

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR D'ALCOI

Control y monitorización de un prototipo de dron
con NI myRIO y LabVIEW

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería eléctrica

Autor: Abidán Negrín Pérez

Tutor: Adolfo Hilarío Caballero, Jaime Masiá Vañó

Curso: 2017-18

Resumen

Ahora que los drones están en auge y están empezando a ser bastante comunes por una parte por sus numerosas aplicaciones, por otra parte el abaratamiento de los componentes y por la facilidad de unir algunos componentes que incluso los aficionados son capaces de volar y construir drones.

La tecnología usada en base a estos vehículos aéreos se a puesto al alcance de la mano es la aplicación del IMU en los teléfonos móviles esto ha hecho que el sistema de navegación de estas aeronaves hayan bajado también.

Esta alza ha sido bastante notoria para nosotros, por lo que hemos querido aprender más acerca del funcionamiento de los drones. Para un estudiante de ingeniería eléctrica, el interés principal se encuentra en la inteligencia detrás de estas máquinas. Por ello, pensamos que la mejor manera de descubrirlo sería intentar programar uno por nuestra cuenta. A través de varias investigaciones y aplicar lo que aprendimos, conseguimos programar un dron usando los programas LabVIEW, MATLAB y Simulink.

En esta memoria hablaremos sobre: los conceptos básicos de los drones, sistemas de control, cómo funciona la legislación al respecto en Europa y España así cómo hemos programado nuestro dron. Igualmente, compartiremos aspectos a tener en cuenta mientras se usan estos drones y en especial, la inteligencia de la que los drones están compuestos.

Now that drones are on the rise, they are starting to be quite common. Its numerous applications, the cheapening of their components and the ease of joining most of the components are the main reasons why even fans and hobbyist are able to fly and build their own drones.

Concerning to its cheapening, there is a fact that must be mentioned. The technology used in these aerial vehicles is the same that is being used in mobile phones, which is IMU. As IMU has become crucial to the mobile phone operative, this has also meant a considerable price drop.

This upswing has been quite remarkable for us, so we wanted to learn more about how drones work. For us, as students in electrical engineering, the main interest lies in the intelligence behind these machines. Therefore, we thought that the best way to learn about the intelligence of the drone was to try to program one by ourselves. Through various investigations and applying what we learned, we managed to program it using the programs LabVIEW, MATLAB and Simulink.

In this report, we will talk about: the basic concepts of drones, control systems, what the legislation is in Europe and Spain and how we programmed our drone. Likewise, we will share some aspects to keep in mind while we use these drones and in particular, the intelligence of which the drones are composed.

Palabras clave

Dron, cuadricóptero, Control avanzado, NI myRIO, LabVIEW, Matlab, Simulink

Drone, quadcopter, Advance Control, NI myRIO, LabVIEW, Matlab, Simulink

Resumen	2
Palabras clave	4
Índice de figuras	7
1. Introducción	9
1.1 ¿Qué es un Dron?	9
1.2 Historia de los Drones	10
1.3 Aplicaciones de los cuadricópteros	14
1.3.1 Aplicaciones comerciales	14
1.3.2 Aplicaciones profesionales.....	15
1.3.3 Aplicaciones de investigación	16
2 Tipos de Drones	16
2.1 Drones de ala fija	16
2.2 Drones de ala giratoria	17
2.2.1 Helicóptero convencional	17
2.2.2 Tricóptero	17
2.2.3 Cuadricóptero	17
2.3 Hexacóptero	18
2.4 Octocópteros	18
3 Legislación sobre drones	19
3.1 Legislación Europea	19
3.1.1 Clase C0.....	21
3.1.2 Clase C1.....	22
3.1.3 Clase C2.....	24
3.1.4 Clase C3.....	26
3.1.5 Clase C4.....	28
3.2 Legislación española	30
3.2.1 Requisitos vuelos recreativos	30
4 Alcance del proyecto	31
4.1 Personas implicadas en el proyecto	31
4.2 Objetivos	32
5 Conceptos de funcionamiento de los Drones	32
5.1 Fuerzas que actúan	33
5.2 Centro de gravedad	34
5.3 Centro de presión	34
5.4 Centro aerodinámico	35
5.5 Ángulo de ataque	35
5.6 Ejes de movimiento	35
6 Funcionamiento de un Dron	36
6.1 Consideraciones del sistema	38
6.2 Modelado cinemático	39

6.3	Modelado dinámico	42
7	Desarrollo experimental	42
7.1	Software	42
7.1.1	labVIEW.....	43
7.1.2	Matlab.....	44
7.1.3	Programas de elaboración de memoria y presentación	45
7.2	Componentes (Hardware)	46
7.2.1	Motor sin escobillas trifásico o motores brushless.....	46
7.2.2	Controlador electrónico de velocidad o ESC.....	47
7.2.3	Sensor de medición inercial o IMU	49
7.2.4	myRIO	51
7.2.5	Brazo balancín.....	51
7.2.6	Multicóptero	52
7.3	Metodología	52
7.3.1	Control del ESC.....	53
7.3.2	Lectura del IMU.....	53
7.3.3	Procesado de señal	53
7.3.4	Diseño del PID	54
7.3.5	labVIEW.....	58
8	Resultados y conclusiones	60
8.1	Resultados	61
8.1.1	Brazo balancín.....	61
8.1.2	Cuadrícóptero	61
8.2	Conclusiones	62
8.3	Sugerencias para futuros trabajos	62
Anexo I		63
Anexo II		70
Anexo III		75
Agradecimientos		76
BIBLIOGRAFÍA.....		76

Índice de figuras

Figura 1.1 OQ-2A Drone	10
Figura 1.2 "Done de asalto" TDR-1 en el Museo Nacional de la Aviación Naval, Pensacola, Florida	11
Figura 1.3 El SD-1, también conocido como MQM-57 Falconer.	11
Figura 1.4 AQM-34Q, una de las muchas variaciones del dron de reconocimiento Ryan 147, usado en los años 1960s y 1970s	12
Figura 1.5 Drone Scout de la industria Israelí de Vehículos Aéreos	13
Figura 1.6 MQ-1 Predator patrullando	13
Figura 1.7 MQ-9 Reaper volando en misión de combate	14
Figura 1.8 Cuadricópteros de uso comercial	15
Figura 1.9 Cuadricóptero de vigilancia policial	15
Figura 2.1 Configuraciones de un cuadricóptero	18
Figura 2.2 Configuraciones de los multicópteros	19
Figura 5.1 Ejes de movimiento	35
Figura 5.2 Principales movimientos de los drones	36
Figura 6.1 Sentidos de giros y velocidades de los motores para los desplazamientos	37
Figura 6.2 Ejes coordenados y fuerzas aplicadas	40
Figura 7.1 Partes de un motor brushless	47
Figura 7.2 ESC	48
Figura 7.3 Esquema de conexión del ESC	48
Figura 7.4 Señal PWM	49
Figura 7.5 IMU Razor 9DoF	50
Figura 7.6 Brazo balancin cedido	51
Figura 7.7 Multicóptero	52
Figura 7.8 Lectura IMU filtrada por la media	54
Figura 7.9 Gráfica de comparación de señal con un modelo establecido	54
Figura 7.10 Lugar de las raíces lazo abierto	55
Figura 7.11 Lugar de las raíces con el polo en el origen	56
Figura 7.12 Lugar de las raíces con el polos en el origen y ceros dobles en el polo de origen. Y marcados con una x los polos de nuestro sistema a utilizar	56
Figura 7.13 Simulink usado para la verificación	57
Figura 7.14 Respueta de la simulación en la parte superior el angulo y en la parte inferior la señal de control	57
Figura 7.15 Diagrama de separacion de lectura del IMU	58
Figura 7.16 en la parte superior el subVI del acelerómetro y en la inferior la del giróscopo	59
Figura 7.17 diagrama del filtro combinado	59
Figura 7.18 Test del funcionamiento a la izquierda y a la derecha el montaje del brazo60	60

Anexo I 1 Pantalla de inicio del labVIEW	64
Anexo I 2 Selección de tipo de proyecto	64
Anexo I 3 Configuración del proyecto	65
Anexo I 4 Visualización del proyecto creado	66
Anexo I 5 Creación de un nuevo VI	66
Anexo I 6 Panel de trabajo labVIEW	67
Anexo I 7 Selección para cambio de tipo USB o WIFI	68
Anexo I 8 Pantalla propiedades	69
Anexo II 1 lectura del IMU Dron	70
Anexo II 2 Procesado de señal del IMU Dron	70
Anexo II 3 Control de los motores del dron	71
Anexo II 4 Panel frontal para el control del dron	71
Anexo II 5 lectura IMU Brazo balancín	72
Anexo II 6 Procesado de señal del IMU en el brazo balancín	72
Anexo II 7 control del brazo	73
Anexo II 8 Panel frontal para el control del brazo balancín	73
Anexo II 9 Bloque PID Creado y usado	74

1. Introducción

En los últimos años, el avance científico y tecnológico para los vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés) ha crecido sustancialmente siendo un campo de investigación de gran interés. Su amplia gama de aplicaciones tanto civiles como militares, ha llevado a utilizar este tipo de dispositivos en tareas de inspección tanto de grandes como de pequeñas áreas, como por ejemplo, en tareas de seguridad pública (supervisión del espacio aéreo, tráfico urbano, búsqueda y rescate (Hoffmann et al., 2006)), gestión de riesgos naturales (volcanes activos, incendios forestales y terremotos (Michael et al., 2012)), gestión ambiental y agricultura de precisión (medida de polución del aire y supervisión de florestas (Rango et al., 2006), intervenciones en ambientes hostiles (atmósferas radioactivas (Tsai et al., 2012), mantenimiento de infraestructuras (supervisión de líneas de transmisión (Toth and Gilpin-Jackson, 2010), transporte cooperativo (abastecimiento de medicinas y alimentos (Doherty and Rudol, 2007), entre otros.

La investigación y desarrollo de vehículos aéreos no tripulados pequeños y micro ha ido en aumento desde mediados de 1990, debido principalmente a los intereses militares y sus recursos de financiación (McMichael and Francis, 1997). En los últimos 10-12 años las plataformas experimentales y de esparcimiento han ganado gran popularidad, en particular los pequeños multirotores UAVs (Cutler, 2012). En comparación con aviones, planeadores y vehículos terrestres no tripulados (UGV por sus siglas en inglés), las aeronaves de palas rotativas (helicópteros y quadrotores) tienen una versatilidad mucho mayor, por ser capaces de despegar, flotar y aterrizar en áreas pequeñas, como laboratorios, oficinas, almacenes, etc; debido a su movilidad tridimensional.

1.1 ¿Qué es un Dron?

Los drones son vehículos aéreos no tripulados capaces de volar de forma autónoma desde el despegue hasta el aterrizaje, lo que hace que lo que comúnmente conocemos y llamamos drones no sean sino cuadricópteros teledirigidos.

Aunque tienen algún grado de autonomía no son capaces de volar totalmente solos desde el despegue automático pasar por puntos de un recorrido y aterrizar sin ayuda.

En este proyecto nos referiremos a un dron como a cualquier tipo de aeronave a radiocontrol con algún tipo de controlador aéreo.

1.2 Historia de los Drones

El primer testimonio histórico de UAV's se remonta a conceptos presentados por Leonardo Da Vinci, no fue sino hasta el 22 de Agosto de 1849 donde fueron empleados por primera vez cuando Austria atacó la ciudad de Venecia utilizando globos cargados con explosivos. No se obtuvieron los resultados esperados ya que los globos vieron modificada su trayectoria por el cambio en la dirección del viento, sin embargo este hecho dejó sentado el precedente para el futuro uso de estos vehículos (Ruiz, 2011).

Durante la Primera Guerra Mundial en el año de 1917, fueron diseñados y puestos en funcionamiento unos nuevos sistemas más cercanos al UAV, utilizando un control mediante una emisora AM. Aunque más que vehículos aéreos, eran lo que hoy llamaríamos misiles, el sistema de control empezaba a tener un grado de sofisticación considerable. Su primer objetivo fue intentar neutralizar Zeppelines (Valavanis, 2007).

Los primeros en usar pilotos remotos fueron la armada de U.S. con el OQ-1 dron y la naval de U.S. con el TDR-1 durante la segunda guerra mundial en el año de 1942 (Miro, 2012). Ambos modelos fueron una combinación de pilotos remotos y pilotos formales entrenados. Figura 1.1 muestra la versión del dron OQ-2A y la Figura 1.2 el modelo TDR-1



Figura 1.1 OQ-2A Drone



Figura 1.2 "Done de asalto" TDR-1 en el Museo Nacional de la Aviación Naval, Pensacola, Florida

A mediados de 1950 el SD-1 (Figura 1.3) o también conocido como MQM-57 Falconer, fue operado remotamente, llevando una cámara de reconocimiento y después de un vuelo de 30 minutos regresó a la base siendo recobrado por paracaídas (Zaloga, 2008). La guerra fría y la pérdida de dos aviones espías U-2 sobre la Unión Soviética y sobre Cuba en 1960, dio un nuevo impulso a la financiación e investigación de la tecnología de aviones de reconocimiento no tripulados (Dalamagkidis et al., 2012; Mirot, 2012).



Figura 1.3 El SD-1, también conocido como MQM-57 Falconer.

En la guerra fría el más predominante UAS (Unmanned Aircraft System por sus siglas en Inglés) fue el Modelo Ryan 147 (Figura 1.4), más de 3500 de estos sistemas fueron empleados sobre los cielos de China y Vietnam y representan el mayor paso en la evolución hacia la era de los UAS modernos (Mirot, 2012).



Figura 1.4 AQM-34Q, una de las muchas variaciones del drone de reconocimiento Ryan 147, usado en los años 1960s y 1970s

La nueva era de drones surge con el apareamiento de los drones Scout y Mastiff (Figura 1.5) construido por la Industria Israelí de Vehículos Aéreos, el segundo fue el cimiento para el desarrollo del popular sistema Israelí Pioneer teniendo una gran influencia en los diseños Estadounidenses en las versiones Predator y Shadow (Newcome, 2004). Por los años de 1980s el sistema Pioneer tuvo alrededor de 1500 horas de vuelo en la operación Tormenta del Desierto (Zaloga, 2008; Dalamagkidis et al., 2012).



Figura 1.5 Drone Scout de la industria Israelí de Vehículos Aéreos

Dentro de los nuevos sistemas tele-dirigidos se encuentran los reconocidos MQ-1 Predator (Figura 1.6) y MQ-9 Reaper (Figura 1.7), estos sistemas son piloteados de tierra en versiones desarmadas desde 1994. Posterior al ataque terrorista el 11 de Septiembre de 2011 en New York, el MQ-1 Predator fue mejorado y utilizado en Afganistán para tareas de reconocimiento y tareas de ataque de precisión (Chappelle et al., 2011).



Figura 1.6 MQ-1 Predator patrullando



Figura 1.7 MQ-9 Reaper volando en misión de combate

1.3 Aplicaciones de los cuadricópteros

En este apartado veremos las diferentes aplicaciones de los cuadricópteros.

1.3.1 Aplicaciones comerciales

También denominados quadrotors recreativos, se caracterizan por su bajo costo y estar al alcance de cualquier persona o civil. El más importante ejemplar que popularizó el uso de quadrotors de manera recreativa fue el Parrot AR Drone (Figura 1.8a) que posee una interfaz para Smartphone mediante conexión wireless, además de ser capaz de tomar fotografías y capturar vídeo HD.

Por otra parte, uno de los más nuevos en el mercado es el quadrotor Phantom (Figura 1.8b) que permite volar en entornos abiertos y puede cargar una cámara de alta resolución. Está equipado con un receptor de GPS y es capaz de volar en trayectorias planificadas previamente desde una computadora o teléfono celular y en caso de pérdida de enlace de radio tiene la capacidad de volver automáticamente al punto de partida.



(a) AR Drone 2 (Fuente: Parrot)



(b) Phantom (Fuente: DJI)

Figura 1.8 Cuadricópteros de uso comercial

1.3.2 Aplicaciones profesionales

Dentro de la categoría de seguridad o militares, se encuentran los sistemas que suelen estar equipados con cámaras de vigilancia y son utilizados para monitorear zonas peligrosas. Resultan ser una alternativa mucho más económica al helicóptero convencional y como también es más silencioso puede sobrevolar zonas a menor altura sin ser detectado. Por lo general este tipo de quadrotores están equipados con estaciones terrenas y antenas de largo alcance. La figura 1.9 muestra un quadrotor adquirido por la policía canadiense para monitorizar las calles, además que este tipo de drones están concebidos para llevar carga útil como cámaras de alta definición, cámaras térmicas, sensores, etc.



Figura 1.9 Cuadricóptero de vigilancia policial

La más popular de las aplicaciones de hoy en día es para la fotografía aérea. Estos quadrotores suelen estar equipados con cámaras fotográficas o de vídeo profesionales y son utilizados para la cobertura de eventos deportivos, películas y comerciales. El costo de operación es una fracción con el alquiler de un equipo de filmación aérea en helicóptero (Kharsansky, 2013).

1.3.3 Aplicaciones de investigación

Los quadrotores de investigación son en general realizados en universidades. Algunos de los temas que se encuentran en desarrollo en la actualidad son: vuelo en formación, enjambres de aeronaves, trabajo colaborativo, nano quadrotores, vuelo autónomo, aprendizaje, entre otros (Kharsansky, 2013; Mellinger et al., 2010; Turpin et al., 2012). En general estas plataformas no se encuentran abiertas para su uso y muchas de ellas dependen de un sistema de navegación basado en visión que lo hace muy costoso.

2 Tipos de Drones.

Los drones se pueden clasificar generalmente por su configuración o tamaño. La configuración se dividen en dos tipos: de ala fija, como los aviones convencionales, donde las alas se encargan de la elevación y de ala giratorias como los helicópteros que las alas giratorias (rotores) se encargan de la elevación. Los drones también se clasifican según su tamaño/masa siendo muy raro los drones para aficionados superiores a los 7Kg para evitar muchas de las regulaciones que se tienen, aparte de que los drones más pesados necesitan más material especializado para el uso comercial.

2.1 Drones de ala fija

Simplificando el lenguaje técnico, los drones de ala fija son los aviones radiocontrol que usan una fuente propulsión (en nuestro caso solo barajamos los motores eléctricos y una hélice) para generar elevación en las alas y permitir que este se mueva y vuele.

Este tipo de drones no tienen punto de trabajo estático puesto que si no hay movimiento en este no se genera la sustentación necesario para permanecer en el aire

2.2 Drones de ala giratoria

Este tipo de vehículos aéreos logran volar gracias a la rotación de un rotor que genera la elevación necesaria para darle la elevación. Se pueden separar en dos categorías principales los helicópteros convencionales y los multicópteros.

Cabe destacar que este tipo de drones son capaces permanecer estáticos en torno a un punto fijo puesto que la sustentación la generan los propios rotores.

2.2.1 Helicóptero convencional

Este tipo de vehículos son capaces de lograr el control cambiando el paso y el ángulo de las palas del rotor con un mecanismo complejo llamado plato oscilante. La mayoría de los helicópteros tiene un rotor grande lo que crea el par motor en dirección contraria a su rotación lo que indispensable un rotor de cola par compensar ese movimiento de giñada o yaw.

