

Diseño, construcción y control de un cuadricóptero— parte 1: hardware y construcción física

MICHELL P EHRLICH, LUIS F LUPIÁN

Resumen—Se presenta el proceso completo de diseño y construcción física para un cuadricóptero pequeño con un diámetro de 275 mm con fines académicos y de investigación dentro del Laboratorio de Robótica Móvil y Sistemas Automatizados de Universidad La Salle. El trabajo presentado hace énfasis en el diseño y construcción de la estructura del marco, así como de la base amortiguadora que aísla a los sensores del ruido producido por los motores. Se presentan pruebas experimentales del resultado obtenido con esta base amortiguadora. Se detallan además los criterios de selección de cada una de las partes de la nave. En su estado actual, el cuadricóptero es capaz de volar y autoestabilizarse de manera satisfactoria.

I. INTRODUCCIÓN

Un cuadricóptero es una herramienta de investigación y desarrollo versátil y divertida que presenta oportunidades de investigación que van más allá de conseguir que levante vuelo y se auto-estabilice, si no que puede ser utilizada para probar y desarrollar otras tecnologías como algoritmos de navegación por reconocimiento de patrones, implementar distintos tipos de sensores para que la aeronave pueda reaccionar a cambios en su ambiente, entre otros. Los objetivos fundamentales de este proyecto son desarrollar (a) el hardware y construcción física del cuadricóptero, y (b) el software y sistema de control de vuelo. Debido a que se buscaba sobre todo aprender cómo desarrollar un cuadricóptero se puso como meta adicional el utilizar el mínimo posible de partes prefabricadas.

El primer antecedente sobre la construcción de un cuadirotor data de 1907, apenas cuatro años después del primer vuelo exitoso de los hermanos Wright, cuando los hermanos Bréguet de nacionalidad francesa diseñaron, construyeron y realizaron las primeras pruebas de una máquina a la que denominaron *Giroplano No. 1*. De acuerdo a datos presentados por Leishman [1], la nave pesaba 578 kg (incluido el piloto), las cuatro hélices de la nave tenían un diámetro de aproximadamente 8.1 m y eran accionadas por un solo motor de combustión interna por medio de un sistema de poleas. El único medio de control disponible para el piloto era el acelerador del motor, por lo que la nave era inherentemente inestable. Sin embargo, los reportes dicen [1] que durante las pruebas el *Giroplano No. 1* alcanzó una altura de vuelo máxima de 1.5 m durante un periodo breve.

Uno de los primeros registros que se tienen de un vuelo exitoso con un cuadirotor es el de M. Oehmichen (también

MICHELL P EHRLICH pertenece a la carrera INGENIERÍA MECATRÓNICA de la FACULTAD DE INGENIERÍA y realizó el proyecto dentro del LABORATORIO DE ROBÓTICA MÓVIL Y SISTEMAS AUTOMATIZADOS (Email: michell_pro@hotmail.com).

El proyecto fue asesorado por el M. en C. LUIS F. LUPIÁN.



Figura 1: Tercera iteración de construcción del cuadricóptero

francés) quien con su *Oehmichen No. 2* logró realizar vuelo vertical y horizontal realizando un recorrido circular a una altura de entre 3 y 5 m [2].

En la última década, los cuadricópteros o cuadirotos han alcanzado gran popularidad tanto por parte del público en general como de la comunidad científica. Actualmente, los cuadirotos se usan en algunas instituciones como caso de estudio en cursos introductorios de la ingeniería con enfoque multidisciplinario [3]. Desde el punto de vista científico, hay varios problemas interesantes que se pueden investigar como el diseño y control [4], [5], [6], [7] y la estimación de pose en tiempo real [8], [9].

Una vez que se tiene diseñado y construido un cuadricóptero estable y maniobrable se pueden desarrollar muchas aplicaciones con él. Destacan en el medio científico los logros de Raffaello D’Andrea quien usando técnicas novedosas de control [10] ha realizado impresionantes acrobacias dinámicas con conjuntos de cuadricópteros como jugar badminton, balancear, lanzar y capturar una varilla, e incluso la construcción de formas arquitectónicas complejas, todo esto de manera autónoma [11].

