfaz de mando y monitoreo	63
6.6. Interfaz cliente: pestaña PID	64
7.1. Plataforma de pruebas	67
7.2. Variación del tiempo de muestreo	67
7.3. Estimación de altura y velocidad con filtro Kalman	69
7.4. Respuesta a disturbio ángulo <i>yaw</i>	71
7.5. Respuesta del control de velocidad angular <i>yaw</i>	72
7.6. Respuesta a disturbio ángulo <i>pitch</i>	73
7.7. Respuesta del control de velocidad angular <i>pitch</i>	73
7.8. Respuesta a disturbio ángulo <i>roll</i>	74
7.9. Respuesta del control de velocidad angular <i>roll</i>	74
7.10. Señales de control en cada motor	75
7.11. Elevación a 1,7 m	77
7.12. Control de velocidad durante el vuelo	77
7.13. Respuesta al escalón en elevación	78
7.14. Respuesta del control de velocidad de elevación	79
7.15. Prueba a disturbio en elevación	80
7.16. Respuesta control de velocidad a disturbios	80
7.17. Implementación cuadricóptero - celular	81
7.18. Posicionamiento del celular sobre el cuadricóptero	81
7.19. Pruebas de vuelo	82
A.1. Hélice sin balancear	87
A.2. Balanceador de hélices	87
A.3. Hélice balanceada	88

Índice de tablas

3.1. Participación en el mercado de los SO móviles	17
4.1. Especificaciones frame S500	28
4.2. Especificaciones del celular LG Nexus 4	33
4.3. Parámetros mecánicos del cuadricóptero	34
5.1. Proceso del filtro Kalman	41
5.2. Ganancias controladores de velocidad angular en simulación	51
5.3. Ganancias controladores de Posición angular en simulación	51
5.4. Ganancias controladores de elevación simulación	55
7.1. Ganancias controladores de velocidad angular	70
7.2. Ganancias controladores de Posición angular	70
7.3. Ganancias controladores de elevación	76

Capítulo 1

Introducción

Actualmente, los equipos celulares han tenido una gran acogida a nivel mundial y en los últimos años, incluso equipos de gama media están dotados de características como: diferentes modos de comunicación (Wifi, bluetooth, USB), sistemas de posicionamiento satelital GNSS, diversidad de sensores, cámaras de alta resolución, mayor capacidad de memoria y gran capacidad de procesamiento informático, brindando al usuario una gran experiencia en el manejo de aplicaciones. Por otro lado, las licencias de código abierto, han permitido a terceros manipular estas características, propiciando que estos equipos se conviertan en sistemas de desarrollo versátiles para adecuarlos a muchas necesidades.

Ahora, otro tema de gran interés en la actualidad, es el estudio de los sistemas de vuelo no tripulados basados en cuadricópteros [1][2]. En donde las aplicaciones de estos equipos, incluyen búsqueda y rescate en situaciones de desastre [3][4][5][6]. Donde abarcar la mayor distancia de búsqueda, en el menor tiempo posible, puede significar la diferencia entre la vida y la muerte de una persona. Y donde un cuadricóptero con la capacidad de transportar diferentes tipos de cámaras y sensores, puede ser de gran utilidad, alertando sobre la ubicación de los sobrevivientes. También, el transporte de mercancía [7][8][9], proyecta una gran ventaja a causa de la disminución de tiempos de entrega y acceso a lugares remotos, donde el transito a vehículos se dificulta. Y además, debido a los diferentes tamaños, donde se aumenta el empuje del cuadricóptero y por ende la capacidad de carga del mismo, se visualiza incluso el transporte de personas [10]. La estabilidad lograda con los cuadricópteros, lo hace apto para la toma de fotografía aérea, cuya perspectiva de visión permite el estudio y por ende la correcta toma de decisiones cuando se trata de trabajar en terrenos para cultivo, áreas de bosque, áreas urbanas, etc [11][12][13].

Los helicópteros comúnmente conocidos, son sistemas de vuelo que utilizan dos rotores para la propulsión, estabilización y direccionamiento. Para los helicópteros con más de dos rotores se utiliza el término multirotor, incluyendo los sistemas tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros y octacópteros.

Desde 1902 se iniciaron las pruebas con helicópteros de cuatro rotores, con el diseño presentado por el francés Louis Breguet realizando una elevación de unos pocos pies [14], para posteriormente realizar otras pruebas y diseños. Uno de los problemas presentados en los comienzos y en la actualidad de los cuadricópteros, radica en que los cuatro rotores de un cuadricóptero son ligeramente diferentes unos de otros. Por lo que producir la suficiente propulsión, simplemente inyectando la misma velocidad a los 4 rotores, no produce un vuelo estable. Debido a esto, los cuadricópteros deben ser constantemente estabilizados y en ausencia de computadoras, toda la carga de control significativamente grande, recaía sobre el piloto. Como resultado de esta deficiencia, la investigación sobre cuadricópteros tuvo un gran freno y se centró el trabajo en los diseños de doble rotor.

Con la aparición de la microelectrónica, el crecimiento en el estudio de motores eléctricos y baterías de mayor capacidad, en las últimas décadas se hace posible el diseño y construcción de multirotores fiables y eficientes, de estructuras mecánicas más simples en comparación con los helicópteros de dos rotores. Donde pequeñas computadoras a bordo de los multirotores, permiten corregir la inestabilidad del sistema, trabajando sobre cada motor independientemente [15].

En los últimos años los multirotores, se han vuelto muy populares como dispositivos personales principalmente para la toma de fotografías aéreas. Actualmente, con el aumento de la tecnología, ésta se ha ido integrando a los multirotores surgiendo una serie de interesantes aplicaciones [16], por ejemplo: fotografía inmobiliaria, inspección de aviones, misiones de búsqueda rescate, prevención de enfermedades, exploración de lagos de lava, vigilancia, construcción y topografía, minería, entrega de alimentos y productos, noticias y deportes [17][18].

Un tema creciente entre la sociedad es la utilización de los celulares inteligentes y la diversificación de sus aplicaciones, involucrando un amplio rango de utilidades (llamadas, mensajes, aplicaciones multimedia, internet móvil, juegos, visión artificial, etc.). En la búsqueda de extender las aplicaciones de la tecnología actual y el auge de la domótica como medio para conseguir una vivienda inteligente, en cuanto a seguridad, confort y ahorro energético se introduce a los celulares como medio de supervisión y mando [19][20]. Google incursiona en mundo de la visión artificial móvil y la robótica por medio del proyecto Tango, desarrollando un dispositivo y software con amplias capacidades de procesamiento y adquisición de variables [21][22].

Adentrándose en el mundo de los cuadricópteros, diferentes empresas fabricantes de los mismos proveen diversas aplicaciones para reemplazar el mando ejercido mediante los controles RC, por celulares inteligentes o tabletas. Estas aplicaciones permiten utilizar las capacidades de comunicación y de visualización de estos dispositivos para ejercer el mando de sus multirotores [23]. En 2013 se crea el proyecto FLONE, *the flying phone* en el marco del concurso NEXT THINGS 2013 - NEXT SPACE [24], por medio de un equipo interdisciplinario, obteniendo como resultado el diseño completo de la estructura del marco del cuadricóptero y el control

de variables por un celular a bordo. Adicionalmente de la posibilidad de ser comandado por comunicación RC o desde otro celular [25]. En 2015 en un proyecto colaborativo entre Qualcomm y un equipo de investigadores de la Universidad de Pensilvania, desarrollaron un cuadricóptero controlado por algoritmos de control y visión, corriendo completamente mediante el hardware de un celular inteligente [26]. La empresa XCRAFT lanza en 2016 el cuadricóptero comercial *phonedrone ethos*. Este consiste de una estructura que permite alojar un celular con sistema operativo Android o un iPhone y aprovechar sus características hardware para convertir al celular, en una cámara autónoma aérea [27]. Esto abre paso a la utilización de los celulares inteligentes en otras áreas de la electrónica como el control inteligente, aprovechando las características hardware y software incluidos en los mismos.

1.1. Planteamiento del problema

¿Cómo mantener la elevación de un cuadricóptero usando como controlador un teléfono inteligente?

1.2. Justificación

Como se menciona anteriormente, los equipos celulares actuales están provistos de interesantes capacidades en cuanto a protocolos de comunicación, adquisición de variables, memoria y procesamiento informático. Los actuales procesadores incluidos en los celulares inteligentes, vienen optimizados para trabajar con un amplio contenido multimedia como: video, imágenes y sonido; tareas que requieren gran capacidad de cálculo. Luego, toda esta capacidad puede ser utilizada para cálculos complejos, como los requeridos para implementar algoritmos asociados a las leyes de control, con el fin de operar dinámicas de acción mecánica.

Con todas las herramientas tecnológicas antes mencionadas, disponibles e integradas en un solo dispositivo, se aumenta la fiabilidad del sistema en conjunto y se reduce el tiempo para adecuación de señales, lo que puede disminuir el costo global de una implementación compleja, como sería la integración de un cuadricóptero con un teléfono celular inteligente, que a su vez son de fácil adquisición en el mercado.

Ahora, otro motivo para usar un teléfono inteligente para realizar tareas de control, es apropiarse sobre el conocimiento y el uso de estas tecnologías y sentar una base para el desarrollo de aplicaciones que vean a estos equipos celulares como un sistema de desarrollo de gran versatilidad, para aplicaciones que incorporen sistemas de control, comunicación y visualización. O incluso, llegar a extender las capacidades de sistemas ya desarrolladas, al contar con todas estas características a disposición.

1.3. Objetivos del trabajo de grado

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar, en un teléfono celular inteligente, una estrategia para controlar la elevación de un cuadricóptero.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar un teléfono celular inteligente para implementar el sistema.
2. Desarrollar una aplicación para leer y procesar la información de los sensores del teléfono celular inteligente.
3. Definir y establecer el sistema de comunicación apropiado entre el teléfono celular inteligente y el cuadricóptero.
4. Diseñar o implementar un sistema para controlar el giro de los motores.
5. Analizar las dinámicas del cuadricóptero para controlar la elevación.
6. Diseñar e implementar una estrategia de control de elevación sobre un teléfono celular.
7. Validar la estabilidad de elevación del cuadricóptero.

Para cumplir con los objetivos propuestos, el proyecto se divide en tres etapas principales: estudio e investigación de las partes involucradas, adaptación hardware y desarrollo de los software, y por último, la validación y pruebas de los resultados. El capítulo 2, realiza un estudio de las principales dinámicas de vuelo de los cuadricópteros y modelado. En el capítulo 3, presenta un estudio de los celulares inteligentes en cuanto a sistemas operativos, capacidad de sensado y módulos de comunicación. Los capítulos 4 y 6 exponen el sistema general implementado y los software desarrollados para los dispositivos celulares respectivamente. En el capítulo 5 se presenta las simulaciones y esquemas de control para estabilización de postura y altura. Por ultimo el capitulo 7 trata la validación y las pruebas de las aplicaciones desarrolladas y los resultados finales obtenidos.

Capítulo 2

Descripción del cuadricóptero

El crecimiento en el estudio de la robótica ha buscado diversas maneras de diversificarse, pasando por diferentes áreas de investigación hasta llegar a incluir una rama que se ha hecho popular en los últimos años: los vehículos aéreos no tripulados. Estos permitieron dejar al equipo humano de control en tierra, mientras cumplían tareas de reconocimiento en situaciones de alto riesgo. Originalmente se hizo uso de aeronaves de ala fija, necesitando de amplias zonas para el aterrizaje y despegue de los mismos, además del mayor costo de estos equipos. Con el renaciente surgimiento de los sistemas cuadricópteros se abre un campo de estudio para aplicación de éstos en la robótica, obteniendo sistemas vuelo de simple construcción y adquisición para cualquier tipo de investigador.

Este capítulo consta de 5 secciones, en donde la sección 2.1 brinda una definición de cuadricóptero. Las secciones 2.2 a 2.4 exponen la dinámica de sustentación, las configuraciones básicas, los principales conceptos relacionados con el movimiento y las dinámicas de vuelo del cuadricóptero para estudiar de una manera puntual las condiciones que deben cumplirse para lograr la elevación y direccionamiento del mismo. En la sección 2.5 se estudia el modelado teórico del cuadricóptero en donde se presentan las variables físicas involucradas en la dinámica de control de sistema.

2.1. Qué es un cuadricóptero

Un cuadricóptero, también llamado helicóptero cuadirrotor o cuadrotor, es un sistema multirrotor que es elevado y propulsado por cuatro rotores, un par girando en sentido horario y el otro en sentido anti-horario. Estos son clasificados como helicópteros debido a que su elevación es generada por el conjunto de rotores verticalmente orientados como se observa en la Figura 2.1. Con lo que a su vez, tienen la gran ventaja con respecto a las aeronaves de ala fija de permanecer inmóviles suspendidos en el aire.



Figura 2.1: Cuadricóptero

Los cuadricópteros han tenido gran acogida en muchas universidades, puesto a que son herramientas de desarrollo muy versátiles. Esto, debido a que son plataformas relativamente económicas, de diversidad de tamaños (de acuerdo a la aplicación) y cuentan con una estructura mecánica simple para construir y mantener. Los cuadricópteros son útiles en campos de investigación como teoría de control, navegación, sistemas de tiempo real y robótica.

También, los cuadricópteros como vehículos aéreos no tripulados son usados por agencias militares y gubernamentales para misiones de vigilancia y reconocimiento, así como para situaciones de búsqueda y rescate.

Actualmente, debido a su sencillez de maniobrabilidad han tenido auge en el sector comercial y en gran parte en el campo de la fotografía aérea, donde expertos y aficionados pueden acceder a cuadricópteros de diferentes gamas.

2.2. Dinámica de sustentación

El principio de sustentación del cuadricóptero se basa en crear una fuerza de empuje contraria a la gravedad, mediante el uso de sus cuatro rotores con sus hélices acopladas.

Pero una vez en el aire, si todas las hélices giran en la misma dirección el torque total que se produce es suficiente para hacer que el cuadricóptero gire de forma descontrolada. Para compensar este efecto y hacer que el sistema tenga un vuelo estable y sin giros aleatorios, dos de los rotores giran en sentido horario y los dos restantes en sentido anti horario. Esto para conseguir que los torques generados por los motores se contrarresten como se muestra en la Figura 2.2.

¹Figura tomada de <http://ardupilot.org/copter/docs/connect-escs-and-motors.html>

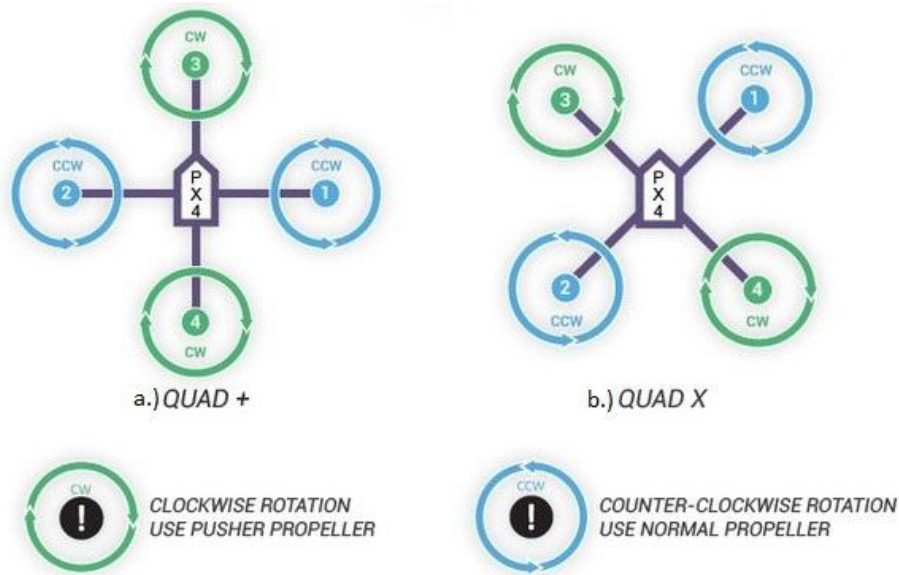


Figura 2.2: a.) Configuración + b.) Configuración x ¹

2.3. Configuraciones básicas de los cuadricópteros

Se disponen de dos configuraciones básicas para realizar la elevación del cuadricóptero: configuración en “x” y configuración en “+”. Como se muestra en la Figura 2.2 a. y 2.2 b. respectivamente, en la configuración en “+” el marco se dispone en forma de mas (+) con la trayectoria y en la configuración en “x” el marco del cuadricóptero forma una equis (X) con la trayectoria del movimiento.

2.4. Dinámica de vuelo

La postura de los cuadricópteros y en general de las aeronaves está definida por tres movimientos de rotación en relación a un eje fijo de coordenadas x, y, z. La Figura 2.3 representa el sistema de coordenadas utilizado en este documento.

Estos ángulos de rotación o ángulos de Euler se conocen en navegación (y para una mejor comprensión de este documento) como:

- **Guiñada** (en inglés *yaw*) Ψ , un ángulo de rotación sobre el eje z.
- **Cabeceo** (en inglés *pitch*) Θ , representa un movimiento de rotación sobre el eje y.
- **Alabeo** (en inglés *roll*) Φ , representa una rotación sobre el eje x.

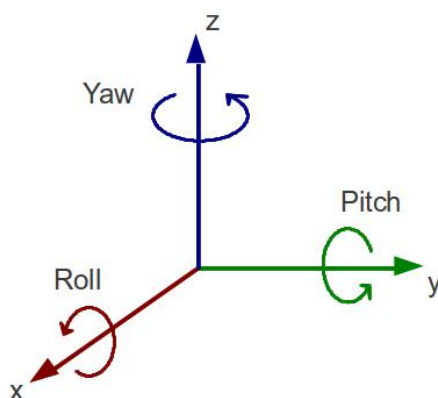


Figura 2.3: Sistema de coordenadas y descripción de ángulos de rotación ²

La manipulación de estos ángulos de rotación tiene como resultado la modificación del desplazamiento del cuadricóptero en el espacio, es decir, una variación del ángulo *pitch* provoca un desplazamiento en el eje x. De manera similar, un cambio en el ángulo *roll* causa que el cuadricóptero se desplace sobre el eje y. Y modificar el ángulo *yaw*, se está causando una rotación del sistema sobre sí mismo y por ende, la dirección de desplazamiento.

La variación de los ángulos de rotación del cuadricóptero se logra modificando la velocidad de giro y por ende el empuje de uno o más motores, dependiendo de la configuración del marco.

2.4.1. Dinámica de vuelo configuración “+”

Como se visualiza en la Figura 2.4, en la configuración “+” cada par de motores forma un eje paralelo con la dirección del desplazamiento. Por lo que para generar una rotación sobre cada eje basta con variar la velocidad del par de motores del eje perpendicular.

La Figura 2.5 detalla la variación de velocidad en cada motor para lograr un desplazamiento del cuadricóptero.

En esta configuración, para lograr un desplazamiento sobre el eje *x* (rotación del ángulo *pitch*) hacia adelante o hacia atrás se aumenta o disminuye la velocidad de los motores 3 y 4, mientras los motores 1 y 2 permanecen constantes. Al cambiar la velocidad de los motores 1 y 2, manteniendo a 3 y 4 constantes, se genera un cambio del ángulo *roll* que provoca los movimientos hacia la derecha e

²Figura tomada de http://doc.aldebaran.com/2-1/family/nao_t2/joints.t2.html

³Figura tomada de <http://controlaplicado.blogspot.com.co/2015/10/concepto-preliminares-de-vuelos.html>

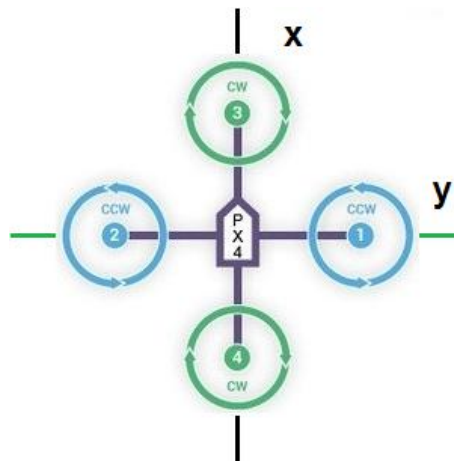
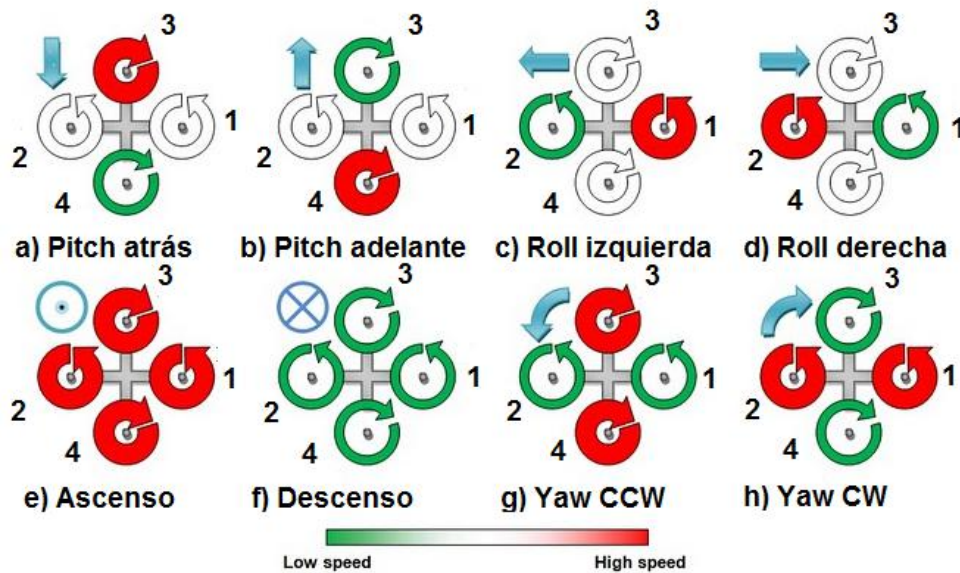


Figura 2.4: Ejes en la configuración “+”

Figura 2.5: Dinámica de vuelo configuración “+”³

izquierda (eje y) del cuadricóptero.

Para lograr un cambio de dirección se modifica el ángulo *yaw*, aumentando la velocidad de los motores del mismo eje mientras se disminuye la velocidad de los motores restantes. Esto ocasiona que el torque total producido sea diferente de cero modificando el ángulo de giro sobre el eje z .

Y por último aumentando o disminuyendo la velocidad de los cuatro motores se logra el ascenso o descenso del cuadricóptero.

2.4.2. Dinámica de vuelo configuración “x”

A diferencia de la configuración anterior, el marco del cuadricóptero forma una “x” con el desplazamiento como se muestra en la Figura 2.6. Debido a esta característica, se debe hacer el cambio de velocidad involucrando los cuatro motores para realizar los movimientos de rotación sobre los ejes x , y .

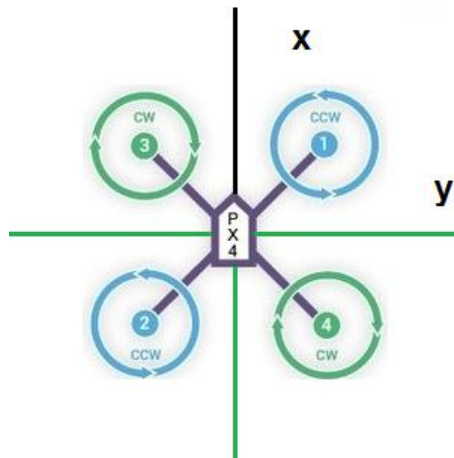


Figura 2.6: Ejes en la configuración “x”

En comparación a la configuración en mas, en la que sólo interviene el cambio de velocidad de dos motores, mientras dos permanecen constantes, en la configuración en “x” se aumenta la velocidad de dos motores mientras se disminuye la de los dos restantes [28]. La Figura 2.7 resume la variación de velocidad de los motores para lograr los diferentes desplazamientos.

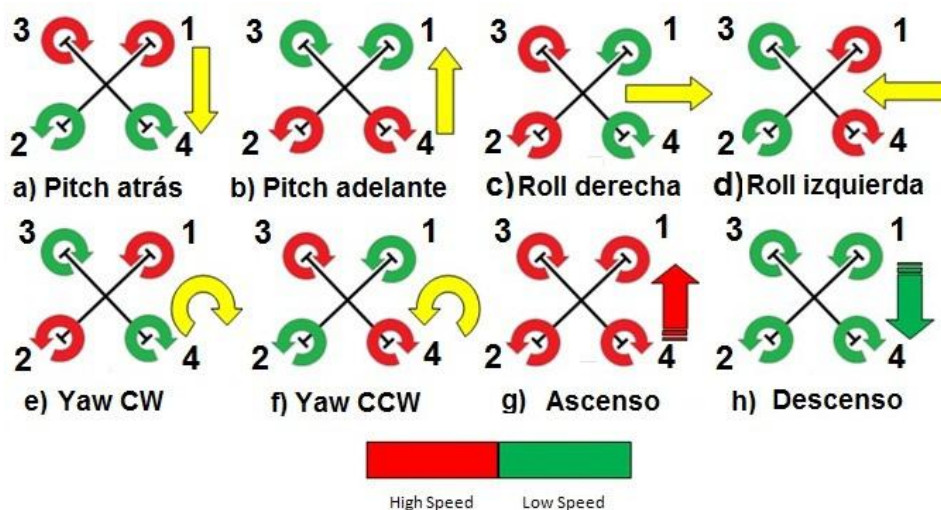


Figura 2.7: Dinámica de vuelo configuración “x” ⁴

Para lograr un movimiento hacia atrás o adelante en el eje x , se realiza la variación del ángulo *pitch*. Esto se logra aumentando o disminuyendo la velocidad en igual magnitud en cada par de motores, es decir, de las parejas de motores 2, 4 y 3, 1.

El desplazamiento en el eje y , se logra variando la velocidad de las parejas de motores 1, 4 y 3, 2, provocando que el cuadricóptero se mueva a la derecha o a la izquierda. Para la modificación del ángulo yaw, y de ascenso y descenso se presenta el mismo funcionamiento que para configuración en “+”.

2.5. Modelado teórico

En esta sección se describe el modelado dinámico usado para realizar el control del cuadricóptero, basado en el estudio realizado en [29][30][31]. Este modelo representa al cuadricóptero como un objeto solido sujeto a una fuerza y tres momentos, sin tener en cuenta factores como la flexibilidad de las hélices y las dinámicas de los motores. Este modelo asume que todas la hélices y los motores son iguales, además de que el cuadricóptero es totalmente simétrico.

