

# Diseño y desarrollo de un vehículo volador de cuatro hélices no tripulado de bajo costo

Hernández Barrón Lorena Anaid, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Velázquez García Guillermina, Sotomayor Olmedo Artemio, Delgado Rosas Manuel

Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro

## Resumen

*Se presenta en este trabajo el diseño y construcción de un cuadricóptero de arquitectura abierta, con un amplio rango de operación de 90m en interiores y hasta 1,500m en exteriores, con un costo menor a \$500.00 USD. El cuadricóptero construido tiene la ventaja de ser un sistema totalmente escalable, que brinda la posibilidad de mejoras, reducción de costos y ampliación de características del dispositivo entero. Este vehículo fue diseñado y construido en base a plataformas de hardware y software de libre distribución u open source como lo son: Arduino, Android, Eclipse, y Processing. La aeronave multirotor construida es capaz de realizar despegues, aterrizajes y cambios en su trayectoria de vuelo, además utiliza los datos de aceleración y velocidad angular adquiridos desde una unidad de medición inercial, en un básico algoritmo de estabilización de vuelo. A través del uso de una de las dos aplicaciones desarrolladas para este trabajo, el piloto es capaz de teleoperar el sistema de manera sencilla e intuitiva, desde una computadora de escritorio, laptop o tablet. Con la construcción de este dispositivo de bajo costo, se eliminó la necesidad de recurrir a tecnologías extranjeras y la aplicación de ingeniería inversa sobre productos comerciales similares, y se ponen a disposición de la comunidad (científica) mexicana las bases de conocimiento necesarias para, a partir de estas, poder reproducir total o parcialmente el proyecto entero, así como la capacidad de realizar mejoras al mismo, debido a la escalabilidad que ofrecen el total de los componentes que integran al prototipo.*

**Palabras clave:** Android, Arduino, Cuadricoptero, Dron, Eclipse, Open Source, Processing, teleoperación, UAV, XBee.

## 1. Introducción

En la actualidad la aviación se divide en dos ramas principales: los vehículos aéreos tripulados (aviones) y los vehículos aéreos no tripulados (UAV), éste último término podría describir un amplio rango de dispositivos capaces de operar en el espacio aéreo que van desde cometas, globos o dirigibles hasta aviones radio controlados, sin olvidar los misiles o aeronaves autónomas [1]. Este tipo de aeronaves poseen grandes ventajas frente a los vehículos tripulados, estos no ponen en riesgo vidas humanas lo cual contribuye a que sus límites vayan más allá de las capacidades y resistencia humanas, es por ello que no están sujetos en su diseño a satisfacer necesidades de ergonomía.

Al no haber la necesidad de una cabina que proteja al piloto, el peso y tamaño del dispositivo son menores brindándole un acceso a sitios inalcanzables para vehículos tripulados. Esta característica también reduce el consumo de la aeronave, teniendo un menor impacto ambiental, producen menos contaminación por gases, ruido y consumo energético, lo cual impacta directamente en un menor costo de mantenimiento.

Otra de las ventajas que estas aeronaves poseen es la capacidad de realizar despegues horizontales (con o sin asistencia, Figura 1) y verticales.



**Figura 1. Despegue horizontal asistido.**

Los UAVs no sólo son de uso militar, también se pueden encontrar –pero en menor cantidad– para aplicaciones civiles alrededor del mundo. Generalmente de menor tamaño, se elaboran con el propósito de cubrir y satisfacer necesidades en su mayoría urbanas y de entretenimiento. En México en 2006 Hydra Technologies de México [3], se convirtió en la primera compañía establecida en el país para el desarrollo, diseño y manufactura de UAVs, logrando reconocimiento internacional por la creación del S4 Ehécatl (Figura 2) cuyo propósito esencial es vigilar y monitorear terrenos peligrosos y fronteras mexicanas.



**Figura 2. UAV Mexicano: S4 Ehécatl**

## **2. Cuadricópteros**

Un Cuadricóptero es un UAV de ala giratoria de cuatro rotores o hélices dispuestas en una configuración en cruz; su plataforma es similar a la de un helicóptero en su movilidad, pero más simple tanto en su construcción como en su operación, como lo son el aterrizaje y despegue verticales, que a su vez hacen posible que el dispositivo permanezca suspendido sobre un punto fijo. La primera construcción documentada de un Cuadricóptero data de 1920 y fue desarrollado por el francés Etienne Oemichen y el Ruso George DeBothezat. En su primer intento el vehículo no pudo levantar el vuelo; para solucionarlo Oemichen añadió al diseño globos con helio que brindaban de potencia de elevación y estabilidad al vehículo. Después de varios rediseños y cálculos, Oemichen fue capaz de volar con un diseño que superó los records de estabilidad y control de la época, con 14 minutos de vuelo para el año de 1923 [5]. A continuación en la Figura 3 se presenta una de las pocas imágenes existentes del dispositivo.