La Fig. 1 muestra el cuadricóptero desarrollado dentro del presente proyecto en su estado actual. La aeronave ya es capaz de volar y auto-estabilizarse de manera satisfactoria como se puede ver en el video anexo [12]. El presente proyecto se divide en dos partes: “hardware y construcción física” y

“software, estimación y control”. En la Sección II se presenta una descripción del problema a resolver en este trabajo, la Sección III describe el proceso de selección de motores, hélices y baterías, la Sección IV presenta los criterios utilizados para seleccionar la computadora para control de vuelo donde se programarán todos los algoritmos de estimación y control, en la Sección V se explica cómo se seleccionó el sistema de transmisor/receptor por medio del cual el piloto puede comandar acciones deseadas al cuadricóptero, la Sección VI explica porqué y cómo se cambió el firmware de los circuitos controladores de motores, en la Sección VII se describen las varias iteraciones de diseño y construcción del marco de la nave, la cual resultó ser una de las partes más complicadas e importantes de este trabajo. En la Sección VIII se describe el problema del ruido de vibraciones de los motores que afecta principalmente a las mediciones del acelerómetro, se explica cómo se resolvió este problema y se da prueba experimental de la solución, en la Sección IX se explica brevemente la necesidad de iluminación en la nave. Finalmente, en la Sección X se presentan las conclusiones del trabajo y se bosquejan las posibilidades de trabajo futuro en relación a este proyecto.

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El primer paso para construir un cuadricóptero es decidir el tamaño y el peso aproximado que se desea, dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar, ya sea una nave ágil y potente para vuelo acrobático o algo más estable y fuerte para llevar cargas pesadas o hacer fotografía aérea. Una vez teniendo claro el objetivo, se puede decidir el tamaño que se desea y el peso que debe cargar y en base a esto se eligen motores, controladores de motor, hélices y materiales para el marco apropiados.

El objetivo al diseñar esta aeronave es hacer algo pequeño y estable, capaz de volar bajo techo. Para este tipo de vuelo es propio un marco pequeño, que pueda maniobrar más holgadamente en espacios cerrados y con hélices ligeras que no causen mucho daño a ningún objeto o persona (en el caso de una colisión, aunque se haga con todas las medidas de seguridad posibles) o a sí mismas. También se buscó que pudiera cargar una pequeña cámara y un transmisor de video, lo cual se puede hacer muy ligero como lo describe Liang [13]. En la versión actual del cuadricóptero aún no está implementado el sistema transmisor de video. Sin embargo, esta consideración fue importante para el diseño y construcción del cuadricóptero.

Después de leer sobre las experiencias de otras personas con cuadricópteros y ver las soluciones existentes en el mercado se decidió construir el cuadricóptero con un tamaño de aproximadamente 300 mm, medido de motor a motor en diagonal.

III. MOTORES, HÉLICES Y BATERÍAS

Los motores apropiados para el tamaño de cuadricóptero elegido, de acuerdo a diversas fuentes, son motores sin escobillas Turnigy 1811, que producen 165 g de empuje con una hélice de 6” de punta a punta y con 3” de inclinación, como lo especifica el fabricante. Un consenso que existe entre las personas que se dedican a construir este tipo de aeronaves en foros y comunidades en línea es que un cuadricóptero

para tener un buen rango de maniobrabilidad debe pesar aproximadamente la mitad del empuje máximo combinado que sus cuatro motores pueden producir. Es decir, si cada uno de los motores produce 165 g de empuje a máxima potencia, cuatro de estos producen 660 g de empuje. El objetivo de peso máximo para el cuadricóptero resultó ser entonces de 330 g.