Las coordenadas generales que representan el posicionamiento del cuadricóptero se definen como

$$q = (x, y, z, \psi, \theta, \phi)^T \in R^6, \quad (2.1)$$

donde $\xi = (x, y, z)^T \in R^3$ es el vector que representa la posición del centro de masa del cuadricóptero relativo al marco de referencia de fijo I mostrado en la Figura 2.8 y $\eta = (\psi, \theta, \phi)$ es el vector para los ángulos de Euler (*yaw, pitch, roll*) y como ya se ha mencionado representan la orientación del cuadricóptero.

El Lagrangiano de el cuadricóptero se define por

$$L(q, \dot{q}) = T_{trans} + T_{rot} - U, \quad (2.2)$$

donde $T_{trans} = \frac{m}{2} \dot{\xi}^T \dot{\xi}$ es la energía cinética, $T_{rot} = \frac{1}{2} \dot{\eta}^T J \dot{\eta}$ es la energía cinética rotacional, $U = mgz$ es la energía potencial del cuadricóptero, m representa la masa del cuadricóptero, z la altura, g es la gravedad y J representa la matriz de inercia.

El modelo completo de la dinámica del cuadricóptero se obtiene de las ecuaciones Euler-Lagrange como se muestra en la siguiente ecuación

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = (F_\xi, \tau), \quad (2.3)$$

⁴Figura tomada de <https://blogs.msdn.microsoft.com/esmsdn/2016/03/02/como-construir-un-drone-con-windows-10-iot/>

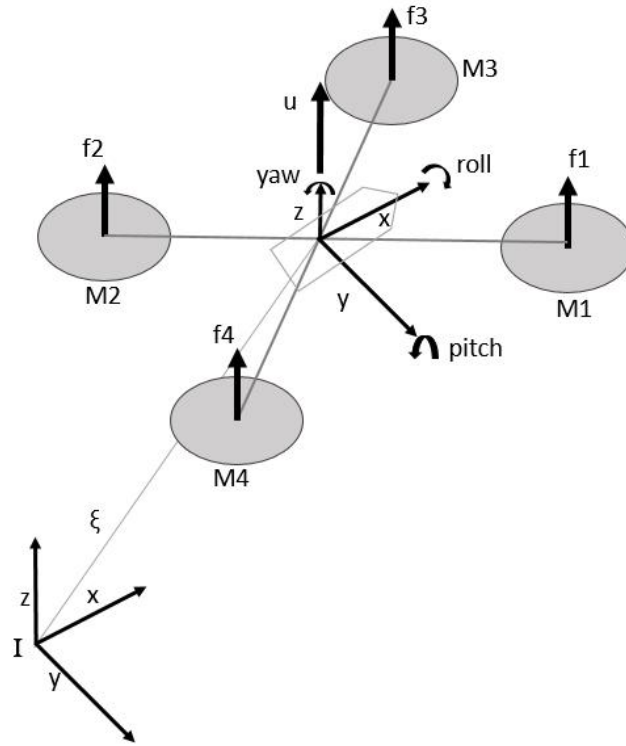


Figura 2.8: Marcos de referencia del cuadricóptero

donde $F_\xi = R\hat{F}$ es la fuerza traslacional aplicada a el cuadricóptero para la entrada de control *throttle*, $\tau \in R^3$ los momentos *pitch*, *roll* y *yaw* y R denota la matriz de rotación $R(\psi, \theta, \phi)$ que representa la orientación del cuadricóptero respecto a un marco de referencia fijo.

De la Figura 2.8 se observa que se tiene un vector de fuerzas $\hat{F}$ dado por

$$\hat{F} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

donde u es la entrada de control definida por

$$u = \sum_{i=1}^4 f_i, \quad (2.5)$$

con f_i la fuerza por cada motor $M_i, i = 1, 4$ como se muestra en la Figura 2.8.

La fuerza f_i se define mediante

$$f_i = k_i w_i^2, \quad (2.6)$$

donde w_i es la velocidad angular de cada motor y k_i es una constante de los mismos.

En la etapa de implementación del proyecto, la expresión que define la fuerza es la relación encontrada en la ecuación (5.1). Puesto que en la práctica, la variable usada para manipular el empuje de cada motor es el ancho de pulso de la señal PWM.

Los torques generados se representan en función de la fuerza de cada motor mediante:

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_\psi \\ \tau_\theta \\ \tau_\phi \end{pmatrix} \triangleq \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^4 \tau_{M_i} \\ (f_2 + f_4 - f_3 - f_1)l\cos 45^\circ \\ (f_1 + f_4 - f_2 - f_3)l\cos 45^\circ \end{pmatrix}, \quad (2.7)$$

la distancia efectiva de los motores hacia el centro de gravedad del cuadricóptero es $l\cos 45^\circ$ y τ_{M_i} es torque producido por cada motor M_i alrededor del centro de gravedad.

Las ecuaciones de Euler Lagrange pueden ser divididas en dos partes, una parte para la dinámica de las coordenadas ξ y otra parte para las coordenadas η obteniendo

$$\ddot{x} = (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m}, \quad (2.8)$$

$$\ddot{y} = (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m}, \quad (2.9)$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m}, \quad (2.10)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\phi} \dot{\theta} \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{L}{I_z} u_2, \quad (2.11)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi} \dot{\psi} \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) + \frac{L}{I_y} u_3, \quad (2.12)$$

$$\ddot{\phi} = \dot{\theta} \dot{\psi} \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) + \frac{L}{I_x} u_4, \quad (2.13)$$

donde (x, y) son las coordenadas en el plano horizontal y z la posición vertical. (ψ, θ, ϕ) son los ángulos de rotación yaw, pitch y roll, m la masa del cuadricóptero, L la distancia desde el centro del marco del cuadricóptero hacia los extremos y (I_x, I_y, I_z) son las inercias del cuerpo en roll, pitch y yaw. Las entradas u_1, u_2, u_3, u_4 corresponden al empuje principal u y a los momentos producidos en cada ángulo de rotación $(\tau_\psi, \tau_\theta, \tau_\phi)$ respectivamente, como se muestra en las ecuaciones (2.5) y (2.7).

En este trabajo se realiza el control de postura y elevación del cuadricóptero, por lo que el modelo se simplifica a las ecuaciones (2.10), (2.11), (2.12) y (2.13).

2.5.1. Representación en variables de estado

Las ecuaciones obtenidas en la sección anterior definen el comportamiento del sistema con respecto a los ángulos de inclinación y posición en el plano x, y, z . Este modelado se expresa en ecuaciones de estado para facilitar la simulación del sistema.

El sistema representado consta de las siguientes ocho variables de estado

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z \\ \dot{z} \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{pmatrix}, \quad (2.14)$$

y las cuatro entradas de control

$$(u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4)^T = (u \ \tau_\psi \ \tau_\theta \ \tau_\phi)^T. \quad (2.15)$$

Las ecuaciones dinámicas para las correspondientes variables de estado y entradas de control quedan definidas como

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \\ \dot{X}_7 \\ \dot{X}_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_2 \\ -g + (\cos X_5 \cos X_7) \frac{u_1}{m} \\ \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{L}{I_z} u_2 \\ X_4 \\ \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) + \frac{L}{I_y} u_3 \\ X_6 \\ \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) + \frac{L}{I_x} u_4 \\ X_8 \end{pmatrix}. \quad (2.16)$$

2.5.2. Modelo lineal

Para el modelo presentado en la ecuación (2.16), se realiza una linealización por medio de series de Taylor. Evaluando las ecuaciones dinámicas de la sección anterior

en el punto $f(0, 0) = 0$ se obtienen las matrices $A, B, \bar{u}$ mostradas respectivamente para

$$\dot{X} = AX + B\bar{u}, \dot{X} = f(x, u), \quad (2.17)$$

donde

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L}{I_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L}{I_x} \end{pmatrix}, \bar{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix}. \quad (2.18)$$

Modelo lineal discreto

El modelo lineal del cuadricóptero presentado, se discretiza mediante el software Matlab, expresándose de la forma:

$$x[n+1] = Ax[n] + Bu[n], \quad (2.19)$$

$$y[n] = Cx[n] + Du[n]. \quad (2.20)$$

Este modelo lineal discreto será usado para realizar la simulación del sistema y los controladores implementados.

2.6. Conclusiones

De las dos configuraciones básicas para cuadricópteros, configuración en “x” y configuración en “+”, se usa el cuadricóptero en configuración “x”. La diferencia entre ambas configuraciones, radica en que la configuración “x”, realiza los cambios de rotación *pitch* y *roll* utilizando los cuatros motores al tiempo, generando un mayor torque. Siendo útil ésta última característica, cuando se requiere realizar maniobras con carga adicional, además de ser la configuración mas extendida en la mayoría de aplicaciones.

Capítulo 3

Teléfonos inteligentes

El creciente desarrollo de la telefonía celular ha introducido en los teléfonos móviles diferentes características como: aumento de la capacidad de procesamiento, sistemas operativos similares a los usados en las computadoras, capacidad multitarea, multimedia y diferentes tipos de sensores. Además, módulos de comunicación como WiFi, bluetooth, USB, lo que ha permitido la conexión a internet y hacia otros periféricos, adicional a las capacidades convencionales encontradas en los celulares de gama baja como mensajería y acceso a las redes 4G, 3G y 2G. Todas estas características que en principio solo tenían las computadoras personales, le han llevado al uso del término “teléfono inteligente”. En este capítulo se muestra una descripción detallada de las capacidades de estos equipos en cuanto a sistemas operativos, los sensores que poseen y módulos de comunicación. En la sección 3.1 se exponen los sistemas operativos más utilizados en teléfonos inteligentes y sus características. Los diferentes tipos de sensores y ejemplos de los mismos se muestran en la sección 3.2 y la sección 3.3 trata los diferentes protocolos de comunicación implementados en diferentes equipos.

3.1. Sistema operativos

Entre los sistemas operativos que comúnmente se encuentran en los dispositivos celulares inteligentes y que actualmente se disputan gran parte del mercado están Android (*Google*), iOS (*Apple*) y Windows Phone (*Microsoft*).

La Tabla 3.1 resume la participación en el mercado de los principales sistemas operativos en dispositivos móviles, mediante un estudio realizado por la compañía Gartner [32].

SO móvil	Participación [%]
Android	81,9
iOS	12,1
Windows Phone	3,6
BlackBerry OS	1,8
Bada	0,3
Symbian OS	0,2
Firefox OS	0,2
Otros	0,2

Tabla 3.1: Participación en el mercado de los SO móviles

3.1.1. Android

Android es un sistema operativo creado para permitir a los diseñadores desarrollar aplicaciones móviles para extraer el máximo provecho de los equipos. En donde cualquier aplicación puede acceder a las principales funciones del teléfono: llamadas, mensajería, comunicación, cámara, memoria, etc. Basado en un kernel Linux de tipo abierto. Utiliza una máquina virtual personalizada que fue diseñada para optimizar los recursos de memoria y hardware en entornos móviles [33].

3.1.2. iOS

iOS es el sistema operativo para dispositivos móviles de la compañía Apple Inc. Originalmente fue diseñado para el iPhone, luego extendido para el iPod touch y el iPad [34]. Este sistema operativo no permite la instalación en hardware de terceros [35].

Desde el año 2008 está disponible el SDK para todos los desarrolladores, pero solo hasta la introducción Xcode 7 se pudo probar las aplicaciones en dispositivos iOS sin tener una cuenta paga [36].

3.1.3. Windows Phone

Windows Phone es el sistema operativo móvil desarrollado por Microsoft, para celulares inteligentes y otros dispositivos móviles, sucesor del sistema operativo Windows Mobile.

Esta plataforma integra varios de los servicios propios de Microsoft como OneDrive, Skype y Xbox Live en su sistema operativo. Microsoft ha establecido unas mínimas condiciones hardware para que las compañías desarrolladoras de equipos móviles puedan utilizar Windows Phone en sus equipos. Esto brinda ciertas ventajas

a los desarrolladores de aplicaciones puesto que se reduce la fragmentación del sistema operativo al no tener una variedad tan grande de tamaños, formas y recursos de hardware.

3.2. Capacidad de sensado

En los teléfonos inteligentes actuales de diferentes gamas, se pueden encontrar varios tipos de sensores que permiten una mejor interacción del usuario con las aplicaciones. Estos pueden medir diferentes variables como posición, aceleración, orientación y diversas condiciones ambientales, proveyendo incluso medidas con una gran precisión y exactitud. Además, son de gran utilidad cuando se desea conocer el movimiento o la localización del dispositivo en tres dimensiones o si se quiere monitorear cambios ambientales en el entorno cercano al dispositivo [37].

La plataforma Android soporta tres amplias categorías de sensores:

- **Sensores de movimiento**

Este tipo de sensores miden las fuerzas de aceleración y de rotación en los tres ejes. A este grupo de sensores pertenecen los acelerómetros, sensores de gravedad, giroscopios y sensores de vectores de rotación.

- **Sensores ambientales**

Estos sensores pueden hacer medidas de varios parámetros ambientales como temperatura ambiente, presión atmosférica, iluminación y humedad. Esta categoría de sensores incluye barómetros, fotómetros y sensores de temperatura.

- **Sensores de posición** Miden la posición física del dispositivo. Aquí se incluyen sensores de orientación, magnetómetros y antenas GNSS (GPS y GLO-NASS).

3.2.1. Sensores de movimiento

La plataforma Android provee muchos sensores, los cuales permiten monitorear el movimiento del dispositivo, la inclinación, sacudidas, rotación o giros. Varios de estos sensores monitorean el movimiento relativo respecto al marco de referencia del dispositivo. Y otros tipos de sensores, miden el movimiento relativo a un marco de referencia de tierra [38].

Algunos están basados completamente en hardware como el acelerómetro y el giroscopio, mientras que otros tipos de sensores pueden estar basados en software, como por ejemplo el sensor de gravedad, de aceleración lineal y sensores de vectores rotación. Éstos hacen sus medidas con base a la medición del acelerómetro y el magnetómetro o incluyendo en ocasiones el giroscopio.

Acelerómetro

Son dispositivos capaces de detectar los cambios en las fuerzas de aceleración, ya sea estáticas o dinámicas. Las fuerzas estáticas incluyen la gravedad y las fuerzas dinámicas pueden ser vibraciones y movimiento en cada uno de los tres ejes, lo que da lugar a una gran variedad de aplicaciones potenciales.

Existen diferentes tipos de acelerómetros, dependiendo del tipo de tecnología que se utiliza para medir esa variable. Pueden ser mecánicos, piezoeléctricos, capacitivos, piezo resistivos, de efecto Hall, etc.

Los acelerómetros capacitivos, al ser eléctricos, son de áreas muy pequeñas, por lo que pueden ser fabricados en chips y ser utilizados en diferentes dispositivos. Éstos son el tipo de acelerómetros que se encuentra en los dispositivos móviles. Los acelerómetros capacitivos miden el cambio de capacidad eléctrica de un condensador, mediante una masa móvil situada entre las placas del mismo. Al moverse esta masa hace cambiar la capacitancia y por ende la corriente que circula entre las placas del capacitor, permitiendo tomar una medida de aceleración.

Giroscopio

El giroscopio mide la velocidad angular en rad/s alrededor de los ejes x, y y z de un dispositivo.

Sensor de vector de rotación

El vector de rotación representa la orientación del dispositivo, como una combinación de un ángulo y un eje, en el cual el dispositivo fue rotado un ángulo alrededor de un eje (X, Y o Z). Esta representación corresponde a un quaternion.

Sensor de gravedad

El sensor de gravedad provee un vector tridimensional indicando la dirección y magnitud de la gravedad. Las unidades usadas por el sensor de gravedad son m/s^2 .

3.2.2. Sensores ambientales

Android provee cuatro sensores basados en hardware que permiten hacer medidas de diferentes variables ambientales.

Iluminancia

Recoge información sobre la luz ambiental y convierte la cantidad de luz detectada en una señal eléctrica medible. El principal uso por defecto de este sensor se encuentra en utilizar la medida tomada para realizar un ajuste automático del brillo de la pantalla del dispositivo.

Presión ambiente

Los terminales dotados para realizar esta medición cuentan con barómetro interno destinado únicamente a medir la presión atmosférica. Con este sensor se obtiene una medición de presión en milibares, correspondiente al lugar donde se encuentre el dispositivo. La medida de presión puede ser utilizada para estimar la altura a la que se encuentra el equipo y en ocasiones ayudar al posicionamiento del GPS.

Temperatura y humedad ambiente relativa

La mayoría de dispositivos cuentan con sensores de temperatura para realizar mediciones de componentes como la batería, procesador y otras piezas internas. Pero otros dispositivos disponen de sensores para realizar mediciones de la temperatura y la humedad relativa ambiente. Estas mediciones son utilizadas por algunas aplicaciones para brindar información a personas con problemas de salud que requieran de ambientes especiales.

3.2.3. Sensores de posición

Estos sensores permiten determinar la posición de un dispositivo, son útiles para determinar la posición física de un equipo en el marco de referencia del mundo. Android posee tres sensores para cumplir esta función: el GPS, el sensor de campo geomagnético y el acelerómetro (mencionado anteriormente). También la plataforma provee un sensor para la determinar qué tan cerca se encuentra la cara frontal del dispositivo a un objeto: sensor de proximidad.

Sensor de campo geomagnético

Se trata de un componente electrónico capaz de medir y cuantificar la fuerza magnética de los objetos a su alrededor y detectar el polo norte magnético, actuando como brújula. El sensor de campo geomagnético, lee el valor de fuerza del campo para cada uno de los tres ejes coordenados.

Sensor de proximidad

El sensor de proximidad permite determinar qué tan cerca está un objeto de un equipo móvil. Dependiendo del dispositivo el sensor puede regresar una medida absoluta en centímetros o regresar solo valores binarios para cerca o lejos. Los sensores de proximidad se basan en un emisor y receptor infrarrojo.

GPS

El GPS (de sus siglas en inglés *Global Positioning System*) o sistema de posicionamiento global, permite conocer la ubicación del dispositivo. Para este tipo de localización se proporcionan *Application Programming Interface* (API) que permiten gestionar automáticamente los proveedores de ubicación, el movimiento de los equipos y la precisión de la ubicación. Este servicio permite desarrollar aplicaciones mas inteligentes brindando información al usuario mas compatible con la ubicación [39].

3.3. Comunicación

Los equipos celulares actuales integran diferentes sistemas y protocolos de comunicación en un solo dispositivo, por lo tanto, es común encontrar protocolos como bluetooth, Wifi, Wifi P2P, NFC, acceso a la red móvil y comunicación USB. Lo que les permite, tener múltiples medios para interactuar con otros dispositivos móviles y/o periféricos y además, tener acceso a internet [40].

3.3.1. Bluetooth

El protocolo bluetooth permite el intercambio de datos de manera inalámbrica entre dispositivos bluetooth. Android incluye soporte para el manejo de redes bluetooth a través de sus APIs [41], por medio de estas, una aplicación inalámbrica puede acceder a todas la funcionalidades bluetooth y conectarse con otros dispositivos ya sea en redes punto a punto o multipunto.

Las APIs permiten a las aplicaciones que implementan el protocolo bluetooth realizar las siguientes funciones:

- Buscar otros dispositivos bluetooth.
- Consultar el adaptador bluetooth local para dispositivos vinculados.
- Establecer canales RFCOMM.
- Conectar a otros dispositivos a través del servicio *Discovery*.

- Transferir datos hacia y desde otros dispositivos.
- Administrar múltiples conexiones.

3.3.2. WiFi

Una gran parte de dispositivos modernos, incluyendo los celulares inteligentes incorporan hardware para acceder a redes WLAN mediante el estándar IEEE 802.11. EL módulo de comunicación WiFi incorporado en los celulares, permite la conexión de los mismos a puntos de acceso WiFi (AP: *Access Point*), para el acceso a internet o establecer comunicación con otros dispositivos que implementan este protocolo.

3.3.3. WiFi P2P

La tecnología Wi-Fi P2P (Peer-to-Peer) provee a los dispositivos que contengan el hardware apropiado conectar directamente a otros dispositivos vía Wi-Fi sin un AP (*Access Point*) intermedio (*Alliance's Wi-Fi DirectTM certification program*) [42].

3.3.4. Red móvil

La telefonía móvil se ha ido desarrollando de la mano con la evolución de los dispositivos. Este tipo de comunicación permite el envío de información mientras se desplaza uno o ambos dispositivos ubicados en lugares diferentes. La telefonía móvil básicamente está formada por dos grandes partes: una red de comunicaciones (o red de telefonía móvil) que está compuesta de antenas repartidas por la superficie terrestre y los terminales (o teléfonos móviles) que permiten el acceso a dicha red [43].

El proceso de desarrollo de la red móvil se identifica hasta el momento en 4 generaciones [44]:

- **1G:** Red análoga: Se caracterizó por ser análoga y solamente para voz. La calidad de los enlaces de voz deficiente, baja velocidad (2400 bauds), la transferencia entre celdas era muy imprecisa, tenían baja capacidad (basadas en FDMA, *Frequency Divison Multiple Access*) y la seguridad no existía. La tecnología predominante de esta generación es AMPS (*Advanced Mobile PhoneSystem*).
- **2G:** La generación 2G soportó velocidades de transmisión de información más alta pero aún limitado para comunicación. A diferencia de la 1G se caracterizó por ser digital. Se pueden ofrecer servicios auxiliares tales como datos, fax y SMS (*Short Message Service*).

- **3G:** Esta generación se caracteriza por datos con acceso inalámbrico a internet, aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos. Los protocolos empleados en los sistemas 3G soportan altas velocidades de información enfocados para aplicaciones más allá de la voz tales como audio (MP3), video en movimiento, video conferencia y acceso rápido a Internet. Los sistemas 3G alcanzan velocidades de hasta 384 Kbps.
- **4G:** El cambio de la tercera a la cuarta generación tiene que ver con el uso de protocolo IP, en vez de circuitos de intercambio. Todos los datos incluyendo voz se transmiten por medio de paquetes conmutados.

3.3.5. NFC

La comunicación NFC (Near Field Communication) es un conjunto de tecnologías inalámbricas que como su nombre lo indica, permite la comunicación inalámbrica en un corto rango. Generalmente requiere una distancia de 4cm o menos para establecer comunicación.

3.3.6. USB

El protocolo USB permite la conexión punto a punto. Este busca establecer comunicación entre un único dispositivo host y un dispositivo periférico u otro host. El USB se utiliza para la conexión de periféricos como: teclados, ratones, memorias *Flash (Pendrive)*, joysticks, etc. El sistema operativo Android soporta dos modos para manejar otros dispositivos a través del protocolo USB: *USB accessory* y *USB host* [45].

Modo USB host y USB accessory

Cuando un equipo Android trabaja en el modo *USB accessory*, el hardware al que éste se conecta actúa como USB host. Estos dispositivos pueden ser: controladores de robots, bases de conexión, equipos de diagnóstico, equipos musicales, puestos de información, lectores de tarjetas, etc [46].

En el modo *USB host* el dispositivo Android actúa directamente como el host en proceso de comunicación. Ejemplos de estos dispositivos pueden ser cámaras digitales, teclados, ratones, controladores de juego, etc [47].

3.4. Celular como controlador de vuelo

Para que el dispositivo celular seleccionado pueda cumplir con las funciones de controlador de vuelo y estabilizar el cuadricóptero, debe tomar la entrada de varios sensores. Estos sensores deben permitir medir las variables de postura y altitud del cuadricóptero, estudiadas en la sección.

El celular para funcionar como controlador de vuelo, debe contar mínimo con sensores como un acelerómetro de tres ejes, giroscopio de tres ejes, magnetómetro y un barómetro para realizar la estimación y control de altura [48]. Para realizar las acciones de control sobre los motores y recibir ordenes mando desde una estación base, el celular debe tener incorporados los módulos de comunicación WiFi, bluetooth y USB.

3.5. Conclusión

En el desarrollo e implementación de este trabajo se ha decidido hacer uso de dispositivos con sistema operativo Android, debido a su menor costo con respecto a equipos basados en iOS y por ende facilidad de adquisición. Además, de que estos equipos cuentan con la cantidad de sensores disponibles con el potencial de llevar a cabo aplicaciones de control y el objetivo principal de este documento, tales como acelerómetros, giroscopios y barómetros. Otro tópico para la elección de equipos con Android, es que cuenta con entornos de desarrollo gratuitos como Android Studio y complementos (SDK) para desarrollar sobre compiladores como Eclipse y NetBeans.

Capítulo 4

Implementación del control de elevación del cuadricoptero

Como se menciona en el estudio realizado en el Capítulo 3 sobre las características de los teléfonos inteligentes, estos poseen gran capacidad en cuanto a procesamiento de datos, memoria, módulos de comunicación y además de gran variedad de sensores. Por lo que el propósito principal de este trabajo, es aprovechar las importantes cualidades de los teléfonos celulares e implementarlas sobre sistemas de control, más específicamente, en el control de elevación de un cuadricóptero, objetivo principal de este trabajo.

Para lograr este objetivo, se debe desarrollar una aplicación para integrar el hardware del cuadricóptero y los sensores del celular. Al mismo tiempo que permita ejecutar las acciones de control calculadas por los controladores, para corregir las variables involucradas en la estabilización del mismo. Además, de permitir el mando del cuadricóptero para iniciar el sistema de forma segura y de direccionarlo una vez entre en vuelo. También, se requiere que la aplicación esté en capacidad de permitir la monitorización de las variables involucradas.

La sección 4.1 presenta el diagrama general del sistema. La sección 4.2 describe los componentes hardware que conforman tanto el cuadricóptero como los componentes de control. Las secciones 4.3 y 4.4 presentan la descripción general del sistema implementado para realizar el propósito de control y su funcionamiento general respectivamente.

4.1. Diagrama general del sistema implementado

Una de los primeros problemas por definir para la integración del celular al sistema, es la comunicación entre el celular y el cuadricóptero, que finalmente resulta en la comunicación con la etapa de potencia de los motores del cuadricóptero. Los puer-

tos disponibles para conectar periféricos en un celular son: bluetooth y USB. Luego se requiere de hardware con la capacidad de generar las señales PWM, requeridas por los motores. Para lo que existen gran variedad de opciones, como las tarjetas Arduino. Usar el bluetooth como medio de comunicación para esta etapa, requiere de utilizar un módulo externo adicional para el envío de información a la tarjeta que genera los PWM, como el Bluetooth HC-05 [49]. Lo que implicaría mayor cantidad de componentes en el sistema. La segunda opción de comunicación, requiere la utilización del puerto USB del celular y un componente capaz de establecer este tipo de comunicación. Realizando una búsqueda del posible hardware, se encuentra con la tarjeta Arduino Mega ADK que posee un módulo de comunicación USB integrado, capaz de interactuar con el sistema operativo android y que cuenta con las salidas PWM necesarias para la aplicación. Se considera ésta la mejor opción, por requerir menos componentes y además, se deja disponible el módulo bluetooth del celular para otro uso.