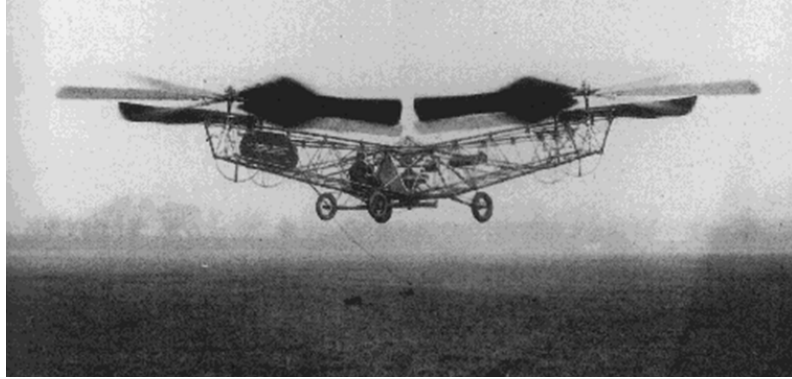


Figura 3. Cuadricóptero de Oemiohem 1923.

### 2.1 Teoría y conceptos del diseño

Para los cuadricópteros no hay una restricción en cuanto al tamaño y funcionalidad, ya que su diseño corresponde a la función que éste debe realizar. Un cuadricóptero –como su nombre lo indica– está conformado por cuatro rotores, cada uno con una hélice, estas pueden tener dos, tres o cuatro aspas. Es importante mencionar que cada uno de los motores produce empuje y torque. Existen dos configuraciones básicas sobre las cuales puede ser diseñado un cuadricóptero; la primera y más sencilla es la llamada configuración Plus como la Figura 4-a) muestra, en esta configuración cada uno de los cuatro motores se encuentra ubicado a los extremos de los ejes o brazos perpendiculares entre sí. Por otra parte, en la configuración X, como se aprecia en la Figura 4-b) el modelo se gira aproximadamente  $45^\circ$ . Más allá de la configuración, es importante que el sentido de giro de dos de los motores sea en el sentido de las agujas del reloj (clockwise o cw) mientras que los otros dos lo hacen en contra (counter clockwise), lo que genera un empuje que levanta el cuadricóptero en el aire evitando cualquier momento angular neto. Este tipo de dispositivos tienen varias ventajas sobre los UAVs de alas fijas [4]; son capaces de descender y aterrizar de manera vertical, pudiendo suspenderse sobre un punto fijo. Los helicópteros son una de las máquinas voladoras más complejas debido a la versatilidad y maniobrabilidad para desempeñar un gran número de tareas; usualmente están equipados con un rotor principal y un rotor secundario o de cola. A diferencia de éstos un cuadricóptero, como su nombre lo indica, tiene cuatro rotores. Es por eso que a pesar de tratarse también de un vehículo de ala giratoria su dinámica de vuelo es distinta.

Los cuatro motores son equidistantes tanto uno del otro como del centro mismo de la estructura, lo cual lo convierte en un vehículo simétrico, en el que cada uno de los motores produce empuje y torque, es por ello que para asegurar que el vehículo se eleve y pueda desplazarse en el aire es necesario que el sentido de giro de los motores y el tipo de hélice a utilizar en cada motor correspondan a una de las configuraciones ilustradas en la Figura 4. Finalmente, esta simetría permite un mejor control, desplazamiento y estabilidad en el vehículo. La aeronave, al tratarse de un cuerpo sólido tridimensional, puede representarse matemáticamente como una fuerza con tres momentos como se aprecia en la X.

Bajo este esquema las coordenadas X, Y y Z representan la posición del centro de masa de la aeronave en relación a su estructura, mientras que  $\theta$ ,  $\phi$  y  $\psi$  representan los ángulos de Euler: *Roll* o  $\theta$ , determina la rotación de cuadricóptero alrededor del eje Y. El *Pitch* o  $\phi$  determina la rotación alrededor del eje X y por último el *Yaw* o  $\psi$  alrededor del eje Z, que representan la orientación del cuadricóptero [2]. En este trabajo se contemplan los dos primeros, por tratarse de los movimientos básicos para el proceso de estabilización de vuelo de la aeronave.