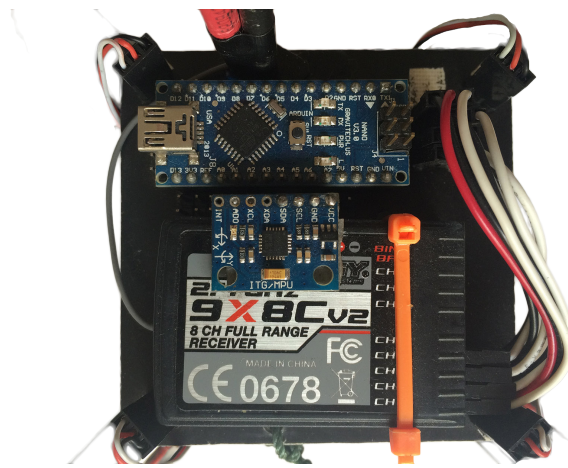
Para accionar un motor sin escobillas como éstos se necesita un controlador de velocidad electrónico o ESC, por sus siglas en inglés (Electronic Speed Controller). Este controlador tiene que ser adecuado para el gasto de corriente del motor que controla. El fabricante del motor especifica que éste puede gastar hasta 5 A máximo, por lo que un controlador apropiado es cualquiera que sea superior a este gasto pero para satisfacer las restricciones de peso se eligió el más pequeño posible. Este resultó ser un Turnigy Plush 6A, que es capaz de manejar hasta 6 A continuamente y que además tiene un circuito eliminador para la batería, dando una salida de voltaje estable de 5 V y hasta 0.8 A, lo cual resulta ser muy útil para alimentar el controlador, el receptor y cualquier otro dispositivo que requiera este nivel de voltaje.

También es necesario usar una batería acorde a esto, ya que un voltaje más alto del especificado puede dañar el motor por sobrecalentamiento. La especificación de este motor indica que se debe usar una batería de litio de dos celdas, que dan 7.4 V (o de Níquel-Metal equivalente). Una consideración importante en la selección de batería es que debe tener la mayor capacidad posible y el menor peso para conseguir tiempos de vuelo más largos. Se eligieron dos baterías de distintas capacidades y pesos para probar cuál era la más adecuada una vez terminado de construir el cuadricóptero. Una de 2000 mAh y 98 g de peso, y otra de 1300 mAh y 67 g de peso.

IV. COMPUTADORA CONTROLADORA DE VUELO

Uno de los objetivos fundamentales de este trabajo es desarrollar el sistema de control para el vuelo del cuadricóptero, por lo que se buscó no usar ninguna de las alternativas que se ofrecen en el mercado que ya incluyen sensores integrados, y todos los pines de salida y entrada que uno pudiera necesitar. Aunque esas soluciones son baratas y muy eficaces, buscamos aprender a controlar el vuelo de manera estable por lo que se optó en desarrollar el controlador a partir de componentes individuales.

El controlador de vuelo debe ser capaz de tomar mediciones de la orientación del cuadricóptero, procesarlas y darle instrucciones a los motores de qué deben hacer al respecto. Con un poco de investigación se llegó a la conclusión de que la forma más fácil y accesible (en precio y existencia) para programar un controlador de vuelo propio es usar el popular microcontrolador de propósito general Arduino. Más específicamente, la Arduino que se acoplaba al propósito del proyecto (algo que requiere poco peso y reducido tamaño) es la Arduino Nano, con dimensiones de 0.73”×1.7”, un peso de 6 g y abundantes pines de entrada y salida digital y analógica. Aunque existen versiones más compactas y ligeras de la Arduino como la Arduino Pro Mini, el hecho de que la Arduino Nano ya es bastante ligera y tiene interfaz USB, a diferencia de esas otras versiones de Arduino, es justificación suficiente para preferir la



(a) Arduino nano, IMU y receptor



(b) Transmisor de RF

Figura 2: Computadora, receptor y transmisor

Arduino Nano. Este microcontrolador, junto con la unidad de medición inercial (IMU) de 6 grados de libertad, constituyen el controlador de vuelo, capaz de tomar mediciones de la orientación de la aeronave relativa a la gravedad de la Tierra y hacer correcciones a ésta cambiando el empuje relativo de los motores para conseguir el comportamiento deseado. La unidad de medición inercial que se seleccionó para el proyecto es el MPU6050 [14].