Estos aparatos no son los más comunes entre los aficionados a los drones debido a su complejidad de construcción.

2.2.2 Tricóptero

Este tipo de multicópteros tienen tres rotores dispuestos en una posición triangular uno en la parte posterior y dos en la parte delantera. Los brazos de un tricóptero están separados 120°.

Uno de los principales beneficios de estos drones son que son más baratos puesto que solo usan tres motores. Pero para tener todos los movimientos del dron hay que ponerle algún dispositivo que permita que el motor trasero gire para tener el movimiento la giñada o yaw.

2.2.3 Cuadricóptero

Son los estos los drones más comunes entre los aficionados, constan de cuatro motores dispuestos axialmente dos a dos en posición en cruz (+) o en equis (X). En la posición en Cruz se alinea el rotor directamente con la parte delantera del vehículo y en la

posición en equis la parte delantera se alinea con los dos motores como se puede ver en la Figura 2.1.

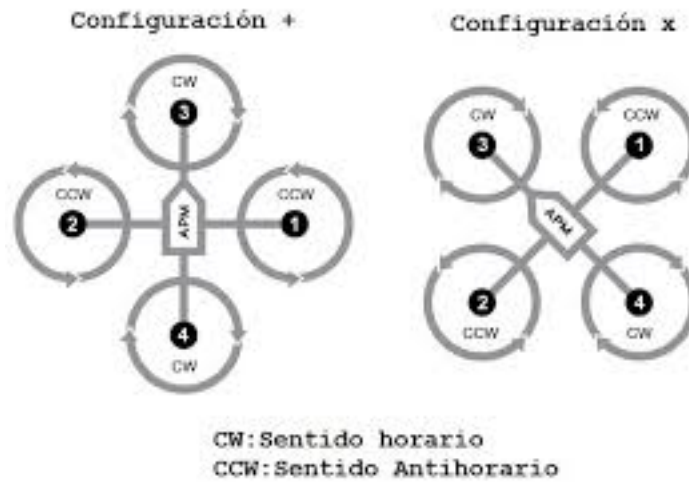


Figura 2.1 Configuraciones de un cuadricóptero

2.3 Hexacóptero

Los hexacópteros tienen seis motores, aparte de lo obvio también significa que pueden levantar más equipo, un beneficio adicional es que si falla un motor es capaz de permanecer relativamente estable permitiendo aterrizar.

En cambio si un cuadricóptero o un tricóptero le fallara normalmente acaban en una precipitación y el aparato roto, puesto que es indispensable cada motor para mantenerse estable. Por esta razón los vehículos profesionales suelen ser hexacópteros o octocópteros

2.4 Octocópteros

Esos multirotores tienen ocho motores espaciados uniformemente. Estos son los multicópteros más grandes llegando a tener 1m de diámetro. Al igual que con hexacópteros, el aumento de números de motores significa que los octocópteros pueden transportar cargas más pesadas ya que tienen una redundancia adicional de los motores.

Mientras un hexacóptero solo sobrevive al fallo de un motor (o a dos si están opuestos), un octocóptero puede hacer frente a fallos de más motores sin estrellarse dependiendo de la carga y los motores que fallen.

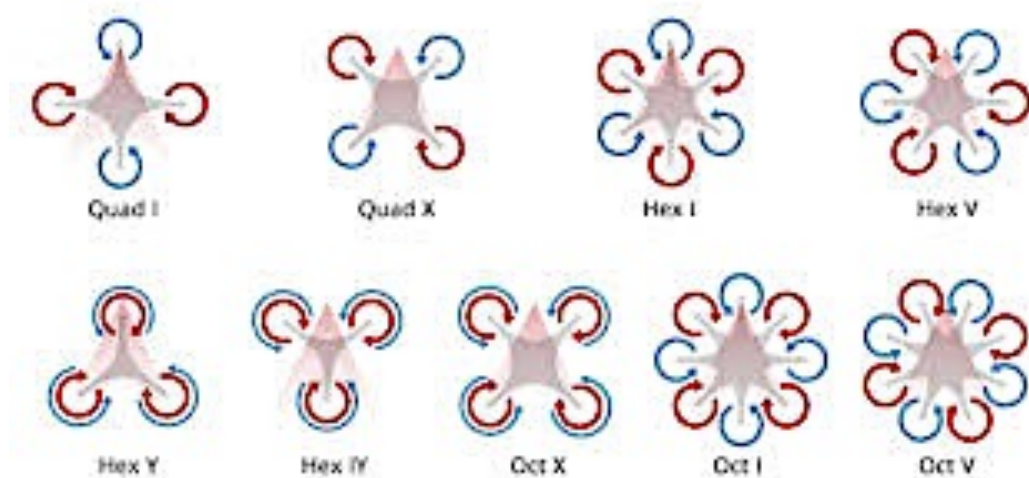


Figura 2.2 Configuraciones de los multicopteros

3 Legislación sobre drones

Con el creciente auge que han tenido estos vehículos aéreos no tripulados y el abaratamiento de estos en los últimos años y la creciente tecnología incorporada por estos, es necesario crear una normativa la cual nos permita convivir con ellos de manera segura.

Por eso en este punto hablaremos sobre esta normativa tanto a nivel europea como española puesto que para cada país es diferente, aunque se está planteando una ley conjunta para estas aeronaves.

3.1 Legislación Europea

Las aeronaves no tripuladas, o drones, representan un sector en auge en la aviación. Ofrece una ventaja destacable, y es que crea muchísimo empleo y crecimiento económico en la Unión Europea, pues es una auténtica novedad y todo el mundo quiere uno. Se deben dictar leyes claras y ordenanzas para que el espacio aéreo se mantenga seguro en Europa.

Antiguamente ya existía una ley sobre aeronaves pequeñas no tripuladas. Sin embargo, debido a la gran cantidad actual de drones, la ley ha debido ser modificada. El 22 de

diciembre de 2017, los embajadores de la UE dieron su aprobación a la ley actualizada sobre aeronaves no tripuladas. La ley entró en vigor a principios de 2018.

Según la AESA (Agencia Europea de Seguridad Aérea) las aeronaves no tripuladas se pueden dividir en 3 categorías.

- 1) La primera categoría es la categoría 'abierta'. Esta es una categoría *de Unmanned Aerial System* (en adelante UAS), sistema aéreo no tripulado donde los riesgos están involucrados. No se necesita una autorización previa de la autoridad competente o una declaración del operador de UAS antes de comenzar la operación.
- 2) La segunda categoría es la categoría 'específica'. Esta es una categoría de operación UAS donde el riesgo ya está involucrado. Antes de operar, necesita una autorización de la autoridad competente teniendo en cuenta la mitigación de medidas que se identifican en una evaluación de riesgo operacional. Hay una excepción para algunos escenarios estándar determinados donde una declaración del operador es suficiente o cuando el operador tiene un certificado de operador UAS ligero con los derechos correctos.
- 3) La última categoría es la categoría 'certificada'. Esta es una categoría de UA o VANT (vehículos aéreos no tripulados) donde los riesgos están involucrados. Se necesita una certificación del UAS, un piloto a distancia con licencia y un operador aprobado de la autoridad competente para garantizar un cierto nivel de seguridad.

Hoy, las reglas para volar un dron son diferentes en cada país europeo, aunque hay planes que se convierten en una ley común que se aplica a todos los países europeos. La AESA está trabajando arduamente para lograr esto en los próximos años, y ya tiene una versión conceptual de estas reglas preparadas. Las reglas también incluyen que se debe registrar el dron si pesa más de 250 gramos. Además de eso, habrá categorías para las operaciones de los drones.

Las nuevas reglas no son solo para los usuarios de drones, sino también para que los fabricantes sigan las demandas de la Unión Europea. Por ejemplo, la etiqueta CE

obligará a los drones a estar equipados con *geofencing*, una técnica que debe garantizar que un dron no pueda despegar cerca de los aeropuertos y otras zonas de exclusión aérea. Además, cada dron vendido en la Unión Europea debe tener una categoría. La idea de las categorías de peso es que habrá 4 categorías diferentes. De C0 hasta C4, donde cada categoría aplicará otras reglas.

3.1.1 Clase C0

La clase C0 es para drones que son más ligeros de 250 gramos con una altitud máxima de vuelo de 50 metros. La ventaja es que los operadores no necesitan registro o conocimiento teórico sobre cómo controlar un dron. Lo negativo es que se debe tener un seguro y no puede volar sobre las personas.

A continuación, se muestran algunas instrucciones recomendadas que se deben seguir por el interés de la seguridad de todos:

- 1) Asegúrese de estar adecuadamente asegurado
- 2) Verifique su dron antes de cada vuelo
- 3) Mantenga siempre el dron en la distancia de observación
- 4) Mantenga su dron tan lejos como sea posible de las propiedades de otras personas, vehículos y otras aeronaves.
- 5) Cumplir con las limitaciones del área, zona o espacio aéreo, definido por la Autoridad Nacional
- 6) Opere su dron dentro de las limitaciones de rendimiento definidas en las instrucciones proporcionadas por el fabricante.

Por supuesto, hay algunas reglas que no se deben romper. Por ejemplo:

- 1) No vuele a más de 50 metros del suelo
- 2) No vuele sobre grandes multitudes o grupos de personas

- 3) No vuele cerca de las aeronaves
- 4) No vuele en las proximidades de aeropuertos, helipuertos, áreas que afecten a la seguridad pública o donde unas maniobras de emergencia estén en curso
- 5) No interfiera con la privacidad de otras personas y use su dron de manera responsable
- 6) No tome fotografías, videos o grabaciones de personas sin su permiso
- 7) No sobrevuele sitios sensibles o protegidos (cárceles, bases militares, plantas energéticas, etc.)
- 8) No haga cambios en el dron

3.1.2 Clase C1

La clase C1 es lo mismo que C0, con la excepción de que se tiene que realizar una prueba teórica y debe tener al menos 14 años de edad.

Hay algunas reglas que debe obedecer si desea comprar un dron clase C1:

- 1) Debe tener al menos 14 años o ser supervisado por una persona mayor de 14 años
- 2) Usted o su supervisor deben estar registrados y aprobar una prueba en línea
- 3) Visualice la marca de registro en el dron y, si está equipado con identificación electrónica, cargue la información de registro

Instrucciones recomendadas que se deben seguir por el interés de la seguridad de todos:

- 1) Asegúrese de estar adecuadamente asegurado
- 2) Verifique su dron antes de cada vuelo
- 3) Mantenga siempre el dron en la distancia de observación

- 4) Mantenga su dron tan lejos como sea posible de las propiedades de otras personas, vehículos y otras aeronaves
- 5) Cumplir con las limitaciones del área, zona o espacio aéreo, definido por su Autoridad Nacional
- 6) Opere su dron dentro de las limitaciones de rendimiento definidas en las instrucciones proporcionadas por el fabricante.
- 7) Planifique su vuelo.
- 8) Asegúrese de que su dron esté equipado con una identificación electrónica actualizada y sistemas de *geofencing* si es obligatorio en el área que desea operar.
- 9) Verifique las condiciones climáticas.
- 10) Familiarícese con el área donde operará su dron y mire en la ubicación de personas, propiedades, vehículos, vías públicas, obstáculos, infraestructuras y cualquier otro elemento que pueda suponer un riesgo para volar su dron sin peligro.

Por supuesto, hay algunas reglas que no se deben romper. Por ejemplo:

- 1) No vuele a más de 120 metros del suelo
- 2) No vuele sobre grandes multitudes o grupos de personas
- 3) No vuele cerca de las aeronaves
- 4) No vuele en las proximidades de aeropuertos, helipuertos, áreas que afecten a la seguridad pública o donde una maniobra de emergencia esté en curso
- 5) No interfiera con la privacidad de otras personas y use su dron de manera responsable

- 6) No tome fotografías, videos o grabaciones de personas sin su permiso
- 7) No sobrevuele sitios sensibles o protegidos (cárceles, bases militares, plantas energéticas, etc.)
- 8) No haga cambios en el dron
- 9) No use el dron para transportar mercancías peligrosas
- 10) Al volar sobre la propiedad de otras personas, no vuele por debajo de 20 m sin su permiso

3.1.3 Clase C2

Los drones de la clase C2 que contienen un peso entre 900 gramos y 4 kg. Es igual a la clase C1 con la excepción de que su edad debe ser igual o superior a los 16 años.

Hay algunas reglas que debe obedecer si quiere comprar un dron clase C2.

- 1) Debe tener al menos 16 años o ser supervisado por una persona mayor de 16 años
- 2) Usted o su supervisor deben: registrarse, registrar el dron y pasar una prueba teórica en una entidad aprobada.
- 3) Visualice la marca de registro en el dron y cargue el registro información sobre la identificación electrónica.

Instrucciones recomendadas que se deben seguir por el interés de la seguridad de todos:

- 1) Asegúrese de estar adecuadamente asegurado
- 2) Verifique su dron antes de cada vuelo
- 3) Mantenga siempre el dron en la distancia de observación

- 4) Mantenga su dron tan lejos como sea posible de las propiedades de otras personas, vehículos y otras aeronaves
- 5) Cumplir con las limitaciones del área, zona o espacio aéreo, definido por su Autoridad Nacional
- 6) Opere su dron dentro de las limitaciones de rendimiento definidas en las instrucciones proporcionadas por el fabricante.
- 7) Planifique su vuelo.
- 8) Asegúrese de que su dron esté equipado con una identificación electrónica actualizada y sistemas de *geofencing* si es obligatorio en el área que desea operar.
- 9) Verifique las condiciones climáticas.
- 10) Familiarícese con el área donde operará su dron y mire en la ubicación de personas, propiedades, vehículos, vías públicas, obstáculos, infraestructuras y cualquier otro elemento que pueda suponer un riesgo para volar su dron sin peligro.

Por supuesto, hay algunas reglas que no se deben romper. Por ejemplo:

- 1) No vuele a más de 120 metros del suelo
- 2) No vuele sobre grandes multitudes o grupos de personas
- 3) No vuele cerca de las aeronaves
- 4) No vuele en las proximidades de aeropuertos, helipuertos, áreas que afecten a la seguridad pública o donde una maniobra de emergencia esté en curso
- 5) No interfiera con la privacidad de otras personas y use su dron de manera responsable

- 6) No tome fotografías, videos o grabaciones de personas sin su permiso
- 7) No sobrevuele sitios sensibles o protegidos (cárceles, bases militares, plantas energéticas, etc.)
- 8) No haga cambios en el dron
- 9) No use el dron para transportar mercancías peligrosas
- 10) Al volar sobre la propiedad de otras personas, no vuele por debajo de 20 m sin su permiso

3.1.4 Clase C3

Los drones de la clase C3 que contienen un peso entre 4kg y 25 kg.

Hay algunas reglas que debe obedecer si quiere comprar un dron clase C3.

- 1) Debe tener al menos 16 años o ser supervisado por una persona mayor de 16 años.
- 2) Usted o su supervisor deben: registrarse, registrar el dron y pasar una prueba teórica online.
- 3) Visualice la marca de registro en el dron y cargue el registro información sobre la identificación electrónica.

Instrucciones recomendadas que se deben seguir por el interés de la seguridad de todos:

- 1) Asegúrese de estar adecuadamente asegurado
- 2) Verifique su dron antes de cada vuelo
- 3) Mantenga siempre el dron en la distancia de observación
- 4) Mantenga su dron tan lejos como sea posible de las propiedades de otras personas, vehículos y otras aeronaves

- 5) Cumplir con las limitaciones del área, zona o espacio aéreo, definido por su Autoridad Nacional
- 6) Opere su dron dentro de las limitaciones de rendimiento definidas en las instrucciones proporcionadas por el fabricante.
- 7) Planifique su vuelo.
- 8) Asegúrese de que su dron esté equipado con una identificación electrónica actualizada y sistemas de *geofencing* si es obligatorio en el área que desea operar.
- 9) Verifique las condiciones climáticas.
- 10) Familiarícese con el área donde operará su dron y mire en la ubicación de personas, propiedades, vehículos, vías públicas, obstáculos, infraestructuras y cualquier otro elemento que pueda suponer un riesgo para volar su dron sin peligro.

Por supuesto, hay algunas reglas que no se deben romper. Por ejemplo:

- 1) No vuele a más de 120 metros del suelo
- 2) No vuele sobre grandes multitudes o grupos de personas
- 3) No vuele cerca de las aeronaves
- 4) No vuele en las proximidades de aeropuertos, helipuertos, áreas que afecten a la seguridad pública o donde una maniobra de emergencia esté en curso
- 5) No interfiera con la privacidad de otras personas y use su dron de manera responsable
- 6) No tome fotografías, videos o grabaciones de personas sin su permiso
- 7) No sobrevuele sitios sensibles o protegidos (cárceles, bases militares, plantas energéticas, etc.)

- 8) No haga cambios en el dron
- 9) No use el dron para transportar mercancías peligrosas
- 10) Al volar sobre la propiedad de otras personas, no vuele por debajo de 20 m sin su permiso

3.1.5 Clase C4

Los drones de la clase C4 que pesan más de 25 kg.

Hay algunas reglas que debe obedecer si quiere comprar un dron clase C4.

- 1) Debe tener al menos 16 años o ser supervisado por una persona mayor de 16 años.
- 2) Usted o su supervisor deben: registrarse, registrar el dron y pasar una prueba teórica online.
- 3) Visualice la marca de registro en el dron y cargue el registro información sobre la identificación electrónica.

Instrucciones recomendadas que se deben seguir por el interés de la seguridad de todos:

- 1) Asegúrese de estar adecuadamente asegurado
- 2) Verifique su dron antes de cada vuelo
- 3) Mantenga siempre el dron en la distancia de observación
- 4) Mantenga su dron tan lejos como sea posible de las propiedades de otras personas, vehículos y otras aeronaves
- 5) Cumplir con las limitaciones del área, zona o espacio aéreo, definido por su Autoridad Nacional

- 6) Opere su dron dentro de las limitaciones de rendimiento definidas en las instrucciones proporcionadas por el fabricante.
- 7) Planifique su vuelo.
- 8) Asegúrese de que su dron esté equipado con una identificación electrónica actualizada y sistemas de *geofencing* si es obligatorio en el área que desea operar.
- 9) Verifique las condiciones climáticas.
- 10) Familiarícese con el área donde operará su dron y mire en la ubicación de personas, propiedades, vehículos, vías públicas, obstáculos, infraestructuras y cualquier otro elemento que pueda suponer un riesgo para volar su dron sin peligro.