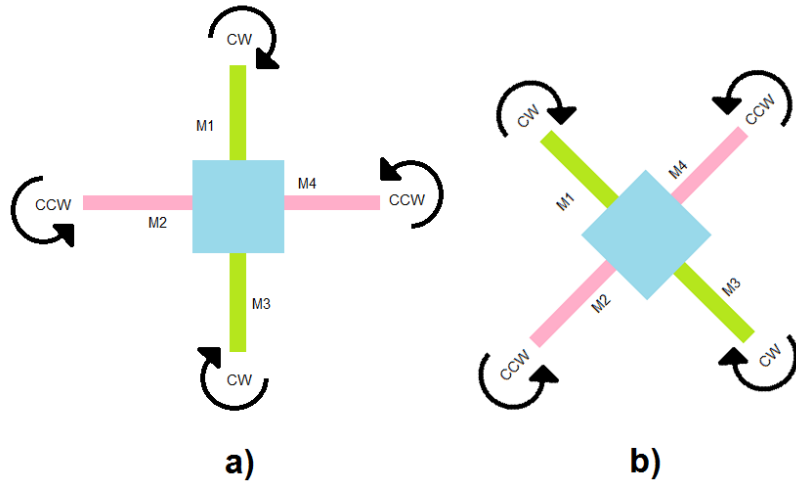


Figura 4. a) Configuración Plus, b) Configuración X.