La selección del dispositivo celular se basa en el estudio realizado en el trabajo de grado [50], en las secciones 4.2 y 4.3.2 “*Prueba de capacidades de adquisición de datos Android*” y “*Comparación de características*” respectivamente, donde se realiza la comparación de diferentes características de adquisición de datos y comunicación a seis dispositivos con sistema operativo Android.

La Figura 4.1, muestra el diagrama general de los componentes que conforman el sistema. Empezando por el equipo que tendrá el usuario, para comandar el cuadricóptero de manera inalámbrica. Posteriormente, el celular que realiza las veces de controlador de vuelo, la interfaz USB entre el celular y la etapa de potencia de los motores y los motores mismos. Todos los componentes reciben potencia de una única batería y se ubican sobre el marco del cuadricóptero.

El sistema implementado mostrado en la Figura 4.2, presenta tres bloques principales:

Equipo base o cliente: encargado de la monitorización de señales, establecer la referencia de elevación deseada y las acciones de mando.

Equipo controlador: es la parte más importante del sistema, ya que es el equipo que posee los sensores necesarios para llevar a cabo el control del cuadricóptero. En este se programan los cuatro controladores en cascada necesarios para lograr la elevación, además de realizar el cálculo del filtro Kalman, recibir las órdenes de mando, enviar las señales de control hacia los motores del cuadricóptero y del almacenamiento de las variables.

Cuadricóptero: este bloque está conformado por el marco, los controladores de velocidad, los motores *brushless* y el Arduino Mega ADK encargado de recibir los datos USB enviados por el celular y generar las cuatro señales PWM.

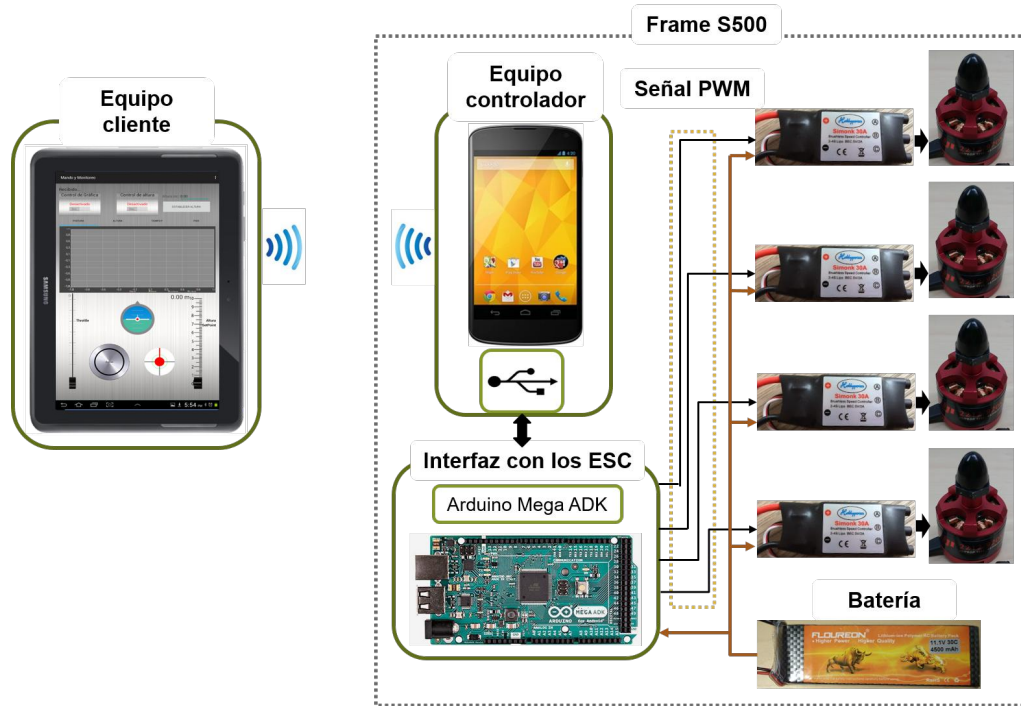


Figura 4.1: Diagrama general de los componentes del sistema

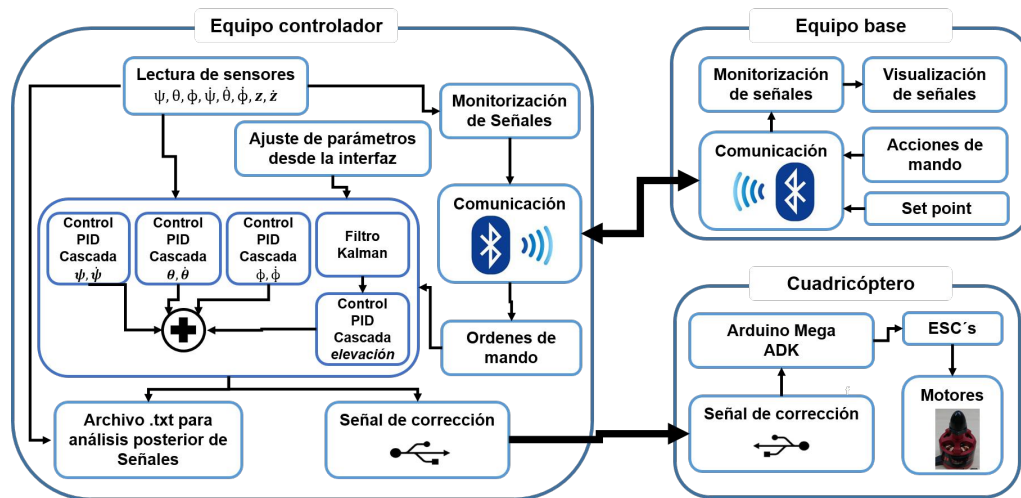


Figura 4.2: Diagrama general del sistema

4.2. Descripción del hardware

Esta sección describe las partes principales que componen el cuadricóptero, además de los componentes adicionales para la integración con celular inteligente.

4.2.1. Frame

El “frame” es el marco principal del sistema de vuelo. Este sostiene los motores, controladores de velocidad (ESC), controladores de vuelo, batería, sistemas de navegación y demás accesorios que transporta el cuadricóptero. Generalmente, el número de brazos del marco depende del número de rotores que se usan para generar el vuelo, pudiendo constar de 3, 4, 6 o más, según la aplicación.



Figura 4.3: **Frame implementado: S500** ⁵

El marco principal implementado para montar el sistema de vuelo cuadricóptero está basado en el frame S500 de la Figura 4.3, diseñado en fibra de vidrio, distribución de potencia integrada, con las especificaciones de la Tabla 4.1.

Centros de motores	480 mm
Altura	170 mm
Peso	405 g

Tabla 4.1: **Especificaciones frame S500**

4.2.2. Motores brushless

Los motores encargados de generar el movimiento de las hélices en este tipo de aplicaciones, son los motores *brushless* o en español, motor sin escobillas. Estos presentan ciertas ventajas con respecto a los motores convencionales con escobillas, como por ejemplo, mejor relación velocidad-par motor, mayor eficiencia, mayor vida útil, menor ruido y mayor rango de velocidad, lo cual los hacen propicios para estos vehículos aéreos. Aunque, presentan mayor coste y un control más complejo debido a que necesitan señales multifásicas para su operación, generalmente trifásicas.

⁵Figura tomada de <https://hobbyking.com/es-es/s500-glass-fiber-quadcopter-frame-480mm-integrated-pcb-version.html>

Los motores *brushless* están contruïdos de manera similar a los de corriente continua. Utilizando bobinas e imanes para provocar el movimiento pero sin contar con escobillas.

Dependiendo de la estructura existen dos posibles configuraciones de los motores *brushless*: de rotor externo y de rotor interno. En los motores brushless de rotor externo, las bobinas están situadas en la parte central del motor, fijas a la carcasa y un conjunto de imanes localizados sobre un cilindro que está acoplado al eje de rotación. Para el caso de los motores de rotor interno las posiciones de las bobinas y los imanes están invertidos respecto a los de rotor externo. El hecho de que las bobinas están fijas a la carcasa, implica que estas no van a rotar, por lo que se pueden conectar directamente eliminando la necesidad de escobillas. La corriente circula a través de las bobinas generando un campo magnético que interactúa con el de los imanes provocando un par de rotación sobre el eje del motor.

Para el desarrollo del proyecto, se utilizan motores brushless de la Figura 4.4, de la marca DJI referencia 2212 de 920 KV.



Figura 4.4: Motor Brushless 2212 de 920 KV

El factor KV indica el número de revoluciones por minuto a las que es capaz de girar el motor por cada Volt aplicado.

4.2.3. Controlador Electrónico de velocidad: ESC

Los ESC (*Electronic Speed Controler*) o controlador de velocidad electrónico es un dispositivo que comandado por un canal receptor, permite controlar la velocidad angular de los motores *brushless*.

Como se mencionó en la sección anterior, los motores brushless necesitan señales generalmente trifásicas para su operación. Por lo que los controladores de velocidad están conectados a una batería de corriente continua y generará una salida trifásica para alimentar el motor.

Cada ESC, se controla por medio de una señal PWM, de 50 Hz. La variación de tensión de salida a los bornes del motor y por ende la velocidad del mismo, está acotada a una variación de ancho de pulso a valores de 1 y 2 ms.

Se usan los ESC Simonk de 30 A de la Figura 4.5, indicados para manejar la potencia de los motores utilizados.



Figura 4.5: ESC Simonk de 30A ⁶

4.2.4. Batería tipo LiPo

Uno de los principales inconvenientes que tienen los cuadricópteros, es el consumo de corriente debido a los motores utilizados. Debido a esto, la fuente de alimentación debe ser capaz de suministrar este consumo de energía tan elevado, que no suele encontrarse en baterías estándar, además, de que el peso añadido por la misma sea lo menor posible. Las baterías utilizadas en este tipo de aplicaciones son las baterías tipo LiPo (abreviatura de Litio Polímero) [51]. Estas baterías tienen como características: buena relación entre capacidad, peso y volumen y alta capacidad de descarga.

Los parámetros técnicos a considerar en las baterías tipo LiPo son [52] [53]:

Número de celdas: esta característica viene designada con la letra S. Cada celda tiene un voltaje de 3.7 V y 4.2 V.

Clasificación por capacidad (mAh): es una medida de la carga en miliamperios que puede entregar la batería por una hora, hasta descargarse completamente.

Tasa de descarga: designada con la letra C, la tasa de descarga es la rapidez con la que una batería puede ser descargada de forma segura. Cuanto mayor sea el valor de C más capacidad de descarga tendrá la batería.

La corriente máxima que puede suministrar la batería LiPo está dada por la ecuación (4.1):

⁶Figura tomada de <http://peterwedegge.blogspot.com.co/2015/10/hp-simonk-30a-esc-brushless-speed.html>

$$I_{max} = K * C, \quad (4.1)$$

donde K es la constante adimensional que especifica la capacidad de descarga máxima de la batería y C es la tasa de descarga dada en mAh .

Teniendo en cuenta el consumo de los cuatro motores utilizados, se seleccionó una batería LiPo para el proyecto de 3S, 4500mAh y 30C mostrada en la Figura 4.6.



Figura 4.6: Batería LiPo 4500mAh 30C

Se debe tener especial cuidado de no descargar estas baterías a un valor inferior a 3.2V por celda, pues se reduce su vida útil o se puede llegar al daño total de celda.

4.2.5. Hélices

Las hélices suministran en conjunto, la fuerza de empuje necesaria para levantar el peso del cuadricóptero y generar el torque para provocar el desplazamiento del mismo. Para los cuadricópteros se necesitan dos pares de hélices con las palas dispuestas para generar el empuje hacia arriba, girando en sentido horario y dos pares para generar el empuje girando en sentido anti horario como se muestra Figura 4.7.

Para el proyecto se implementan dos juegos de hélices 1045 CCW/CW 254x114MM como los de la Figura 4.7, recomendadas para los motores adquiridos.



Figura 4.7: hélices 1045 CCW/CW 254x114MM

4.2.6. Arduino Mega ADK

El arduino mega ADK [54] es una tarjeta de desarrollo manejada por micro-controlador basada en el ATmega2560 [55]. Esta tarjeta de desarrollo posee todas las características de entradas y salidas de las demás series arduino [56]. Pero la característica principal que la hace útil para esta aplicación, es que ésta incorpora un controlador USB host MAX3421E [57] que soporta el firmware *Android Open Accessory Development Kit* (ADK) de Google [58]. Permitiendo realizar desarrollos para controlar periféricos con el sistema operativo Android.

En este trabajo el arduino mega ADK de la Figura 4.8, se utiliza como interfaz de comunicación USB entre el teléfono celular controlador Y los controladores de velocidad de los motores, produciendo las señales PWM requeridas.



Figura 4.8: Arduino Mega ADK ⁷

4.2.7. Celular LG Nexus 4

El celular Nexus 4 mostrado en la Figura 4.9 es un celular de la gama Nexus desarrollado por la compañía Google en colaboración con el fabricante LG, saliendo a la venta el 13 de octubre de 2012. Los dispositivos de la serie Nexus cuentan con un sistema operativo Android puro, sin modificaciones por parte del operador, ni el fabricante. Además, de permitir un mayor desarrollo y personalización por parte del usuario, debido a disponer un gestor de inicio no bloqueado. Las principales características de este dispositivo [59], se listan en la Tabla 4.2.

⁷Figura tomada de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMegaADK>

Peso	139 g
Cámaras	8 MP (trasera), 1.3 MP (frontal)
Memoria	8 Gb, 2 Gb RAM
CPU	Qualcomm Snapdragon S4 Pro 1.5 GHz
Sensores	Micrófono, acelerómetro, compas, luz ambiente, barómetro, giroscopio, GPS
Conectividad	WiFi, NFC, bluetooth, micro USB, SlimPort HDMI, salida para audífonos 3.5 mm
Sistema Operativo	Android 4.2 (Jelly Bean)

Tabla 4.2: Especificaciones del celular LG Nexus 4

Figura 4.9: Celular LG Nexus 4 ⁸

El celular LG Nexus 4 es el cerebro de este proyecto, haciendo las veces de controlador de vuelo encargado de la estabilización en postura y altura del cuadricóptero mediante las leyes de control que corren en su software.

4.2.8. Parámetros mecánicos del cuadricóptero

La Tabla 4.3 lista los valores para la masa y las inercias del cuadricóptero, calculadas en el trabajo realizado en [60].

⁸Figura tomada de <http://www.phonelane.com/downloads/lg-nexus-4-e960-pc-suite-and-drivers-download-free/>

Masa (kg)	$I_x(kgm^2)$	$I_y(kgm^2)$	$I_z(kgm^2)$	L (m)
1.464	0.014927	0.014927	0.025345	0.25

Tabla 4.3: Parámetros mecánicos del cuadricóptero

4.3. Descripción general del sistema implementado

Se diseña un sistema utilizando dos dispositivos móviles inteligentes y como se muestra en la Figura 4.10, implementan un protocolo de comunicación inalámbrica para la transferencia de información de mando y monitorización entre ambos celulares.

El primer celular inteligente (equipo controlador), se encuentra localizado sobre el marco del cuadricóptero. Es el encargado de realizar la medida de los ángulos *pitch*, *roll*, *yaw* y de la estimación de altura, utilizando únicamente los sensores localizados en él, como ya se ha mencionado. Este mismo dispositivo implementa los controladores que van a regular cada variable del sistema, para luego enviar la señal de control hacia los motores del cuadricóptero.

Como segundo dispositivo móvil, se utiliza una Tablet que hace las veces de estación base para controlar el funcionamiento del sistema. Esta, establece comunicación con el celular localizado en el cuadricóptero, para ejecutar acciones de mando, configuración y aprovechando las características de su pantalla, se realiza una visualización de las variables tomadas por el celular que realiza las acciones de control.



Figura 4.10: Descripción general del sistema implementado

4.4. Funcionamiento general del sistema

Como se expuso anteriormente, el desarrollo implementado trabaja con dos equipos móviles para el control de la elevación del cuadricóptero. En los dispositivos celulares utilizados en la realización del proyecto, se cuenta con dos protocolos de comunicación inalámbrica disponibles: WiFi y bluetooth. El protocolo WiFi brinda un gran alcance para la transmisión de datos, aumentando según la red utilizada y la potencia de los equipos. Pero haciendo necesario utilizar en primera instancia un punto de acceso para la comunicación entre dispositivos. Los equipos celulares a utilizar cuentan con el protocolo bluetooth 4.0, que sugieren teóricamente un distancia máxima de 100 metros. Además, de permitir comunicación punto a punto para la transferencia de datos [61][62][63]. En la comunicación entre ambos equipos se establece el protocolo bluetooth para la comunicación inalámbrica, debido a que no se espera realizar desplazamientos a largas distancias, ni a grandes elevaciones y este protocolo provee la sencillez de implementación y un alcance adecuados. La comunicación establecida se representa en la Figura 4.10.

El equipo controlador está basado en el celular inteligente LG Nexus 4, seleccionado en el Capítulo 3. Al estar ubicado en el frame del cuadricóptero, las mediciones hechas por equipo de las variaciones en las variables *pitch*, *roll*, *yaw* y altura, corresponden a su vez a las variaciones del cuadricóptero.

En el equipo controlador se encuentran implementados los controladores PID en cascada, diseñados y estudiados en Capítulo 5. Las mediciones tomadas de los sensores del celular, son llevadas hacia los controladores para realizar el cálculo de las señales de control y así corregir el estado de cada variable. Las mediciones de los ángulos de postura, altura y los datos de corrección son enviadas vía bluetooth para ser monitoreadas en la estación base. Además, éstas y las demás variables involucradas en los procesos de control son almacenadas en cada instante de tiempo en un archivo de texto .txt, para el análisis de las respuestas con matlab, como se visualiza en la Figura 4.11.

Los valores de corrección de los controladores en el celular, deben ser enviados hacia los cuatro variadores de velocidad en forma de PWM, por lo que se necesita una interfaz de comunicación entre el celular y los ESC. Como se expresa en la Figura 4.12, esta interfaz se implementa por medio de la tarjeta de desarrollo Arduino mega ADK, que permite la conexión vía USB a dispositivos celulares y generar señales PWM.

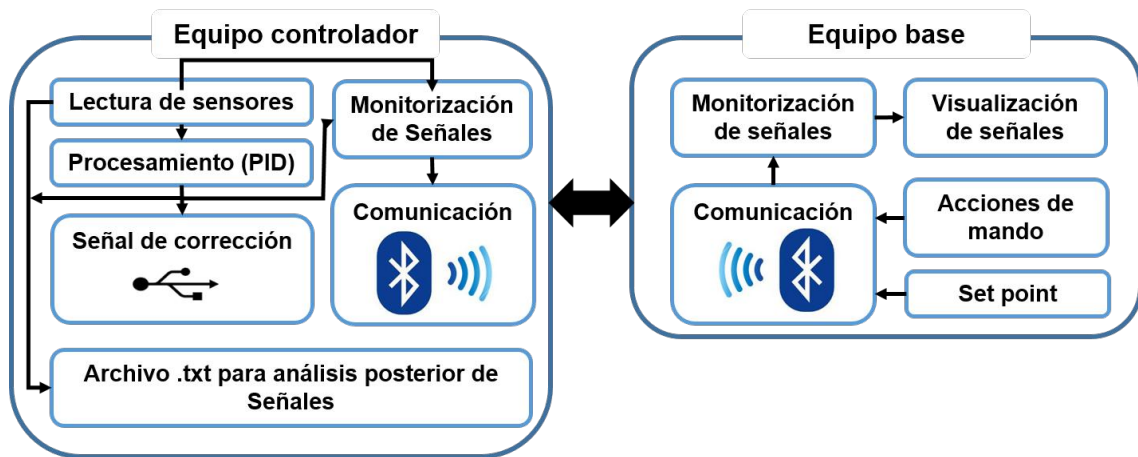


Figura 4.11: Descripción general del Equipo controlador - Equipo base

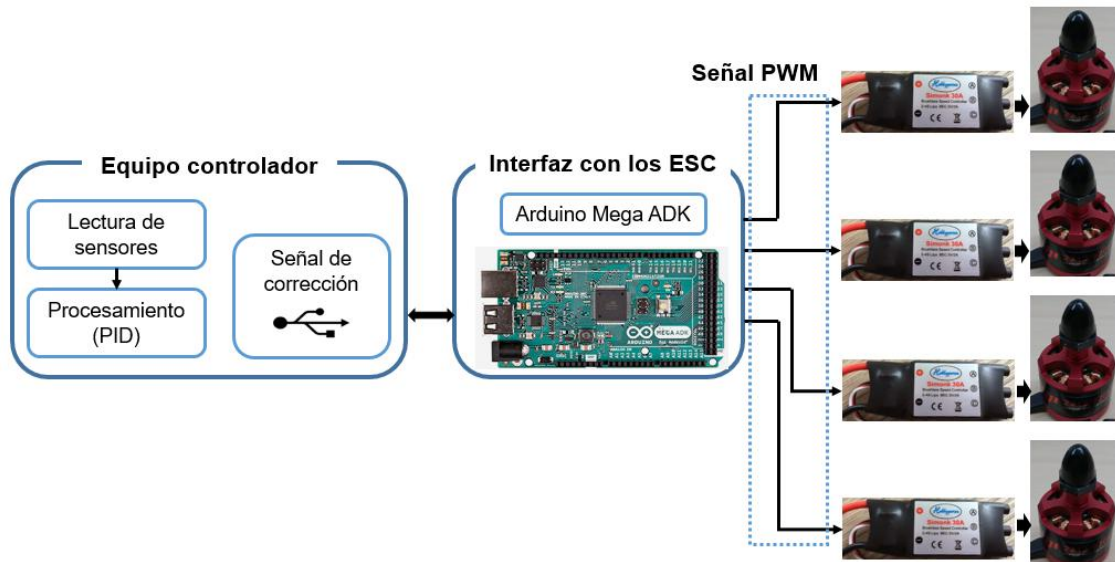


Figura 4.12: Interfaz con los variadores de velocidad

El dispositivo móvil que actúa como estación base, se encarga de recibir los datos que envía el equipo controlador y generar gráficos para mejor estudio del comportamiento del cuadricóptero. La función principal de la estación base consiste en enviar ordenes de mando vía bluetooth para control funciones como inicio y paro, potencia de los motores, establecer el set point y activar el control de elevación.

4.5. Conclusiones

El dispositivo utilizado, dispone de los sensores necesarios para realizar las respectivas mediciones de las variables involucradas en proceso de control, principalmente el barómetro para realizar el control de altura, así como de los tiempos de muestreo necesarios para ejecutar las acciones de control. Otra característica fundamental que hace apto este dispositivo, es la variedad de módulos de comunicación disponibles, necesarios para el manejo de las diferentes señales de control y mando del sistema.

Se diseña un sistema para controlar y comandar el cuadricóptero basado en dos equipos, uno que realiza las veces de estación base para realizar acciones de comando y un segundo equipo localizado sobre el cuadricóptero para realizar las veces de controlador de vuelo. El sistema implementado trabajo con dos protocolos de comunicación: La comunicación bluetooth, permite la interacción inalámbrica entre los equipos y la comunicación USB, posibilita el envío de las señales de control desde el celular hacia los motores, a través de la tarjeta de desarrollo Arduino Mega ADK. Logrando una completa relación entre las tres partes involucradas.

Capítulo 5

Control del cuadricóptero usando un teléfono inteligente

La implementación de sistemas automáticos de control, permite que un dispositivo controlador, ejerza regulaciones al sistema con base a las medidas tomadas y los parámetros establecidos. Esto libera a un operador humano de realizar tareas de control exigentes, como el control de postura del cuadricóptero, en la que intervienen la velocidad de cuatro motores y además, de mantenerlo en una elevación deseada.

En este capítulo se introduce en primera instancia, con la caracterización de los motores en la sección 5.1 y la selección del tiempo de muestreo para la lectura de variables y ejecución de las acciones de control en la sección 5.2. Se expone en la sección 5.3 un método para estimación de altura por fusión sensorial mediante la utilización de un filtro Kalman. El diseño de controlador se presenta en la sección 5.4. La sección 5.5 trata los esquemas de control a implementar para las variables de postura y elevación del cuadricóptero. Y en la sección 5.5 se realiza la simulación en Simulink de los controladores diseñados junto con la representación en variables de estado del modelo del cuadricóptero para tener un acercamiento al comportamiento del sistema de control en conjunto.

5.1. Caracterización de los motores

La salida enviada hacia los ESC (se estudia en el capítulo 4, sección 4.2), es un dato de 8 bits que representa un ancho de pulso 1 a 2 *ms*. El empuje vertical generado por cada motor, está relacionado directamente con la variación del ancho de pulso de la señal PWM que recibe el correspondiente variador de velocidad. Esta relación es estimada para cada motor, midiendo mediante una báscula el empuje generado para cada variación de ancho de pulso, como se observa en el montaje de la Figura 5.1.

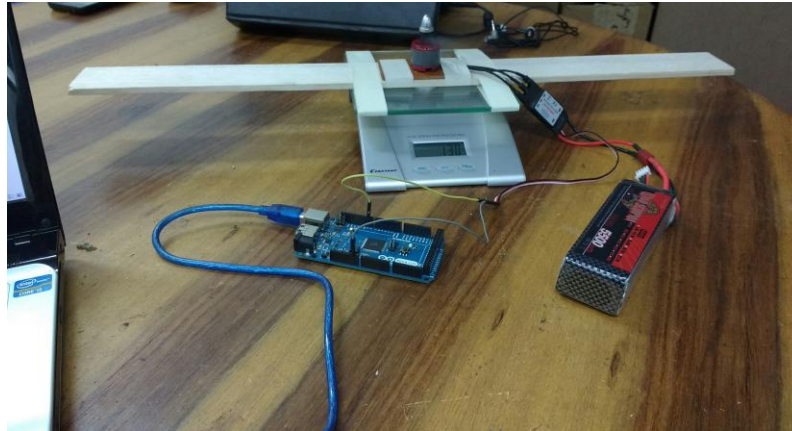


Figura 5.1: Medición del empuje generado

La Figura 5.2 muestra la relación empuje-ancho de pulso, obtenida para 8 pruebas realizadas.