Por supuesto, hay algunas reglas que no se deben romper. Por ejemplo:

- 1) No vuele a más de 120 metros del suelo
- 2) No vuele sobre grandes multitudes o grupos de personas
- 3) No vuele cerca de las aeronaves
- 4) No vuele en las proximidades de aeropuertos, helipuertos, áreas que afecten a la seguridad pública o donde una maniobra de emergencia esté en curso
- 5) No interfiera con la privacidad de otras personas y use su dron de manera responsable
- 6) No tome fotografías, videos o grabaciones de personas sin su permiso
- 7) No sobrevuele sitios sensibles o protegidos (cárceles, bases militares, plantas energéticas, etc.)
- 8) No haga cambios en el dron
- 9) No use el dron para transportar mercancías peligrosas

- 10) Al volar sobre la propiedad de otras personas, no vuele por debajo de 20 m sin su permiso

3.2 Legislación española

El pasado 29 de Diciembre de 2017 se publicaba en el Boletín Oficial del Estado (BOE) el nuevo marco normativo que regulará la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto en España. Esta nueva normativa entraba en vigor al día siguiente de ser publicada en el BOE, el 30 de Diciembre de 2017. Se trata de una nueva normativa que introduce nuevos escenarios en los que se hasta la fecha no era posible realizar: vuelos en ciudad, vuelos nocturnos, vuelos en espacio aéreo controlado, vuelos más allá del alcance visual para aeronaves de más de 2 kg y vuelos de alcance visual aumentado.

En el [Real Decreto Real Decreto 1036/2017](#) aplica la normativa europea simplificándola en dos clases por peso: drones menores a 25kg de peso y drones mayores a 25kg. Siendo obligatoria la licencia aprobada por el AESA para uso profesional, no siendo necesaria para uno recreativo.

3.2.1 Requisitos vuelos recreativos

Los usuarios de aeronaves pilotadas por control remoto destinadas exclusivamente a **vuelos recreativos** deberán de cumplir las siguientes condiciones:

- Volar a una distancia mínima de 8 km de cualquier aeropuerto o aeródromo.
- Volar fuera del espacio aéreo controlado.
- No sobrepasar los 120 metros de altura sobre el suelo, o sobre el obstáculo más alto situado dentro de un radio de 150 metros desde la aeronave.
- Volar de día y en buenas condiciones meteorológicas. Aquí hay que destacar que si la aeronave pesa menos de 2 kilogramos están permitidos los vuelos nocturnos siempre que no se superen los 50 metros de altura.
- Los vuelos siempre serán dentro del alcance visual del piloto (VLOS).

- Las aeronaves de menos de 250 gramos podrán volar en ciudad y sobre aglomeraciones de personas y edificios siempre y cuando no se superen los 20 metros de altura.
- Aunque no es obligatorio para el uso recreativo, sí es muy recomendable contar con un seguro de responsabilidad civil.

4 Alcance del proyecto

En el alcance del proyecto analizaremos los factores necesarios para diseñar el control de el dron:

- Crear programa de lectura del IMU con el labVIEW myRIO.
- Estudio del comportamiento del brazo para sacar modelo matemático con el Matlab.
- Controlar la posición del ángulo de un brazo móvil con labVIEW.
- Diseño de un PID para el funcionamiento autónomo de el brazo móvil con Matlab y labVIEW.
- Diseño del sistema de control PID para la estabilización a punto 0 del dron.

4.1 Personas implicadas en el proyecto

En este apartado detallaremos las personas implicadas en este proyecto o se han implicado con en el de alguna manera.

- Desarrolladores

Los desarrolladores globales de este proyecto son Martijn Verbrugge, Robbe Van der Cruyssen como el autor de esta memoria Abidán Negrín Pérez. Abarcando el proyecto de manera conjunta repartiendo las tareas y ejecutándolas de manera individual.

- Tutor del proyecto

El tutor de este proyecto es el D. Adolfo Hilaro Caballero, teniendo el papel de supervisar que el proyecto cumple los objetivos establecidos y asesorando en la realización del mismo.

- Cotutor del proyecto

El cotutor de este proyecto es Jaime Masiá Vañó, teniendo el papel de asesora mecánicamente sobre el dron y el uso de algunos componentes electrónicos como el IMU.

4.2 Objetivos

El objetivo principal es hacer el diseño de un controlador para la estabilización de el dron de manera estática, para ello usaremos el software labVIEW y Matlab para conseguir un PID valido para la estabilización de este en un punto fijo desde cero, esto quiere decir sacar un modelado matemático del cuadricóptero (planta), así como las lecturas de nuestro sensor IMU creando un programa para ello en labVIEW para combinarlo en un solo proyecto para ello.

A parte de eso buscar el soporte para que se pueda acceder de forma remota a todos estos parámetros atreves del propio myRIO.

Para todo esto empezaremos desde cero con una simplificación (brazo articulado) intentando hacer que se mantenga en un referencia de manera autónoma, dándonos cuenta que es un sistema no lineal y por tanto tratarlo como tal o linealizar lo frente a un punto de funcionamiento.

5 Conceptos de funcionamiento de los Drones

En este punto vamos a analizar y a definir algunos conceptos básicos de los que haremos mención más a delante para entender como se mueven los drones, así como las fuerzas que actúan en estos vehículos no tripulados para su óptimo funcionamiento.

5.1 Fuerzas que actúan

Durante el vuelo existen diferentes fuerzas que se oponen o favorecen el vuelo. Estas fuerzas son necesarias para poder controlar el vehículo en el aire. Las fuerzas principales que actúan sobre un helicóptero durante el vuelo son:

- Sustentación. Fuerza aerodinámica producida por un objeto sólido que se mueve a través de un fluido, en este caso el aire, es decir, es la fuerza que sostiene la aeronave en el aire. Esta fuerza es perpendicular a la dirección del flujo y el tamaño del vector de fuerza de sustentación depende de varios factores como tamaño, forma y velocidad de la aeronave. La dirección del vector empuje es característica de la posición de los motores de la aeronave y su magnitud depende de la potencia de los motores.
- Peso. Fuerza producida por la acción de la gravedad sobre la aeronave, la dirección del vector es hacia el centro de la Tierra. La fuerza del peso es ejercida sobre un punto de la aeronave llamado centro de gravedad. Es en este punto donde se concentra la fuerza de la gravedad. La magnitud del vector depende de la masa de la aeronave.
- Arrastre. Fuerza aerodinámica producida por un objeto sólido que se mueve a través de un fluido. como en la sustentación es aire, es la fuerza que empuja la aeronave hacia adelante. Esta fuerza depende de la orientación, velocidad, tamaño de la aeronave que producirá un arrastre mayor o menor.
- Resistencia. Fuerza aerodinámica producida por la fricción de un fluido al paso por la superficie de la aeronave, en este caso el fluido es aire. Esta fuerza depende de la superficie de contacto del aire como también del cuadrado de la velocidad en la que se encuentra la aeronave. Cuanta mayor velocidad mayor resistencia ofrece el aire por lo que mayor fuerza deberán generar los motores para avanzar.

La suma de estas fuerzas determina el movimiento de la aeronave, por lo que según la magnitud de las diferentes fuerzas el avión ascenderá o descenderá, o se moverá con mayor velocidad o menor velocidad. Para que la aeronave se mueva con velocidad constante se debe dar la condición siguiente:

$$F_{sustentación} = P_{aeronave} + R_{aire} \quad (1)$$

$$\vec{F}_{arrastre} = \vec{P}_{aeronave} + \vec{R}_{aire} \quad (2)$$

En la ecuación 1, las fuerzas se aplican en el eje Z donde interviene el peso y la resistencia que son fuerzas normales a la aeronave opuestas a la fuerza de sustentación.

En la ecuación 2, la fuerza de arrastre se aplica descomponiéndola ya que cuando la aeronave avanza esta se encuentra con un ángulo respecto al eje X, por lo que la fuerza de arrastre que es perpendicular a la aeronave tiene un ángulo de ataque. Como en el caso anterior el peso se encuentra aplicado al eje Z y por último la fuerza de resistencia esta aplicada en el eje X.

5.2 Centro de gravedad

La aeronave puede realizar distintas maniobras modificando las velocidades de los motores, los cuales modifican la posición en el aire. Esto produce que la aeronave gire respecto a su centro de gravedad (CG). Este punto es el promedio del peso total de la aeronave, por lo que en la construcción de la aeronave se tiene que tener en cuenta para que su colocación este en equilibrio con la aeronave.

5.3 Centro de presión

El Centro de Presión (CP) es el punto resultante de la suma de las presiones que se producen sobre la superficie de la aeronave. Cuando una aeronave se mueve por un fluido, se crean distintas velocidades a lo largo de la estructura del mismo, esto produce que se creen diferentes presiones. Estas distintas presiones pueden ser de dos formas, sobrepresiones o depresiones que hacen que el aire se separe de la aeronave o que el aire se pegue a la aeronave, respectivamente.

5.4 Centro aerodinámico

El Centro Aerodinámico es el punto de la aeronave donde el momento aerodinámico permanece constante. En los drones este punto se encuentra aproximadamente en el centro de la aeronave debido a que es simétrico en el eje x y eje y.

5.5 Ángulo de ataque

Cuando la aeronave se mueve a través del aire, este se coloca con cierto ángulo respecto a la dirección de vuelo. El ángulo entre la línea de cuerda y la dirección de vuelo es el denominado ángulo de ataque.

5.6 Ejes de movimiento

Se define como un sistema de coordenadas tridimensionales a través del centro de gravedad con cada eje de este sistema de coordenadas perpendiculares a los otros dos ejes. (Sistema de coordenadas 3D) Por lo que, se puede establecer la orientación de la aeronave según el ángulo de rotación de los ejes principales.

Observando la Figura 5.1 y Figura 5.2 que el movimiento de los drones son en los tres ejes coordenados así como la rotación en sentido propio estos movimientos reciben su nombre del inglés Pitch (rotación en el eje Y), Roll (rotación en el eje X) y Yaw (rotación en función del eje Z), el desplazamiento en el eje Z sería la Altitud.

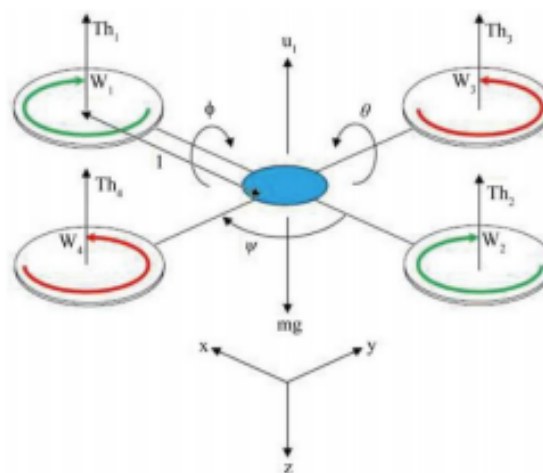


Figura 5.1 Ejes de movimiento

- Pitch

El Pitch o cabeceo es la rotación en el eje Y, en el sistema coordenado establecido por nosotros, que nos permitirá el desplazamiento adelante y atrás

- Roll

El Roll o Alabeo es la rotación en el eje X, en el sistema coordenado establecido por nosotros, que nos permitirá el desplazamiento lateral (izquierda y derecha).

- Yaw

El Yaw o giñada es la rotación en el eje Z, en el sistema establecido por nosotros, esto nos permitirá rotar sobre nosotros mismos para tener más grados de libertad al movernos.

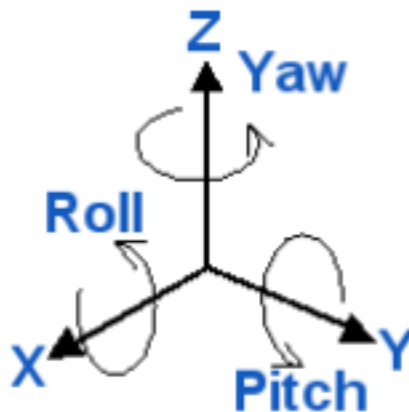


Figura 5.2 Principales movimientos de los drones

Con la suma de estos movimientos (Pitch, Roll, Yaw) y añadiendo la altitud tenemos los movimientos para llegar a todos los puntos del espacio y por ende definidos nuestros movimientos.

6 Funcionamiento de un Dron

El funcionamiento de los cuadricópteros es muy similar a la de los helicópteros la principal diferencia es que en los multicópteros la sustentación y el desplazamiento se

hace con cuatro motores mientras que en los helicópteros lo se hace con el rotor principal y el rotor de cola.

Para lograr la sustentación los drones usan la potencia de motores colocada de manera axial dos a dos en diagonales girando un par en sentido horario y el otro par en sentido anti horario. Cabe destacar que los multicópteros son sistemas inestables y por tanto necesitan un sistema de control en el aire muy bueno.

Teniendo todo esto en cuenta los movimientos de los cuadricópteros se consigue variando la velocidades de los motores para así lograr el desplazamiento en los 6 grados de libertad que se tienen. En la Figura 6.1 podemos ver la relación de movimientos y la velocidad que deberíamos darle a los motores.

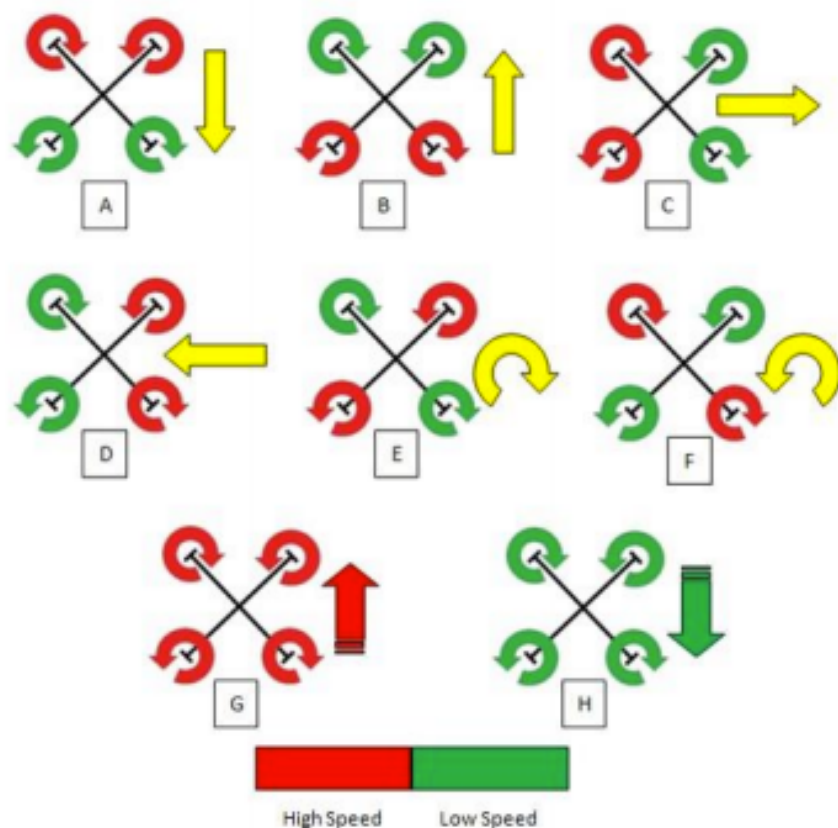


Figura 6.1 Sentidos de giros y velocidades de los motores para los desplazamientos

Teniendo todo esto en cuenta procederemos a hacer el modelado matemático teniendo en cuenta que tenemos un modelo cinemático y dinámico y para el correcto

funcionamiento hay que hacer una combinación de estos dos modelos. En este proyecto nos centramos en un vuelo estático.

6.1 Consideraciones del sistema

Para el análisis y estudio del quadrotor, Bouabdallah (2007) presenta las siguientes hipótesis para el desarrollo del modelo:

- La estructura se supone rígida.
- La estructura se supone simétrica.
- El centro de masa y el origen de coordenadas, se asume coincidente.
- Las hélices son rígidas.
- El empuje y la resistencia al avance son proporcionales al cuadrado de la velocidad de las hélices.

Por medio de estas consideraciones, se establece la dinámica del sistema como un cuerpo rígido en el espacio, añadiendo las fuerzas aerodinámicas causadas por el movimiento de los rotores. En el modelo del quadrotor se deben considerar los efectos giroscopios. Una corta lista de los principales efectos que actúan sobre un helicóptero (Mullhaupt, 1999; Bouabdallah, 2007) son mostrados en el Tabla 6.1, donde C representan términos constantes, ω es la velocidad del rotor, J_R es el momento de inercia rotacional del rotor alrededor de su eje, l es la distancia del centro de masa a los rotores, J es el momento de inercia del cuerpo rígido y φ , θ y ψ son los ángulos de Tait-Bryan.

Tabla 6.1 Principales efectos físicos actuantes en un helicóptero

Efecto	Fuente	Formulación
Efectos Aerodinámicos	Rotación de Motores Giro de hélices	$C\Omega^2$
Pares Inerciales Opuestos	Cambio en la velocidad de rotación de los rotores	$J_R\dot{\Omega}$
Efectos de la Gravedad	Posición del centro de masas	l
Efectos Giroscópicos	Cambio en la orientación del cuerpo rígido Cambio en la orientación del plano de los rotores	$J\theta\psi$ $J_R\Omega\theta, \phi$
Fricción	Todos los movimientos del helicóptero	$C\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$

6.2 Modelado cinemático

La rotación de un cuerpo rígido puede ser parametrizado usando muchos métodos como los ángulos de Euler, Cuaternios y ángulos de Tait-Bryan (Goldstein et al., 2002). Los ángulos de Tait-Bryan son extensamente usados en ingeniería espacial, para describir la orientación en el espacio respecto al marco de referencia fijo, estos ángulos son alabeo, cabeceo y guiñada, aunque son más conocidos por sus nombres en inglés (roll, pitch y yaw respectivamente). La matriz de rotación se obtiene por tres rotaciones sucesivas alrededor de los ejes del cuerpo rígido, la primera rotación alrededor de x esta dada por el ángulo roll ($-\pi < \phi < \pi$), siguiendo de la rotación en y por el ángulo pitch ($-\pi/2 < \theta < \pi/2$) y por último la rotación en z por el ángulo yaw ($-\pi < \psi < \pi$).

Considerando un sistema de coordenada con orientación de mano-derecha, las tres rotaciones individuales son descritas separadamente por:

- Alabeo(Roll), $R(x, \phi)$, rotación alrededor del eje X (Ec. 6.1).