## 2.2 Teoría y conceptos de vuelo de un cuadricóptero

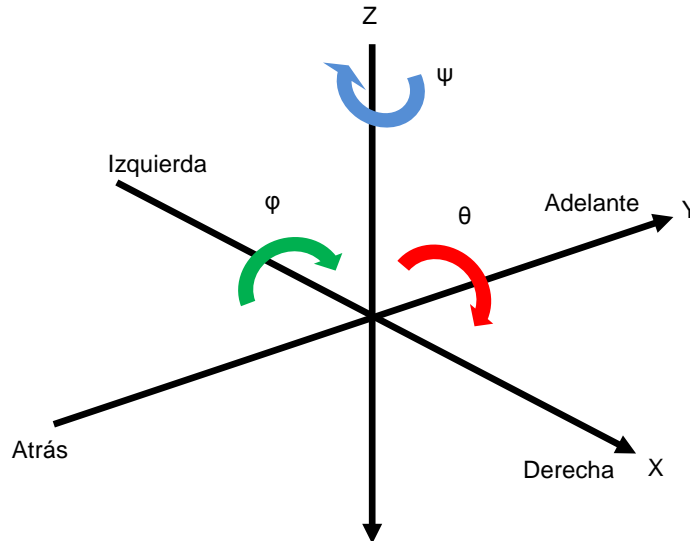


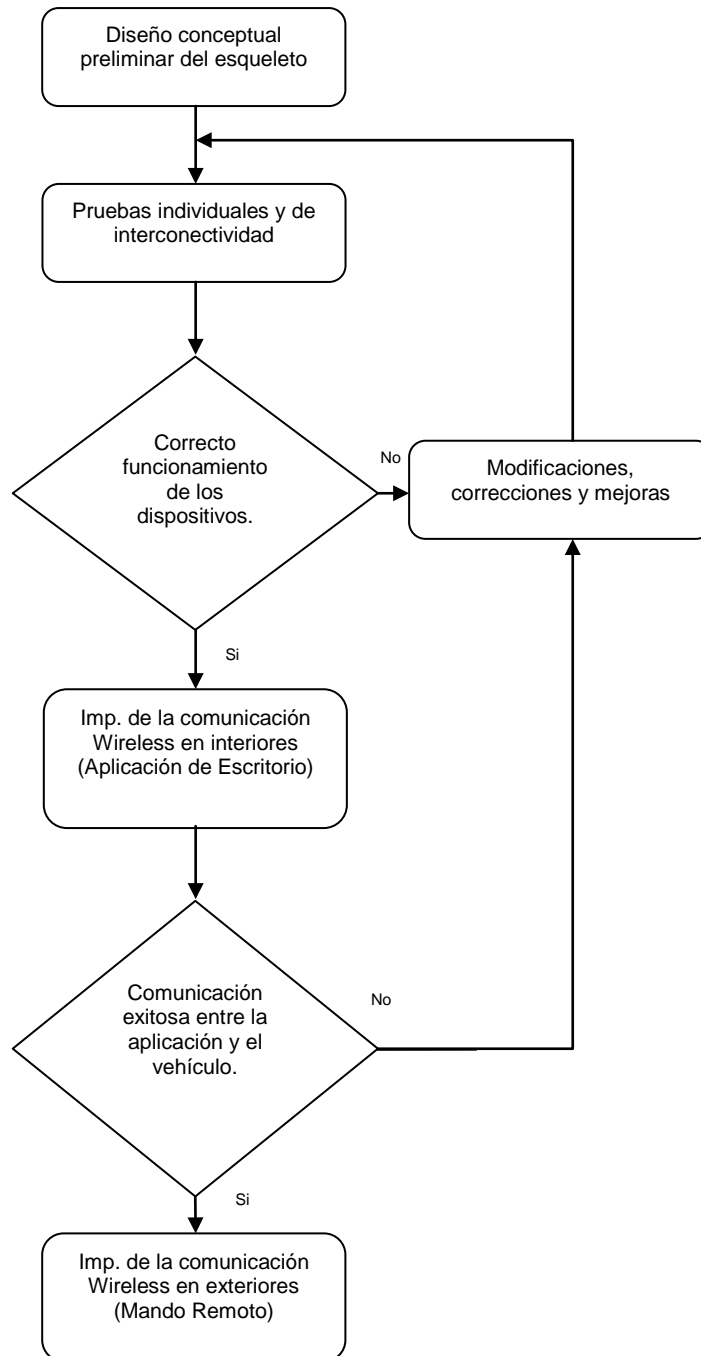
Figura 5. Representación matemática del cuadricóptero como una fuerza con tres momentos y la orientación a la cual corresponden los ángulos de Euler para roll ( $\theta$ ), pitch ( $\phi$ ) y yaw ( $\psi$ ).

## 3. Construcción del cuadricóptero

El presente trabajo se desarrolló en base a la metodología que muestra el Diagrama 1, la cual contempló principalmente cuatro etapas de diseño, ensamblado, programación y pruebas.

### 3.1 Diseño y especificaciones técnicas

La construcción de un cuadricóptero requiere de la interconexión de dispositivos, de una integración de sistemas, software y hardware que en conjunto realizan la tarea básica de este tipo de aeronaves: volar.



**Diagrama 1. Metodología del diseño y construcción del cuadricóptero.**

### **3.1.1 Hardware**

El cuadricóptero construido para este trabajo se basó en el esquema electrónico general de cualquier plataforma multirrotor disponible actualmente en el Diagrama 2. Como se observa en el diagrama anterior, son cinco principales bloques los que conforman el sistema electrónico del vehículo, dependiendo de la plataforma se utilizan diferentes tecnologías y protocolos para comunicarse entre sí. El vehículo desarrollado en base a esta propuesta implementa tecnologías que

lo convierten en una plataforma open source, de bajo costo y configurable a partir de las necesidades del usuario final. A lo largo de este apartado se detalla la construcción del cuadricóptero de acuerdo a cada uno de los bloques que conforman el sistema electrónico mostrado en el diagrama anterior.