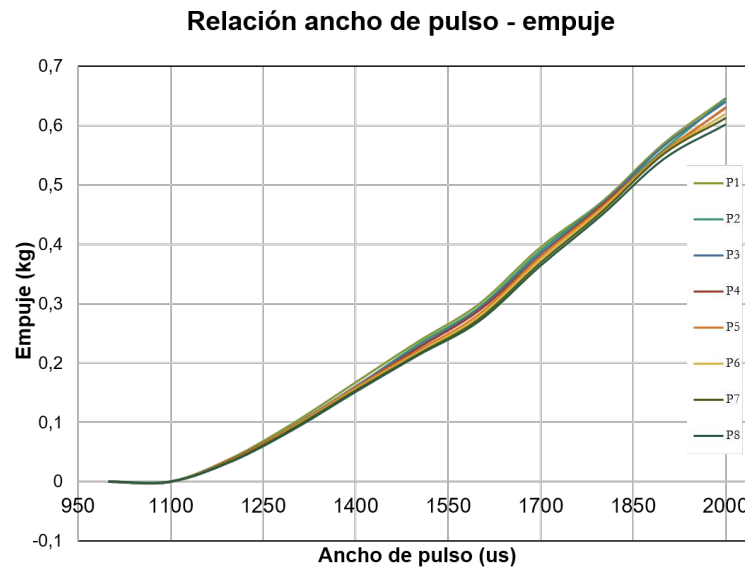


Figura 5.2: Relación empuje - ancho de pulso

Usando los datos obtenidos en la prueba de empuje, se genera la siguiente ecuación lineal, que relaciona la variación del ancho de pulso con el empuje vertical que genera el motor:

$$Empuje = 0,0007 * ancho_pulso - 0,7389. \quad (5.1)$$

Según los datos arrojados por las pruebas realizadas, en donde la dispersión del empuje es menor para los primeros valores de PWM y se va haciendo mayor a

medida que este aumenta, se presenta una función para la incertidumbre del empuje dada por

$$\triangle Empuje = \pm(1 * 10^{-5} * ancho_pulso - 0,014). \quad (5.2)$$

5.2. Selección del tiempo de muestreo

La selección del tiempo de muestreo se toma con base a la velocidad con que el celular puede leer los sensores incorporados. Estando especificado por el entorno de programación para tres velocidades: 5 *ms* (200 *hz*), 10 *ms* (100 *hz*) y 20 *ms* (50 *hz*) mediante una interrupción que registra los cambios en los sensores.

Se parte de comprobar la máxima velocidad permitida para la lectura de los sensores, midiendo el tiempo en que el celular tarda en tomar una muestra y la siguiente. Generando la gráfica para la variación de los tiempos de la Figura 5.3.

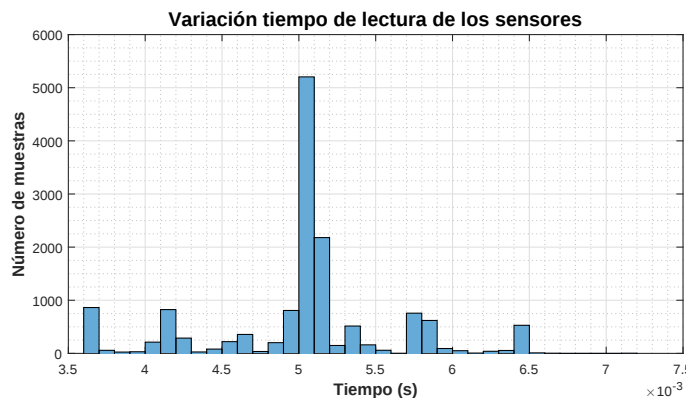


Figura 5.3: Variación del tiempo de lectura de sensores en el celular

Al revisar los resultados de los tiempos medidos, de 14284 muestras tomadas de los tiempos de lectura de los sensores del celular, se tiene que aproximadamente 5240 muestras equivalente al 36,7% corresponden a mediciones iguales a 5 *ms*. Un 31,5% de las muestras corresponden a tiempos menores a 5 *ms*, el 15,4% de las mediciones tomadas está en 5,1 *ms* y el 16,4% restante se encuentra por encima a 5 *ms*. Como se puede observar de los resultados generados de los tiempos de refresco de los sensores, estos pueden ser más rápidos a los 5 *ms* especificados, pero también mayores, llegando a tiempos de 7,2 *ms* en las muestras tomadas. Con el fin de asegurar de que siempre se tomará una medida no repetida por parte de la aplicación, se establece el tiempo de muestreo en 10 *ms*, manteniendo la lectura de sensores por parte del celular a 5 *ms*.

5.3. Estimación de altura mediante fusión sensorial

La estimación de altura respecto a un punto de inicio, se lleva a cabo mediante la combinación de dos medidas tomadas con dos sensores diferentes: medición de altura sobre el nivel del mar, tomado por el sensor de presión atmosférica y la medición de aceleración lineal sobre el eje z . La integración de estas dos variables para la estimación de elevación y velocidad de elevación se realiza mediante la implementación de un filtro Kalman.

El filtro Kalman [64] es un filtro digital, usado para reducir el ruido de una serie de medidas observadas en un intervalo de tiempo. Se desarrolló inicialmente para navegación espacial, pero se extendió su uso a otras aplicaciones.

Se utiliza principalmente, para estimar sistemas que sólo pueden ser observados de forma indirecta o imprecisa por el sistema mismo. El filtro opera recursivamente sobre el flujo de datos de un sistema dinámico, cuyas medidas pueden presentar ruido y otras inexactitudes y el modelo teórico que lo representa, para dar una estimación óptima del estado actual del sistema.

El algoritmo del filtro Kalman mostrado en la Tabla 5.1, está basado en dos etapas: una etapa de predicción y una etapa de corrección.

Etapas de predicción	Etapas de corrección
1. Predicción del estado	1. Calcular la ganancia Kalman
$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k$	$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$
	2. Actualización del estado por z_k
2. Predicción de la matriz de covarianza	$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-)$
$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$	3. Actualización de la matriz de covarianza
	$P_k = (I - K_kH)P_k^-$

Tabla 5.1: Proceso del filtro Kalman

Con: $\hat{x}_k^-$ estado estimado previo
 $\hat{x}_k$ estado estimado en el instante k
 $\hat{P}_k^-$ matriz de error de covarianza previa
 P_k matriz de error de covarianza
 K_k ganancia Kalman
 z_k matriz de medidas
 u_k vector de control
 A matriz de transición de estados
 B matriz de control

H matriz de observación

Q error estimado de la medida

R error de la covarianza del error estimado de la medida

I es una matriz identidad.

La Tabla 5.1 describe los procesos realizados en cada etapa. La etapa de predicción involucra dos procesos: la predicción del estado que se realiza a partir de la matriz de transición de estados, la cual representa el modelo teórico del sistema y un segundo proceso para la predicción de la matriz de covarianza. La etapa de corrección se calcula la matriz de ganancias del filtro (ganancia Kalman), se aplica la actualización de los estados filtrados mediante la medición directa realizada por los sensores en la variable z_k , los estados previos y la ganancia Kalman y por último se realiza la actualización de la matriz de covarianza P_k .

El proceso para el cálculo de las variables involucradas en el filtro Kalman se realiza de manera recursiva definiendo posteriormente a la etapa corrección las variables $\hat{x}_{k-1}$ y P_{k-1} .

En la aplicación del filtro Kalman en la estimación de las variables de elevación del cuadricóptero, se declaran tres estados: altura, velocidad de elevación y aceleración en el eje z , es decir, $\hat{x}_k = (z, \dot{z}, \ddot{z})^T$. Como variables medidas ingresadas al filtro, se utilizan la medición de altura tomada por el barómetro, la velocidad de cambio calculada a través del mismo y la aceleración lineal en el eje z . Obteniendo la matriz $z_k = (z_{baro}, \dot{z}_{baro}, \ddot{z}_{accel})^T$.

La matriz de observación H está definida como

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 \end{pmatrix}, \quad (5.3)$$

donde cada componente de la diagonal de la matriz representa el estado del que se realizará la medida.

El error estimado de la medida Q y el error de la covarianza del error estimado R se definen como

$$Q = \begin{pmatrix} 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 \end{pmatrix}, R = \begin{pmatrix} 0,01 & 0 & 0 \\ 0 & 0,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 \end{pmatrix}. \quad (5.4)$$

Estas variables, ofrecen dos grados de libertad para la sintonización deseada del filtro y durante la etapa de pruebas, se permite modificar ambos valores. Los valores iniciales para poner a prueba el filtro se toman del estudio realizado en [65].

Para estimar una medida de elevación y velocidad de elevación, se define la

matriz de transición de estados A mediante las ecuaciones del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado [65], dadas por

$$x_{k+1} = x_k + \dot{x}_k \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{z}_k \Delta t^2 \quad (5.5)$$

$$\dot{x}_{k+1} = \dot{x}_k + \ddot{z}_k \Delta t \quad (5.6)$$

$$\ddot{z}_{k+1} = \ddot{z}_k. \quad (5.7)$$

Esto, partiendo de asumir que para intervalos de tiempo pequeños como los manejados por el periodo de muestreo, la aceleración es constante durante esos intervalos y que se realiza solo un movimiento en el eje global z . Obteniendo la matriz de transición de estados

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.8)$$

Todas las variables son medidas por los sensores propios del celular.

5.4. Diseño del controlador

Al implementar las acciones de control en los dispositivos digitales, lo primero que se debe conocer es que estos son máquinas que solo pueden procesar valores discretos y finitos, por lo que se hace necesario discretizar la ecuación, en este caso la del controlador. Luego, cuando se ha discretizado la función de transferencia del controlador, se calcula para cada periodo de muestreo, la salida de la acción de control.

Uno de los controladores más difundidos por su historia de aplicación y sencillez de implementación es el controlador PID, en el cual la salida de control depende de las tres acciones involucradas en este: proporcional, integral y derivativa. El algoritmo general de control PID continuo se define como

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t). \quad (5.9)$$

Para hacer uso de esta ley de control en dispositivos electrónicos, se hace necesario discretizar la ecuación (5.9). Una vez discretizada la ecuación, permitirá al controlador digital tomar valores discretos y finitos, calculando para cada instante de tiempo muestreado la acción de control. La acción se repite para cada intervalo

de tiempo en donde el sistema vuelve a calcular una nueva salida hasta alcanzar la referencia deseada.

La función discreta del controlador PID a implementar se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$u(z) = K_p e(z) + K_i T_0 \frac{1}{1 - z^{-1}} e(z) + \frac{k_d}{T_0} (1 - z^{-1}) e(z), \quad (5.10)$$

donde K_p , K_i y K_d son las ganancias proporcional, integral y derivativa, respectivamente. $e(z)$ es el error entre la salida y la referencia y T_0 es tiempo de muestreo. La discretización de controlador permite ser expresado en ecuaciones de diferencias para su posterior implementación en los algoritmos de control.

5.5. Control del cuadricóptero

Como se estudió en el capítulo 2, el control del cuadricóptero se realiza variando la velocidad de los cuatro motores. Buscando en primer lugar, estabilizar los ángulos de postura, modificar o mantener la elevación, al igual que mantener una posición fija o causar un desplazamiento. Variables que deben ser ajustadas en lapsos de tiempo del orden de milisegundos y que para un operador humano se dificultaría en gran medida controlar los grados de libertad involucrados. Debido a esto, se integran en los sistemas cuadricópteros etapas de control que faciliten el mando de este tipo de aeronaves.

Un cuadricóptero cuenta con seis grados de libertad para su movimiento, definidos por el vector:

$$q = (x, y, z, \psi, \theta, \phi)^T \in R^6, \quad (5.11)$$

como se mencionó en la sección de modelamiento teórico, en este trabajo se realiza el control de postura y posición en eje z dejando el control de posición en los ejes x, y de manera manual por el usuario.

La Figura 5.4, muestra el diagrama general del sistema de control en lazo cerrado para las variables del cuadricóptero.

Donde la señal $r_{z,\psi,\theta,\phi}$ indica la elevación y la postura deseada del cuadricóptero, la señal $y_{z,\psi,\theta,\phi}$ son la elevación y postura actuales del sistema, medidas por los sensores del celular inteligente. $e_{z,\psi,\theta,\phi}$ es la señal de error entre la postura y elevación deseadas y las reales. El bloque de control PID, son los controladores discretos, cuya variable de control es la señal de salida $u_{z,\psi,\theta,\phi}$. Estas señales se suman a la variable *throttle* y se integran usando la expresión de fuerzas de la Ecuación (2.4), obteniendo las señales $u_{M1,M2,M3,M4}$ que son las señales aplicadas a cada uno de los motores del cuadricóptero.

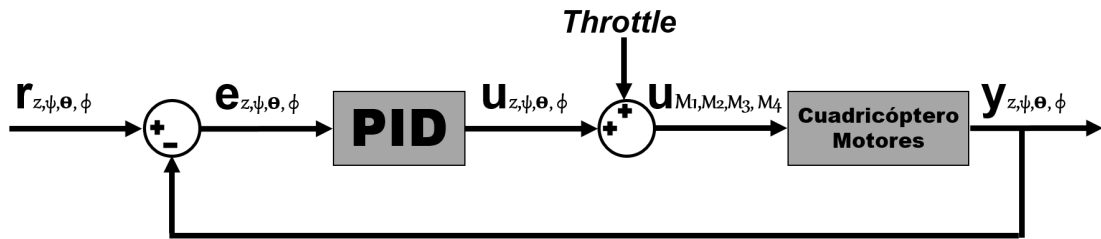


Figura 5.4: Diagrama de control general en lazo cerrado

La variable *throttle*, es la señal de referencia de velocidad base para los cuatro motores. Y a partir del valor de esta señal, las correcciones aplicadas por los controladores PID de postura son sumadas o restadas a cada motor.

5.5.1. Control de postura: ángulos yaw, pitch y roll

En el control de postura del cuadricóptero se implementa controles en cascada para cada uno de los ángulos *yaw*, *pitch* y *roll*. La Figura 5.5 muestra el diagrama de control en cascada utilizado, donde se observa la bucla de control interna de velocidad angular de cada ángulo de rotación.

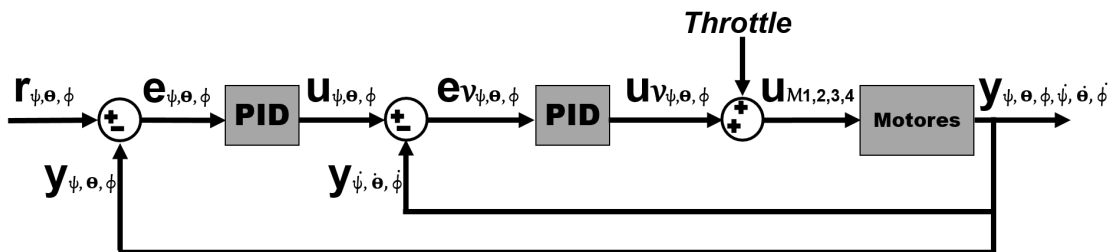


Figura 5.5: Control en cascada postura

La señal $y_{\psi,\theta,\phi,\dot{\psi},\dot{\theta},\dot{\phi}}$ representa las mediciones de los ángulos y las velocidades angulares tomadas por los sensores del celular. Tomando las referencias de los ángulos $r_{\psi,\theta,\phi}$ y la señal realimentada $y_{\psi,\theta,\phi}$ se obtiene la señal de error de posición angular $e_{\psi,\theta,\phi}$ que se procesa por el primer bloque PID. La salida del PID de posición angular $u_{\psi,\theta,\phi}$ se convierte en la referencia para el lazo de control de velocidad angular, que al restarla con la realimentación de velocidad angular $y_{\dot{\psi},\dot{\theta},\dot{\phi}}$, genera la señal de error de velocidad $e_{v_{\psi,\theta,\phi}}$. El segundo bloque PID genera la señal de control para la velocidad de rotación $u_{v_{\psi,\theta,\phi}}$ que se suma a la señal de *throttle* para finalmente ejecutar la acción sobre los motores. La Figura 5.6 muestra el diagrama de control de postura. Las señales de error $e_{\psi}, e_{\theta}, e_{\phi}$ obtenidas de las referencias $(r_{\psi}, r_{\theta}, r_{\phi})$ y las variables realimentadas, son llevadas al bloque controlador correspondiente de donde se obtienen tres señales de control: $u_{v_{\psi}}, u_{v_{\theta}}, u_{v_{\phi}}$. Las tres señales de control

se suman para actuar sobre cada motor correspondiente. Así, la señal de corrección de *yaw* actúa en igual magnitud sobre los motores (1, 2) mientras suma o resta en los motores (3, 4), la señal de corrección *pitch* actúa de la misma manera sobre los pares de motores (1, 3) y los motores (2, 4). La señal de corrección *roll* ejerce los cambios sobre los pares de motores (1, 4) y (2, 3).

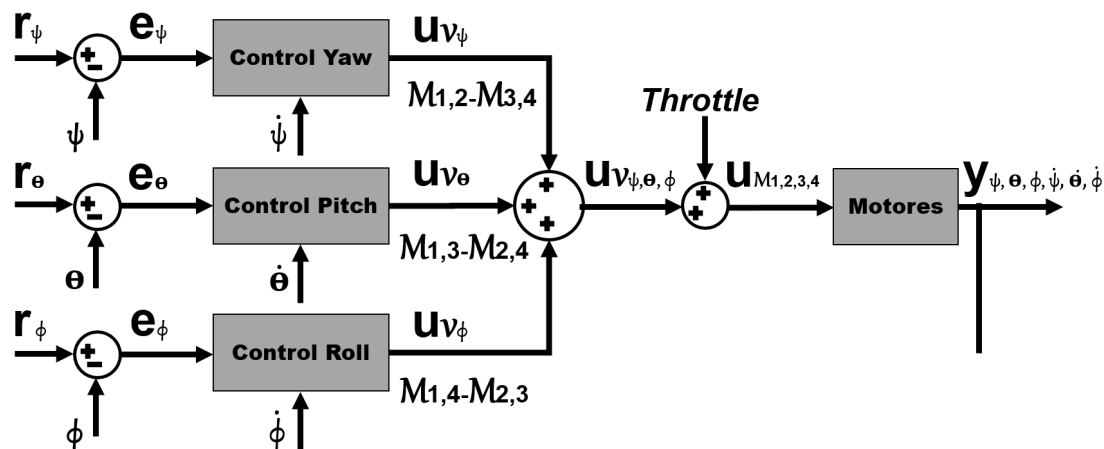


Figura 5.6: Acción de los motores con los controles de postura

Las señales de corrección de ángulos, son sumadas a la señal de velocidad base de los motores *throttle* antes de ser aplicadas a estos.

5.5.2. Control de posición

El control de posición en el trabajo realizado se divide en dos partes: el control de elevación (eje z) y control manual de posición en los ejes x y y con respecto al marco de tierra Figura 2.8.

Para desplazar el cuadricóptero en el plano x y y se modifica el valor de las señales (r_ψ, r_θ, r_ϕ) mostradas en la Figura 5.6, es decir, variar la referencia de los ángulos *yaw*, *pitch* y *roll* al respectivo control de postura. Por lo que si desea hacer un desplazamiento hacia adelante o hacia atrás en el eje x se modifica el valor de referencia *pitch* r_θ . De igual forma, para realizar un movimiento en el y se varía la referencia del ángulo *roll* r_ϕ .

5.5.3. Control de elevación

El control de elevación, busca mantener al cuadricóptero en una posición deseada en el eje z . Para el control de elevación se implementa la estructura de control en cascada de la Figura 5.7. El usuario define la señal de referencia de altura r_z , las

medidas realimentadas $y_z, y_{\dot{z}}$ son las variables de altura y velocidad estimadas por el celular utilizando las mediciones realizadas por el barómetro y el acelerómetro del mismo. La señal de error de elevación e_z , se lleva al primer bloque PID que genera la señal de control u_z . Definiendo esta, la referencia del lazo interno de control de velocidad en el eje z . El segundo bloque PID recibe la señal de error de velocidad e_{v_z} y genera la señal de control u_{v_z} .

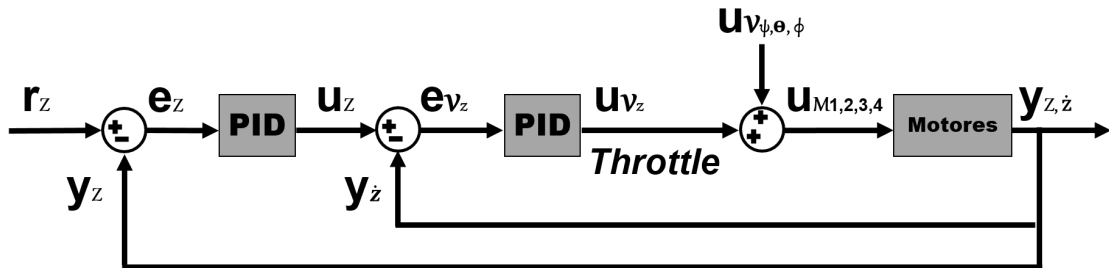


Figura 5.7: Control de elevación

La señal u_{v_z} representa la variable de velocidad base *throttle* que se aplica en igual magnitud a todos los motores del cuadricóptero. El control de elevación, se realiza aumentando o disminuyendo la velocidad de los cuatro motores con igual magnitud según la señal de control. Al combinar las variables de control de postura $u_{v_{\psi, \theta, \phi}}$ y elevación *throttle* se obtiene la señal total que actúa sobre el sistema $u_{M1,2,3,4}$.

5.5.4. Control general del sistema

El control final del cuadricóptero queda constituido por cuatro bloques controladores PID en cascada: tres controladores para los ángulos de postura y un controlador para la elevación. La Figura 5.8 muestra el diagrama de control general del sistema y como cada controlador aporta una señal de corrección, que modifica la velocidad de los cuatro motores del cuadricóptero.

Integración de las variables de control

La variable de corrección total actuante sobre cada motor, es la suma de las correcciones de los controladores de postura más la variable de corrección de elevación [66].

La Figura 5.9, representa el esquema de integración de las variables de control que definen las señales de corrección de velocidad de cada motor. Las funciones a usar en la etapa de implementación del sistema, quedan definidas por las ecuaciones

$$u_{M1} = throttle - u_{v_{\psi}} + u_{v_{\theta}} + u_{v_{\phi}}, \quad (5.12)$$

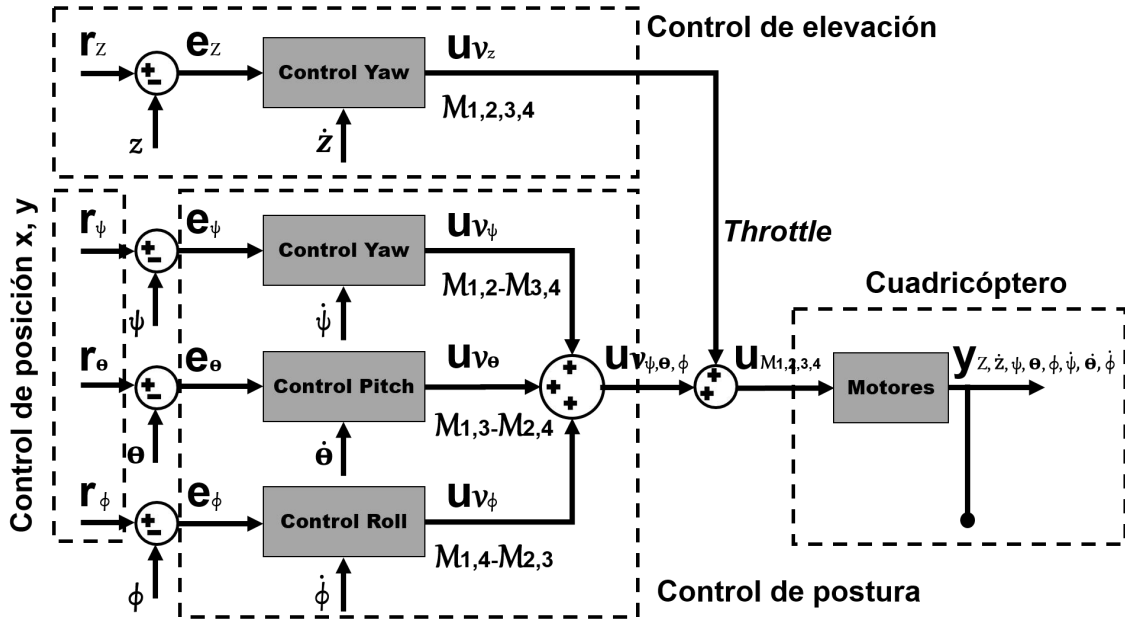


Figura 5.8: Diagrama de control general del cuadricóptero

$$u_{M_2} = throttle - u_{v_\psi} - u_{v_\theta} - u_{v_\phi}, \quad (5.13)$$

$$u_{M_3} = throttle + u_{v_\psi} + u_{v_\theta} - u_{v_\phi}, \quad (5.14)$$

$$u_{M_4} = throttle + u_{v_\psi} - u_{v_\theta} + u_{v_\phi}, \quad (5.15)$$

donde $u_{M_1}, u_{M_2}, u_{M_3}$ y u_{M_4} son las variables de control aplicadas a los motores 1, 2, 3 y 4 respectivamente. *throttle* es la señal de control de elevación y u_{v_ψ}, u_{v_θ} y u_{v_ϕ} son las variables de control de *yaw*, *pitch* y *roll*.

5.6. Simulación en MatLab

En esta sección, se implementará la simulación de las ecuaciones que describen el modelado del cuadricóptero. Al igual que se hará la simulación de los controladores para las variables *yaw*, *pitch* y *roll* y de control de altura. Las simulaciones se desarrollan por medio de la herramienta Simulink de Matlab.

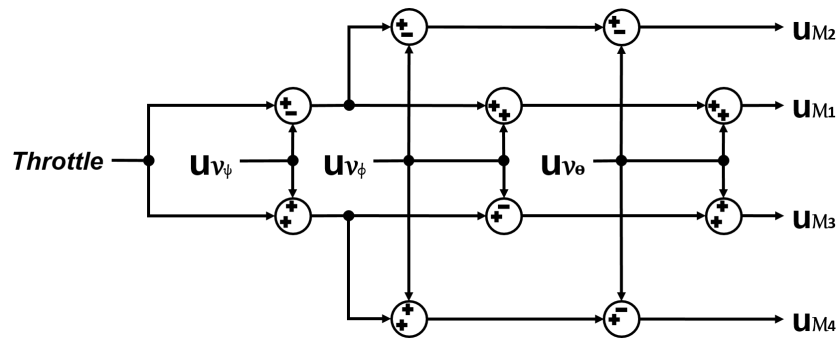


Figura 5.9: Integración de las correcciones de control

5.6.1. Control general del sistema

Como se estudió en la sección anterior, el control del cuadricóptero se divide en dos partes: el control de postura y el control de elevación. La simulación presentada se divide en 5 bloques principales para una mejor interpretación del sistema: un bloque del modelo lineal en tiempo discreto del cuadricóptero, el control de postura, control de elevación, un bloque para los disturbios generados y un último bloque para la visualización de las variables, como se muestra en la Figura 5.10.