- Cabeceo (Pitch), $R(y, \theta)$, rotación alrededor del eje Y. (Ec. 6.2)
- Guiñada (Yaw), $R(z, \psi)$, rotación alrededor del eje Z. (Ec. 6.3)

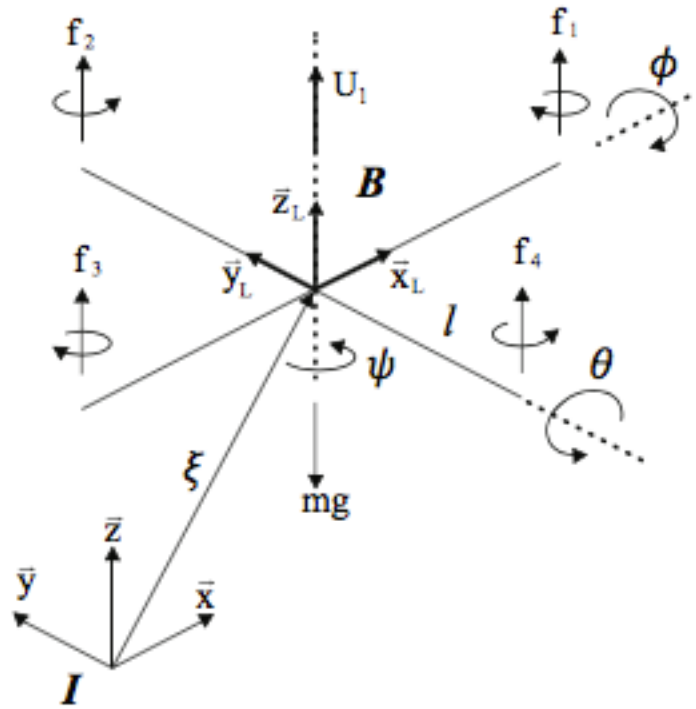


Figura 6.2 Ejes coordenados y fuerzas aplicadas

$$R_{(x,\phi)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\text{sen}\phi \\ 0 & \text{sen}\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$R_{(y,\theta)} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \text{sen}\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$R_{(z,\psi)} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\text{sen}\psi & 0 \\ \text{sen}\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

La matriz de rotación de cosenos directores del eje **B** respecto al eje inercial **I** viene dada por (Bouabdallah, 2007):

$$R_I = R_{(z,\psi)} \cdot R_{(y,\theta)} \cdot R_{(x,\phi)}$$

$$R_I = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\text{sen}\psi & 0 \\ \text{sen}\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \text{sen}\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\text{sen}\phi \\ 0 & \text{sen}\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$

$$R_I = \begin{bmatrix} \cos\psi\text{sen}\theta & \cos\psi\text{sen}\theta\text{sen}\phi - \text{sen}\psi\cos\phi & \cos\psi\text{sen}\theta\cos\phi - \text{sen}\psi\text{sen}\phi \\ \text{sen}\psi\cos\theta & \text{sen}\psi\text{sen}\theta\text{sen}\phi + \cos\psi\cos\phi & \text{sen}\psi\text{sen}\theta\cos\phi - \cos\psi\text{sen}\phi \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta\text{sen}\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

Debido a la propiedad de ortogonalidad, la matriz de rotación respecto al eje de coordenadas del cuerpo **B**, es la transpuesta de **R_I** y viene dada por:

$$R_B = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \text{sen}\psi\cos\theta & -\text{sen}\theta \\ \cos\psi\text{sen}\theta\text{sen}\phi - \text{sen}\psi\cos\phi & \text{sen}\psi\text{sen}\theta\text{sen}\phi + \cos\psi\cos\theta & \cos\theta\text{sen}\phi \\ \cos\psi\text{sen}\theta\cos\phi + \text{sen}\psi\text{sen}\phi & \text{sen}\psi\text{sen}\theta\cos\phi - \cos\psi\text{sen}\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones cinemáticas de rotación del vehículo que establecen las relaciones entre las velocidades angulares, se obtienen mediante el análisis siguiente:

$$\dot{R}_I = R_I \cdot S(\omega)$$

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix}$$

La cinemática rotacional se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$\dot{\eta} = W^{-1}\omega$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\text{sen}\phi \\ 0 & \text{sen}\phi\text{sec}\theta & \cos\phi\text{sec}\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

donde, $\eta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ y $\omega = [p \ q \ r]^T$, son los ángulos y velocidades angulares en los ejes del cuerpo.

La cinemática traslacional puede ser expresada:

$$v = R_I \cdot V$$

donde $v = [u_0 \ v_0 \ w_0]^T$ y $V = [u_L \ v_L \ w_L]^T$ son velocidades lineales expresadas en el eje inercial y el eje del cuerpo respectivamente.

6.3 Modelado dinámico

La dinámica del modelo que describe el movimiento traslacional como también el rotacional, se plantea mediante la formulación de Euler-Lagrange.

Pero puesto que no lo vamos a mover de el punto de funcionamiento no vamos a entrar en detalle sobre el desarrollo matemático.

7 Desarrollo experimental

Con el desarrollo experimental queremos lo explicar el procedimiento llevado a cabo para lograr el funcionamiento de este proyecto, así como los componentes (hardware) y programas (software) empleados en la elaboración del mismo.

7.1 Software

En este apartado vamos analizar el software empleado para la elaboración de esta memoria, que serían:

- labVIEW
- Matlab
- Programas de elaboración de memoria y presentación

7.1.1 labVIEW



LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

Este programa fue desarrollado por National Instruments (1976) dirigido a ordenadores MAC, aunque no salió al mercado por primera vez hasta 1986. Ahora está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux. Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, y su origen provenía del control de instrumentos, aunque hoy en día se ha expandido ampliamente no sólo al control de todo tipo de electrónica (Instrumentación electrónica) sino también a su programación embebida, comunicaciones, matemáticas, etc.

Para nosotros es el programa principal puesto que este es el que se va a encargar de dar las ordenes al sistema, hemos elegido este Software porque permite controlar fácilmente:

- Lecturas telemáticas.
- Varias interfaces de comunicaciones.
- Capacidad para interactuar con otros lenguajes de programación y aplicaciones

Como se ha dicho es una herramienta gráfica de programación, esto significa que los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando su comprensión. Al tener ya pre-diseñados una gran cantidad de bloques, se le facilita al usuario la creación del

proyecto, con lo cual en vez de estar una gran cantidad de tiempo en programar un dispositivo/bloque, se le permite invertir mucho menos tiempo y dedicarse un poco más en la interfaz gráfica y la interacción con el usuario final. Cada VI consta de dos partes diferenciadas:

- Panel Frontal: El Panel Frontal es la interfaz con el usuario, la utilizamos para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. Los usuarios podrán observar los datos del programa actualizados en tiempo real (como van fluyendo los datos, un ejemplo sería una calculadora, donde tú le pones las entradas, y te pone el resultado en la salida). En esta interfaz se definen los controles (los usamos como entradas, pueden ser botones, marcadores etc...) e indicadores (los usamos como salidas, pueden ser gráficas....).
- Diagrama de Bloques: es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan íconos que realizan una determinada función y se interconectan (el código que controla el programa. Suele haber una tercera parte icono/conector que son los medios utilizados para conectar un VI con otros VIs.

En el panel frontal, encontraremos todo tipos de controles o indicadores, donde cada uno de estos elementos tiene asignado en el diagrama de bloques una terminal, es decir el usuario podrá diseñar un proyecto en el panel frontal con controles e indicadores, donde estos elementos serán las entradas y salidas que interactuarán con la terminal del VI.

7.1.2 Matlab



MATLAB (abreviatura de *MATrix LABORatory*, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux .

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las *cajas de herramientas (toolboxes)*; y las de Simulink con los *paquetes de bloques (blocksets)*.

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

En 2004, se estimaba que MATLAB era empleado por más de un millón de personas en ámbitos académicos y empresariales.

Las aplicaciones de MATLAB se desarrollan en un lenguaje de programación propio. Este lenguaje es interpretado, y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo, como a través de un archivo de script (archivos *.m). Este lenguaje permite operaciones de vectores y matrices, funciones, cálculo lambda, y programación orientada a objetos.

Por todo esto nosotros lo hemos escogido para el análisis de datos y búsqueda de modelos matemáticos de graficas.

7.1.3 Programas de elaboración de memoria y presentación

Para elaborar esta memoria y la presentación hemos escogido los programas más usados a nivel de usuario puesto la facilidad y compatibilidad que otorgan que son:

- Microsoft Word es una aplicación informática dedicada al procesamiento de textos. Fue desarrollada por la empresa Microsoft, y viene integrada en el paquete ofimático Microsoft Office.

La primera versión del programa fue desarrollada por dos ex-programadores de Xerox, Charlie Simonyi y Richard Brodie, contratados en 1981 por Bill Gates y Paul Allen. Estos dos programadores venían de trabajar en el procesador de

textos Xerox bravo, que era el primer procesador de textos desarrollado con la técnica WYSIWYG (“What You See Is What You Get”). Es en el año 1983 cuando sale al mercado la primera versión, el Word 1.0 para la plataforma Xenix MS-DOS. No fue hasta 1989 cuando se lanzó la versión para Microsoft Windows.

- Microsoft PowerPoint es un programa de presentación, desarrollado por Microsoft e integrado en el paquete ofimático Microsoft Office como un complemento más, el cual es capaz de aprovechar las ventajas ofrecidas por el resto de componentes para obtener un resultado óptimo. Está diseñado para realizar presentaciones con texto esquematizado, con diapositivas, animaciones de texto, etc.

En 1980, en una pequeña oficina de California llamada Forethought, dos programadores de software estaban desarrollando el primer software de presentaciones gráficas para ordenadores personales. Los primeros esfuerzos de los productores por vender el software no tuvieron ningún resultado ya que ningún inversor decidió apostar por el entonces llamado Presenter, que estaba dirigido a la plataforma Mac. No fue hasta el año 1987 cuando vendieron la compañía a Microsoft, la cual lo renombró a como ahora lo conocemos.

Es uno de los programas de presentación más conocidos y extendidos actualmente, es usado en dominios como la enseñanza, negocios, etc. Según cifras del desarrollador Microsoft, a diario se realizan alrededor de treinta millones de presentaciones en PowerPoint.

7.2 Componentes (Hardware)

En este apartado veremos no solo los componentes de un dron sino los componentes empleados para el desarrollo de este proyecto.

7.2.1 Motor sin escobillas trifásico o motores brushless

Los motores sin escobillas o motores brushless son los motores más usados entre todos los fabricantes de aviones radiocontrol puesto que proporcionan gran potencia y de

pequeño peso. Estos motores sin escobillas están formados por una parte inmóvil estator y una parte móvil rotor, el estator consiste en bobinas dispuestas en un patrón radial, con alambre de cobre enrollado alrededor de cada bobina.

El estator está compuesto de imanes alrededor de su carcasa interior. Para hacer girar el motor, la potencia se aplica en intervalos muy precisos a los conjuntos de las bobinas.

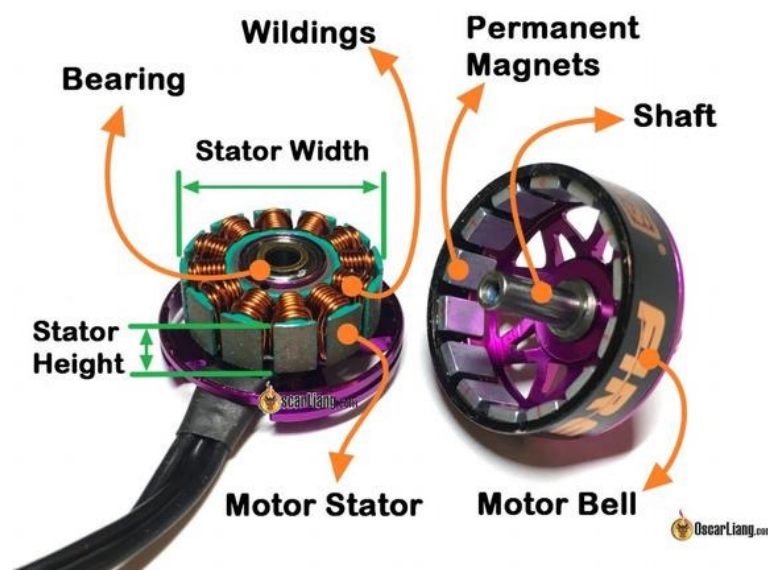


Figura 7.1 Partes de un motor brushless

Estos motores son los encargados de mantener al cuadricóptero en vuelo para ello como hemos visto necesitamos incorporarle una potencia a intervalos necesitando un controlador electrónico de velocidad o ESC (siglas del inglés Electronic Speed Controller) para hacer que estas señales lleguen bien, cabe destacar que estos motores son trifásicos y por ello necesitan que el ESC también lo sea.

7.2.2 Controlador electrónico de velocidad o ESC

El variador de velocidad se encarga de regular la velocidad de motores mediante un controlador eléctrico-electrónico. El empleo de un variador de velocidad es causado por la velocidad constante que proviene de la batería que es necesaria que se transforme de una tensión constante a una fuente de tensión variable y de sentido reversible por cada polo del motor.



Figura 7.2 ESC

La forma de conexión de los ESC es muy sencilla solo hay que poner los cables de salida (tres cables únicamente) al motor y en la entrada tenemos un conector que va a la regulación PWM y dos cables rojo negro que van a la batería que es la alimentación según se parecía en la Figura 7.3

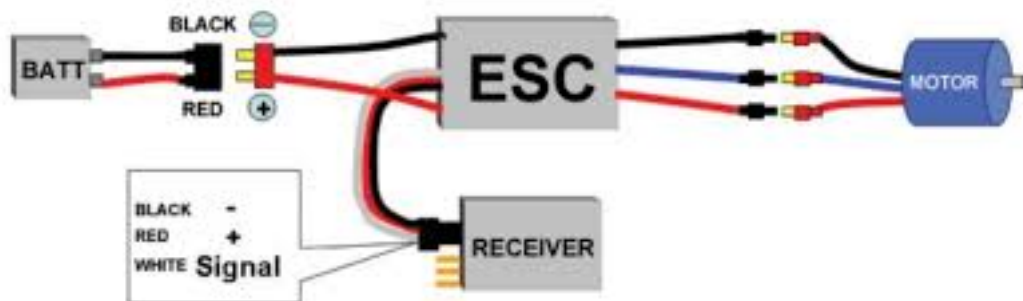


Figura 7.3 Esquema de conexión del ESC

El ESC trabaja generando una señal PWM que es un tipo de señal de voltaje utilizada para enviar información o para modificar la cantidad de energía que se envía a una carga. Estas señales son cuadradas o sinusoidales que hacen uso de la ecuación:

$$D = \frac{\tau}{T} \cdot 100\%$$

Donde D es el ciclo de trabajo, τ es el tiempo donde la señal es positiva y T es el periodo.

Para emular una señal analógica se modifica el ciclo de trabajo (duty cycle en inglés) de manera que el valor promedio de la señal sea un valor aproximado del voltaje que se quiere obtener, pudiendo introducir voltajes entre 0[V] y el máximo que soporte el dispositivo PWM utilizado, en este caso el controlador myRIO.

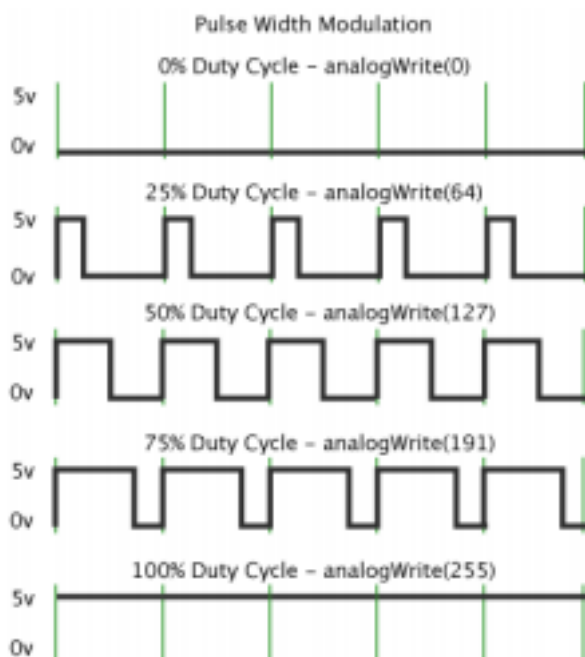


Figura 7.4 Señal PWM

Cabe destacar que es una señal para se usa también para controlar la luminosidad de los LED, mover servo motores pero en nuestro proyecto lo usaremos para generar el movimiento de nuestro motor de corriente continua.

7.2.3 Sensor de medición inercial o IMU

Un sensor de medición inercial o IMU (siglas procedentes del inglés) es un dispositivo electrónico que mide la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, combinando el uso de un acelerómetro y giroscopio.

También pueden medir la posición respecto al norte magnético de la Tierra ya que algunos modelos dispone de un magnetómetro que realiza la función de brújula digital, pudiendo conocer la dirección que tiene el multicoptero.

Además también pueden medir la altura a la que se encuentran puesto que algunos modelos también llevan incorporados barómetros para hacer medir las pequeñas oscilaciones de presión y así medir la altura.

Para este proyecto se utilizara un IMU que tiene giróscopo en los tres ejes, acelerómetro en los tres ejes y magnetómetro en los tres ejes se suelen llamar también 9dof por que nos dan nueve medidas, a los que incorporan barómetro se le suele encontrar como IMU 10DoF.



Figura 7.5 IMU Razor 9DoF

Acelerómetro. Mide de aceleración o vibración, proporcionando una señal electrónica según un parámetro físico, en este caso es la aceleración y vibración.

Giroscopio. Mide la rotación de un dron. La rotación mide la velocidad angular, y las unidades de medida son en grados por segundo ($^{\circ}/s$) o revoluciones por segundo (RPS). Otra utilidad de estos dispositivos es medir la orientación de aeronaves, para realizar correcciones respecto a la posición de equilibrio y enviar al motor las variaciones para que el dron se mantenga en equilibrio.

Magnetómetro o compas. Utiliza un sensor de campo magnético, que detecta el campo magnético de la Tierra. Gracias a las indicaciones que muestra el magnetómetro se puede saber la dirección que tiene el dron en el aire, y así poder corregir su dirección si este se aleja de su rumbo marcado.

7.2.4 myRIO

myRIO es una combinación de un microprocesador + FPGA + Puertos de Entrada/Salida. Para ser más específicos myRIO tiene procesador ARM® Cortex™-A9 dual-core de rendimiento en tiempo real y E/S personalizada. Disponible en dos versiones, la versión cubierta de NI myRIO (NI myRIO-1900) ofrece habilidad WiFi, 3 puertos de E/S y una cubierta lista para estudiantes, mientras que la versión de tarjeta únicamente (NI myRIO-1950) ofrece un tamaño más pequeño sin WiFi y con 2 puertos de E/S. La tarjeta cuenta con 8 entradas analógicas, 4 salidas analógicas; 32 líneas E/S digitales, LEDs, push-button y acelerómetro interno.

La tarjeta myRIO esta diseñada para ser programada en LabVIEW o C/C++ en la parte del procesador y con LabVIEW en la parte del FPGA.

Todo esto hace que sea la herramienta elegida para realizar este trabajo dado su potencia y su comodidad a la hora de programarlo.

7.2.5 Brazo balancín

Este brazo es un balancín diseñado por los compañeros Manuel Francisco Pérez García y Carlos Juan Micó en su proyecto “Análisis aerodinámico, de sustentación y control de dron por impresión 3D” .



Figura 7.6 Brazo balancin cedido

En este brazo nos centraremos más adelante puesto que en este proyecto toma una parte fundamental en nuestro proyecto puesto que es lo primero que hay que controlar para entender el funcionamiento de los componentes.

7.2.6 Multicóptero

El dron es parte de un proyecto desarrollado por los compañeros Manuel Francisco Pérez García y Carlos Juan Micó en su proyecto “Análisis aerodinámico, de sustentación y control de dron por impresión 3D” cedido para el control del mismo.



Figura 7.7 Multicóptero

7.3 Metodología

Analizaremos la metodología empleada para la realización de este proyecto con el fin de que se entienda como hemos procedido y se pueda duplicar este en un futuro estando todas las imágenes añadidas en el Anexo I de todo lo empleado para el funcionamiento del mismo. Aparte de añadir todos los archivos de programa en un anexo aparte.