Para montarlo todo en una sola unidad se diseñó un PCB, el cual fue manufacturado en los talleres de ingeniería de la Universidad La Salle. En éste se montan la Arduino y el IMU por medio de pines (ver Fig. 2(a)), pudiendo ser cambiados en cualquier momento en caso de ser necesario.

V. TRANSMISOR Y RECEPTOR

El cuadricóptero tiene que seguir instrucciones, ya sea de un algoritmo preprogramado o de un operario humano a través de control remoto. Para esto es necesario un sistema que transmita las instrucciones y otro que las reciba y se las comunique al controlador de vuelo. La forma más factible por el rango que se debe manejar es la comunicación por radiofrecuencias. Existen otras tecnologías que se podrían implementar, pero no son prácticas ya que, por ejemplo, la transmisión de datos por Bluetooth está limitada a más o menos 10 m y la comunicación por infrarrojo está aún más limitada en rango y es muy susceptible a interferencias y pérdida de señal.

Se requiere un sistema de transmisor y receptor capaz de comunicarse a una distancia aproximada de 100 m y que tenga un precio accesible. Se encontró un sistema de transmisor y receptor que dan un buen funcionamiento por su precio: el transmisor Turnigy 9X de 9 canales a 2.4GHz y el receptor Turnigy 2.4GHz 8CH, mostrados en la Fig. 2(a) y 2(b). Este sistema tiene un rango de entre 100 m y 1000 m dependiendo de las condiciones. Además, el receptor es muy ligero pesando sólo 18 g.

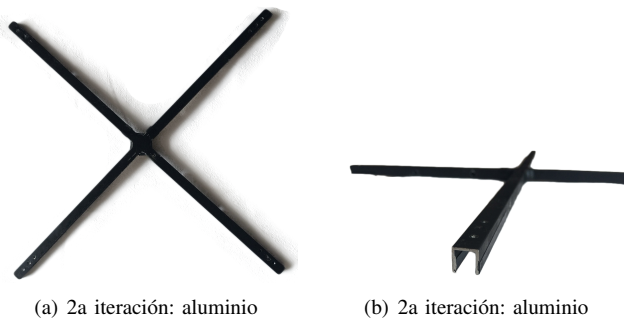
VI. FIRMWARE PARA CONTROLADORES DE MOTORES

Los motores se controlan normalmente por una señal PWM estándar de servo. En esta señal hay un pulso alto de entre 1 ms y 2 ms, siendo el primero la mínima señal y el segundo la máxima, seguido de 18 ms–19 ms, lo necesario para completar 20 ms y después este proceso se repite, dando así actualizaciones a 50 Hz. El controlador de motor está programado para aviones o helicópteros, no para multicopteros. Para esto tiene características específicas de control como, por ejemplo, que la programación de fábrica toma un promedio de las últimas medidas y esa es la velocidad a la que giran los motores. Esto no es conveniente para un cuadricóptero, ya que la estabilidad depende de que se puedan hacer correcciones rápidas a cada uno de los motores para mantener la nave en el aire de manera estable. Para librarnos de estas y otras limitaciones como la velocidad de actualización de 50 Hz, el controlador se reprogramó con un firmware escrito por Skaug [15] específicamente para controlar multicopteros, el cual permite velocidades de actualización de hasta 499 Hz y no toma ningún promedio. Para esto se soldaron diminutos cables a unas terminales del procesador manufacturado por SiLabs del controlador de motor y se flasheó utilizando una Arduino como herramienta reprogramadora. Esto incrementó la estabilidad considerablemente, ya que el cuadricóptero responde más rápido a los cambios comandados por el controlador de vuelo.