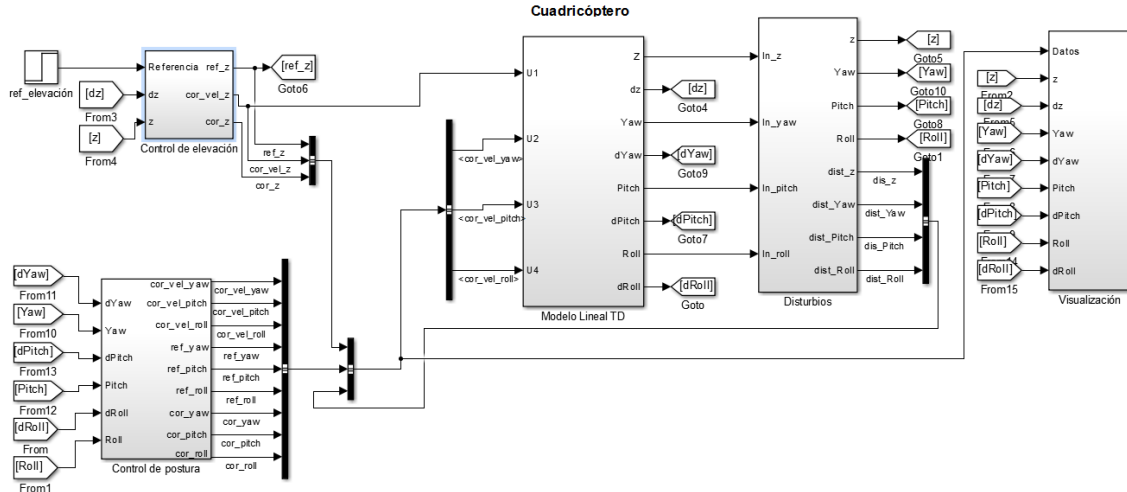


Figura 5.10: Esquema de control general en simulación

Las ganancias de los controladores PID en cascada, se ajustan para obtener características basados en los resultados obtenidos en [67] [68] [69] [70] para el control de postura y elevación. Consiguiendo tiempos de estabilización de entre 0,5 s y 2,5 s sin sobrepasos, para los ángulos *yaw*, *pitch*, *roll* y tiempos de 4 s a 6 s para la estabilización en el eje *z*, con sobrepaso menor a 20 %.

La sintonización de los controladores en cascada, para los ángulos de postura y

el control de elevación se realiza con ayuda del bloque para tiempo discreto *PID Controller* de Simulink. Como se visualiza en la Figura 5.11, este se introduce en el lazo interno para el control de velocidad de rotación y de elevación. El bloque *PID Controller*, permite modificar la respuesta del lazo de control, manipulando los controles del bloque denominadas *Response Time (seconds)* y *Transient Behavior* hasta lograr la respuesta deseada.

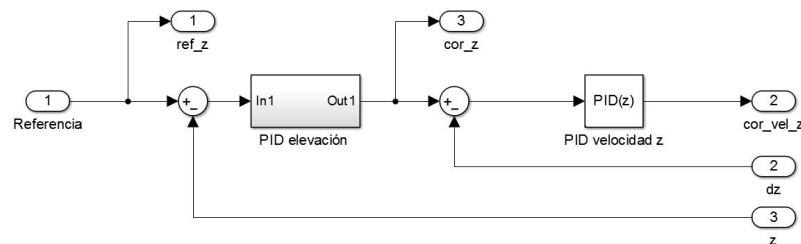


Figura 5.11: Esquema para sintonización de controladores

5.6.2. Control de postura

El control de postura, es el encargado de estabilizar cada uno de los tres ángulos que intervienen en el vuelo del cuadricóptero. Esto da lugar, a que se puedan ejecutar los demás controles que involucran la posición del mismo, en las coordenadas de tierra x, y, z . Este control debe mantener equilibrados los torques generados, evitando que el cuadricóptero rote sobre sí mismo de una manera indeseada. Se desea que el control de los ángulos *yaw*, *pitch* y *roll*, actúe de manera rápida sobre las perturbaciones que se presenten en el sistema. Por lo que se requiere que el sistema presente un tiempo de estabilización de 1 s, sin presentar sobrepasos. Este requerimiento se debe, a que la respuesta de los ángulos está directamente relacionada con la posición y presentar sobrepasos en un ángulo de postura, provoca un desplazamiento indeseado haciendo más difícil el mando del sistema en los ejes x, y .

Las ganancias para los controladores PID deben ser ajustados para obtener las características de la función de transferencia discreta deseadas dadas por

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{k}{z^2 - 1,9212z + 0,9231}, \quad (5.16)$$

donde la respuesta de la Figura 5.12 para la ecuación deseada, presenta un tiempo de estabilización de 1 s sin sobrepasos.

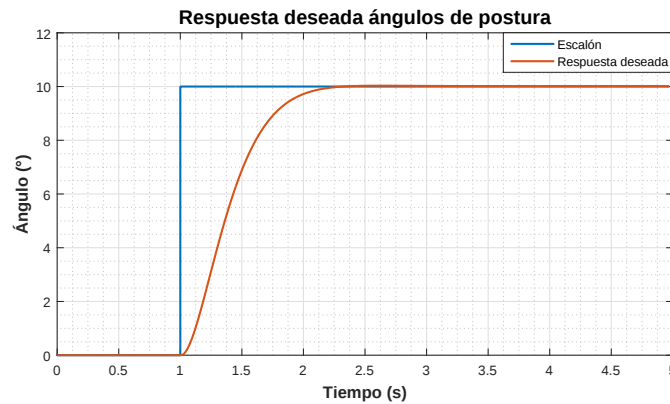


Figura 5.12: Respuesta deseada para los ángulos *yaw*, *pitch* y *roll*

Parámetros de los controladores

Luego de ajustar la respuesta del sistema, por medio del bloque *PID Controller* hasta encontrar una deseada. Se extraen las ganancias obtenidas para las etapas PID del control en cascada, listadas en las Tablas 5.2 y 5.3.

Controlador de velocidad angular	Ganancias PID		
	K_p	K_i	K_d
<i>Yaw</i>	6.459	1.893	0.020
<i>Pitch</i>	6.333	1.030	0.008
<i>Roll</i>	6.333	1.030	0.008

Tabla 5.2: Ganancias controladores de velocidad angular en simulación

Controlador de posición angular	Ganancias PID		
	K_p	K_i	K_d
Yaw	4	0	0
Pitch	5	0	0
Roll	5	0	0

Tabla 5.3: Ganancias controladores de posición angular en simulación

Para lograr la respuesta deseada sin sobrepasos, las ganancias obtenidas muestran la utilización de un controlador PID para el lazo de control de velocidad y controlador P para el lazo externo de posición angular.

Respuesta a disturbios

Se verifica ahora, la respuesta obtenida de las ganancias encontradas para los controladores, manteniendo una referencia de cero de grados e introduciendo un

disturbio en la salida de posición angular. Indicando esto, que los controladores son capaces de estabilizar la postura del cuadricóptero en una posición horizontal, manteniendo el empuje principal completamente en posición vertical.

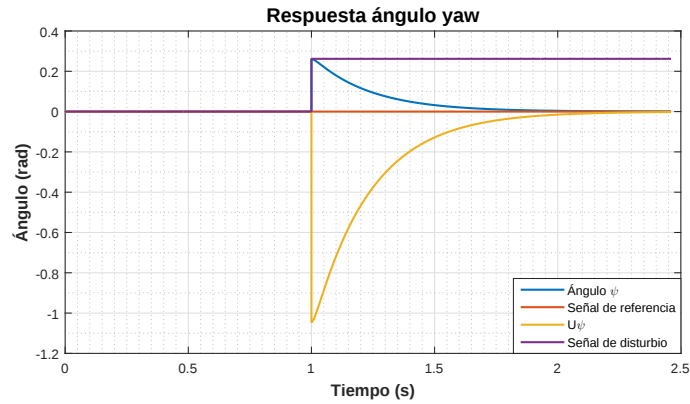


Figura 5.13: Respuesta a disturbios ángulo *yaw*

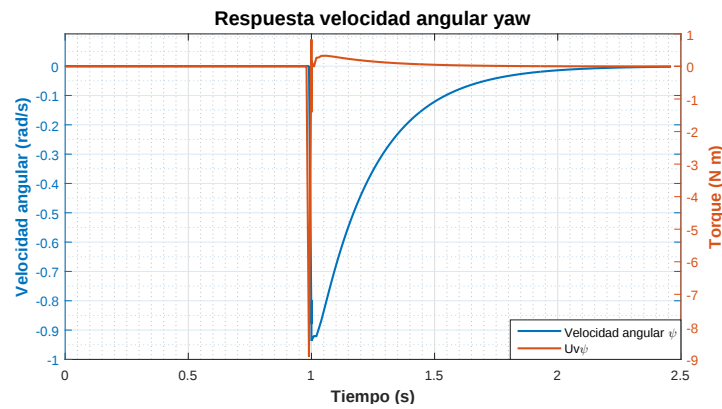


Figura 5.14: Respuesta velocidad angular *yaw*

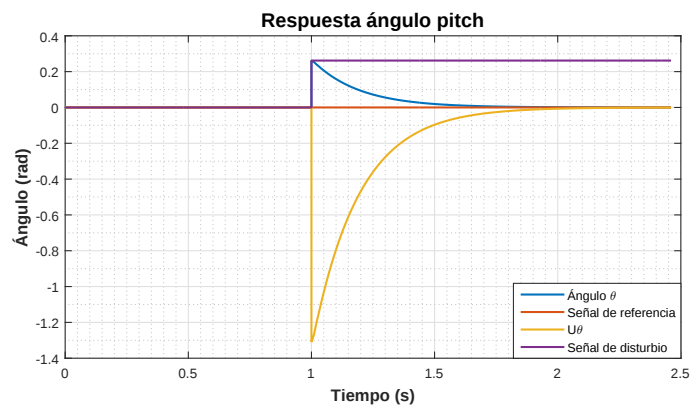
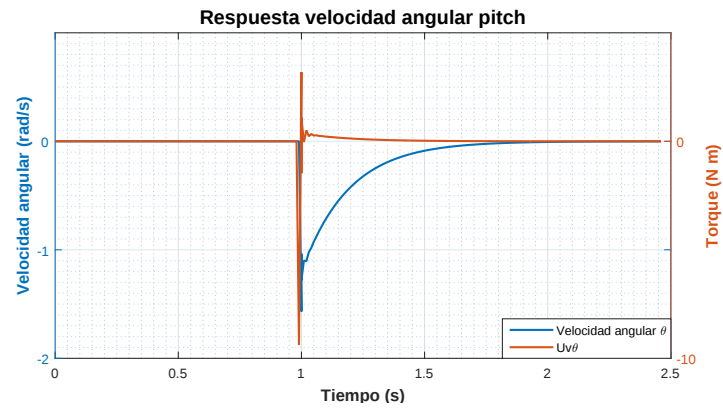
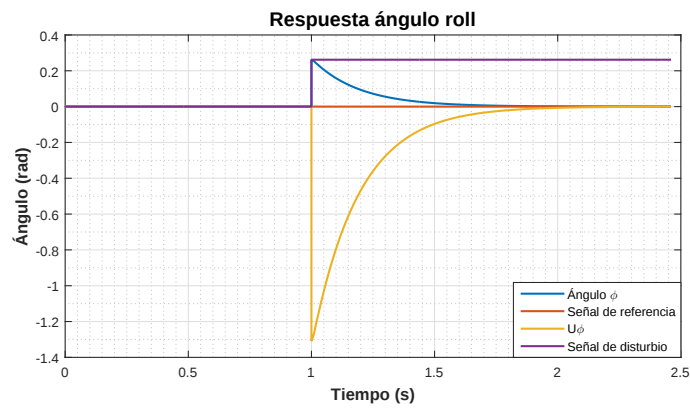
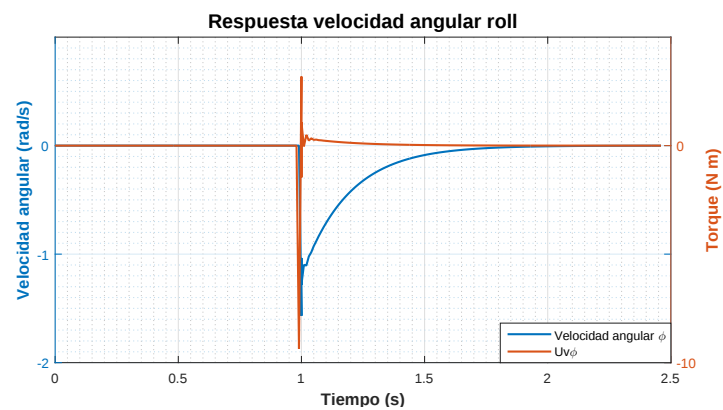


Figura 5.15: Respuesta a disturbios ángulo *pitch*

Figura 5.16: Respuesta velocidad angular *pitch*Figura 5.17: Respuesta a disturbios ángulo *roll*Figura 5.18: Respuesta velocidad angular *roll*

Las respuestas obtenidas en la Figuras 5.13 a 5.18 para *yaw*, *pitch* y *roll*, cumplen con las características deseadas para un tiempo de estabilización de 1 s y sin

presentar sobrepasos.

5.6.3. Control de elevación

Luego de que los controles de postura se encarguen de estabilizar el cuadricóptero, manteniendo el empuje generado por los motores en dirección vertical. Se debe ejercer un control sobre esta fuerza generada, para mantener al cuadricóptero en una referencia de elevación deseada. Puesto que si genera un empuje en crecimiento, el sistema seguirá elevándose sin control y si este se hace muy débil, no podrá producir la fuerza de sustentación necesaria para mantener el propio peso del cuadricóptero y descenderá inevitablemente.

Para ejercer el control de elevación, no se requiere un comportamiento tan exigente del sistema, en cuanto al tiempo de estabilización. Pudiendo estar en el orden de los segundos y además, durante la etapa de implementación, esta característica podría ayudar a rechazar variaciones rápidas presentadas en la medida de elevación. Para el control de elevación se requiere que el sistema cumpla con un tiempo de estabilización de 4 s y con un sobrepaso menor al 10 %. Las características deseadas para la elevación del cuadricóptero, se ajustan según la función de transferencia

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{k}{z^2 - 1,9799z + 0,9802}, \quad (5.17)$$

en donde la respuesta de la Figura 5.19 para la ecuación deseada, ante una entrada en escalón de 1 m, presenta un tiempo de estabilización de 4 s y un sobre paso menor al 10 %.

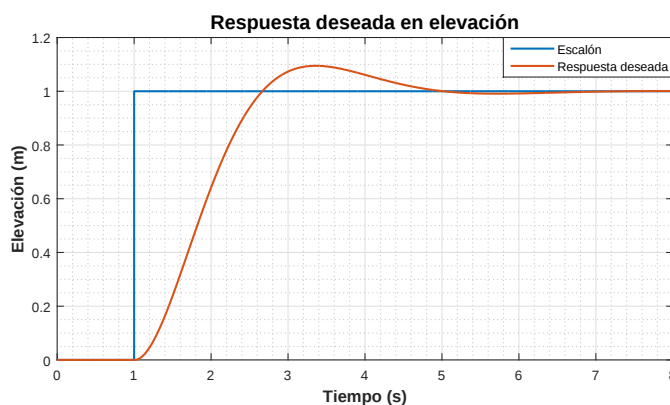


Figura 5.19: Respuesta deseada en elevación

Parámetros del controlador de altura

Como se menciona al inicio de esta sección, la sintonización de las ganancias de los controladores se realiza, utilizando el bloque (PID Controller) en el lazo de

velocidad y terminando el ajuste para el lazo externo. Como resultado, se obtiene un controlador PID para el lazo de velocidad sobre el eje z y controlador P para el control de elevación. Los valores para las ganancias se listan en la Tabla 5.4.

	K_p	K_i	K_d
Control velocidad en z	4.160	1.252	0.690
Control posición en z	1	0	0

Tabla 5.4: Ganancias controladores de elevación simulación

Respuesta al escalón

El controlador implementado debe estar en la capacidad, luego de mantener la elevación inicial, de seguir los cambios de referencia puestos por el usuario. Esto, sin presentar oscilaciones que puedan poner en riesgo la integridad del sistema y posteriormente, de estabilizarse en la nueva referencia deseada. Para el sistema de control puesto en simulación, se introduce un cambio de referencia de 1 m , luego de que el sistema se ha estabilizado inicialmente en 2 metros, como se muestra se aprecia en la Figura 5.20.

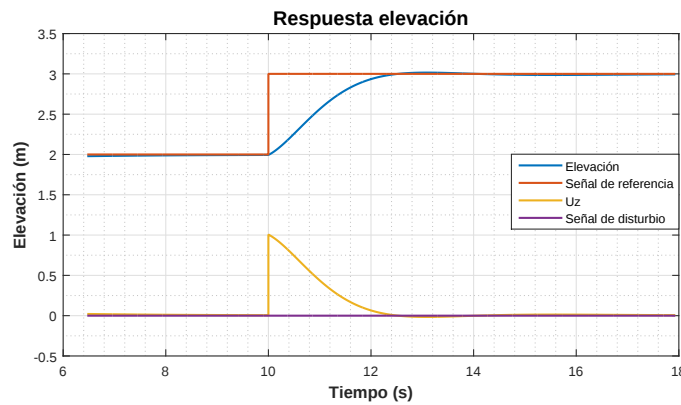


Figura 5.20: Respuesta al escalón en elevación

La respuesta obtenida para el cambio de referencia, cumple con los características deseadas. Presentando un tiempo de estabilización de 4 s con un sobrepaso menor al 10 %. Inmediatamente después de generar el cambio de referencia, el controlador de elevación ejerce la acción de control, disminuyendo a medida que se alcanza la referencia. La Figura 5.21 presenta la respuesta del controlador de velocidad y la fuerza de empuje ejercida para realizar el cambio de referencia.

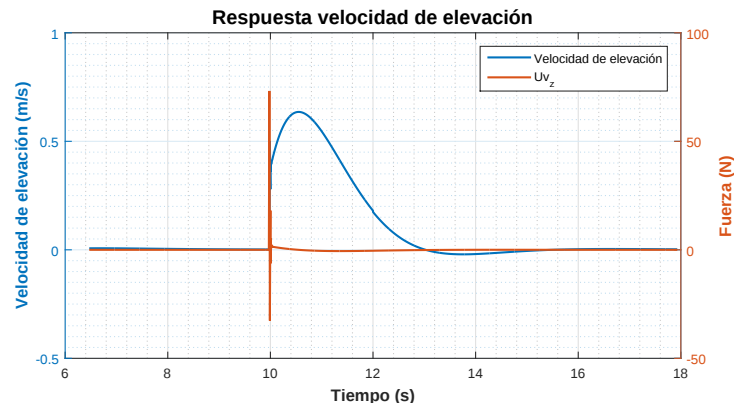


Figura 5.21: Respuesta de la velocidad de elevación

Respuesta a disturbios

Para analizar la respuesta que presenta el sistema de control ante entrada de disturbio, se establece inicialmente una referencia de 2.5 metros. Y posteriormente, se ejerce un disturbio de fuerza que desplaza al cuadricóptero un metro por debajo de la medida inicial. Las Figuras 5.22 y 5.23 muestran la respuesta del sistema en elevación y velocidad de elevación ante la perturbación, en donde nuevamente presentan la respuesta con las características deseadas.

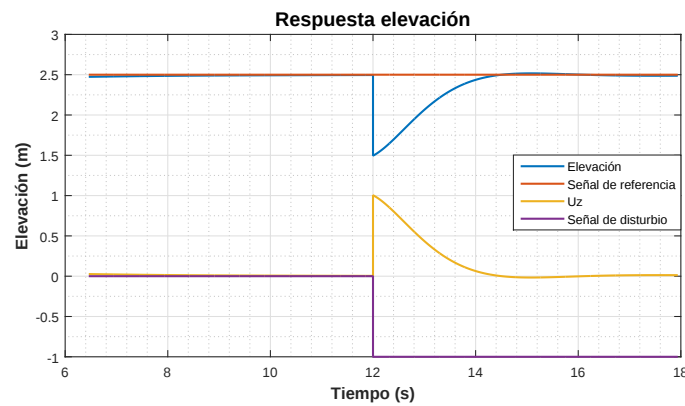


Figura 5.22: Respuesta ante disturbios en elevación

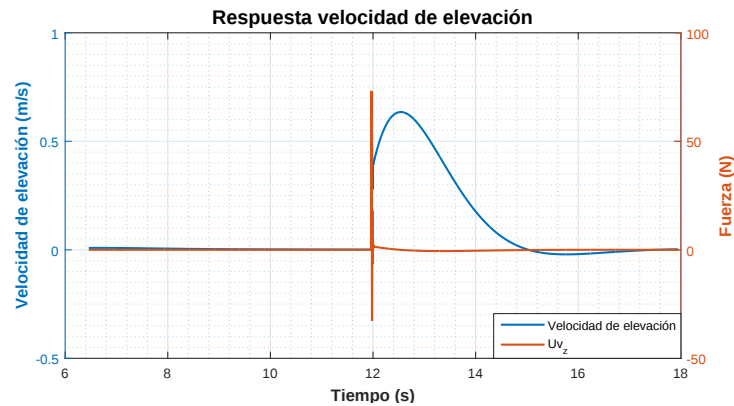


Figura 5.23: Respuesta de la velocidad ante disturbios en elevación

5.7. Conclusiones

La implementación del filtro Kalman permite al mismo tiempo de realizar una mejora en la medición, realizar la estimación de la velocidad de elevación. Variable para la cual no se cuenta con un sensor disponible en el celular utilizado.

Se diseñan 3 controles PID discretos en cascada, para controlar las tres velocidades de giro y los tres ángulos de postura del cuadricóptero y un cuarto PID en cascada para regular la velocidad de elevación y la elevación misma. El hecho de que sean controladores en tiempo discreto, permitirá la implementación directa en la aplicación encargada de realizar el control.

Con respecto al control en cascada, este tiene la capacidad de controlar en sus lazos internos, la velocidad de giro de los ángulos de postura y velocidad de elevación, reduciendolas a medida que se acerca al punto de referencia. Característica que brinda un mejor desempeño en cuanto respuesta a disturbios, disminuyendo los sobrepasos.

Capítulo 6

Implementación de las aplicaciones para el control de elevación

La integración del celular inteligente con el cuadricóptero, requiere de una aplicación que gestione tanto el uso de los diferentes sensores integrados en el celular escogido, así como el tratamiento de esta información para realizar los cálculos respectivos de las leyes de control. Y además, de permitir interactuar con los módulos de comunicación del celular, para ejercer las correspondientes correcciones sobre el cuadricóptero y la recepción de órdenes de mando desde una estación base.

El sistema desarrollado consta de dos partes: una aplicación controladora, encargada de realizar el control de postura y elevación del dispositivo. Y una segunda aplicación encargada de las órdenes de mando y monitorización de las variables de la aplicación servidora. La sección 6.1 presenta la descripción de las aplicaciones para el control del sistema y la sección 6.2, contiene el desarrollo de las aplicaciones implementadas de control y cliente, junto con las funciones más específicas de cada una.

6.1. Descripción de las aplicaciones para el control, mando, comunicación y monitorización

Para lograr la adaptación del dispositivo celular como parte controladora, en el sistema de elevación del cuadricóptero, se dispone a realizar una aplicación que permita la integración de los sensores necesarios propios del celular. Y que además, realice el procesamiento de los mismos, para ejecutar los requerimientos de control necesarios para lograr el vuelo.

Con el fin de lograr el objetivo propuesto, después de haber dimensionado las características del marco, los motores y los controladores de velocidad del cuadricópte-

ro para soportar el peso del celular, se realizan dos aplicaciones para dos dispositivos móviles. Una aplicación de control, que actúa como aplicación servidora en el protocolo de comunicación, localizada sobre el marco del cuadricóptero y encargada de la toma de datos de los sensores y el procesamiento de los mismos. Esta aplicación, también será la encargada de ejecutar la ley de control y permitir la modificación de los parámetros de las leyes implementadas. Otra función de la aplicación de control, es comunicarse a la interfaz con los dispositivos de control de velocidad.

La segunda aplicación (cliente), se encarga de dar los mandos de inicio y fin de las acciones de la aplicación servidora sobre el cuadricóptero. Además, de recibir datos de esta para la monitorización de la estabilidad y respuesta de la dinámica del sistema.

Las aplicaciones realizadas para los dispositivos denominadas “Control_Elevación” y “Control_Elevación_client” tienen como finalidad, realizar el control y la monitorización de la elevación del cuadricóptero. Estas, deben trabajar en conjunto para realizar las tareas programadas y llevar a cabo de manera controlada el funcionamiento del sistema. En esta sección, se muestran los diagramas de navegación de las dos aplicaciones desarrolladas. Se exponen las condiciones que deben cumplirse, para dar inicio a cada uno de los estados que ponen en marcha el control del cuadricóptero, desde las dos aplicaciones.

La Figura 6.1, muestra el diagrama de navegación para la aplicación de control, que corre sobre el celular ubicado en el marco del cuadricóptero. Luego de iniciar la aplicación, se debe ejecutar la acción para conectar con la aplicación cliente. Esta, involucra encender el bluetooth del celular y mostrar su id para ser reconocido por las demás aplicaciones. Posteriormente, se lanza la actividad de control, en donde se configuran los diferentes parámetros de los PID y del filtro Kalman. Para quedar a la espera por las órdenes de mando desde la aplicación cliente.

Se emite una orden de **armado** desde la aplicación cliente, que permite a la aplicación de control iniciar un ciclo temporizador para realizar el muestreo de las variables a controlar. Y además, de en ese mismo intervalo de tiempo, ejecutar los cálculos de las dinámicas de control cuando son habilitadas. Luego de recibir la orden de armado, la aplicación recibe las señales de referencia del sistema.

Como medida de seguridad, se espera una segunda confirmación para permitir la acción de los controladores sobre los motores. Esta confirmación, consiste en aumentar de forma manual la barra de control deslizante denominada *Throttle*, con el fin de evitar activaciones involuntarias. Por último, el proceso termina con el almacenamiento en un archivo de texto de las variables involucradas en el sistema de control, para un posterior análisis.