7.3.1 Control del ESC

Para empezar este proyecto hemos tenido que saber como funciona y como se controla el ESC con el myRIO aparte conocer su conexionado y la zona muerta. Puesto que la mayoría de los controladores vienen con ella de fabrica para evitar fallos o accidentes, también tienen un ciclo de trabajo diferente y hay que informarse sobre ello.

La zona de trabajo esta entorno a los 1000 y 2000 milisegundos siendo efectivos a partir de los 1200ms no empiezan en cero para evitar posibles conflictos o interferencias en los aparatos, pero nosotros queremos un porcentaje que vaya de 0% al 100% para que la regulación del PID sea más cómoda.

Esto se consigue realizando una serie de operaciones en el propio myRIO para que al introducir un % nos de una señal de 1000 a 2000.

7.3.2 Lectura del IMU

Una parte fundamental para poder realizar el control de los cuadricópteros es fundamental leer los datos de nuestro sensor y saber que tiempo tarde en leerlo, en este caso se lee casi en tiempo real, puesto que tenemos un retraso (delay en inglés) en el procesado en el myRIO de unos 15ms.

7.3.3 Procesado de señal

Una vez tenemos claro como lee el IMU y como se controla el ESC procedemos a la colocación de los componentes en el brazo balancín y a tomar datos para ver el comportamiento del mismo y procesarlos en el Matlab para ver la señal de respuesta y ver que tipo de modelo tenemos.

En la Figura 7.8 vemos que tenemos ruido a pesar de intentar eliminarlo con un filtro de la media con un filtro que muestre 30 medidas para no causar mucho retraso en el procesamiento de la señal.

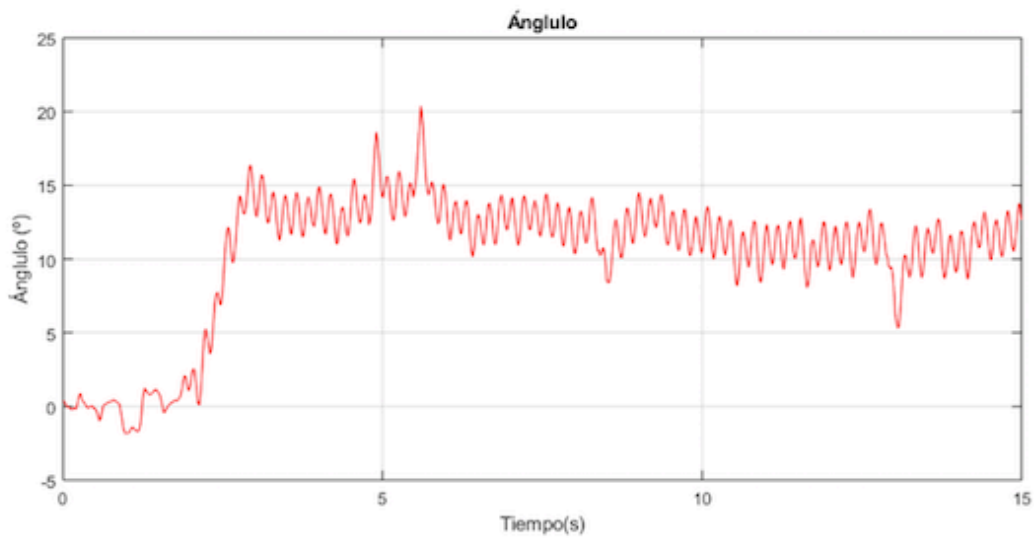


Figura 7.8 Lectura IMU filtrada por la media

7.3.4 Diseño del PID

Una vez tenemos nuestra señal referida a un punto de funcionamiento en este caso 15° procesada y optimizada en Matlab le daremos un comando para que compare la señal y nos de forma aproximada el valor de la ecuación de la planta para así poder empezar a diseñar nuestro controlador del brazo.

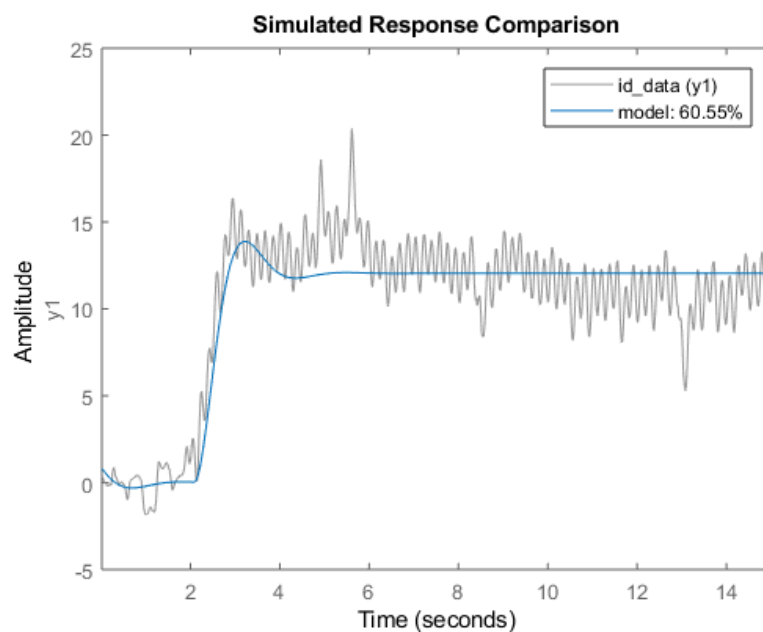


Figura 7.9 Gráfica de comparación de señal con un modelo establecido

Una vez con esta señal generada y guardada vamos a realizar el diseño de nuestro controlador. Para ello veremos la manera utilizaremos el lugar de las raíces de la planta para ver los posibles puntos y comprobar la estabilidad del sistema como podemos ver en la Figura 7.10 la planta es inestable puesto que tiende a la parte derecha de la gráfica.

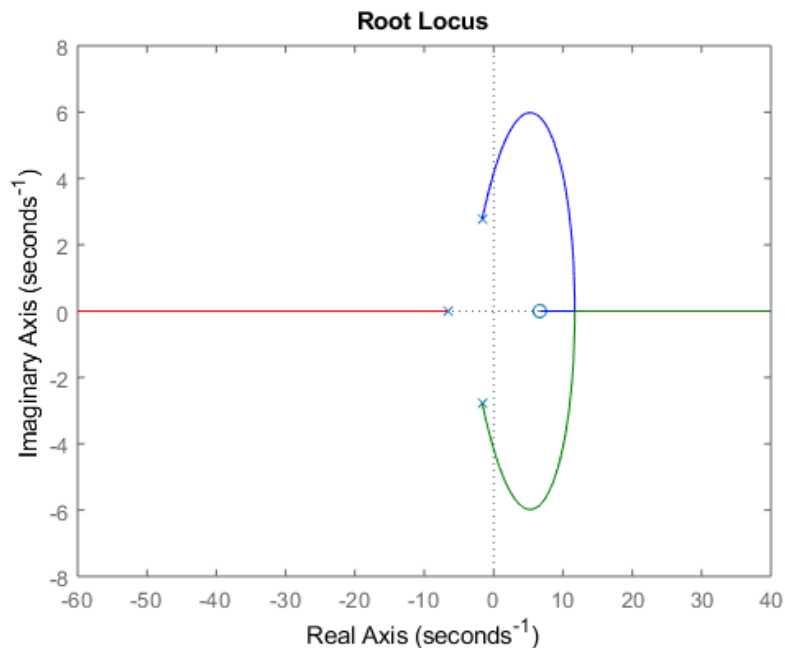


Figura 7.10 Lugar de las raíces lazo abierto

Luego ponemos un polo en el origen que lo pone nuestro PID lo comprobamos con el lugar de las raíces y vemos que todavía es más inestable como se puede ver en la Figura 7.11 para luego poder añadir los ceros en los polos complejos que son los más inestables para luego definir el punto de funcionamiento según la Figura 7.12 como podemos ver el sistema es inestable pero esto es por la no linealidad del sistema pero en este caso como el punto de funcionamiento es fijo no le damos importancia.

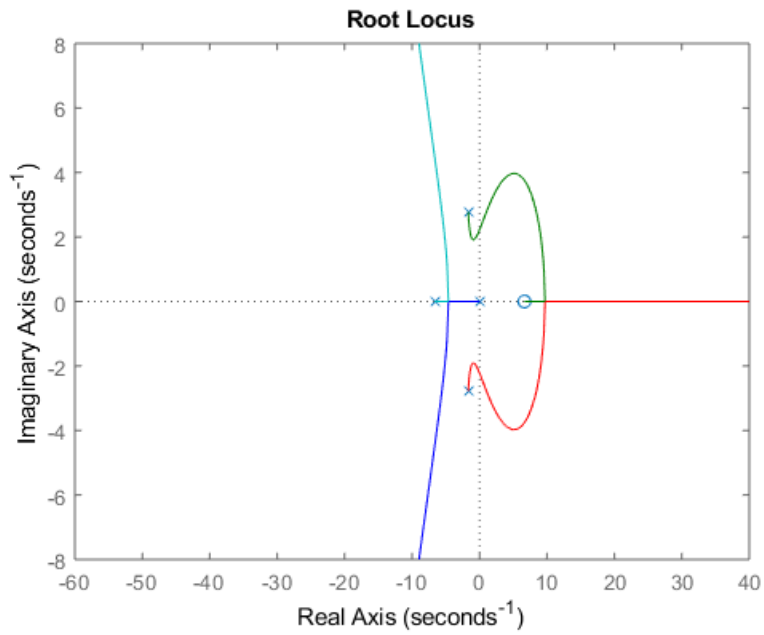


Figura 7.11 Lugar de las raíces con el polo en el origen

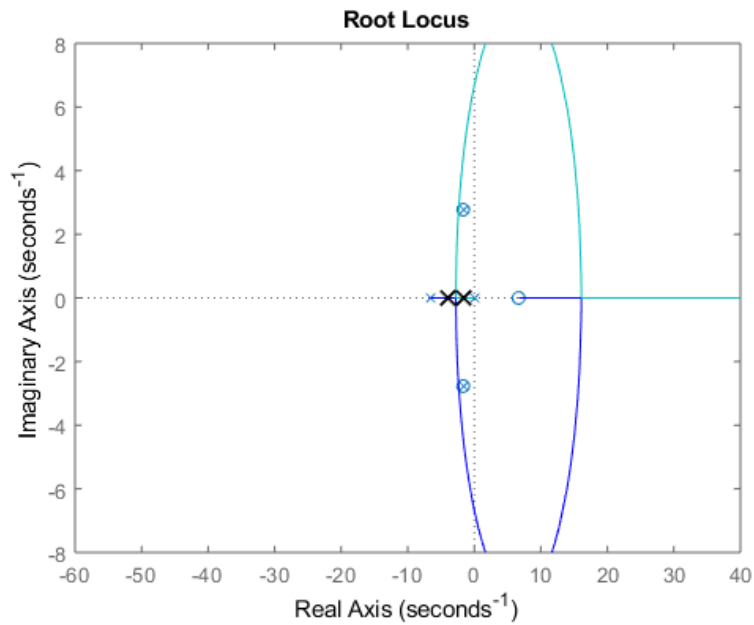


Figura 7.12 Lugar de las raíces con el polos en el origen y ceros dobles en el polo de origen. Y marcados con una x los polos de nuestro sistema a utilizar

Luego desarrollaremos un simulink para ver la forma de actuar del sistema y ver si responde correctamente en el brazo balancín, a la hora de simular el sistema meteremos ruido en la salida y en la entrada de lectura del IMU como podemos ver en la Figura 7.14

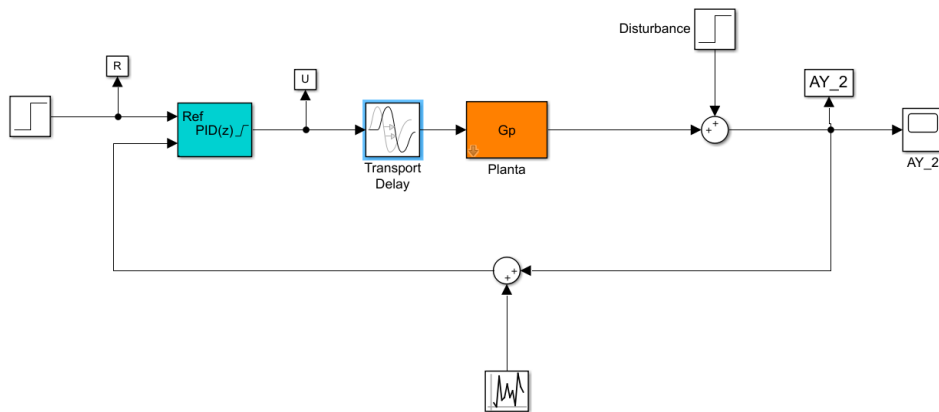


Figura 7.13 Simulink usado para la verificación

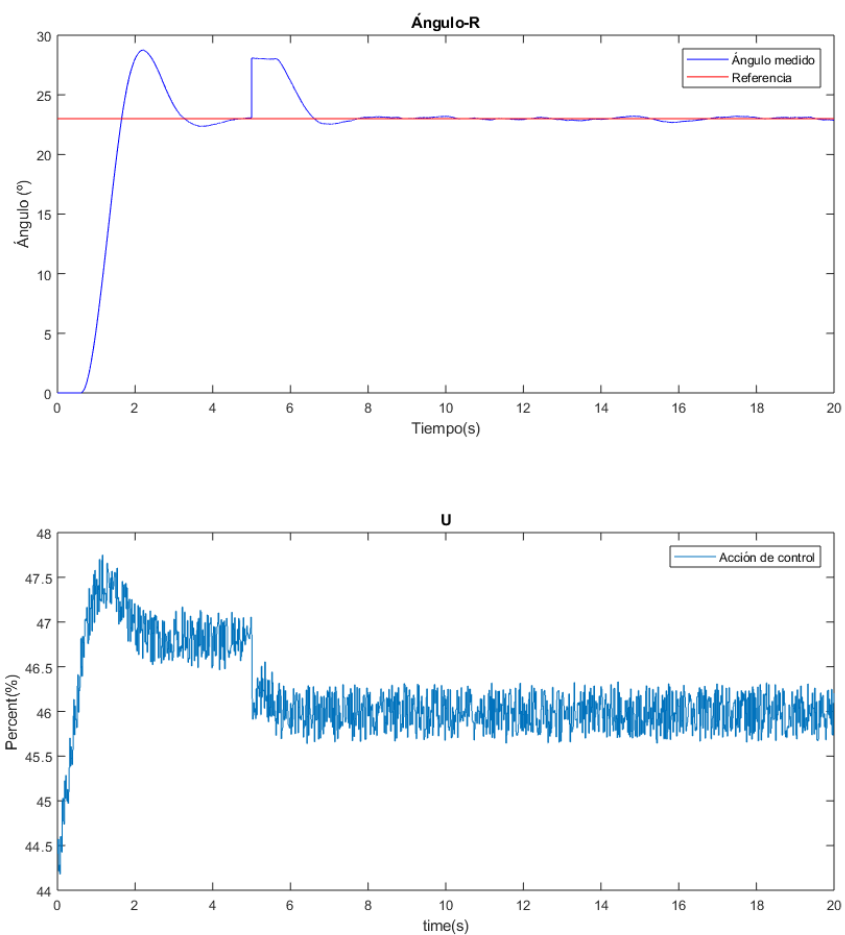


Figura 7.14 Respuesta de la simulación en la parte superior el ángulo y en la parte inferior la señal de control

Una vez comprobado que el sistema funciona incluso con el ruido es el momento de pasar al labVIEW para montar el sistema para que funcione.

7.3.5 labVIEW

Para montar el sistema en labVIEW tenemos que tener claro lo que necesitamos para que funcione crearemos una carpeta para la los archivos que necesitamos leer y no estarán en el programa final para no ensuciar el entorno los llamaremos subVI para hacer referencia a lo que esta debajo del VI final (extensión que usa el labVIEW).

También hay que saber la manera de la que vamos a conectar el labVIEW a al myRIO puesto según si es USB o WIFI se entra de manera diferente. Esto se mostrará en las imágenes incorporadas en el Anexo I a parte de estar el software completo en la carpeta de descargas Anexa a este documento.

Usaremos un subVI para general la lectura del IMU como vemos en la Figura 7.15 de esta forma tendremos las salidas del IMU marcadas y listas para usar.

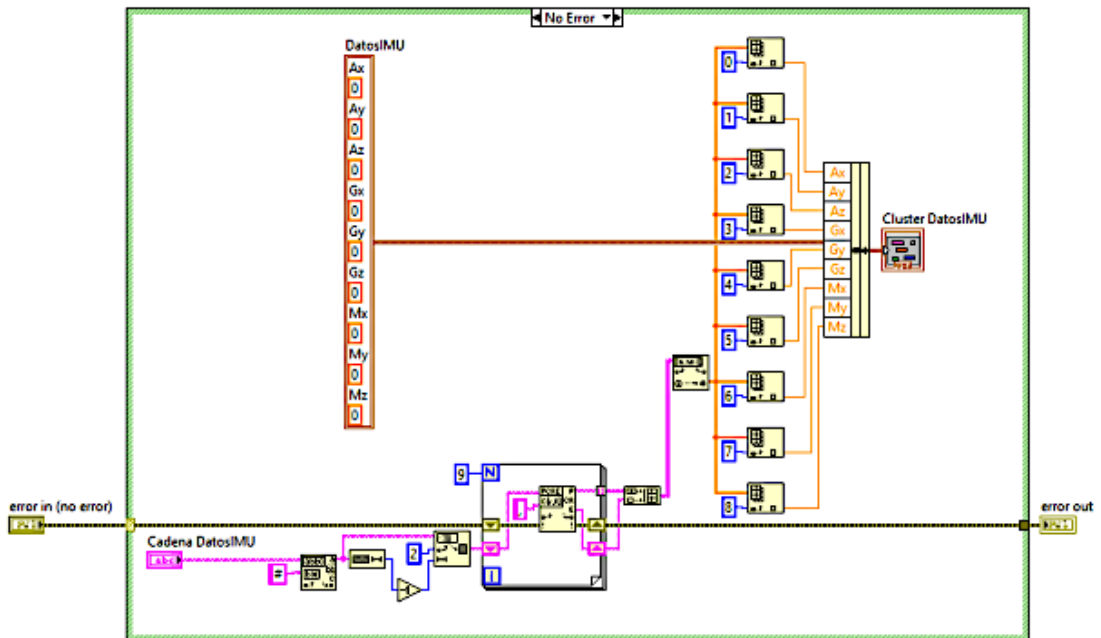


Figura 7.15 Diagrama de separacion de lectura del IMU

También generaremos un subVI para transformar la lectura del acelerómetro en grados y el giróscopo también según vemos en la figura

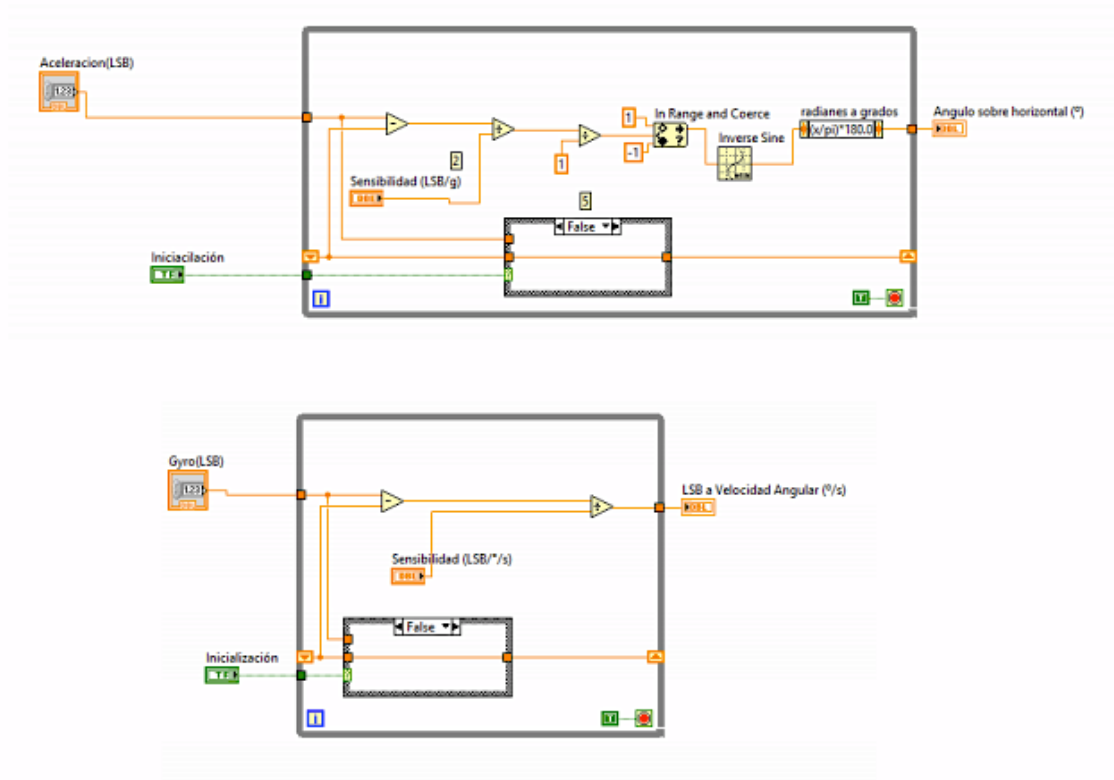


Figura 7.16 en la parte superior el subVI del acelerómetro y en la inferior la del giróscopo

También crearemos otro subVI para la unión de el acelerómetro y giróscopo (filtro combinado). Este filtro combinado sería es un poco rudimentario y sencillo estableciendo cuanto de cada cosa escogemos según se aprecia en la .