VII. ESTRUCTURA DEL MARCO

Una de las partes más importantes para el vuelo estable de un cuadricóptero es el marco, que debe ser ligero y rígido para que tenga características de vuelo óptimas, pero al mismo tiempo resistente para que no se rompa en aterrizajes duros o en caso de colisiones.

En el transcurso del desarrollo de este proyecto se descubrió que el marco es una de las partes más difíciles de hacer



(a) 2a iteración: aluminio

(b) 2a iteración: aluminio

Figura 3: Segunda iteración del diseño del marco

bien. Tiene que ser muy resistente y rígido para que no se rompa ni se tuerza, pero al mismo tiempo debe ser ligero y de perfil delgado para que no interfiera con el aire de las hélices ni sea muy pesado. Se ha pasado ya por varias iteraciones en el diseño del marco del cuadricóptero, intentando distintos diseños, materiales y métodos con los que se ha experimentado con distintos grados de éxito hasta ahora.

La primera iteración se hizo con perfil en U de aluminio de $3/8''$. Este parecía muy rígido y ligero. Se unió en forma de cruz con ángulos y remaches en el centro y luego se le hicieron perforaciones en los extremos donde se atornillaron los motores. Se dobló con lámina una rejilla para la batería y unas patas para aterrizar y ambas se remacharon a la cruz principal. Aunque el marco aparentemente estaba construido sólidamente, al momento de realizar las primeras pruebas de vuelo había inestabilidades y turbulencias no periódicas que no fue posible corregir con software. Después de analizar el marco se notó que un brazo estaba angulado hacia arriba, lo que hizo sospechar que ese desbalance podría estar causando el comportamiento extraño. Esta sospecha se confirmó cuando después de un aterrizaje forzoso, el brazo contrario se dobló de igual manera, lo que hizo que el vuelo se hiciera mucho más estable, ya que la aeronave ahora era simétrica. Con base en el resultado de estos primeros experimentos se determinó la necesidad de un marco con más rigidez.

La segunda iteración se fabricó con el mismo perfil en U de $3/8''$ de aluminio (Fig. 3(a) y 3(b)), pero esta vez se soldó en vez de remacharse. Este marco tuvo un vuelo mucho más estable y predecible, las inestabilidades que tenía inicialmente eran de carácter periódico por lo que se puede rastrear su origen muy fácilmente al software y fueron corregidas oportunamente. Después de varios vuelos y aterrizajes forzosos (ya que aunque sea estable se necesita habilidad y práctica para pilotarlo) comenzó a tener un comportamiento extraño de nuevo. Al inspeccionarlo fue evidente que el perfil de aluminio soldado, aunque muy resistente a doblarse, se torcía muy fácilmente lo que hacía que los motores estuvieran desalineados. Por lo tanto, se necesitaba otro tipo o forma de material para que fuera resistente tanto a los dobleces como a la torsión.

La tercera iteración estuvo hecha con perfil cuadrado de aluminio. Desafortunadamente no se encontró existencia de este perfil en $3/8''$ con ningún proveedor local, por lo que se tuvo que usar perfil de $1/2''$ el cual es el doble de peso