La primera actividad de la aplicación cliente, después de iniciar la aplicación, detallada en la Figura 6.2, al igual que en la aplicación de control, consiste en el emparejamiento bluetooth entre los dos dispositivos, para dar paso a la actividad



Figura 6.1: Diagrama de navegación aplicación de control

de mando y monitoreo. Desde esta actividad, se emite el comando de **armar** que habilita la lectura de variables desde la aplicación de control y al mismo tiempo, la monitorización de las variables *yaw*, *pitch*, *roll* y elevación.

Por último, se emite la orden para iniciar la acción de los controladores sobre los motores a través de *Throttle*, activando seguidamente el control automático de elevación o enviando la potencia hacia estos manualmente.

6.2. Desarrollo de las aplicaciones de control y cliente

Las aplicaciones de control y cliente se desarrollaron en el entorno de programación Android Studio, para versiones Android superiores a 4.1. Cada una de las aplicaciones cuenta con su respectiva interfaz, para permitir la modificación de parámetros, visualización de variables y acciones de mando.

6.2.1. Aplicación de control

La aplicación de control, al ser la directamente implicada en realizar el control de elevación, debe permitir interactuar con las variables involucradas y las acciones de control que se van a ejercer. Por lo que se diseña una interfaz, que permite configurar distintos parámetros del funcionamiento del sistema de control.

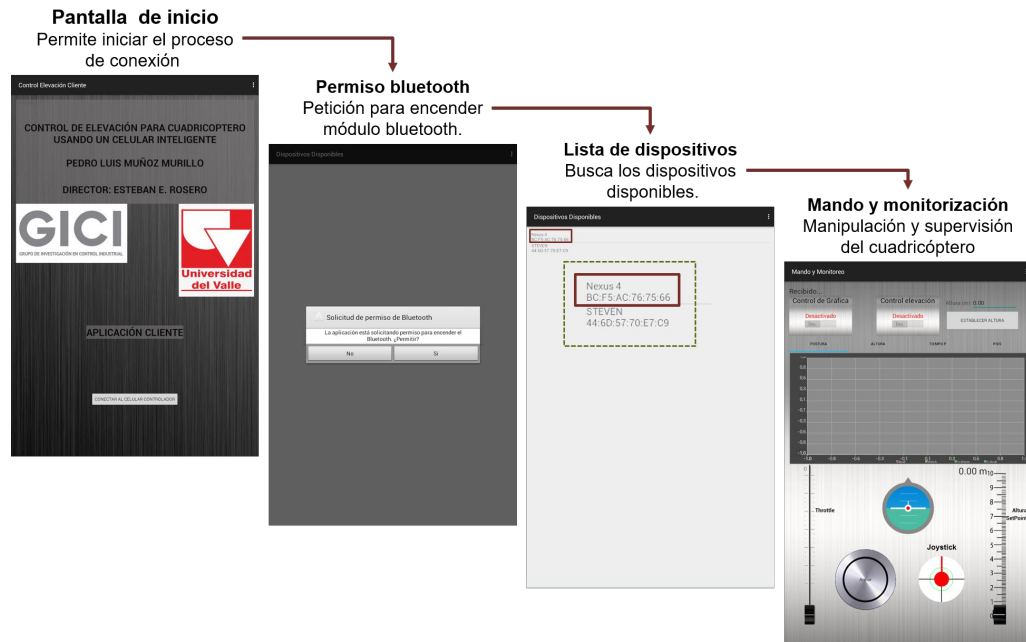


Figura 6.2: Diagrama de navegación aplicación cliente

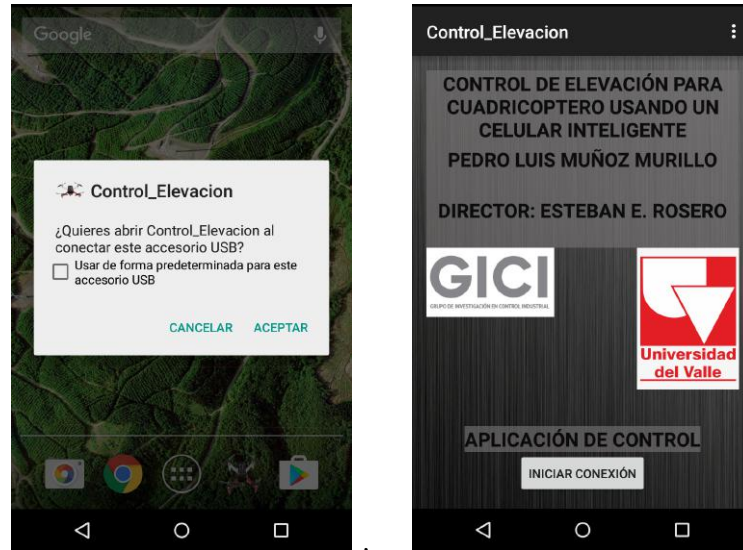
Al conectar el celular por primera vez al Arduino mega ADK, se reconoce a esta tarjeta como un accesorio USB. Por lo que se despliega una pequeña ventana de confirmación, haciendo la petición para vincular este dispositivo con la aplicación de control, como se observa en la Figura 6.3a. Se selecciona la casilla si se desea vincular de forma permanente y se presiona la opción aceptar para iniciar la aplicación.

Al iniciar la aplicación, se visualiza la interfaz de la Figura 6.3b, donde se dispone de un menú de información y un botón para iniciar el emparejamiento bluetooth con la aplicación cliente.

Al presionar el botón de INICIAR CONEXIÓN, se hace la petición para activar el bluetooth del dispositivo y ponerlo en modo visible, lo cual se deberá aceptar. Seguidamente, se despliega una segunda interfaz en la que se incluyen tres pestañas: CONF. PID, DATOS y CONF. FILTRO, como se observa en la Figura 7.19.

La pestaña CONF. PID mostrada en la Figura 7.19a, cuenta con casillas editables que permiten variar las ganancias k_p , k_i y k_d de la ecuación (5.10). Implementada para los controladores en cascada de velocidad angular y de postura *pitch*, *roll* y *yaw*, como también para el controlador de velocidad de elevación y elevación. Estos parámetros se permiten modificar, con el objetivo de sintonizar los controladores durante las pruebas realizadas. Una vez se modifica el parámetro deseado, se presiona el botón CARGAR PID para actualizar los cambios.

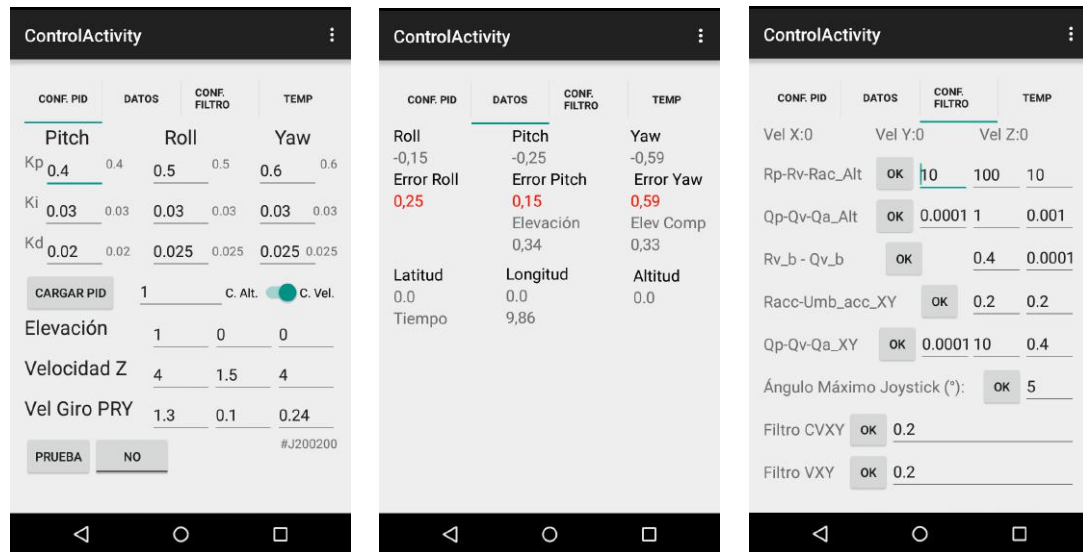
La segunda pestaña DATOS presentada en la Figura 7.19b, visualiza de manera numérica los valores medidos para los ángulos de postura, el error con respecto a



(a) Petición de vinculación del accesorio USB

(b) Pantalla de inicio aplicación de control

Figura 6.3: Pantallas de inicio



(a) Configuración de PID's

(b) Visualización de datos

(c) Configuración filtro Kalman

Figura 6.4: Interfaz de la aplicación de control

la referencia, la altura estimada del cuadricóptero, lecturas de latitud, longitud y altitud del GPS para futuras implementaciones y el tiempo de muestreo de los hilos de control.

En la Figura 6.4c, se visualiza la pestaña CONF. FILTROS, que permite la

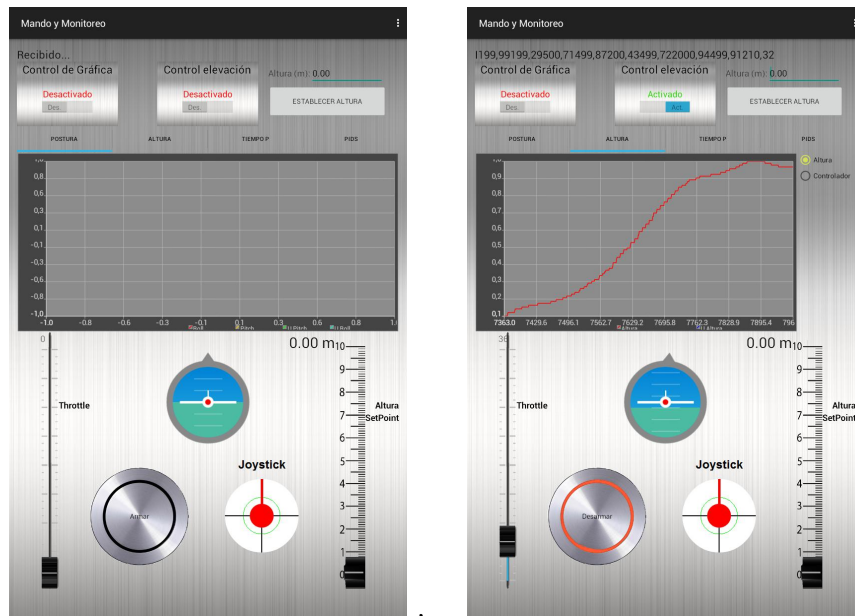
edición de los parámetros R (error de la covarianza) y Q (error estimado de la medida) de las variables involucradas en el proceso de cálculo del filtro Kalman, para el filtrado de altura y estimación de la velocidad de elevación.

6.2.2. Aplicación cliente

La aplicación cliente, se desarrolla sobre el dispositivo que hace el papel de estación base, para realizar el mando del sistema. Y como se menciona anteriormente, aprovechando el tamaño de su pantalla, se desarrolla una aplicación que permite monitorear de manera gráfica las variables del proceso.

Al lanzar la aplicación cliente, se inicia al igual que la aplicación de control, con una interfaz que permite establecer la conexión en este caso al celular de control, que se encuentra en modo visible para los demás dispositivos bluetooth.

Luego de presionar el botón CONECTAR AL CELULAR CONTROLADOR, despliega una segunda interfaz en la que se listan los dispositivos bluetooth disponibles, eligiendo el celular controlador Nexus 4 utilizado en este trabajo.



(a) Componentes de la interfaz de mando y monitoreo

(b) Pestañas de la interfaz cliente

Figura 6.5: Interfaz de mando y monitoreo

Posteriormente a seleccionar el dispositivo, se muestra la interfaz de usuario de mando y monitoreo presentada en la Figura 6.5a. Esta aplicación dispone de diferentes controles, entre los que se encuentra en primer lugar el botón de armado-

desarmado, encargado de activar y desactivar la marcha del cuadricóptero. Se cuenta con dos barras deslizantes: la primera barra denominada SetPoint Altura, como se indica, permite cambiar de manera más visual la referencia de altura. Y la segunda barra *Throttle*, manipula de manera manual la potencia de los motores. Otra manera para establecer el set point de altura se hace por medio del control editable Altura(m) y del botón ESTABLECER ALTURA.

La interfaz cuenta también con un *joystick*, que permite manipular los ángulos de referencia de *pitch* y *roll* para estabilizar de manera manual la posición del cuadricóptero en las coordenadas x , y .

Se dispone de 4 pestañas: POSTURA, ALTURA, TIEMPO P y PIDS. La pestaña POSTURA permite visualizar de manera gráfica el comportamiento de los ángulos *pitch*, *roll* y de las señales de control obtenidas por los controladores, como se detalla en la Figura 6.5a. La pestaña ALTURA, indicada en la Figura 6.5b, muestra el comportamiento de la altura alcanzada del cuadricóptero, así como la señal de control. En TIEMPO P, se tiene una visualización de las variaciones de los tiempos en los hilos de muestreo, información utilizada para ayudar en la selección del tiempo de muestreo, para el cálculo de las señales de control.

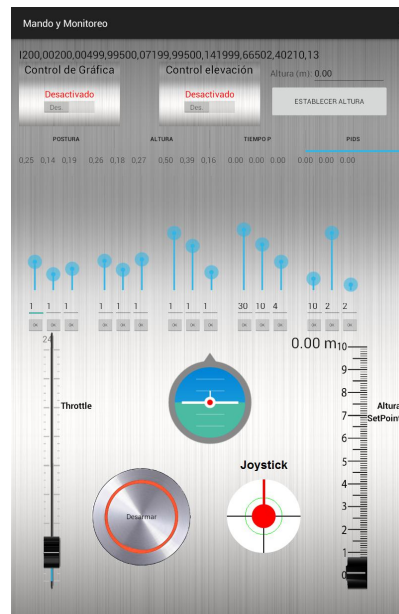


Figura 6.6: Interfaz cliente: pestaña PID

La cuarta pestaña PIDS observada en la Figura 6.6, formada por varios grupos de controles deslizantes. Permite modificar los valores de las constantes k_p , k_i y k_d , de los controladores implementados en la aplicación de control, para ayudar en el proceso de sintonización de los mismos. Los valores configurados tanto en la aplicación de control, como en la aplicación cliente son iguales en una principio. Pero al modificar los controles de la aplicación cliente, estos tienen prioridad sobre

los configurados en la aplicación servidora. Esto con el objetivo, de realizar cambios de manera más rápida e incluso sin detener por completo el sistema.

Para tener otra vista del cuadricóptero, se implementa un componente de postura que genera una visión desde la perspectiva del mismo, mediante la medida de los ángulos *yaw*, *pitch* y *roll*.

Por último, se cuenta con dos interruptores deslizantes, uno denominando control gráfica que realiza la función de permitir o no, la visualización de la gráfica de los datos *pitch* y *roll*. Y un segundo interruptor nombrado control elevación, como medida de seguridad para activar el control de elevación automático.

6.3. Conclusiones

Se desarrollan dos aplicaciones para controlar el funcionamiento del cuadricóptero: la primera aplicación permite modificar los diferentes parámetros de las partes involucradas en el sistema de control. Lo que facilita ajustar las ganancias y por ende la respuesta de los controladores, a medida que se lleva a cabo la etapa de pruebas. Y una segunda aplicación, que permite activar de manera controlada, las leyes de control del cuadricóptero y realizar el mando del mismo.

Capítulo 7

Validación y pruebas de las aplicaciones desarrolladas

En el Capítulo 6, se describen las aplicaciones desarrolladas, tanto para el control automático del sistema para la estabilización de postura y elevación del cuadricóptero, como para el mando y supervisión del mismo. Estas aplicaciones hacen posible gestionar los recursos del celular, para cumplir con el objetivo de control. En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos en la integración del celular al marco del cuadricóptero, en cuanto a estabilización y rechazo a disturbios en los controles de postura y elevación.

Para la prueba de los ángulos del cuadricóptero se hace uso de la plataforma de pruebas de la sección 7.1. En la sección 7.2 y 7.3 se tratan respectivamente los resultados obtenidos en la verificación del tiempo de muestreo y en la estimación de altura y velocidad de elevación mediante la fusión sensorial. El comportamiento de los controladores de postura *yaw*, *pitch* y *roll* y de elevación se presenta en las secciones 7.4 y 7.5. Y por último, se expone el sistema final implementado en la integración celular – cuadricóptero en la sección 7.6.

7.1. Plataforma de pruebas

Una parte fundamental para el vuelo exitoso del cuadricóptero, es la correcta estabilización de los ángulos *yaw*, *pitch* y *roll*. Por lo que la primera prueba, consiste en evaluar el desempeño de los controladores para estos.

Esta prueba, se realiza mediante la ayuda de una base de pruebas, diseñada para permitir que el cuadricóptero gire sobre su mismo eje, sin permitir el desplazamiento en el plano x, y, z . Con la base mostrada en la Figura 7.1, se realiza la sintonización de las constantes de los controladores de postura partiendo de los parámetros encontrados en la simulación. Y además, de permitir evaluar el desempeño de los

misimos de manera segura en cuanto a la inyección de disturbios.



Figura 7.1: Plataforma de pruebas

7.2. Verificación del tiempo de muestreo

El tiempo de muestreo seleccionado, para realizar el cálculo de las señales de control discretas se estableció en 10 ms . Tomando este tiempo para realizar la lectura de los sensores, realizar el filtrado y ejecutar las leyes de control. El método usado durante la implementación se basó en temporizadores proporcionados por el entorno de programación, pero al hacer una medición de estos tiempos se tienen diferentes mediciones.

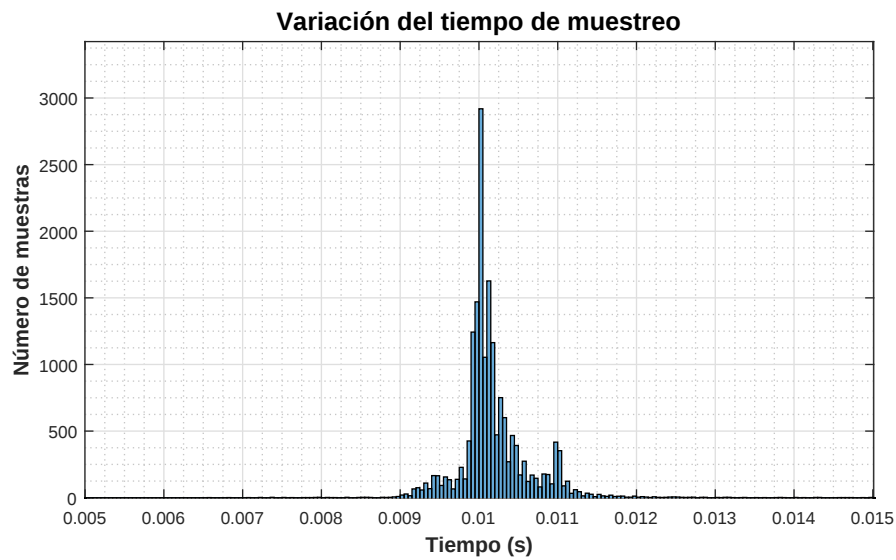


Figura 7.2: Variación del tiempo de muestreo

Los 17498 datos recolectados sobre la variación de los tiempos de muestreo,

presentan una desviación estándar de $0,55\text{ ms}$ y una media en $10,19\text{ ms}$. Como se presenta en el histograma de la Figura 7.2, la muestra central se basa en los 10 ms esperados, con variaciones cercanas de $9,9\text{ ms}$ y $10,15\text{ ms}$. Estando el grupo de principal de muestras, en el rango de 9 y 11 ms .

Como se menciona en el Capítulo 5, el tiempo de lectura de los sensores por parte del celular, se estableció en 5 ms . Por lo que al utilizar un tiempo de muestreo mayor por parte de la aplicación, se está asegurando una lectura nueva en cada periodo. Para los tiempos menores o iguales a 10 ms , el controlador toma las medidas de las variables, realiza los cálculos y ejerce las acciones de control en tiempos menores si es el caso. Pero, si no se alcanza a realizar todo el procesamiento de los datos por tiempos muy pequeños, la orden de corrección hacia los motores, será la acción calculada en el intervalo anterior. De igual forma, cuando los intervalos del tiempo de muestreo se extienden a más de 10 ms , las señales calculadas hacia los motores, se mantienen durante este periodo de tiempo.

7.3. Estimación de altura y velocidad

Luego de ajustar los parámetros del filtro Kalman, para estimar la posición y velocidad sobre el eje z , introducido en la sección 5.3, se realizan las pruebas utilizando solo con el celular, es decir, sin poner en funcionamiento los motores del cuadricóptero para comprobar la correcta operación del filtro. Para la realización de esta prueba, se tiene en cuenta en primer lugar, que la medida tomada por el barómetro puede ser afectada por el calor del sol. Y siendo una de las medidas tomadas para la estimación de estados, influye directamente el comportamiento del filtro. Debido a que no se implementa una compensación por temperatura, se realizan las pruebas en horas de 7 a 10 de la mañana y de 4 pm en adelante buscando las horas con menos incidencia del sol durante el día.

Como se visualiza en la Figura 7.3, se lleva el celular desde un punto de referencia cero hasta una posición fija de $2,5\text{ m}$ y después de un intervalo de tiempo de 40 s , se vuelve a su posición inicial. Es importante aclarar que durante este tiempo no se cambia la posición del equipo en ningún momento.

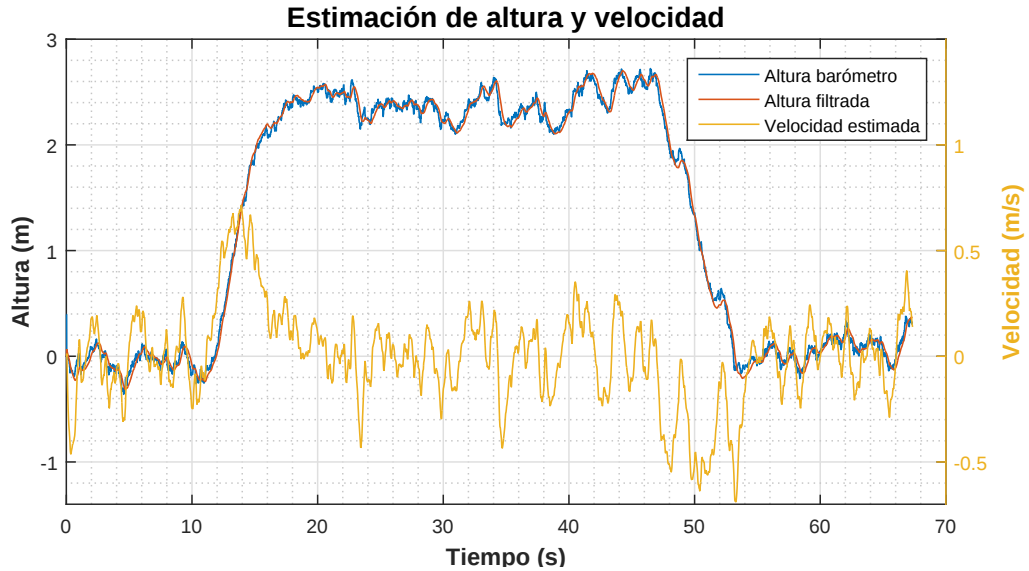


Figura 7.3: Estimación de altura y velocidad con filtro Kalman

La medida obtenida, permite eliminar las variaciones en alta frecuencia de la medición, suavizando los cambios obtenidos inherentes a la medición realizada por el barómetro. La medida presenta variaciones en baja frecuencia con cambios máximos de 40 *cm*, sin que se haya cambiado la altura del celular en ningún momento. La estimación hecha para la velocidad, permite seguir los cambios realizados de elevación, aumentando de manera positiva para los cambios hacia arriba del celular y marcando velocidades negativas para los cambios de una altura mayor a una menor.

7.4. Controladores de postura: *yaw*, *pitch* y *roll*

El control de postura, es una de las partes fundamentales para un correcto vuelo del cuadricóptero. Como se estudia en capítulos anteriores, el control de postura consta de tres controles diferentes, es decir, uno para cada ángulo y a su vez cada controlador, está formado de un control en cascada de posición y velocidad angular. Cada uno de los controles PID, se sintoniza y posteriormente se prueba su correcta respuesta, antes de realizar la sintonización y prueba del control de elevación.

Para realizar las pruebas sobre el control de ángulos, se hace uso de la base pruebas de la Figura 7.1. En donde se ubica el cuadricóptero y se procede a incrementar manualmente la velocidad de los motores, por medio de la aplicación cliente desarrollada. La velocidad se incrementa hasta un punto en donde el cuadricóptero se estabilice y mantenga horizontalmente sobre su eje central, por el empuje generado por sus cuatro hélices. Y posteriormente se inyecta un disturbio de fuerza que modifica el valor de cada uno de los ángulos involucrados en el sistema.

7.4.1. Parámetros de los controladores

La correcta sintonización de los controladores de postura, permite en primer lugar al cuadricóptero, mantener un vuelo estable, facilitando el mando del mismo. Y en segundo lugar, que esté en capacidad de controlar las entradas de disturbio que podría tener el sistema, como podrían ser cambios en el viento durante el vuelo u otros.

Partiendo de las ganancias encontradas en el Capítulo 4, para los controladores PID de control de ángulo y velocidad angular, se terminan de ajustar estos parámetros por medio de la interfaz diseñada y la base de pruebas. Teniendo presente, que estas ganancias mostraron un buen comportamiento ante las señales de disturbio introducidas. Por lo que se considera los parámetros simulados, como un buen punto de partida para la sintonización de los valores reales. Los disturbios de fuerza presentados en la etapa de simulación, representan en el momento de llevar el sistema a pruebas reales, perturbaciones provocadas por el entorno. Como pueden ser cambios de dirección del viento o ráfagas aisladas del mismo, que pueden hacer que el cuadricóptero sufra inclinaciones en cualquiera de los ángulos de postura.

Los valores finales obtenidos para las ganancias de los controladores de velocidad y posición angular se listan en la Tabla 7.1 y la Tabla 7.2 respectivamente. Luego de sintonizar las ganancias en la base construida, se procede a realizar pruebas en campo abierto. Aunque buscando por seguridad, horas del día en los cuales no se presente vientos demasiado fuertes.