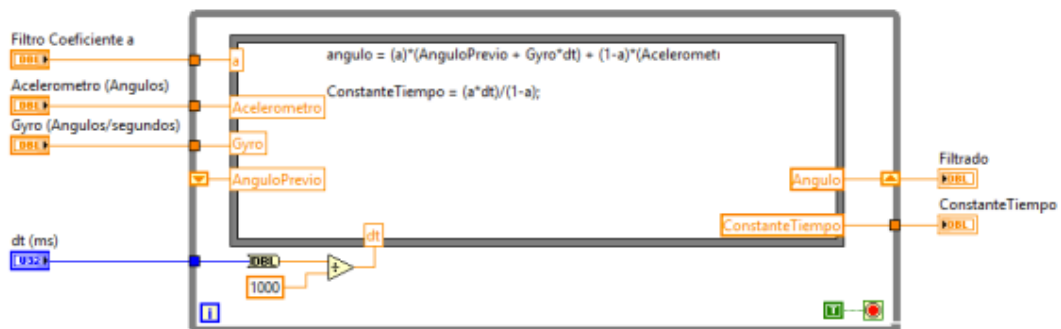


Figura 7.17 diagrama del filtro combinado

Ya solo quedaría montarlo todo en el VI principal junto con el control de los motores y hacer el test de que funcione correctamente

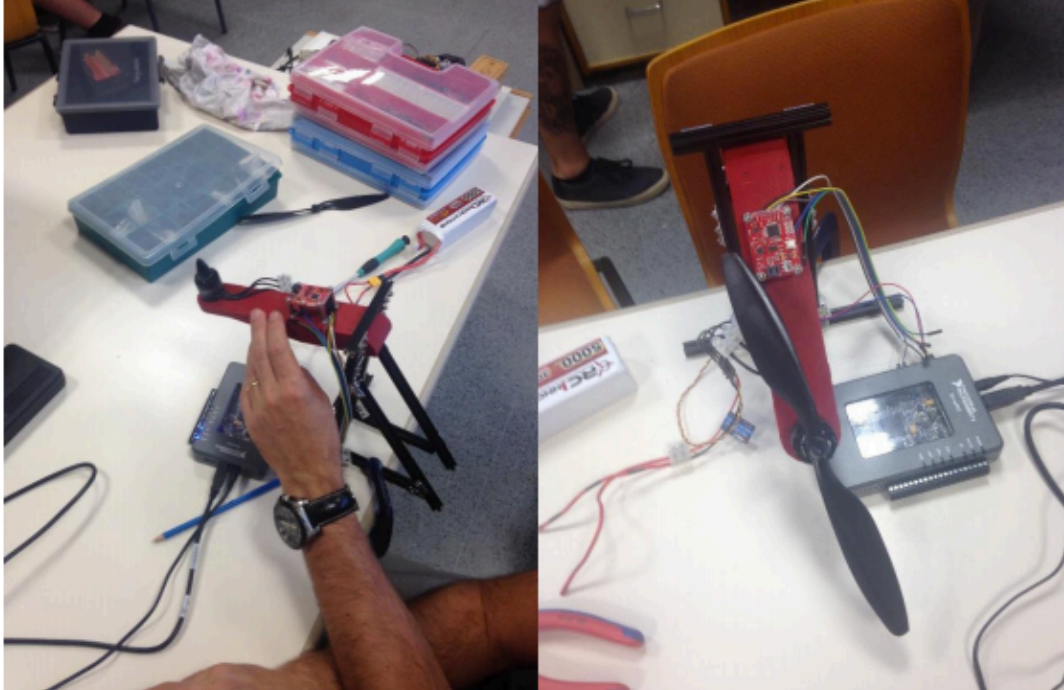


Figura 7.18 Test del funcionamiento a la izquierda y a la derecha el montaje del brazo

El programa completo lo pondremos observar en el Anexo II.

Para hacer el del brazo solo usaremos el eje Y que es en el que vamos a actuar, para el control del drone bastaría con leer los tres ejes y de manera sencilla darle las ordenes a los pares de motores que van a usar según el movimiento como podemos ver en el apartado 6 Funcionamiento de un Dron Figura 6.1 pág. 37

8 Resultados y conclusiones

En este apartado hablaremos de los resultados y conclusiones obtenidos al realizar este proyecto aportando los problemas y soluciones dadas a los diferentes problemas que se han obtenido a lo largo de este proyecto.

8.1 Resultados

8.1.1 Brazo balancín

En cuanto al control del brazo balancín hemos logrado el funcionamiento entorno a una referencia fija a que reaccione frente a las perturbaciones llevándolo al punto de funcionamiento nuevamente de manera autónoma que era uno de los objetivos principales del este proyecto.

Ha costado mucho poner el sistema en marcha puesto que las lecturas del IMU con la puesta en marcha de los motores, estos transmitían las vibraciones y se reflejaban en la lectura teniendo que sobre filtrar la señal usando un filtro de la media haciendo que el sistema se vuelva un poco más lento.

Hemos tenido que hacer concesiones de velocidad de procesado puesto que las vibraciones eran demasiado grandes y volvían el sistema inestable.

Los ESC se han desconfigurado de los parámetros de fabrica teniendo que intentar restablecerlos para su correcto funcionamiento, esta configuración se accede poniendo el programa al 100% de la señal del ESC y unos pitidos indican que esta en la configuración y mediante pitidos indica que parámetros se está cambiando en el manual adjunto en el Anexo III estará la información de dicho manual.

8.1.2 Cuadricóptero

En el cuadricóptero no hemos podido probar el programa puesto a la falta de tiempo así como a los problemas sufridos con la lectura del IMU y que el bloque PID no funcionaban correctamente. Reintentando y rediseñando los controladores logramos que los PID respondieran pero las salidas del IMU al conectar los 3 ejes no fuimos capaces de resolver ese problema y por tanto preferimos no hacer pruebas por seguridad tanto humana como del aparato.

También cabe destacar que el IMU no estaba centrado con el centro de rotación lo que hacia peligroso que se descontrolara puesto que el control no estaba pensado para ello.

8.2 Conclusiones

Las conclusiones finales son que he aprendido mucho de este proyecto sobre la regulación de procesos y la manera de afrontar los problemas gracias a Adolfo Hilario Caballero que con su ayuda y su orientación ha sido posible la elaboración de este proyecto.

Añadir que ha sido un proyecto muy complicado a la hora de realizar puesto a la complejidad que conlleva así como los problemas encontrados, pero gracias a ellos me han permitido aprender. Unos de los mayores problemas encontrados es el desplazamiento del IMU de sus centro de rotación y no poder solucionarlo por falta de tiempo.

8.3 Sugerencias para futuros trabajos

En todo proyecto siempre hay aspectos en los que hay que mejorar para ello expondremos tanto mejoras en el hardware como en el software.

En el software necesitaría un arreglo de optimización puesto que esta diseñado con pocos conocimientos y posiblemente haya muchísimo campo de estudio en el para mejorarlo. Por ejemplo añadir un sistema de filtrado KALMAN para evitar el ruido.

En el hardware tenemos que empezar por el cambio del diseño de la placa de control poniendo en IMU en el centro del drone para que lo giros sean en relación a este punto puesto que ahora mismo esta desplazado y el control no seria del todo correcto.

Otro aspecto a modificar seria añadir un IMU 10 DoF que incluyen barómetro para el control de la altitud, puesto el que tenemos es 9 DoF.

Se podría añadir cámara de FPV de visión a distancia para el manejo y un posible reconocimiento de objetos.

Anexo I

En este anexo veremos la manera de proceder a crear un nuevo proyecto en el labVIEW para el myRIO así como una vez creado para una conexión USB cambiarla a una conexión WIFI de manera gráfica.

En la figura Anexo I 1 tenemos observamos la pantalla inicial del labVIEW para crear o abrir un nuevo proyecto, seleccionando el nuevo proyecto pasaremos a la figura Anexo I 2 en la que tenemos el tipo de proyecto a crear. En nuestro caso myRIO y dentro de este myRIO Project.

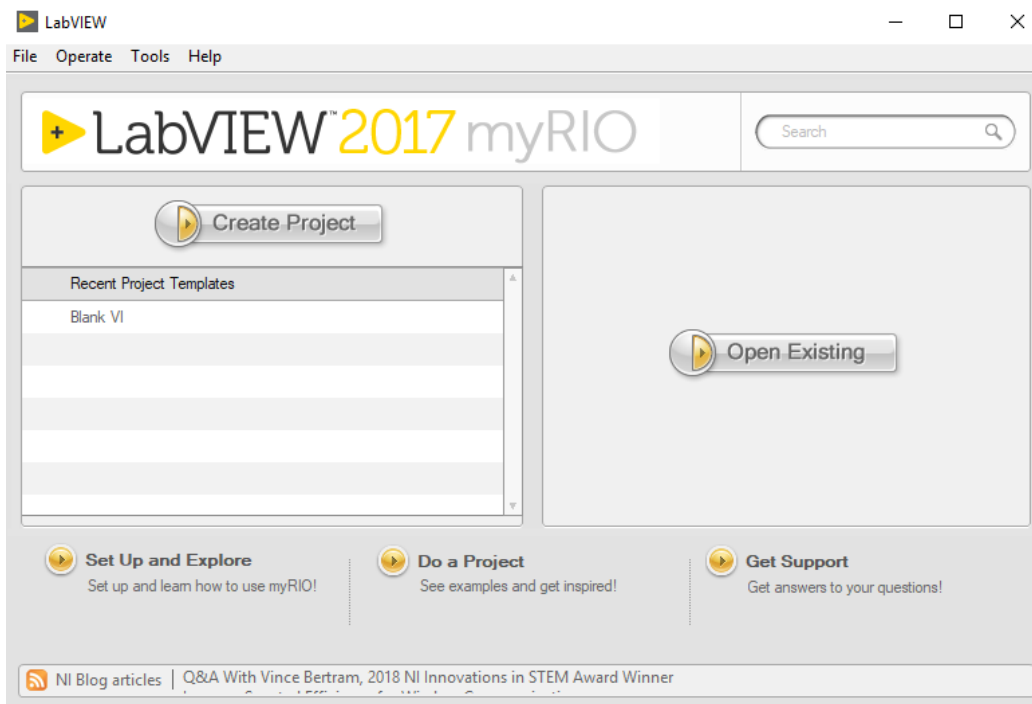
Una vez seleccionada esta opción podemos que configurar el tipo de conexión, así como el nombre que va a tener el proyecto, el directorio de guardado, como se observa en la figura Anexo I 3. Seleccionamos la opción de USB y le damos a la flecha azul para generar la dirección IP de este. Cuando este todo configurado le daremos al botón finish en la parte inferior que se habilitará.

Una vez listo se ejecutara la pantalla de la figura Anexo I 4 donde tenemos la estructura del proyecto ya solo queda crear un nuevo VI. Yendo a la parte superior de esta seleccionaremos FILE luego CREATE NEW VI como podemos ver en la figura Anexo I 5 y acto seguido se nos abrirá el panel de trabajo como se observa en el figura Anexo I 7 donde será donde creamos nuestro trabajo.

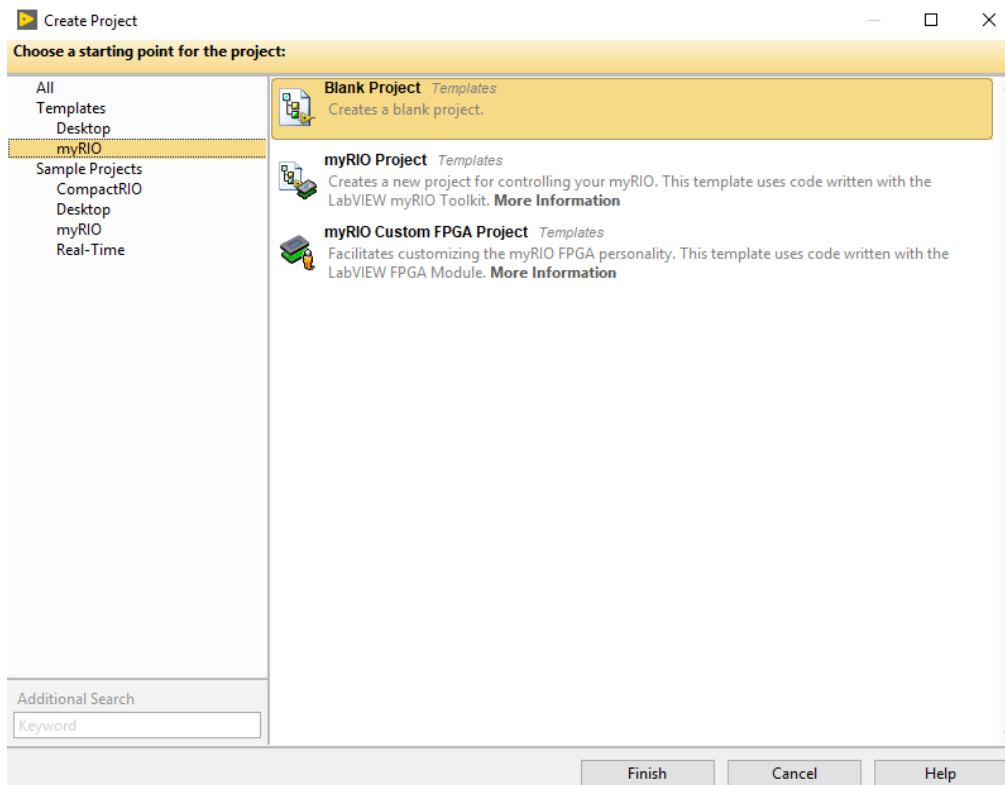
Si ahora quisiéramos cambiar a la configuración WIFI volveríamos a la pantalla de estructura del proyecto para luego, hacer clic con el botón derecho del ratón sobre la tarjeta de myRIO y seleccionamos propiedades como vemos en la figura Anexo I 8.

Se nos abrirá una pestaña como en la figura Anexo I 8 en la cual cambiando las direcciones IP de nuestra tarjeta como se ve en el recuadro rojo lo tendríamos listo, como consejo para saber las direcciones IP de nuestro proyecto podemos verlas en la pantalla de configuración de la tarjeta.

Otra manera de cambiar a configuración WIFI o USB es abrir otro proyecto y copiar todo en este, pero tenemos que tener en cuenta los subVI creados porque podríamos tener problemas.



Anexo I 1 Pantalla de inicio del labVIEW



Anexo I 2 Selección de tipo de proyecto

Create Project

Configure the new project: myRIO Project

Project Name
Untitled Project 1

Project Root
C:\Users\abnegpe\Documents\LabVIEW Data\Untitled Project 1

File Name Prefix (Optional)

Target

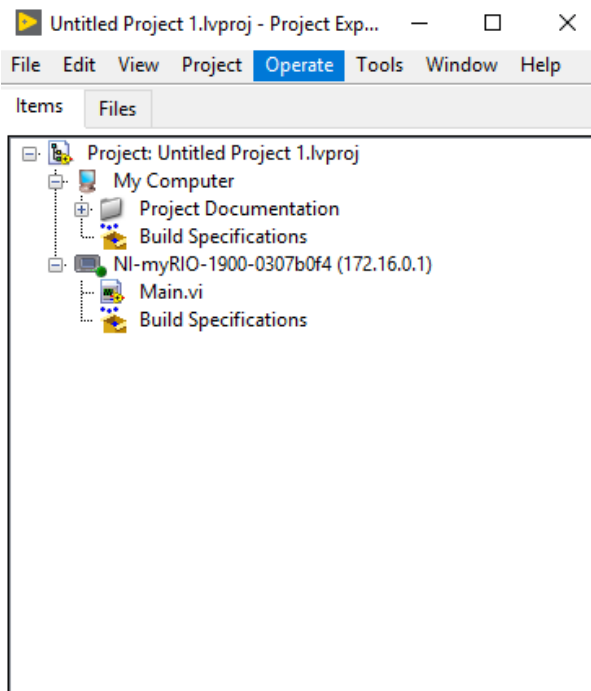
Plugged into USB
 Connected over WiFi
 Generic Target
 Specific IP Address or Hostname

FPGA Personality
Select a Target ...