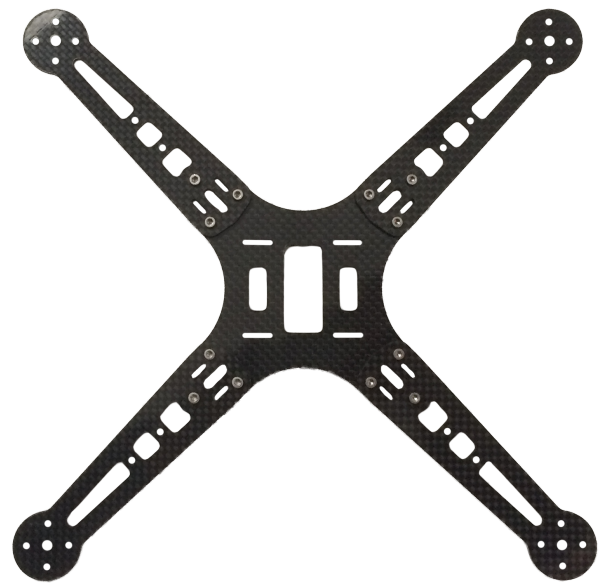


Figura 4: Cuarta iteración del diseño del marco



Figura 5: Perforaciones a lo largo de las caras del perfil cuadrado

por la misma longitud. Las uniones en este marco se hicieron soldadas también. Al volar ya no había ningún movimiento en los motores que inclinara su plano de empuje por lo que las características de vuelo mejoraron mucho (ver Fig. 1). El único inconveniente es que este perfil, al pesar el doble que el anterior, hizo que se redujera el tiempo de vuelo y la maniobrabilidad. Para compensar el peso adicional del perfil cuadrado se hicieron perforaciones con la fresadora en cada cara el perfil para reducir el peso. Estas perforaciones se realizaron defasándolas en las caras perpendiculares para retener la resistencia estructural, como se muestra en la Fig. 5. Todas las pruebas de vuelo y control presentadas en la segunda parte del proyecto (“software, estimación y control”) fueron desarrolladas usando esta tercera iteración del marco.

Para mejorar aún más el desempeño del marco estructural del cuadricóptero se usó polímero reforzado con fibra de carbono para desarrollar una cuarta iteración. En términos generales, este material es mucho mejor que el aluminio ya que es más ligero y más resistente. En la Fig. 4 se muestra una fotografía de este marco. Sin embargo, durante las pruebas se determinó que la tercera iteración del marco fabricado en aluminio daba un mucho mejor desempeño, por lo que se decidió continuar usando este marco.

VIII. REDUCCIÓN DE VIBRACIONES

Los sensores microelectromecánicos como es el IMU, por su naturaleza son muy susceptibles a ruido inducido por vibraciones. Si hay demasiadas puede confundir al controlador de vuelo con medidas falsas, teniendo así características de vuelo erráticas. Es por eso que es de vital importancia reducir el efecto de las vibraciones que inevitablemente generan los motores y las hélices.

La primera acción que se tomó para reducir vibraciones fue balancear las hélices. Se maquinó en el torno una pequeña barra de aluminio perfectamente derecha que embona en el agujero central de la hélice, después se colocó este eje sobre dos barras paralelas balanceadas y manualmente se hizo girar la hélice a varios ángulos. En este experimento, la hélice siempre se cargaba hacia un lado, indicando que este lado era el que pesaba más. Se colocó un pequeño pedazo de cinta de aislar en el lado ligero y se repitió el proceso hasta que la hélice se pudiera girar en cualquier dirección y quedarse en el sitio que se detenía. Esto ayudó a reducir las vibraciones inicialmente.

Desafortunadamente aún había vibraciones, por lo que se tomaron más medidas para evitarlas. Se diseñó e imprimió en 3D una base para aislar el controlador de vuelo del cuerpo principal de la nave, la cual está inspirada en el trabajo presentado en [16]. Esta base tiene cuatro monturas de goma que aíslan el controlador de vuelo de la masa principal, consiguiendo que éste tuviera muy pocas vibraciones al tacto. Para añadir otro nivel de aislamiento, entre esta base y el PCB del controlador de vuelo se colocó un gel absorbente de vibraciones (ver Fig. 6), Moongel, manufacturado por RTOM. El efecto amortiguador de la base diseñada se puede apreciar en la Fig. 7 en donde se muestra el ruido captado por el eje Z del acelerómetro cuando los motores están en operación, con y sin amortiguadores. Cabe hacer notar que estas dos señales se captaron en momentos distintos usando el mismo acelerómetro. En el primer caso, el acelerómetro estaba montado sobre la base en su lugar habitual, y en el segundo caso se colocó directamente sobre uno de los brazos del marco del cuadricóptero. Resulta claro que la diferencia entre la potencia del ruido en uno y otro caso es enorme. La relación de amplitud entre la señales (calculada como la relación entre las desviaciones estándar de las señales) es 11.3:1, lo que implica que la reducción de potencia en el ruido gracias a la base amortiguadora es 127.6:1 o 21 dB.