	Ganancias PID		
Controlador de velocidad angular	K_p	K_i	K_d
<i>Yaw</i>	1.3	0.1	0.24
<i>Pitch</i>	1.3	0.1	0.24
<i>Roll</i>	1.3	0.1	0.24

Tabla 7.1: **Ganancias controladores de velocidad angular**

	Ganancias PID		
Controlador de posición angular	K_p	K_i	K_d
Yaw	0.6	0.03	0.025
Pitch	0.4	0.03	0.02
Roll	0.5	0.03	0.025

Tabla 7.2: **Ganancias controladores de posición angular**

7.4.2. Respuesta a disturbios

En esta sección, se estudia la respuesta obtenida con los controles en cascada, que regulan el comportamiento de los ángulos de postura ante una entrada de disturbio. Esta entrada se genera intencionalmente, ayudados por la plataforma de pruebas y visualizando el comportamiento de cada una de las variables involucradas. Todas las pruebas se realizan teniendo como ángulo de referencia 0 grados, posición en la cual el cuadricóptero se encuentra en posición horizontal y desde el cual se miden los ángulos de rotación como positivos o negativos, según se gire hacia la derecha o izquierda de un respectivo eje de rotación.

Control de ángulo *yaw*

La Figura 7.4 muestra los disturbios generados para el ángulo *yaw* del cuadricóptero, dos disturbios de magnitud negativa de 32° y 37° y dos disturbios positivos de 27° y 30° . El controlador PID, genera una señal de control (Corrección Yaw) contraria, como respuesta a los disturbios generados. Esta señal de control, sirve como referencia al lazo interno de velocidad angular.

Para el ángulo *yaw*, se obtienen ante los disturbios generados, tiempos de estabilización de 1 segundo sin sobrepasos, cumpliendo con los requerimientos establecidos.

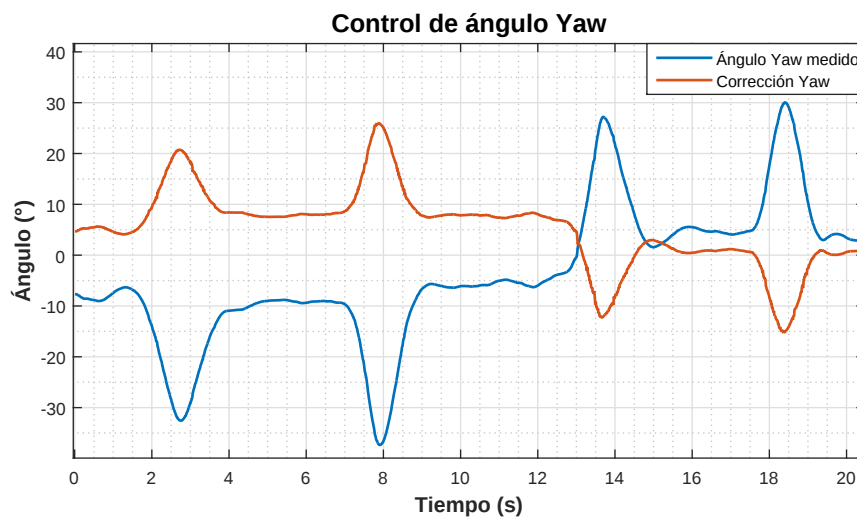


Figura 7.4: Respuesta a disturbio ángulo *yaw*

Las variables del lazo interno de control de velocidad angular, se muestran en la Figura 7.5. En los primeros instantes de tiempo, después de presentarse el disturbio, se tiene la mayor referencia de velocidad por lo que el sistema responde con un incremento de la velocidad angular y a medida que el sistema se acerca a la referencia de 0° la velocidad tiende a disminuir. Todo el movimiento se hace en sentido contrario al disturbio generado.

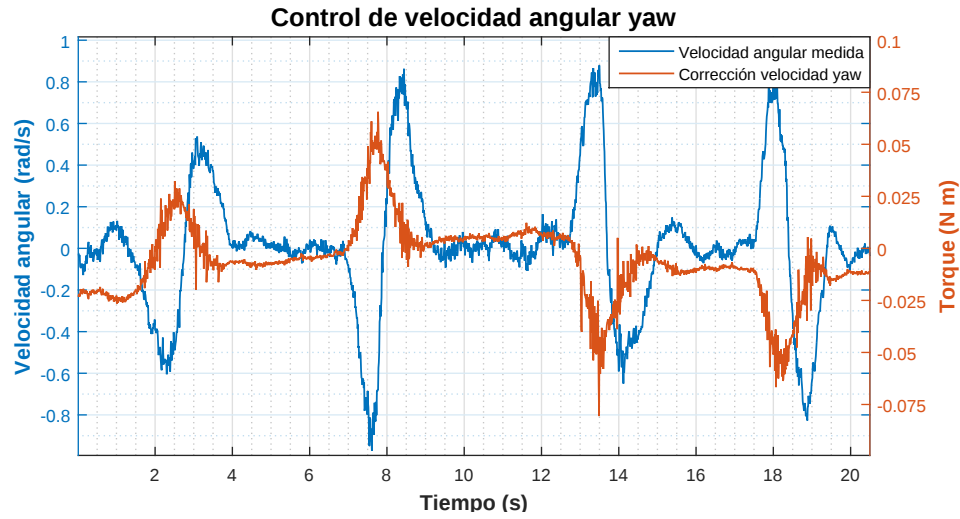


Figura 7.5: Respuesta del control de velocidad angular *yaw*

La señal de control del PID de velocidad angular (Corrección velocidad Yaw), genera el valor de corrección en un dato de 0 a 255 como se estudió en el Capítulo 5. Esta corrección se lleva a la suma de señales de control mostrada en la Figura 5.9, para obtener la señal de control para cada motor.

Control de ángulo *pitch*

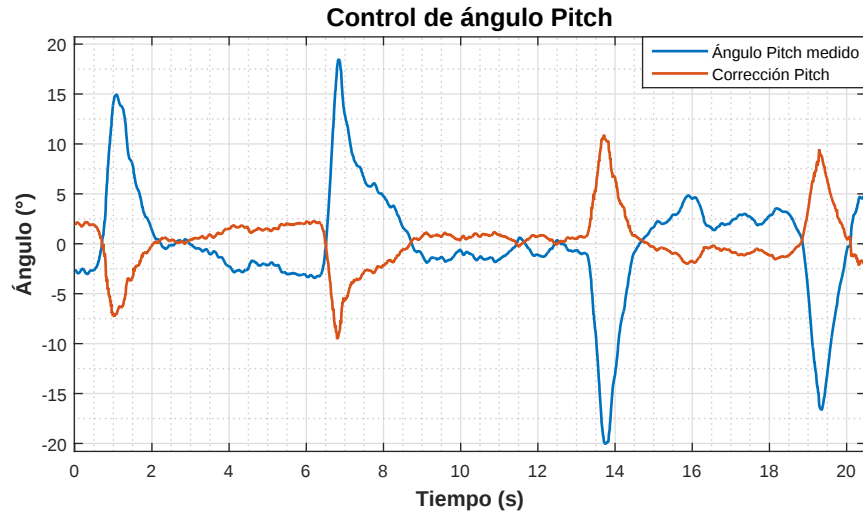
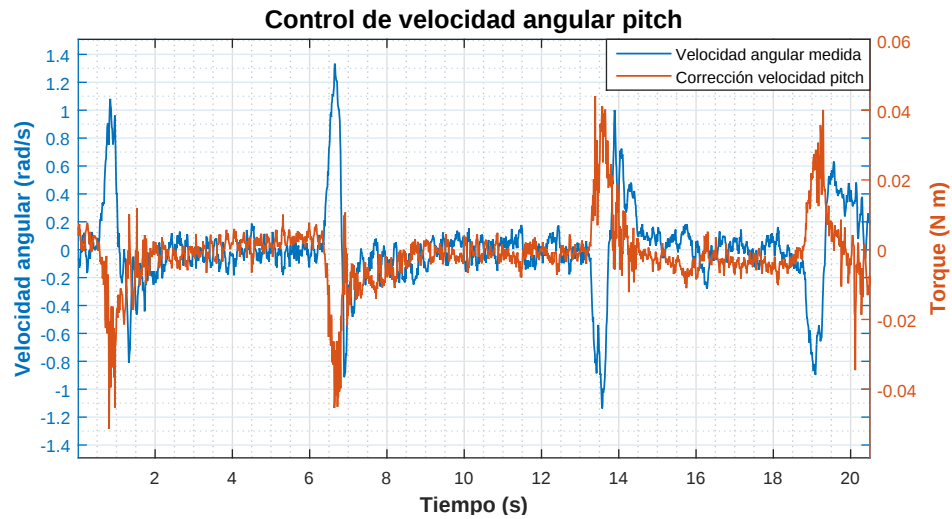
Para la prueba de rechazo a disturbios en el ángulo *pitch*, se generan cuatro perturbaciones con un valor de 15° , 18° , -20° y -16° . Como se aprecia en la Figura 7.6, el controlador genera la señal de corrección (Corrección Pitch), buscando estabilizar nuevamente el sistema en el ángulo de referencia de cero grados.

Para el control del ángulo *pitch* se logra las características requeridas con un tiempo de estabilización ante los disturbios generados de 1 segundo, sin presentar sobrepasos debidos a estos.

La respuesta del lazo interno de control de velocidad angular *pitch*, se muestra en la Figura 7.7. La medida de velocidad angular va cambiando junto con la referencia, disminuyendo a medida que se acerca a la referencia cero. La Figura 7.7 muestra también la señal de control generada corrección velocidad *pitch* para la acción sobre los motores.

Control de ángulo *roll*

Para comprobar el comportamiento del ángulo *roll*, se generan de igual manera cuatro disturbios de valores -16° , -18° , 22° y 18° como se observa en la Figura 7.8. Generando tiempo de estabilización requerido, al igual que en el control de *pitch*,

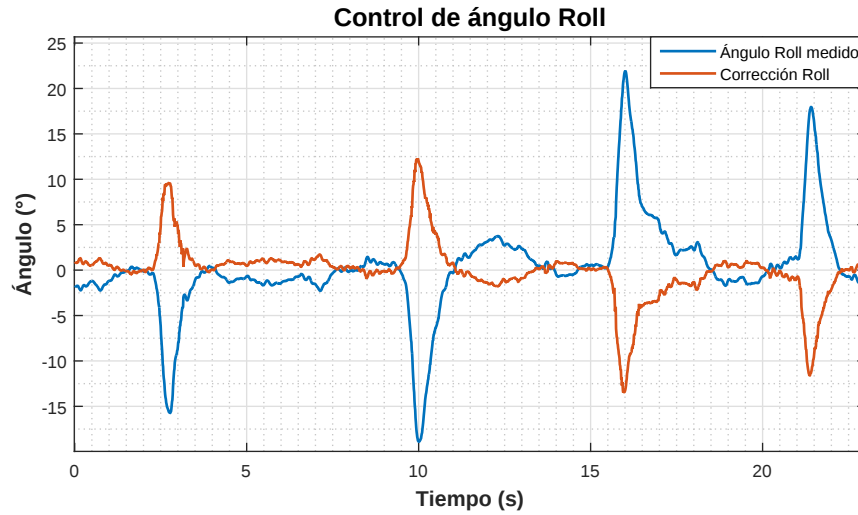
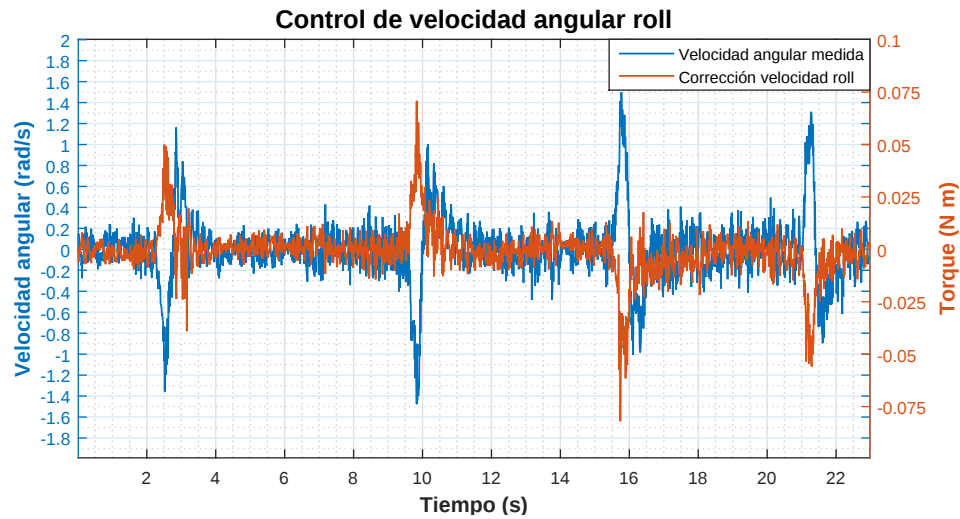
Figura 7.6: Respuesta a disturbio ángulo *pitch*Figura 7.7: Respuesta del control de velocidad angular *pitch*

de alrededor de 1 segundo sin sobrepasos en la medida.

La respuesta obtenida para el control de velocidad angular *roll*, se muestra en la Figura 7.9 junto con la señal de corrección enviada hacia los motores.

Señales de control hacia los motores

Después de generar las señales de control, se integran en las cuatro correcciones necesarias para modificar la velocidad de cada uno de los motores. Se realiza una visualización de estas cuatro acciones de control, para monitorear su comportamiento y verificar que no se esté llevando los motores hasta la saturación.

Figura 7.8: Respuesta a disturbio ángulo *roll*Figura 7.9: Respuesta del control de velocidad angular *roll*

Las respuestas a disturbios anteriormente expuestas, se generaron en orden *roll* - *pitch* - *yaw*, anotación necesaria para comprender las señales presentadas en la Figura 7.10. Donde las cuatro primeras perturbaciones, corresponden a las generadas para el ángulo *roll*, las cuatro siguientes para el ángulo *pitch* y las cuatro últimas para *yaw*.

Al generar disturbios negativos en *roll*, el sistema responde disminuyendo la velocidad de los motores 1 y 4 mientras la aumenta para los motores 2 y 3. El caso contrario ocurre para los disturbios positivos, aumentando la velocidad para 1 y 4 y disminuyendo para 2 y 3. Para disturbios positivos en *pitch*, se aumenta la velocidad en los motores 1 y 3, mientras se disminuye la velocidad en 2 y 4. Se actúa de manera

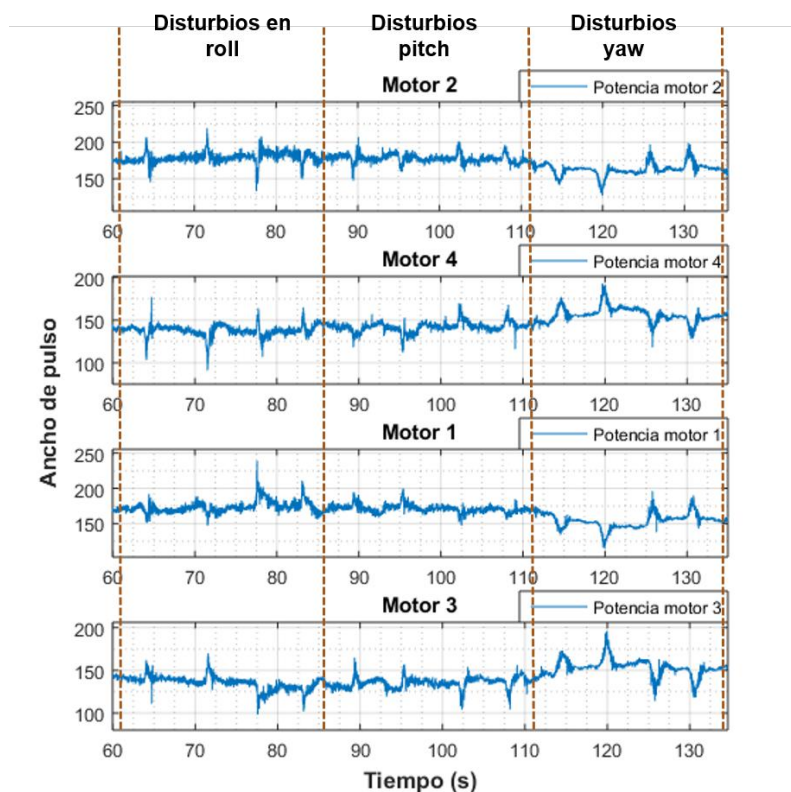


Figura 7.10: Señales de control en cada motor

inversa para disturbios negativos. La respuesta a entradas de disturbio negativas en el ángulo *yaw*, se hace aumentando el ancho de pulso enviado a los motores 3 y 4 y disminuyendo para 1 y 2. Y para disturbios positivos ocurre el caso contrario.

7.5. Control de elevación

El objetivo principal de este trabajo, es lograr la elevación del cuadricóptero usando el celular inteligente, permitiendo mantener una posición deseada en el eje *z*. Liberando al operario de ejercer el control de esta variable y preocupándose solo por el control de la posición *x* y *y* del mismo.

El control implementado, consta de una bucla interna de control de velocidad sobre el eje *z* y una bucla externa de control de elevación. Como se estudió en el Capítulo 5, el control de elevación se realiza modificando el empuje principal del cuadricóptero, afectando los cuatro motores en igual magnitud.

7.5.1. Parámetros de los controladores

La sintonización de los parámetros para los controladores de elevación, presenta uno de los mayores retos durante la implementación. Esto, debido a las características del sistema, principalmente su inestabilidad y peso, haciendo que provocar oscilaciones intencionales o no deseadas, resulte sustancialmente peligroso para el sistema y en ocasiones para el que realiza la sintonización de los controles. Debido a esto, se parte el ajuste de los controles, desde los valores encontrados para las ganancias en la sección de simulación de este documento.

Los valores finales para las ganancias de los controladores PID de velocidad y posición en z se muestran en la Tabla 7.3.

	K_p	K_i	K_d
Control velocidad en z	4	1.5	4
Control posición en z	0.8	-	-

Tabla 7.3: **Ganancias controladores de elevación**

Las ganancias sintonizadas para el control en cascada, arrojan como resultado un controlador proporcional para el control de posición en el eje z y un controlador PID para el control de velocidad de elevación.

7.5.2. Prueba de estabilización en elevación

Como primera prueba para medir el correcto funcionamiento del control de elevación, se requiere que el celular pueda mantener al cuadricóptero en una primera posición deseada, sin entrar en oscilaciones crecientes por causa de variaciones en la medición o por su propio peso. Es decir, se requiere que el cuadricóptero pueda realizar un vuelo estable, manteniendo siempre la referencia deseada y dejando al usuario solo el control de posición en los ejes x, y .

Para el primer vuelo se establece una referencia de $1,7\text{ m}$, se inician los controles del sistema y se permite al cuadricóptero alcanzar la elevación establecida, como se observa en la Figura 7.11.

Los controladores puestos en el celular permiten que el cuadricóptero mantenga un vuelo estable, manteniendo oscilaciones lentas alrededor de la referencia de $\pm 40\text{ cm}$, causadas por la variación inherente en la medida tomada por el celular. Esto se evidencia en el momento de posicionar el cuadricóptero en una base fija, sin estar en vuelo pero con los motores funcionando. Donde para una misma altura, los motores experimentan aumentos y disminuciones de velocidad.

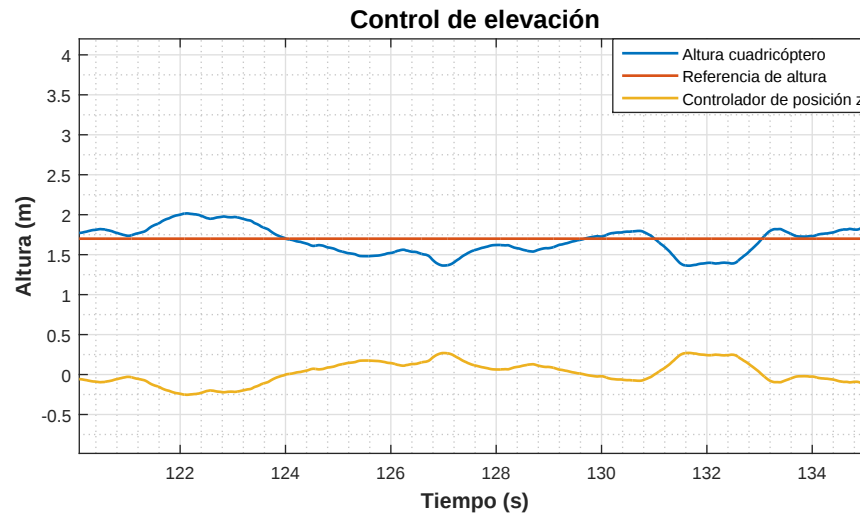


Figura 7.11: Elevación a 1,7 m

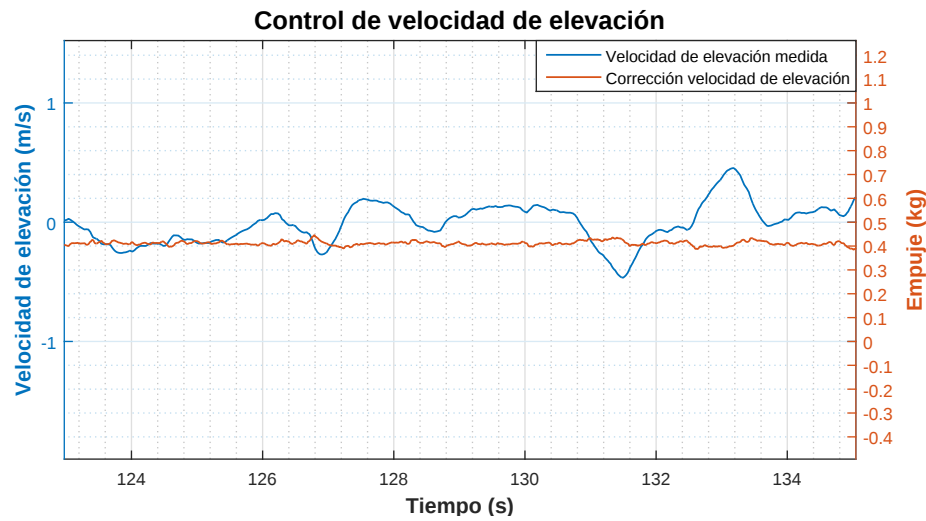


Figura 7.12: Control de velocidad durante el vuelo

El control en cascada para velocidad y posición en el eje z implementado en el celular, trabaja compensando en todo instante de tiempo los cambios de elevación y velocidad, presentados en el cuadricóptero, manteniéndolo de manera controlada en la referencia inicial establecida. El comportamiento a esta prueba se presenta en las Figuras 7.11 y 7.12.

7.5.3. Respuesta al escalón

Cuando el cuadricóptero se ha estabilizado en una posición inicial deseada, se procede a aplicar un escalón en la referencia de altura, por medio de la aplicación de mando desarrollada. Lo anterior, para analizar el comportamiento del sistema ante cambios en la referencia.

Se lleva al cuadricóptero a una elevación inicial de 2 m y luego de que el sistema se ha estabilizado se aplica un cambio de referencia de 1 m.

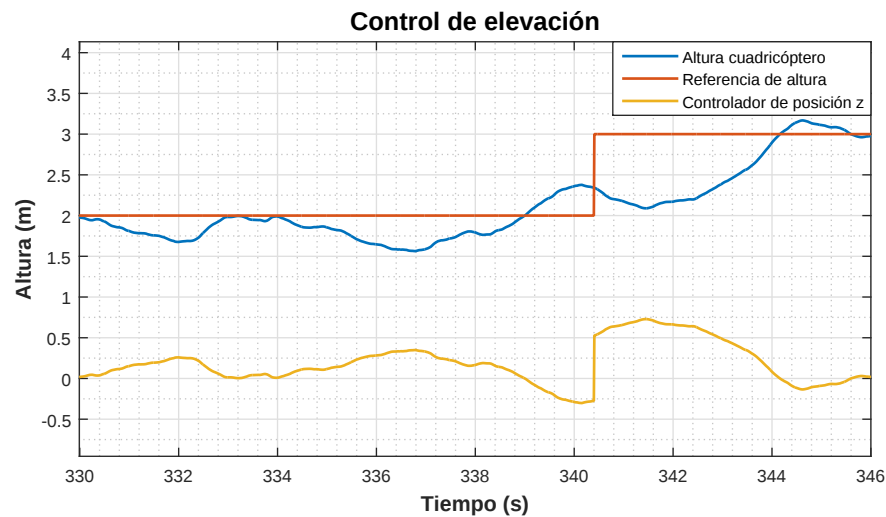


Figura 7.13: Respuesta al escalón en elevación

De la Figura 7.13, se aprecia como el control de elevación, responde inmediatamente después de aplicar el escalón. El celular responde generando la señal de control ejercida por el control proporcional, que actúa como referencia al lazo interno de control de velocidad.

El sistema responde siguiendo la nueva entrada de referencia, alcanzando el nuevo valor en un tiempo de 3,6 s, con un sobrepaso del 15 % y presentando un tiempo de estabilización de 5,6 s.

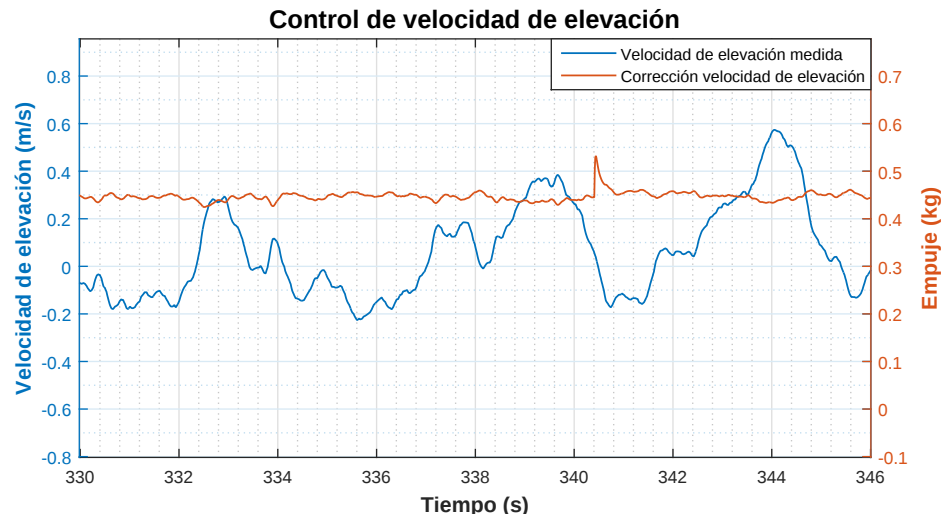


Figura 7.14: Respuesta del control de velocidad de elevación

El control de velocidad responde ante el cambio de referencia, aumentando la señal de control del empuje principal, como se aprecia en la Figura 7.14 para el mismo instante de tiempo. El aumento del valor de la señal de control, resulta en un aumento de velocidad sobre los cuatro motores, iniciando el desplazamiento del cuadricóptero hacia la nueva referencia. A medida que el cuadricóptero se acerca a la referencia deseada, se disminuye la señal de control y por ende la velocidad de elevación.