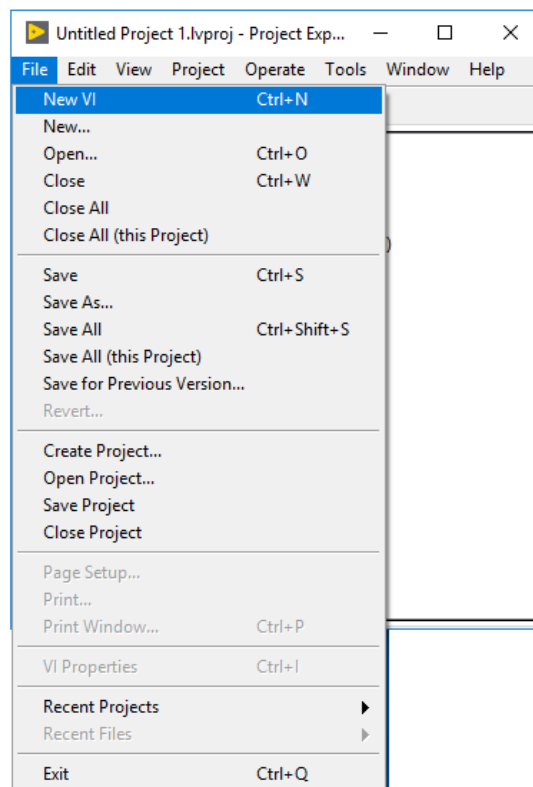
Please correct the following issues:
No myRIO devices found.

Back Finish Cancel Help

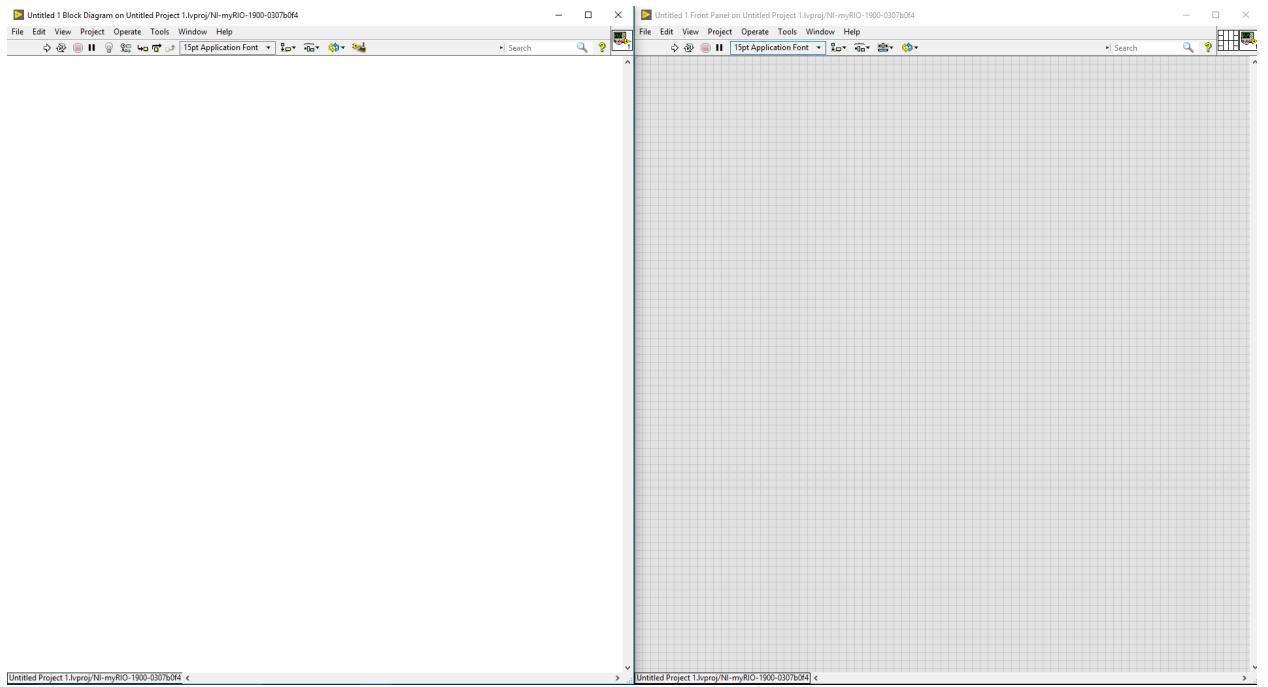
Anexo I 3 Configuración del proyecto



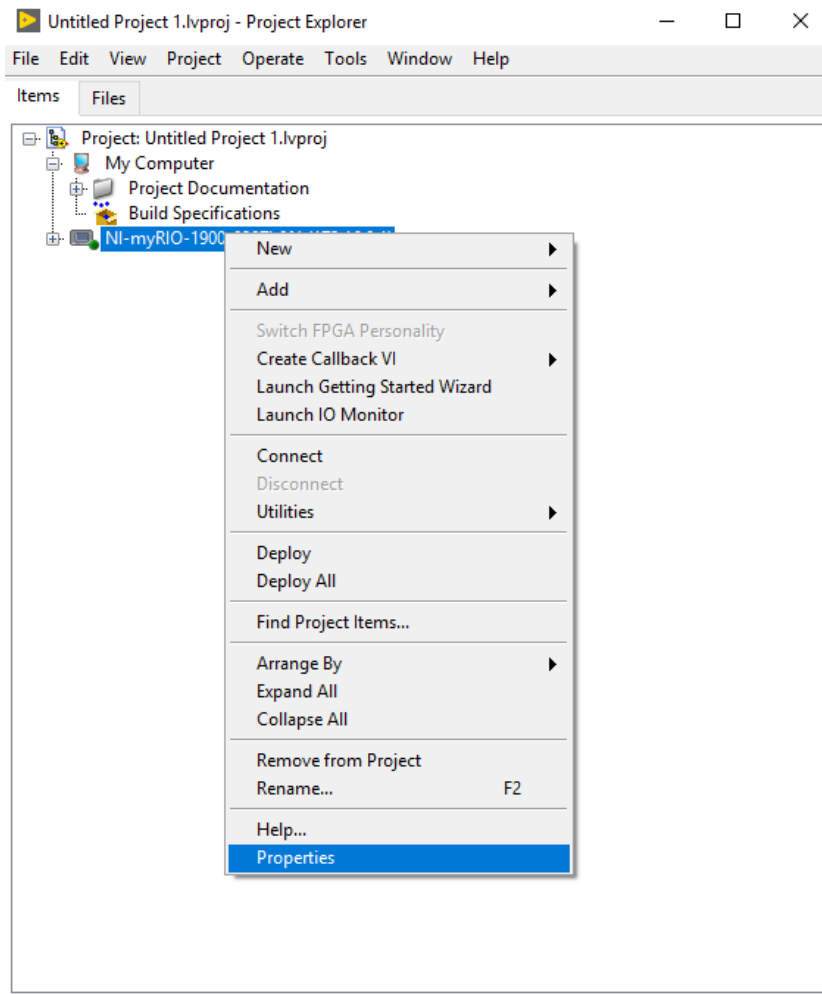
Anexo I 4 Visualización del proyecto creado



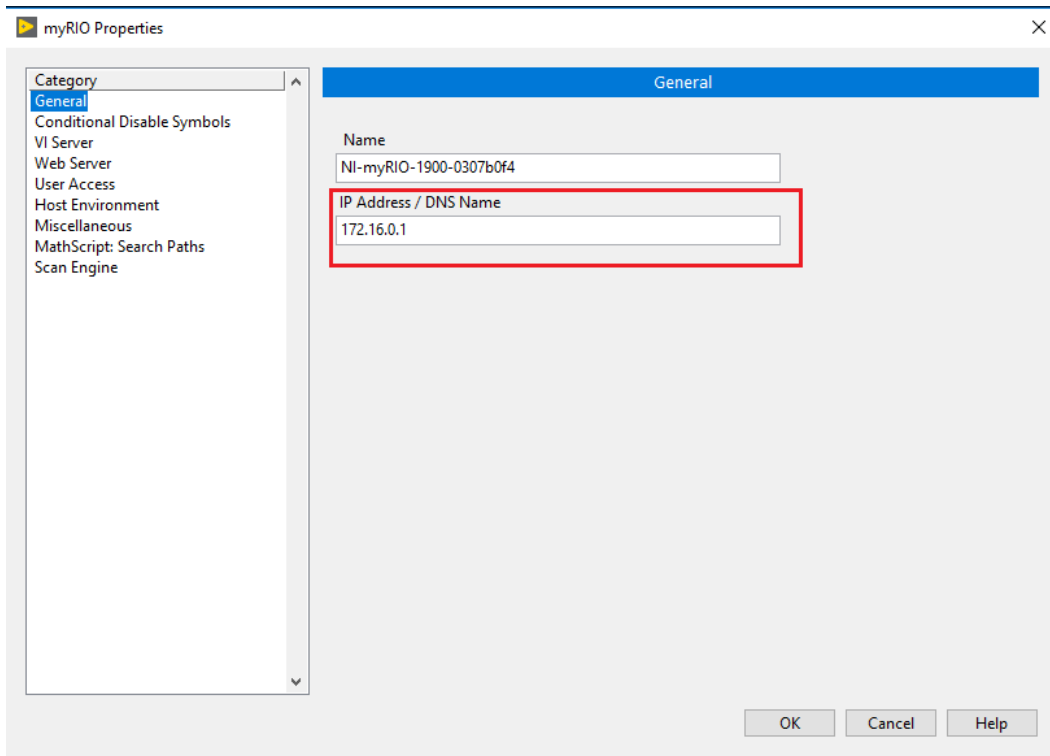
Anexo I 5 Creación de un nuevo VI



Anexo I 6 Panel de trabajo labVIEW



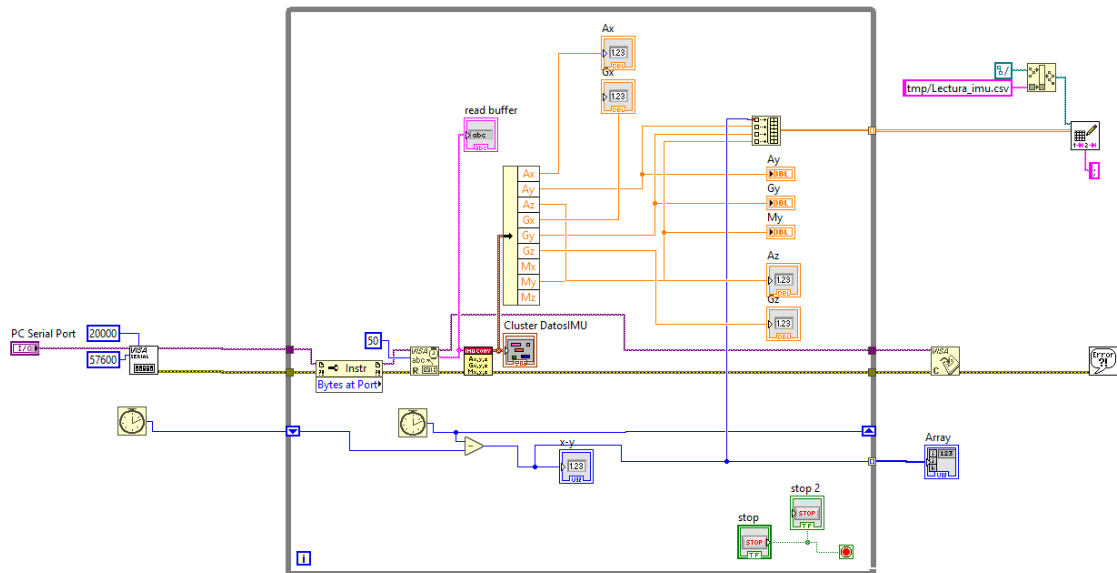
Anexo I 7 Selección para cambio de tipo USB o WIFI



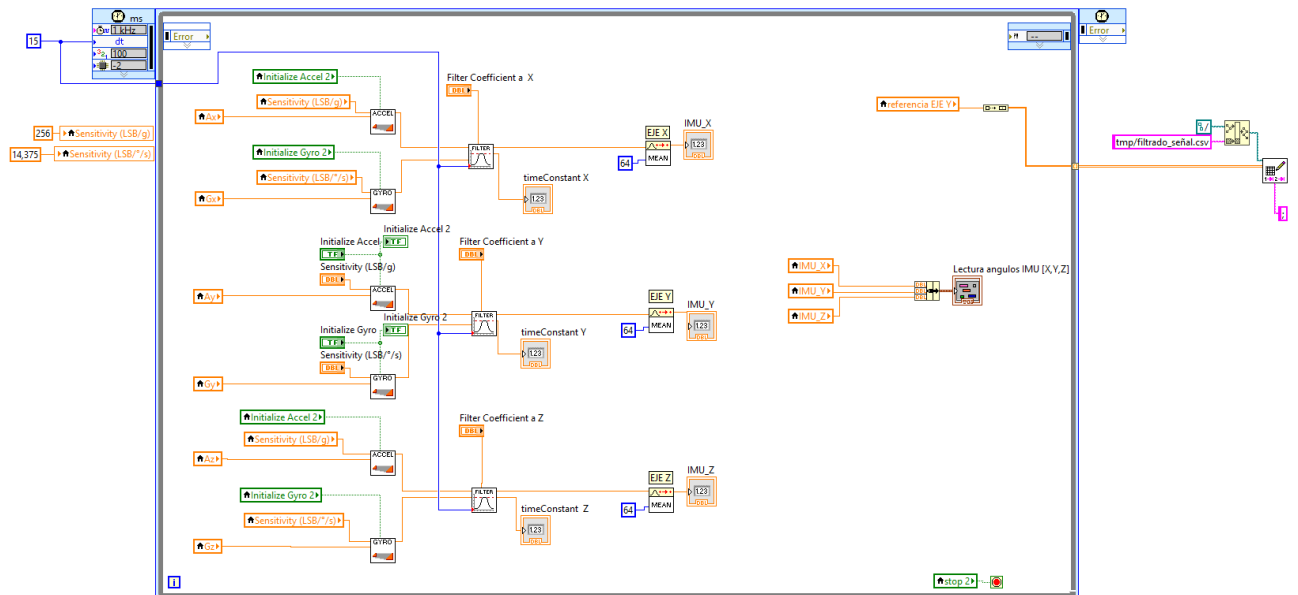
Anexo I 8 Pantalla propiedades

Anexo II

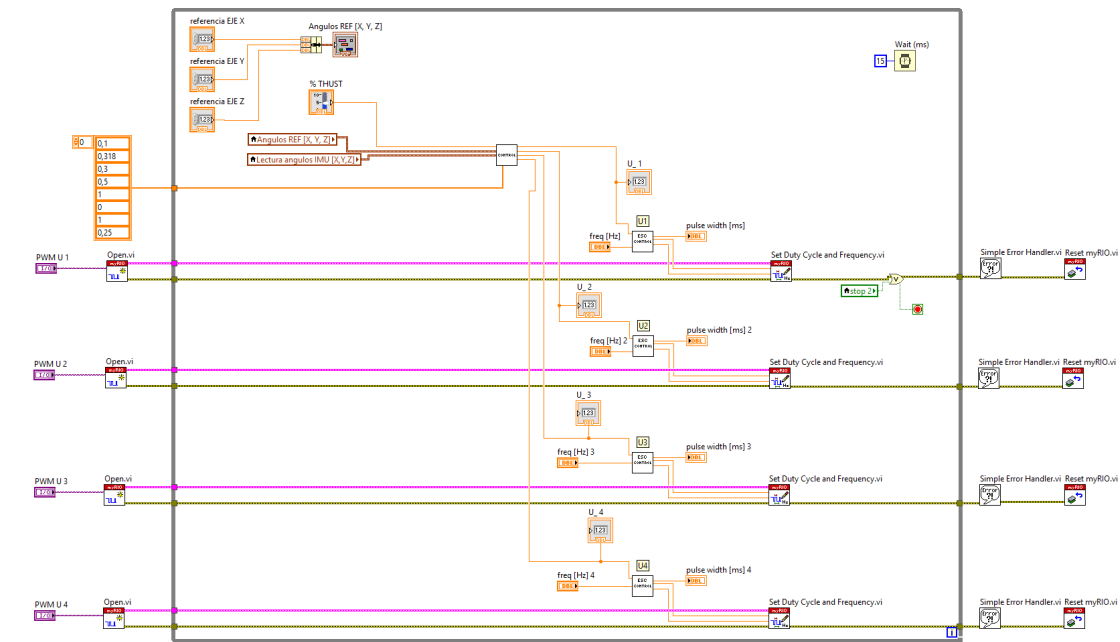
En este anexo añadiremos las imágenes de los VI creados para este proyecto.



Anexo II 1 lectura del IMU Dron



Anexo II 2 Procesado de señal del IMU Dron



Anexo II 3 Control del los motores del drone

Parametros del filtro Complementario de lectura del IMU
 Filter Coefficient funciona cuanto más se acerca a 0 usara datos del Acelerómetro y cuanto más al 1 más caso hara al giroscopio

Los datos de sensitivity se obtienen del datasheet del IMU en cuestión

Sensitivity (LSB/g) 256 Initialize

Sensitivity (LSB/°/s) 14,375 Initialize

Filter Coefficient a X 0,747388 timeConstant X 0

Filter Coefficient a Y 0,747388 timeConstant Y 0

Filter Coefficient a Z 0,747388 timeConstant Z 0

Ángulos medidos por el IMU en cada eje

IMU_X	IMU_Y	IMU_Z
0,00	0,00	0,00

PARAMETROS QUE LE LLEGAN A ESC U1

freq [Hz] 50

pulse width [ms] 1,5

U2

freq [Hz] 2 50

pulse width [ms] 2 1,5

U3

freq [Hz] 3 50

pulse width [ms] 3 1,5

U4

freq [Hz] 4 50

pulse width [ms] 4 1,5

ANGULOS DE REFERENCIA

referencia EJE X	U_1	U_2
0	0	0
referencia EJE Y	U_4	U_3
0	0	0
referencia EJE Z	0	0