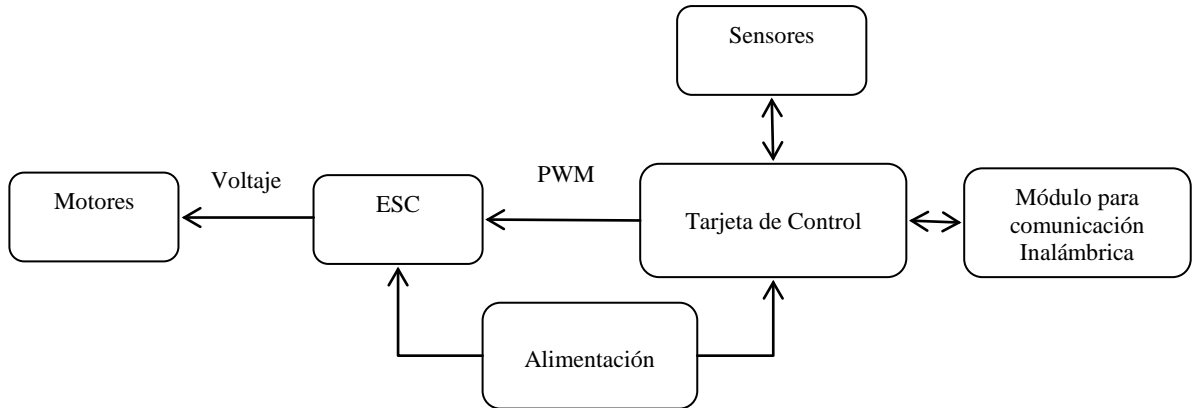


Diagrama 2. Esquema electrónico general de una plataforma multirrotor.

### 3.1.2 *Arduino: Tarjeta maestra de control.*

La elección de una plataforma base para el control del vehículo fue rigurosa y se optó por el hardware Arduino, una herramienta OpenSource de prototipos electrónicos basada en hardware y software flexible [6]. Específicamente se seleccionó la tarjeta UNO mostrada en la Figura 6, basada en el microcontrolador ATmega328 que entre sus múltiples características destacan sus 6 pines, que pueden ser usados como salidas PWM (modulación por ancho de pulsos) para controlar los cuatro motores. Esta tarjeta cuenta además con pines específicos para comunicación I2C, botón de reset y 32KB de Memoria Flash, suficientes para portar el software de control.

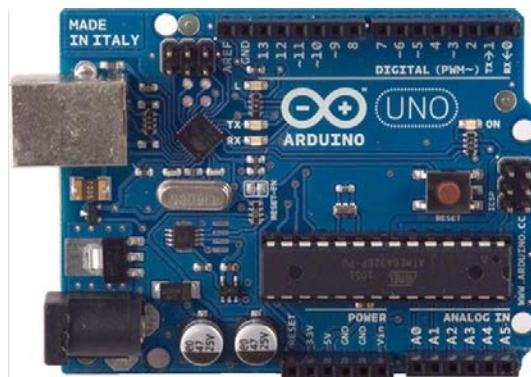


Figura 6. Arduino UNO

### 3.1.3 *Motores BLDC*

Los motores de corriente continua sin escobillas (BLDC, por sus siglas en inglés) como su nombre lo indica, no utilizan escobillas para la conmutación; en su lugar, realizan la conmutación electrónicamente, frente a los motores DC poseen ventajas tales como una alta eficiencia y vida útil, así como una operación silenciosa y altos rangos de velocidad. Además, la relación de torque suministrado – tamaño del motor, es mayor, haciéndolo muy útil en aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos [7].

Éste tipo de motores tienen tres bobinas en el interior (en el centro) del motor, que están fijadas a la carcasa. En el exterior tienen imanes montados en un cilindro que está unido al eje de rotación. Por lo tanto, para un proyecto de este tipo, donde son necesarios motores pequeños y fuertes, hay que trabajar sin escobillas. El cuadricóptero desarrollado utilizó 4 motores outrunner de 620KV, que necesitan ser alimentados con una batería de hasta 3S, que se ilustran en la Figura 7.



Figura 7. Motor BLDC Outrunner.

### 3.1.4 Control Electrónico de Velocidad (ESC)

Los variadores son los elementos que se encargan de manejar los motores eléctricos, además se encargan de convertir la corriente DC –proporcionada por la batería- a corriente alterna, la necesaria para que los motores funcionen. El variador o ESC recibirá la señal PWM y dependiendo de la longitud del ancho de pulso entregará mayor o menor potencia al motor. Algunos variadores poseen un circuito eliminador de batería, también conocido como BEC (del inglés Battery Eliminator Circuit), el cual elimina –como su nombre lo indica- la necesidad de una batería extra para el dispositivo entero, proveyendo de energía con una sola batería tanto a los motores como al sistema de control. En la Figura 8 se muestra un diagrama general de la conexión batería – ESC – BEC- receptor – motor.

