CAPÍTULO VI – Conclusiones y recomendaciones

# Conclusiones

1. La metodología de desarrollo de software de espiral es adecuada para la realización de proyectos de robótica como el desarrollado en el presente trabajo de investigación, ya que permite el perfeccionamiento de los componentes individuales del mismo a partir del desarrollo de una serie de prototipos incrementales desarrollados. Esto promueve un proceso de desarrollo, análisis de resultados e introducción de mejoras constante, asegura una mayor calidad de los componentes finales y simplifica el proceso de integración de la plataforma final.
2. La tarjeta Arduino Nano 3.0 utilizada en el presente trabajo, y basada en el microcontrolador ATMEGA328, ha presentado un rendimiento satisfactorio, una alta confiabilidad, y ha permitido reducir el tiempo de implementación y pruebas del proyecto en gran medida, pero, las características técnicas de la misma, extremadamente simples, han obstaculizado el desarrollo de los sistemas de control de altura del cuadricóptero, y la implementación de algoritmos de estimación y comunicación de mayor complejidad.
3. En el desarrollo de circuitos de potencia es recomendable realizar un análisis incremental, partiendo de la respuesta de la mínima combinación de componentes bajo las condiciones de trabajo esperadas, y aumentando la complejidad conforme se realizan pruebas y se recogen datos de funcionamiento. Esto permite identificar las características de funcionamiento particulares de cada componente, y, de los circuitos diseñados, y es vital para alcanzar las condiciones óptimas de funcionamiento de los mismos.
4. Las vibraciones mecánicas producidas por la rotación de las aspas y el accionamiento de los motores a alta velocidad pueden llegar a perturbar de forma significativa, e incluso, inutilizar, las estimaciones de estado realizadas mediante giroscopios y acelerómetros ubicados en el cuadricóptero. La construcción de una estructura física que limite la transmisión de vibraciones, y en menor medida, la colocación física de los sensores en el chasis e implementación de algoritmos de filtrado de las señales de los mismos, son aspectos críticos para el éxito de cualquier proyecto que involucre estimación de estado de un cuadricóptero mediante Unidades de Medición Inercial.
5. Las hélices flexibles del chasis Draganflyer V, a pesar de poseer una alta durabilidad y representar un menor peligro para el usuario final, reducen en gran medida la eficiencia energética del cuadricóptero y la carga máxima que este puede levantar.
6. Se comprueba, en simulación, la hipótesis presentada en [Nadales 2009]acerca de la posibilidad de estabilizar un cuadricóptero en vuelo mediante la aplicación de un algoritmo Proporcional-Integral-Derivativo. Más aún, se verifica que a partir de una estimación de estado basada en mediciones de giroscopios, acelerómetros y sensores de distancia, y mediante la aplicación de una arquitectura de control basada en algoritmos PID, es posible realizar un control satisfactorio de la orientación angular y altura de un cuadricóptero en vuelo.
7. La hipótesis presentada en [Nadales 2009] se verifica parcialmente con base en los resultados de pruebas reales de vuelo con las arquitecturas de control del cuadricóptero desarrolladas. Por la magnitud de las vibraciones físicas del cuadricóptero, las cuales introducen incertidumbre a la estimación de estado del mismo, no se puede asegurar seguimiento preciso de consignas con las arquitecturas de control PID desarrolladas.
8. La velocidad de transmisión, la verificación de errores, y la coordinación de la comunicación entre la unidad de control del cuadricóptero y cualquier otra unidad o estación de control, son variables críticas para una correcta ejecución de los sistemas de control, el correcto envío y ejecución de comandos, y una retroalimentación efectiva del estado del cuadricóptero mediante telemetría.

# Recomendaciones

1. Para implementar exitosamente los sistemas de control de posición angular y altura en el cuadricóptero partiendo de la estimación de estado obtenida a partir de sensores inerciales, se recomienda utilizar un chasis para cuadricópteros que limite la generación y transmisión de vibraciones mecánicas.
2. Se recomienda partir de la interfaz de comunicación serial desarrollada para realizar la retroalimentación entre el Módulo de Lógica, Sensores y Comunicación desarrollado, y cualquier otra unidad que ejecute un algoritmo de control de mayor nivel, como pueden ser, algoritmos de control de posición o trayectoria.
3. Para solucionar el problema de contención de recursos del segundo temporizador del Arduino Nano producido por la librería NewPing y la asignación de los puertos de PWM del circuito de lógica, sensores y comunicación, se recomienda modificar el circuito desarrollado para utilizar únicamente los puertos 5, 6, 9 y 10 del Arduino Nano para emitir señales de PWM, de modo que sólo sean utilizados los temporizadores timer0 y timer1 del mismo, y el temporizador timer2 quede libre para su utilización por parte de la librería NewPing.
4. En caso de perseguirse el desarrollo sistemas de control para realizar vuelo acrobático o maniobras agresivas, se recomienda mejorar el algoritmo de estimación de ángulos mediante un filtro complementario validando la dirección del vector de aceleración gravitacional al realizar la estimación de ángulo a partir de los datos del acelerómetro, o utilizando cuaterniones en lugar de ángulos de Euler.
5. Para una estimación más robusta del ángulo de Yaw se recomienda la utilización de un magnetómetro en conjunción con un giroscopio. Se sugiere consultar la investigación presentada en [Madgwick 2010].
6. Para disminuir el tiempo de respuesta e incrementar la robustez y precisión de los sistemas de control se recomienda implementar control de velocidad individual de los motores del cuadricóptero.
7. Para la realización de pruebas de algoritmos de estimación de estado, control y comunicación se recomienda limitar el movimiento del cuadricóptero en uno, dos, o tres ejes, ya que ello permite realizar un estudio exhaustivo del rendimiento de los mismos bajo condiciones controladas, e identificar posibles problemas de funcionamiento e integración con mayor rapidez y precisión.
8. La estrategia desarrollada para el cálculo de velocidad lineal en el eje Z del cuadricóptero está constantemente sujeta a errores de estimación por obtenerse a partir de integración numérica, y por la alta sensibilidad del acelerómetro a las vibraciones mecánicas. Se recomienda mejorar la precisión de la misma complementando la estimación mediante el acelerómetro con la estimación a partir de otro sensor infrarrojo de distancia o de odometría visual, y realizando la fusión de ambas estimaciones con un filtro de Kalman extendido.
9. Para la realización de investigación avanzada con cuadricópteros se recomienda fervientemente utilizar tecnología de punta, como pueden ser: los motores sin escobillas, Electronic Speed Controllers, y unidades de control como el Ardupilot Mega, Pixhawk y Asctec Mastermind, entre otros. Esto, porque los mismos están basados en estándares del área, y permiten reducir el tiempo de desarrollo, al homogeneizar la arquitectura de los cuadricópteros sobre los cuales se realizará la investigación.