CANALES DE REGULACION PWM PARA CADA MOTOR

PWM U 1	PWM U 2
% A/PWM1	% B/PWM2
PWM U 4	PWM U 3
% B/PWM1	% A/PWM2

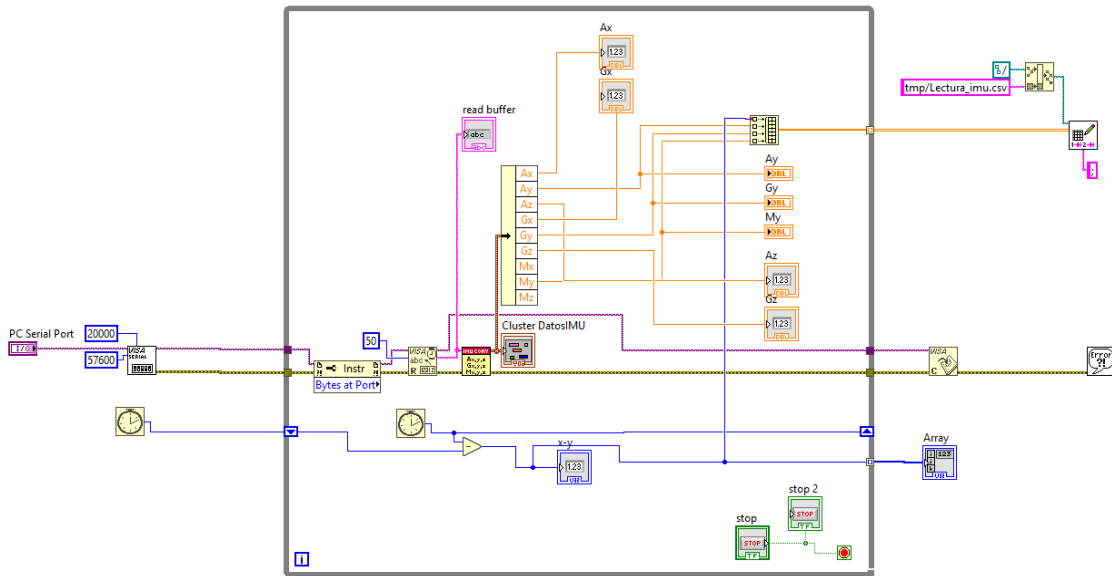
% DE FUERZA QUE SE APLICA A TODOS LOS MOTORES POR IGUAL

% THUST 0

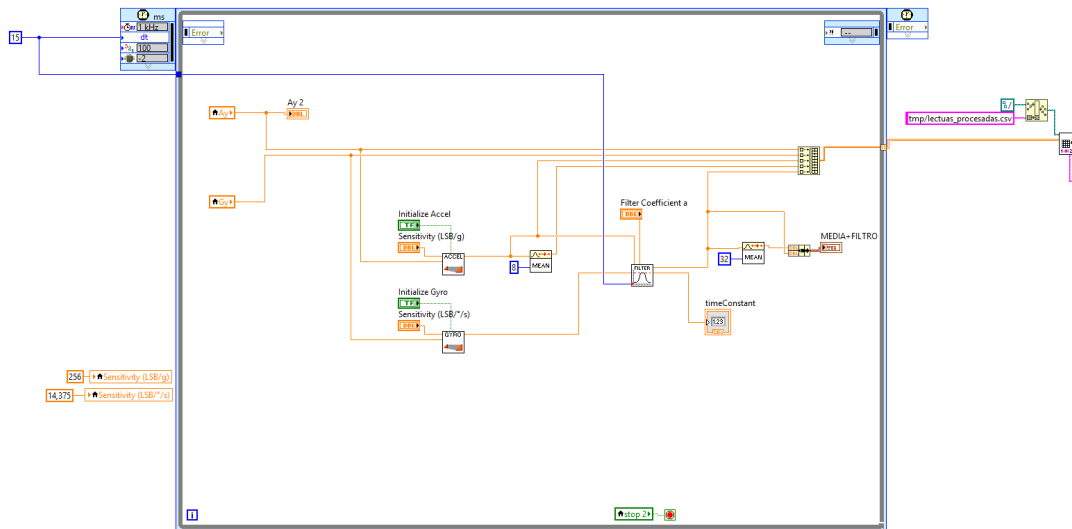
Initialize

stop STOP

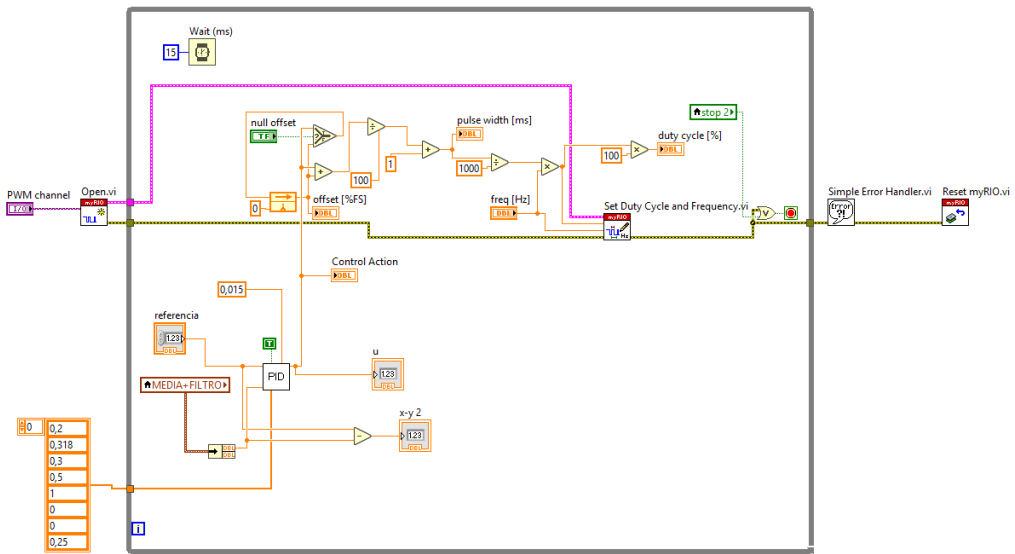
Anexo II 4 Panel frontal para el control del dron



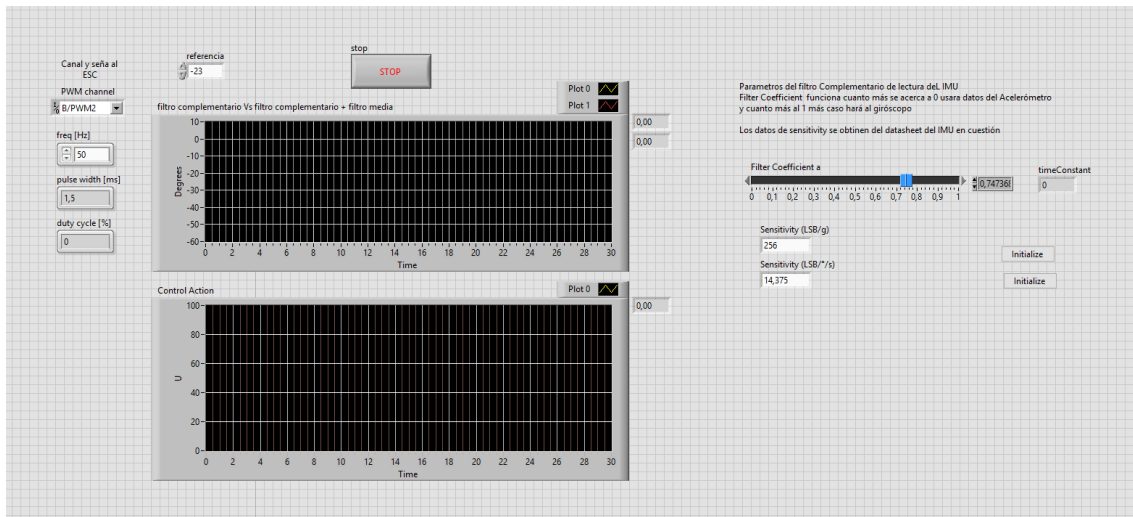
Anexo II 5 lectura IMU Brazo balancín



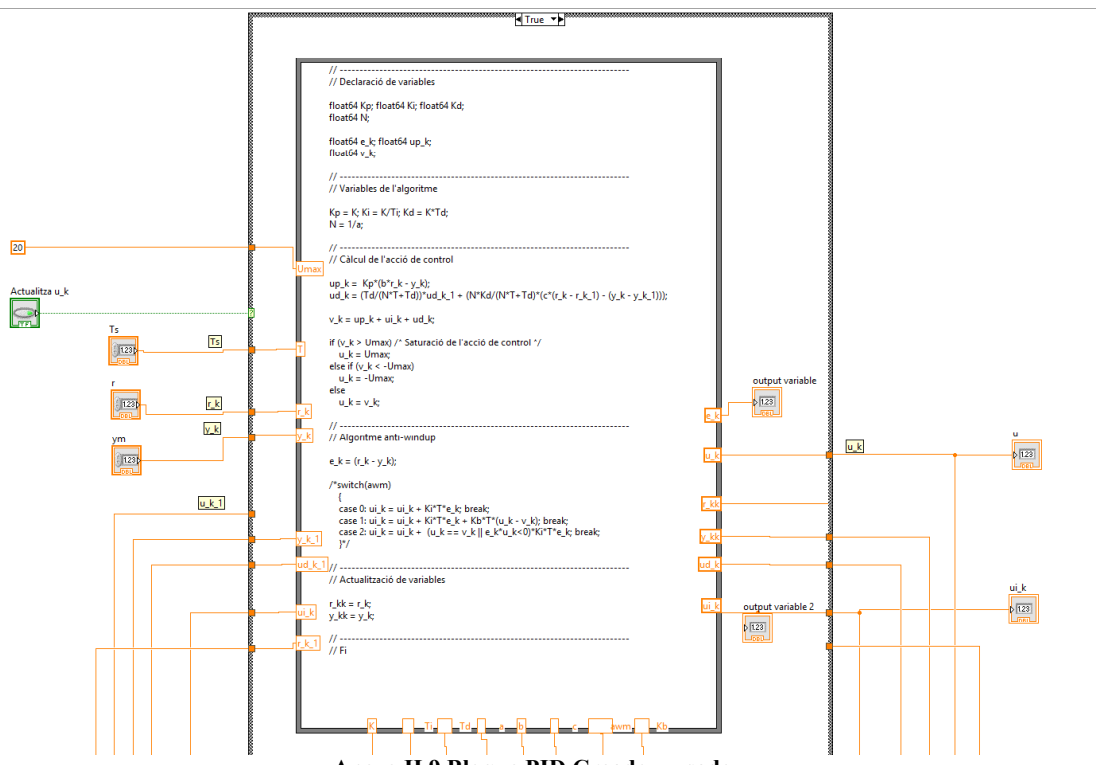
Anexo II 6 Procesado de señal del IMU en el brazo balancín



Anexo II 7 control del brazo



Anexo II 8 Panel frontal para el control del brazo balancín



Anexo II 9 Bloque PID Creado y usado

Agradecimientos

Agradecer primero a mi familia que sin ellos y su apoyo económico no podría haber estudiado y sobre todo a su apoyo moral, a mis amistades, un especial agradecimiento a la universidad por facilitarme el material y el laboratorio para realizarlo, a D. Adolfo Hilario Caballero en espacial por su paciencia, ayuda y determinación en este proyecto que aparte de mentor y tutor de este a sido un gran apoyo en los problemas encontrados y a lograr superarlos en medida de lo posible, a D. Jaime Masiá Vañó por facilitarme el laboratorio de robótica, así como datos de los otros compañeros.

BIBLIOGRAFÍA

Alexis, K., Nikolakopoulos, G., and Tzes, A. (2011). Switching model predictive attitude control for a quadrotor helicopter subject to atmospheric disturbances. *Control Engineering Practice*, 19(10):1195 – 1207.

Billingsley, T. B. (2006). *Safety analysis of TCAS on Global Hawk using airspace encounter models*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Bouabdallah, S. (2007). *Design and control of quadrotors with application to autonomous flying*. PhD thesis.

Brito, M. (2009). Quadrotor prototype. Master's thesis, Universidad Técnica de Lisboa.

Carpio, M. (2013). Evaluación de desempeño de los controladores digitales PID y predictivo tolerante a fallas, aplicados al control de nivel de líquidos en un tanque. Master's thesis.

Castillo, P., García, P., Lozano, R., and Albertos, P. (2007). Modelado y estabilización de un helicóptero con cuatro rotores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 4(1):41 – 57.

Chappelle, W., McDonald, K., and McMillan, K. (2011). Important and critical psychological attributes of USAF MQ-1 Predator and MQ-9 Reaper Pilots according to subject matter experts. Technical report, DTIC Document.

Chee, K. Y. and Zhong, Z. W. (2013). Control, navigation and collision avoidance for an unmanned aerial vehicle. *Sensors and Actuators A: Physical*, 190:66 – 76.

Cutler, M. J. (2012). *Design and control of an autonomous variable-pitch quadrotor helicopter*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Dalamagkidis, K., Valavanis, K. P., and Piegl, L. A. (2012). *On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system: Issues, challenges, operational restrictions, certification, and recommendations*, volume 54. Springer.

Doherty, P. and Rudol, P. (2007). A UAV search and rescue scenario with human body detection and geolocalization. In *AI 2007: Advances in Artificial Intelligence*, pages 1 – 13. Springer.

Feng, W. and Postlethwaite, I. (1994). Robust non-linear H_∞ /adaptive control of robot manipulator motion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 208(4):221 – 230.

Glickhouse, R. (2013). Explainer: Drones in latin america. Obtenido de <http://www.ascoa.org/articles/explainer-drones-latin-america>. Consultado el 16 Apr, 2014.

Goldstein, H., Poole, C., and Safko, J. (2002). *Classical Mechanics*, volume 3. Addison Wesley.

Gu, S.-s., Liu, J.-y., Zeng, Q.-h., and Lv, P. (2014). A Kalman filter algorithm based on exact modeling for FOG GPS/SINS integration. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*.

Hoffmann, G. M., Waslander, S. L., and Tomlin, C. J. (2006). Distributed cooperative search using information-theoretic costs for particle filters, with quadrotor applications. In *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, pages 21 – 24.

Kerma, M., Mokhtari, A., Abdelaziz, B., and Orlov, Y. (2012). Nonlinear H_∞ control of a Quadrotor (UAV), using high order sliding mode disturbance estimator. *International Journal of Control*, 85(12):1876 – 1885.

Kharsansky, A. (2013). Diseño e implementación de un sistema embebido de control de actitud para aeronaves no tripuladas. Technical report, Universidad de Buenos Aires.

LaFleur, K., Cassady, K., Doud, A., Shades, K., Rogin, E., and He, B. (2013). Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain-computer interface. *Journal of neural engineering*, 10(4):046003.

Lee, B.-Y., Hong, S.-M., Yoo, D.-W., Lee, H.-I., Moon, G.-H., and Tahk, M.-J. (2015). Design of a Neural Network Controller for a Slung-Load System Lifted by 1 Quad-Rotor. *Journal of Automation and Control Engineering Vol*, 3(1).

Li, T., Zhang, Y., and Gordon, B. W. (2013). Passive and active nonlinear fault-tolerant control of a quadrotor unmanned aerial vehicle based on the sliding mode control technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 227(1):12 – 23.

Liu, H., Bai, Y., Lu, G., Shi, Z., and Zhong, Y. (2013a). Robust tracking control of a quadrotor helicopter. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, pages 1 – 14.

Liu, H., Bai, Y., Lu, G., and Zhong, Y. (2013b). Robust attitude control of a quadrotor helicopter with unknown parameters. In *Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese*, pages 2633 – 2637. IEEE.

McMichael, J. M. and Francis, M. S. (1997). Micro air vehicles-toward a new dimension in flight. *DARPA document*.

Mellinger, D., Shomin, M., and Kumar, V. (2010). Control of quadrotors for robust perching and landing. In *Proceedings of the International Powered Lift Conference*.

Mirot, A. (2012). The future of unmanned aircraft systems pilot qualification. *The Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*, 22(3).

Mullhaupt, P. (1999). *Analysis and control of underactuated mechanical nonminimum-phase systems*. PhD thesis, EPFL.

Newcome, L. R. (2004). *Unmanned aviation: A brief history of unmanned aerial vehicles*. Aiaa.

Ortega, M. G., Vargas, M., Vivas, C., and Rubio, F. R. (2005). Robustness improvement of a nonlinear H_∞ controller for robot manipulators via saturation functions. *Journal of Robotic Systems*, 22(8):421 – 437.

Raffo, G. V. (2007). Modelado y control de un helicóptero quad-rotor. Master's thesis, Universidad de Sevilla, Dept. Ing. Sistemas y Automática, Sevilla, España.

Raffo, G. V., Ortega, M. G., and Rubio, F. R. (2008). Backstepping/nonlinear H_∞ control for path tracking of a quadrotor unmanned aerial vehicle. In *American Control Conference, 2008*, pages 3356 – 3361. IEEE.

Raffo, G. V., Ortega, M. G., and Rubio, F. R. (2010). An integral predictive/nonlinear H_∞ control structure for a quadrotor helicopter. *Automatica*, 46(1):29 – 39.

Rango, A., Laliberte, A., Steele, C., Herrick, J. E., Bestelmeyer, B., Schmutz, T., Roanhorse, A., and Jenkins, V. (2006). Using unmanned aerial vehicles for rangelands: Current applications and future potentials. *Environmental Practice*, 8(03):159 – 168.

Rudin, K., Hua, M.-D., Ducard, G., and Bouabdallah, S. (2011). A robust attitude controller and its application to quadrotor helicopters. In *18Th IFAC World Congress*, pages 10379 – 10384.

Ruiz, H. V. (2011). Sistema de control y navegación para MAV.

Toth, J. and Gilpin-Jackson, A. (2010). Smart view for a smart grid- Unmanned Aerial Vehicles for transmission lines. In *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2010 1st International Conference on*, pages 1 – 6. IEEE.

Tsai, M.-K., Lee, Y.-C., Lu, C.-H., Chen, M.-H., Chou, T.-Y., and Yau, N.-J. (2012). Integrating geographical information and augmented reality techniques for mobile escape guidelines on nuclear accident sites. *Journal of environmental radioactivity*, 109:36 – 44.

Turpin, M., Michael, N., and Kumar, V. (2012). Trajectory design and control for aggressive formation flight with quadrotors. *Autonomous Robots*, 33(1 - 2):143 – 156.

Valavanis, K. P. (2007). *Advances in unmanned aerial vehicles: State of the art and the road to autonomy*, volume 33. Springer.

van der Schaft, A. (1992). L 2-gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state-feedback H_∞ control. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 37(6):770 – 784.

van der Schaft, A. (1999). *L2-gain and passivity in nonlinear control*. Springer-Verlag New York, Inc.

Wang, W., Ma, H., Xia, M., Weng, L., and Ye, X. (2013). Attitude and altitude controller design for quad-rotor type MAVs. *Mathematical Problems in Engineering*.

Zaloga, S. J. (2008). *Unmanned aerial vehicles: robotic air warfare 1917-2007*, volume 144. Osprey Publishing.

Marlin, E. M. (2000) *Process Control Designing Processes And Control Systems For Dynamic Performance*. USA: Thomas Casson

Easa, Europe (2017). Flying a drone do's and don'ts – Easa Europe. [online] easa.europa.eu. Available at: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/213888_EASA_DRONE_POSTER___v5.pdf [Accessed 14 April 2018].

EASA. (2018). *Civil drones (Unmanned aircraft) | EASA*. [online] Available at: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas> [Accessed 15 Apr. 2018].

Dronewatch. (2018). *Zo komen de Europese droneregels er in grote lijnen uit te zien*. [online] Available at: <https://www.dronewatch.nl/2017/05/08/zo-komen-de-europese-droneregels-er-in-grote-lijnen-uit-te-zien/> [Accessed 15 Apr. 2018].

En.wikipedia.org. (2018). *PID controller*. [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller [Accessed 8 May 2018].

Anon, (2018). [online] Available at: <https://www.electronics-tutorials.ws/systems/open-loop-system.html> [Accessed 13 May 2018].

Ni.com. (2018). [online] Available at: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf> [Accessed 24 May 2018].

Thrust Stand and Dynamometer. (2018). *Series 1520 - Thrust Stand and Dynamometer | RCbenchmark*. [online] Available at: <https://www.rcbenchmark.com/dynamometer-series-1520/#features> [Accessed 31 May 2018].

Brown, L. (2018). *Types of Drones*. [online] Wondershare. Available at: <https://filmora.wondershare.com/drones/types-of-drones.html> [Accessed 31 May 2018].