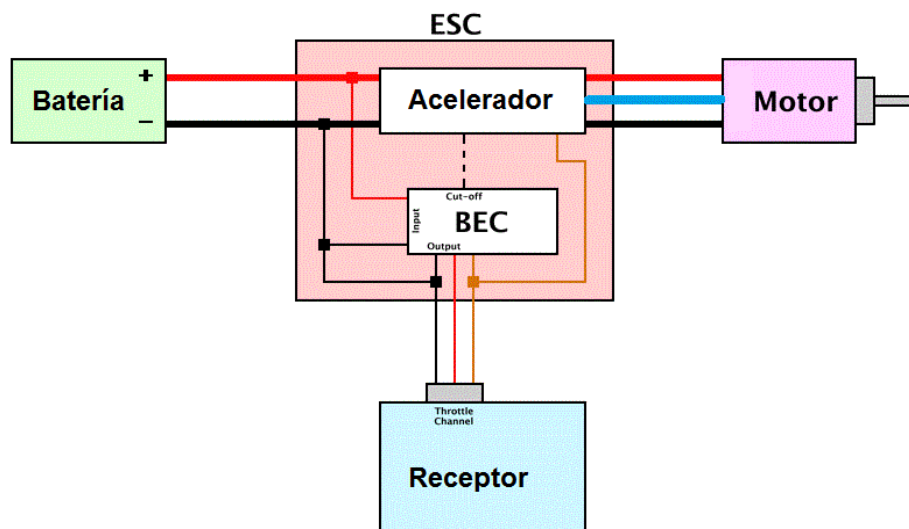


Figura 8. Conexión Batería – ESC – BEC – Receptor – Motor.

Los ESC logran una gestión avanzada del motor y algunos necesitan ser programados antes de ser usados [8]. Los variadores utilizados en el desarrollo de este proyecto, cubren las recomendaciones de los motores para el proyecto y se ilustran a continuación en la Figura 9.

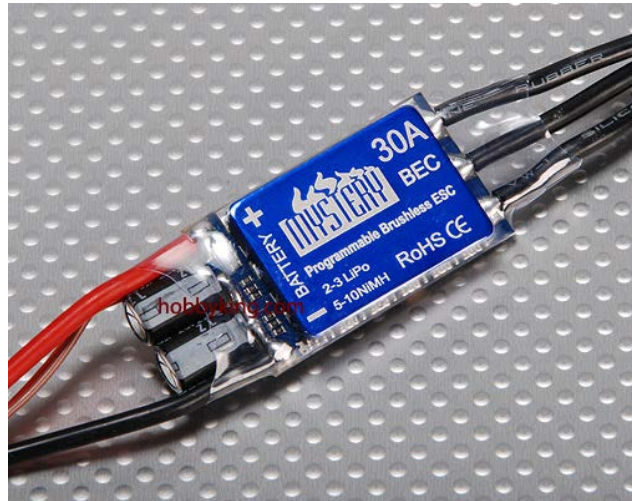


Figura 9. ESC-BEC Mystery 30A.

### 3.1.5 Alimentación

Para alimentar el sistema fue necesario utilizar una única fuente de energía; una batería LiPo (Figura 10) de 3 celdas alimenta a los cuatro controles electrónicos de velocidad y mediante estos se alimentan los motores y la tarjeta de control.



Figura 10. Batería LiPo 3S 2200mAh 45C.

#### 3.1.5.1 Baterías LiPo

Las baterías de polímero de Litio o LiPo, tienen una forma rectangular con dos placas en la parte superior, una negativa y una positiva. Sin embargo todas las baterías poseen características que hay que considerar al suministrar la energía al sistema. Para este proyecto las características más importantes a considerar de una batería son la Tasa de Descarga (C) y la Tensión (V) son las características más importantes. Usualmente las celdas están conectadas en serie, sumando el voltaje de cada celda manteniendo la misma cantidad de amperes/hora (Ah). Para un Cuadricóptero es recomendable utilizar baterías 3SP1, lo que significa tres (3) celdas conectadas en serie en una



batería en paralelo. En el caso de la batería utilizada para este proyecto se trata de una batería LiPo 3SP1. Lo que significa que con una carga normal provee 11.1V como la Figura 10. La tasa de descarga de la batería es de 45C constantes y provee un total de 2200 mAh.

En cuanto a la capacidad de la batería se refiere es sencillo hacer una estimación del tiempo de vuelo que tendrá el vehículo. Sólo basta con dividir la capacidad de carga de la batería utilizada (2200mAh) entre el rango de Kv - que es el número de RPM que dará el motor suministrado con n-volts - de los motores (620 Kv), a continuación en la ecuación (1) se calcula el Tiempo de vuelo aproximado del vehículo con las especificaciones de los materiales utilizados en este proyecto:

$$\text{Tiempo de vuelo}_{(\text{aprox})} = \text{Capacidad de Carga de la Batería} / \text{Kv}$$

Sustituyendo:

$$\text{Tiempo de vuelo}_{(\text{aprox})} = 2200 \text{ mAh} / 620 \text{ Kv} \quad (1)$$

$$\text{Tiempo de vuelo}_{(\text{aprox})} = 3.54 \text{ min} \quad (1)$$

El resultado arrojado de 3.54 min es el tiempo de vuelo aproximado a máxima potencia en los 4 motores. Ahora que se cuenta con el sistema eléctrico y de propulsión completo es necesario el sistema de comunicación cuadricóptero – piloto.