IX. ILUMINACIÓN

Cuando el cuadricóptero comienza a alejarse, se vuelve difícil ver cuál es el frente y cuál es atrás, lo cual complica mucho su pilotaje. Para ayudar al piloto a orientarse con respecto a la aeronave, se instalaron luces LED en los cuatro brazos, dos verdes en los dos brazos que corresponden al frente y dos azules atrás. Esto implica que el vuelo del robot es en configuración de \times , es decir que dos rotores van al frente y dos van en la parte trasera, tal como se ilustra en la Fig. 8.

X. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En su estado actual, el cuadricóptero ya es capaz de volar y auto-estabilizarse de manera muy satisfactoria. Aún con la

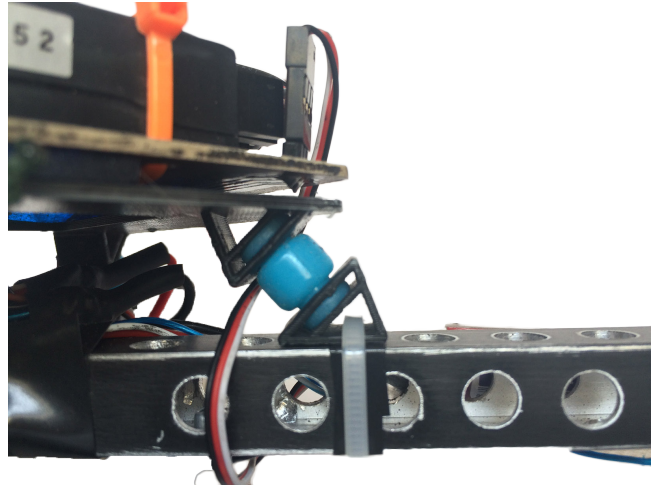


Figura 6: Base aislante con gel absorbente de vibraciones y perforaciones sobre el marco de aluminio

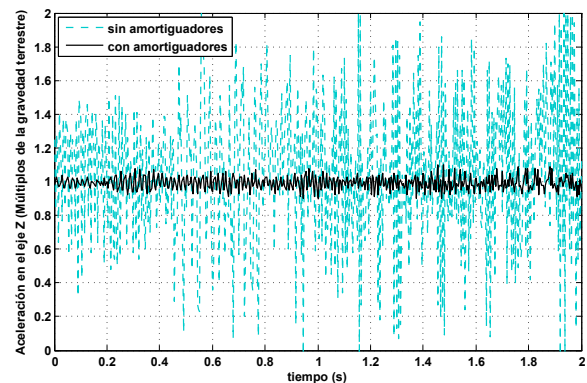


Figura 7: Señal de acelerómetro con y sin amortiguamiento

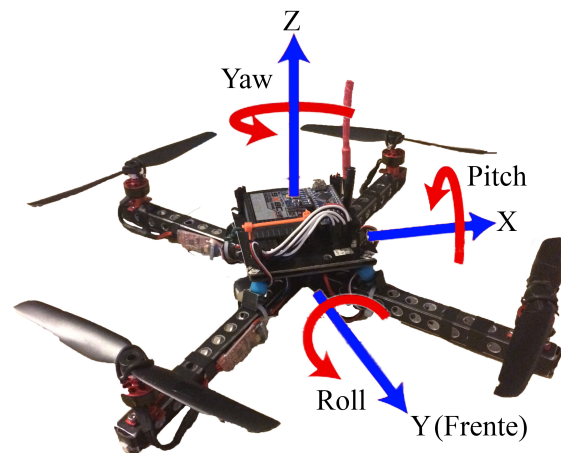


Figura 8: Ejes de rotación y marco de referencia local

batería más pesada de 98 g se logró satisfacer el objetivo de peso máximo fijado en 330 g. El tiempo de vuelo usando esta batería alcanza a ser ligeramente superior a 10 minutos.