7.5.4. Respuesta a disturbios

Durante el vuelo, se pueden presentar cambios en las variables involucradas que afecten la elevación del cuadricóptero. Este debe estar en la capacidad de actuar frente a este tipo de disturbios, retomando el valor de elevación deseado sin la intervención del usuario. Para verificar el comportamiento del sistema, se establece una referencia para la elevación del cuadricóptero y se imprime manualmente una fuerza contraria a la elevación, para hacer que este cambie de posición.

En la prueba realizada, se establece una referencia para la elevación de 2,5 m, dejando que el cuadricóptero alcance y se estabilice en la posición deseada. Se ejerce una fuerza para disminuir la elevación del cuadricóptero en 1 m, como se visualiza en la Figura 7.15.

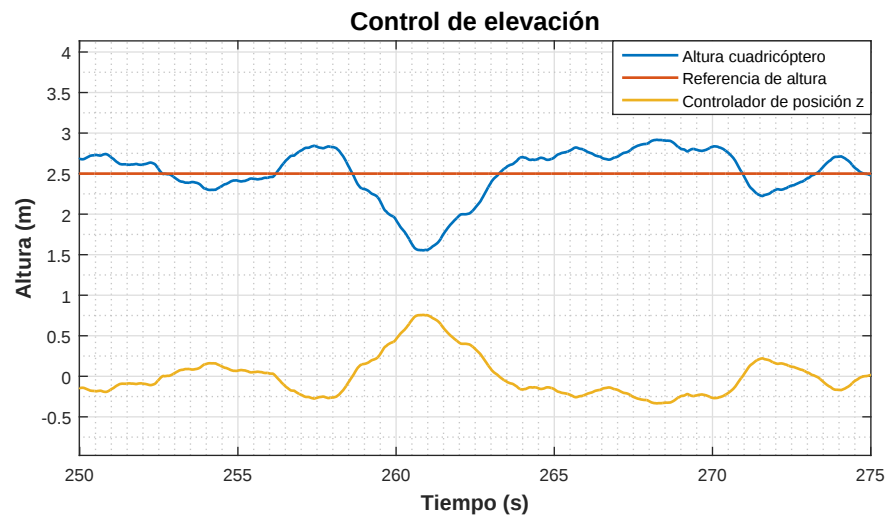


Figura 7.15: Prueba a disturbio en elevación

El control de elevación responde oponiéndose al movimiento y devolviendo al cuadricóptero a la posición deseada. El tiempo de estabilización después de generar el disturbio es de aproximadamente 4 s.

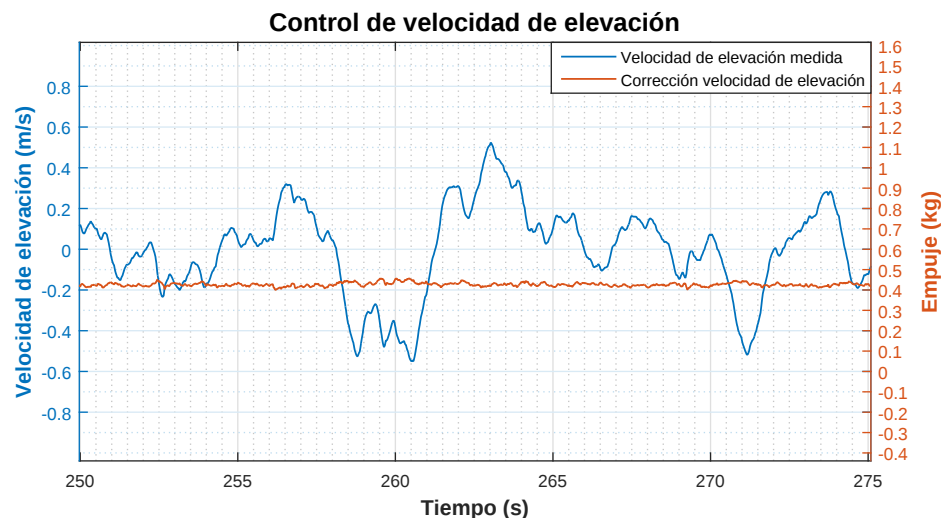


Figura 7.16: Respuesta control de velocidad a disturbios

De las gráficas de respuesta al disturbio de las Figuras 7.15 y 7.16, se puede apreciar que los controladores de elevación y velocidad respectivamente, generan las señales de corrección desde que se inicia el movimiento de disturbio, generando un incremento en el empuje principal tratándose de oponer a la fuerza aplicada.

7.6. Sistema final implementado

La integración final y funcional del prototipo cuadricóptero-celular, se muestra en la Figura 7.17. Se resalta principalmente la ubicación del celular, localizado en el centro y en la parte superior del cuadricóptero y como se estudió en el Capítulo 2, forma una configuración en “x” con respecto al marco del mismo. Cada uno de los controladores de velocidad, se encuentra en el respectivo brazo donde funciona cada motor.



Figura 7.17: Implementación cuadricóptero - celular



Figura 7.18: Posicionamiento del celular sobre el cuadricóptero

Una parte esencial para mejorar el funcionamiento de los controladores de postura, es la ubicación del celular en el marco del cuadricóptero, sobre algún componente que sirva como amortiguador y no directamente sujeto al marco. Esto, con el objetivo de reducir las vibraciones causadas por los motores, debido a que estas introducen un ruido de gran magnitud en la medición de las variables involucradas. Para el caso

implementado se usan cuatro almohadillas para reposar el celular señaladas en la Figura 7.18.

La Figura 7.19, muestra dos fotografías del cuadricóptero durante dos pruebas de vuelo, realizadas sosteniendo una referencia de elevación deseada.

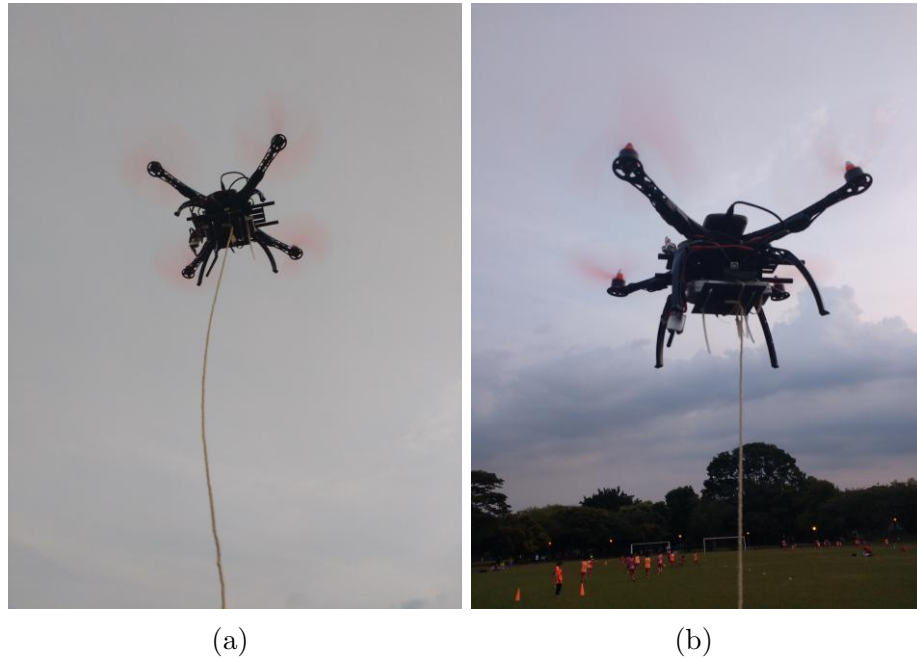


Figura 7.19: Pruebas de vuelo

7.7. Conclusiones

Los controladores de postura implementados, toman las lecturas realizadas de velocidad de giro y ángulo y permiten regular la velocidad de los cuatro motores, manteniendo al cuadricóptero en posición horizontal y apuntando siempre en una sola dirección. Al mismo tiempo que puede regular disturbios introducidos, sin entrar en oscilaciones crecientes.

El control de elevación responde de una manera eficiente, ante cambios en la medida que involucren un movimiento en dirección contraria a la gravedad. Pero para cambios rápidos que deban hacerse en la misma dirección a la gravedad, debido al peso del cuadricóptero, los cambios se hacen de manera más abrupta. Por lo que el controlador de altura se termina de sintonizar, para que responda de una manera más lenta, ayudando a filtrar los cambios rápidos inherentes en la medición.

Conclusiones

Se diseñaron dos aplicaciones para dispositivos celulares. Una aplicación para el celular localizado en el marco del cuadricóptero, encargado de la lectura de sus sensores, procesarlos junto con las leyes de control y generar las respectivas correcciones. Y la segunda aplicación para permitir la operación del cuadricóptero de manera remota.

Se desarrolla un sistema que funciona completamente con el procesamiento y sensores propios del celular, utilizando como único hardware externo, una tarjeta micro-controlada que actúa por medio del puerto USB del celular, como interfaz entre el mismo y los controladores de velocidad de los motores.

La estimación de altitud relativa, se logra mediante el diseño e implementación de un filtro Kalman lineal. Tomando como entradas, los datos adquiridos por el barómetro y el sensor de aceleración lineal. Así mismo, los resultados obtenidos con el filtro, permiten realizar una estimación de la velocidad de elevación del cuadricóptero.

Se implementa un control PID en cascada para cada una de las variables *yaw*, *pitch* y *roll*, aprovechando la disponibilidad de medidas relacionadas con la postura del celular, como la velocidad de rotación y ángulos. Además, como resultado de la implementación del filtro Kalman, se tiene la medida estimada de la velocidad de elevación y la elevación del celular. Para lo cual se implementa un cuarto control en cascada, para controlar la elevación del cuadricóptero.

Las leyes de control programadas en el celular, permiten estabilizar los ángulos de postura del cuadricóptero. Esto al mantener regulados los torques generados, manteniendo siempre el cuadricóptero en posición horizontal y regulando los disturbios inyectados al sistema permitiendo el vuelo del mismo. En cuanto a la elevación, el celular responde manteniendo la elevación en una sola referencia. Actúa modificando de manera apropiada el empuje total del cuadricóptero, para responder ante las pruebas de disturbio realizadas y a los cambios de referencia generados.

Se logra la implementación de un sistema completo, basado en celulares inteligentes. Integrando comunicación inalámbrica y cableada, interfaces, procesamiento de los sensores internos y bloques de leyes de control. El sistema completo trabaja para generar acciones de corrección sobre una planta, que en el trabajo realizado, corresponde al control de elevación de un cuadricóptero.

La limitación en los resultados finales obtenidos, se encuentra en el despegue y aterrizaje del cuadricóptero, requiriendo intervención manual para realizar las dos acciones. Esta limitación se debe, a que se trabaja a partir del momento en que el cuadricóptero ha alcanzado una elevación inicial y realizar el despegue y aterrizaje requieren consideraciones adicionales.

Trabajos futuros

Como trabajo futuro, se requiere en primer lugar trabajar en la implementación de control automático de posición en el plano x, y , mediante la combinación del GPS del celular y los demás sensores.

Complementar el funcionamiento del cuadricóptero, adicionando los algoritmos de control, para realizar el despegue y aterrizaje de manera autónoma.

Modificar la posición del celular, acondicionando un mejor soporte para permitir la implementación y el uso de las cámaras del celular, para la toma de video e imágenes. También, la utilización de un protocolo de comunicación inalámbrico diferente al bluetooth, que permita un mayor alcance.

Otro trabajo futuro, estaría en el desarrollo y puesta en marcha de estrategias de control más avanzadas. Además, de mejorar los algoritmos de estimación del filtro Kalman, como podría ser la aplicación de un filtro Kalman extendido.

Publicaciones

Astudillo Alejandro, Muñoz Pedro, Alvarez Fredy, Rosero Esteban. *Altitude and Attitude Cascade Controller for a Smartphone-Based Quadcopter*. 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, June 13-16, 2017, Miami, FL, USA.

Apéndice A

Balanceo de hélices

Uno de las prácticas que puede realizarse con el propósito de reducir las vibraciones en el cuadricóptero es el balanceo de las hélices. Las vibraciones son producidas debido a que un aspa de la hélice, tiene menor peso que su opuesta, como se nota en la Figura A.1. Este efecto al sumarse a las altas revoluciones con que giran los motores *brushless*, se traduce en las vibraciones introducidas al cuadricóptero.

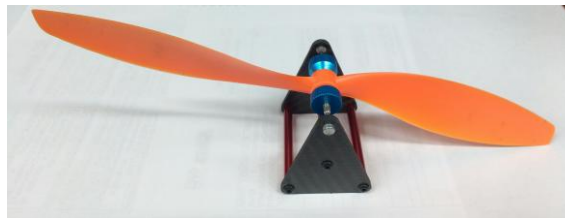


Figura A.1: Hélice sin balancear

Para reducir las vibraciones producidas, se procese a balancear las hélices con ayuda de un balanceador de hélices magnético, como el mostrado en la Figura A.2. La hélice se ubica en el eje de rotación, permitiendo que se mueva con muy baja fricción.



Figura A.2: Balanceador de hélices

El balanceo de la hélice, se realiza adicionando peso hacia el lado donde se inclina inicialmente. Hasta lograr que la misma se sostenga horizontalmente, por su propio peso. La Figura A.3, muestra la hélice cuando ha sido balanceada.



Figura A.3: **Hélice balanceada**

En el caso de las hélices del proyecto se utiliza cinta adhesiva para lograr igualar el peso de cada aspa.

Bibliografía

- [1] Los drones, un mercado con gran potencial en el ámbito corporativo y en el canal. [online] Disponible en: <http://www.itreseller.es/distribucion/2016/09/los-drones-un-mercado-con-gran-potencial-en-el-ambito-corporativo-y-en-el-canal>. Accesado: 2016-01-15.
- [2] Los drones, a la conquista del mercado laboral. [online] Disponible en: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2016/05/16/sentidos/1463396852_332900.html. Accesado: 2016-05-20.
- [3] Los drones ayudan en la mejora de la eficiencia en situaciones de emergencia. [online] Disponible en: <http://www2.ual.es/drones/servicios/rescate-emergencias-y-desastres-naturales/>. Accesado: 2016-05-20.
- [4] Los drones pueden ser útiles en caso de desastres. [online] Disponible en: <http://www.sophimania.pe/tecnologia/gadgets-wearables-e-innovacion/los-drones-pueden-ser-utiles-en-caso-de-desastres/>. Accesado: 2016-05-20.
- [5] How drones are changing humanitarian disaster response. [online] Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/kalevleetaru/2015/11/09/how-drones-are-changing-humanitarian-disaster-response/#69d79e88310c>. Accesado: 2016-05-20.
- [6] When every second counts. first aid with quadrocopters. [online] Disponible en: <https://www.microdrones.com/en/applications/growth-markets/first-aid-with-quadrocopters/>. Accesado: 2017-07-18.
- [7] ¿drones para transportar mercancía? es posible. [online] Disponible en: <http://www.dronplanet.com/drones-para-transportar-mercancia-es-posible/>. Accesado: 2016-05-20.
- [8] Ups y dhl alemania: Drones voladores para repartir el correo. [online] Disponible en: <http://dineroclub.net/ups-alemania-drones-voladores-para-repartir-el-correo-alvarodabril/>. Accesado: 2016-05-20.

-
- [9] Las empresas de transporte insisten en un futuro con drones: Ups monta uno en sus camiones. [online] Disponible en: <https://www.xataka.com/drones/las-empresas-de-transporte-insisten-en-un-futuro-con-drones-ups-monta-uno-en-sus-camiones>. Accesado: 2016-05-20.
- [10] The ehang 184 personal autonomous passenger drone is hoping to change transport. [online] Disponible en: <http://www.news.com.au/technology/innovation/design/the-ehang-184-personal-autonomous-passenger-drone-is-hoping-to-change-transport/news-story/3b9339951cef212fab0614c5e0853907>. Accesado: 2016-05-20.
- [11] Los drones son los nuevos 'ojos' de los científicos de la agricultura. [online] Disponible en: <http://www.eltiempo.com/vida/ciencia/drones-usados-en-la-agricultura-39867>. Accesado: 2016-05-20.
- [12] El uso de drones en agricultura. [online] Disponible en: <http://www.todrone.com/uso-drones-agricultura/>. Accesado: 2016-05-20.
- [13] Sando inicia un estudio de investigación para gestionar zonas verdes mediante drones. [online] Disponible en: <http://www.elmundo.es/andalucia/2017/01/31/5890d22046163f92728b4620.html>. Accesado: 2016-05-20.
- [14] Warren R Young. The helicopters. the epic of flight. chicago: Time-life books. 1982.
- [15] History of quadcopters and other multirotors. [online] Disponible en: <http://www.krossblade.com/history-of-quadcopters-and-multirotors/>. Accesado: 2017-03-24.
- [16] 10 incredibly interesting uses for drones. [online] Disponible en: <https://dronebuff.com/uses-for-drones/>. Accesado: 2017-03-24.
- [17] Unmanned applied solutions. [online] Disponible en: <https://www.microdrones.com/en/applications/>. Accesado: 2016-05-20.
- [18] Drone applications at present and in the future. [online] Disponible en: <https://filmora.wondershare.com/drones/drone-applications-and-uses-in-future.html>. Accesado: 2016-05-20.
- [19] Con project tango, google quiere que los móviles tengan ojos. [online] Disponible en: <http://www.enter.co/eventos/googleio/2015/con-project-tango-google-quiere-que-los-moviles-tengan-ojos/>. Accesado: 2016-03-3.

-
- [20] El proyecto tango de google despliega una nueva tecnología de creación de mapas. [online] Disponible en: <https://www.cnet.com/es/noticias/el-proyecto-tango-de-google-despliega-una-nueva-tecnologia-de-creacion-de-mapas/>. Accesado: 2016-03-3.
- [21] Repurposing old smartphones for home automation. [online] Disponible en: <https://www.linux.com/news/repurposing-old-smartphones-home-automation>. Accesado: 2017-03-24.
- [22] Domótica desde el smartphone. [online] Disponible en: <http://www.pisos.com/aldia/domotica-desde-el-smartphone/49848/>. Accesado: 2017-03-24.
- [23] 6 fun drones you can control with your smartphone. [online] Disponible en: <http://charged.io/drones-control-by-smartphone/>. Accesado: 2017-03-24.
- [24] Next things 2013 - next space — laboral centro de arte y creación industrial. [online] Disponible en: <http://www.laboralcentrodearte.org/en/r/convocatorias/nextthings2013>. Accesado: 2016-03-3.
- [25] flone - una plataforma para que los smartphones puedan volar. [online] Disponible en: <http://flone.cc>. Accesado: 2016-03-3.
- [26] This drone uses a smartphone for eyes and a brain. [online] Disponible en: <http://spectrum.ieee.org/video/robotics/drones/this-drone-uses-a-smartphone-for-a-brain>. Accesado: 2016-03-3.
- [27] Phone drone – xcraft. [online] Disponible en: <http://xcraft.io/phone-drone/>. Accesado: 2016-03-3.
- [28] Ablogs.msdn.microsoft.com. como construir un drone con windows 10 iot. [online] Disponible en: <https://blogs.msdn.microsoft.com/esmsdn/2016/03/02/como-construir-un-drone-con-windows-10-iot/>. Accesado: 2015-01-21.
- [29] R. LOZANO P. CASTILLO. Stabilization of a mini-rotorcraft having four rotors, 2004.
- [30] IGEDE PUJA ASTAWA NI'AM TAMAMI, ENDRA PITOWARNO. Proportional derivative active force control for “x” configuration quadcopter, 2014.
- [31] HOLGER VOOS. Nonlinear control of a quadrotor micro-uav using feedback-linearization, 2007.
- [32] Gartner.com. gartner says smartphone sales accounted for 55 percent of overall mobile phone sales in third quarter of 2013. [online] Disponible en: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2623415>. Accesado: 2016-09-3.

- [33] Open handset alliance.com. android overview. [online] Disponible en: http://www.openhandsetalliance.com/android_overview.html. Accesado: 2016-03-10.
- [34] Concepto definicion.de. ¿qué es ios? - su definición, concepto y significado:. [online] Disponible en: <http://concepto definicion.de/ios/>. Accesado: 2016-03-10.
- [35] Applesfera.com. la evolución de ios desde sus orígenes: una carrera para ser el mejor sistema operativo móvil de la historia:. [online] Disponible en: <http://www.applesfera.com/ios/la-evolucion-de-ios-desde-sus-origenes-una-carrera-para-ser-el-mejor-sistema-operativo-movil-de-la-historia>. Accesado: 2016-03-10.
- [36] Concepto definicion.de. ¿qué es ios? - su definición, concepto y significado:. [online] Disponible en: <http://concepto definicion.de/ios/>. Accesado: 2016-03-10.
- [37] Developer.android.com. sensors overview. [online] Disponible en: https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview.html. Accesado: 2016-04-16.
- [38] Developer.android.com. sensors motion. [online] Disponible en: https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_motion.html. Accesado: 2016-04-15.
- [39] Developer.android.com. location strategies. [online] Disponible en: <https://developer.android.com/guide/topics/location/strategies.html>. Accesado: 2016-04-20.
- [40] Developer.android.com. connectivity. [online] Disponible en: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/index.html>. Accesado: 2016-04-15.
- [41] Developer.android.com. package index. [online] Disponible en: <https://developer.android.com/reference/packages.html>. Accesado: 2016-04-20.
- [42] wi-fi.org. wi-fi direct. [online] Disponible en: <http://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-direct>. Accesado: 2016-05-1.
- [43] Areatecnologia.com. telefonía móvil definición. [online] Disponible en: <http://www.areatecnologia.com/telefonía-movil.htm>. Accesado: 2016-04-15.
- [44] Celulares.about.com. que significan 1g 2g 3g y 4g. [online] Disponible en: http://celulares.about.com/od/Preguntas_frecuentes/a/Que-Significan-1g-2g-3g-Y-4g.htm. Accesado: 2016-04-15.

-
- [45] Developer.android.com. usb connectivity. [online] Disponible en: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/usb/index.html>. Accesado: 2016-04-20.
- [46] Developer.android.com. usb accessory. [online] Disponible en: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/usb/accessory.html>. Accesado: 2016-04-20.
- [47] Developer.android.com. usb host. [online] Disponible en: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/usb/host.html>. Accesado: 2016-04-20.
- [48] KRISTIAN SLOTH LAUSZUS. Flight controller for quad rotor helicopter in x-configuration, 2015.
- [49] Bluetooth hc-05 y hc-06 tutorial de configuración. [online] Disponible en: <https://www.geekfactory.mx/tutoriales/bluetooth-hc-05yh-c-06-tutorial-de-configuracion/>. Accesado: 2015-011-20.
- [50] OCHOA CALAMBÁS DIEGO FERNANDO GARCIA TÉLLEZ JONATHAN. Desarrollo de una plataforma de monitorización, control y comunicación con teléfonos inteligentes, para laboratorios portátiles de soporte al Área de señales y sistemas, 2015.
- [51] LUIS SEVILLA FERNÁNDEZ. Modelado y control de un cuadricóptero, 2014.
- [52] Erlerobotics.gitbooks.io. lipo batteries. [online] Disponible en: <https://erlerobotics.gitbooks.io/erle-robotics-erle-copter/content/es/safety/lipo.html>. Accesado: 2015-011-15.
- [53] Fulchis rc. baterías lipo: conceptos básicos y consejos de uso. [online] Disponible en: <http://fulchis.es/baterias-lipo/>. Accesado: 2015-011-15.
- [54] Arduino. arduino mega adk. [online] Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMegaADK>. Accesado: 2015-011-20.
- [55] Atmel. atmel atmega640/v-1280/v-1281/v-2560/v-2561/v. [Archivo PDF] Disponible en: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561-Summary.pdf>. Accesado: 2015-011-20.
- [56] Arduino. arduino products. [online] Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>. Accesado: 2015-011-20.
- [57] Maxim integrated. max3421e usb peripheral/host controller with spi interface. [Archivo PDF] Disponible en: https://datasheets.maximintegrated.com/en/errata/Errata_MAX3421E.pdf. Accesado: 2015-011-15.

-
- [58] Android developers. accessory development kit 2012 guide. [online] Disponible en: <https://developer.android.com/adk/adk2.html#components>. Accedido: 2015-011-20.
- [59] Nexus tech specs - nexus help. [online] Disponible en: https://support.google.com/nexus/answer/6102470?hl=en&ref_topic=3415518. Accedido: 2017-03-24.
- [60] FREDY YAMID ALVAREZ PALECHOR. Cuadricóptero dedicado al seguimiento autónomo de un dispositivo celular inteligente, 2017.
- [61] ¿qué es y cómo funciona el sistema bluetooth?. [online] Disponible en: <http://etecnologia.com/gadgets/funcionamiento-bluetooth>. Accedido: 2016-02-17.
- [62] Wi-fi direct vs. bluetooth 4.0: A battle for supremacy. [online] Disponible en: http://www.pcworld.com/article/208778/Wi_Fi_Direct_vs_Bluetooth_4_0_A_Battle_for_Supremacy.html. Accedido: 2016-02-17.
- [63] What is bluetooth 4.0?. [online] Disponible en: <https://www.laptopmag.com/articles/just-what-is-bluetooth-4-0-anyway>. Accedido: 2016-02-17.
- [64] Dan Simon. Kalman filtering. *Embedded systems programming*, 14(6):72–79, 2001.
- [65] Toshak Singhal, Akshat Harit, and DN Vishwakarma. Kalman filter implementation on an accelerometer sensor data for three state estimation of a dynamic system. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 1(6):330–334, 2012.
- [66] ANTONIO PICO VILLALPANDO. Diseño e implementación de un sistema de control para un cuadricóptero, 2012.
- [67] Iván González, Sergio Salazar, Jorge Torres, Rogelio Lozano, and Hugo Romero. Real-time attitude stabilization of a mini-uav quad-rotor using motor speed feedback. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 70(1-4):93–106, 2013.
- [68] Abdelhamid Tayebi and Stephen McGilvray. Attitude stabilization of a vtol quadrotor aircraft. *IEEE Transactions on control systems technology*, 14(3):562–571, 2006.
- [69] M Hassan Tanveer, D Hazry, FA Warsi, and MK Joyo. Stabilized controller design for attitude and altitude controlling of quad-rotor under diisturbance and noisy conditios. *American Journal of Applied Sciences*, 10(8):819–831, 2013.
- [70] Pablo García Auñon. Control of quadcopter. 2015.