Se llegó a la conclusión de que un marco bien diseñado y el uso de los materiales adecuados es vital para el buen funcionamiento de un cuadricóptero. Si el material no es rígido y no está unido propiamente los motores se desalinean, ya sea porque el brazo se doble o se tuerza y esto arruina la estabilidad. Si es demasiado pesado se hace poco maniobrable y deja poca potencia para cargar cualquier desarrollo que se le agregue después. También es muy importante aislar vibraciones, ya que el IMU es muy sensible a éstas y sin una estimación adecuada del ángulo no es posible conseguir un vuelo estable.

En un futuro, se implementarán otros sensores como pueden ser barómetro o ultrasónico para desarrollar un control de altura automático y una cámara con un transmisor de video, para poder volar el cuadricóptero con perspectiva de primera persona y tomar fotografías aéreas.

REFERENCIAS

- [1] J. G. Leishman, "The Breguet-Richet Quad-Rotor Helicopter of 1907," Publicación electrónica: <http://bit.ly/1vye3dB> Consultada 2015/02/16.
- [2] F. Archive, "A Successful French Helicopter," Publicación electrónica: <http://bit.ly/1Jlllrn> Consultada 2015/02/16.
- [3] I. Gaponov and A. Razinkova, "Quadcopter design and implementation as a multidisciplinary engineering course," in *Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*, 2012 IEEE International Conference on, Aug 2012, pp. H2B-16-H2B-19.
- [4] S. Bouabdallah, P. Murrieri, and R. Siegwart, "Design and control of an indoor micro quadrotor," in *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, vol. 5, April 2004, pp. 4393-4398 Vol.5.
- [5] R. Mahony, V. Kumar, and P. Corke, "Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor," *Robotics Automation Magazine, IEEE*, vol. 19, no. 3, pp. 20-32, Sept 2012.
- [6] A. Tayebi and S. McGilvray, "Attitude stabilization of a four-rotor aerial robot," in *Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on*, vol. 2, Dec 2004, pp. 1216-1221 Vol.2.
- [7] H. Voos, "Nonlinear control of a quadrotor micro-uav using feedback-linearization," in *Mechatronics, 2009. ICM 2009. IEEE International Conference on*, April 2009, pp. 1-6.
- [8] M. Earl and R. D'Andrea, "Real-time attitude estimation techniques applied to a four rotor helicopter," in *Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on*, vol. 4, Dec 2004, pp. 3956-3961 Vol.4.
- [9] J. Hall, N. Knoebel, and T. McLain, "Quaternion attitude estimation for miniature air vehicles using a multiplicative extended kalman filter," in *Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION*, May 2008, pp. 1230-1237.
- [10] O. Purwin and R. D'Andrea, "Performing aggressive maneuvers using iterative learning control," in *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, May 2009, pp. 1731-1736.
- [11] S. Lupashin, M. Hehn, M. W. Mueller, A. P. Schoellig, M. Sherback, and R. D'Andrea, "A platform for aerial robotics research and demonstration: The flying machine arena," *Mechatronics*, 2014.
- [12] M. P. Ehrlich and L. F. Lupián, "Prueba de vuelo de cuadricóptero," Publicación electrónica: <http://youtu.be/A0CQ2GqSkhw> Consultada 2014/12/05.
- [13] O. Liang, "Cheap and Simple Quadcopter FPV Ideas," Publicación electrónica: <http://blog.oscarliang.net/cheap-simple-quadcopter-fpv-ideas/> Consultada 2014/12/01.
- [14] *MPU-6000/MPU-6050 Product Specification*, 3.4 ed., InvenSense, Inc., USA, Aug. 2013.
- [15] S. Skaug, "BLHeli for brushless ESC firmware," Publicación electrónica: <https://github.com/bitdump/BLHeli> Consultada 2014/12/01.
- [16] 3DRobotics, "Vibration Damping and Isolation of the Flight Control Boards," Publicación electrónica: <http://copter.ardupilot.com/wiki/vibration-damping/> Consultada 2014/12/01.