### 3.1.6 Sensores

Una aeronave capaz de realizar vuelos autónomos con una mínima intervención del piloto necesita incluir algunos sensores que le ayuden a mantener un vuelo estable y seguro. Para ello en el cuadricóptero se montó un SensorStick 9DOF o 9 grados de libertad (Figura 11) que consta de 3 sensores, un giroscopio, un acelerómetro y un magnetómetro, de los cuales se adquieren los datos de los ejes X, Y, Z de cada uno, que participan en el algoritmo de estabilización de vuelo.

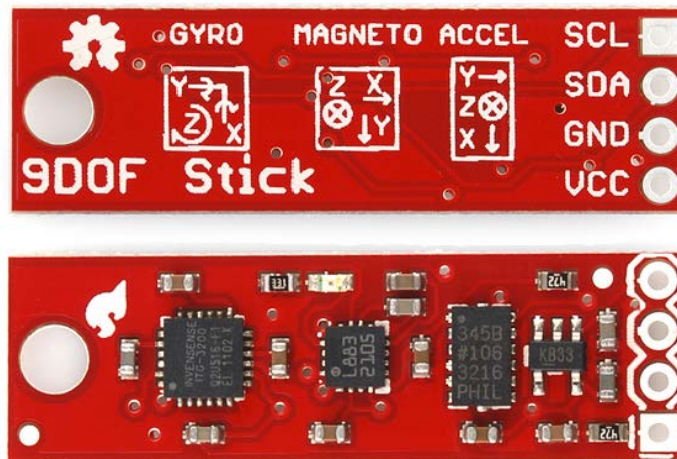


Figura 11. Open Hardware SensorStick Sparkfun 9DOF.

Con ayuda de los encapsulados ITG3200 y ADXL345 (giroscopio y acelerómetro, respectivamente) se determinan los ángulos de inclinación de *Pitch* y *Roll* mediante el tratamiento de los datos de aceleración y velocidad angular obtenidos desde los seis ejes sensados.

Para el caso de la determinación de los ángulos de inclinación con los datos de aceleración, se utilizaron las ecuaciones trigonométricas (2) y (3), por medio de las cuales se obtuvieron los valores

en radianes de *pitch* y *roll*, respectivamente, con una sensibilidad constante de 360° de rotación, respecto a la Figura 5.

$$\text{pitch} = \varphi = \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{Y^2 + Z^2}} \quad (2)$$

$$\text{roll} = \theta = \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Z^2}} \quad (3)$$

Debido a que estas operaciones devuelven valores en radianes es necesaria una conversión, de manera que las ecuaciones resultantes se presentan a continuación:

$$\text{pitch} = \varphi = \left( \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{Y^2 + Z^2}} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

$$\text{roll} = \theta = \left( \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Z^2}} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (5)$$

La determinación del ángulo de inclinación con los datos de velocidad angular adquiridos por el giroscopio es bastante simple. La velocidad angular calculada se representa en la ecuación (6). Una integración con respecto a t es suficiente para obtener el ángulo de inclinación, usando el tiempo que ejecución de cada ciclo. El resultado obtenido también se somete a tratamiento para convertir la medición de radianes a grados, como muestra la ecuación (7).

$$\omega = \frac{\theta}{dt} \quad (6)$$

$$\theta = (\omega \times dt) \times \frac{180}{\pi} \quad (7)$$

Como resultado, los ángulos de inclinación de *Pitch* y *Roll* son determinados por las ecuaciones (8) y (9) que se muestran a continuación:

$$\text{pitch} = \varphi = (X \times dt) \times \frac{180}{\pi} \quad (8)$$

$$\text{roll} = \theta = (Y \times dt) \times \frac{180}{\pi} \quad (9)$$

Esta información participa en un básico algoritmo de estabilización de vuelo para regular y compensar los movimientos del cuadricóptero al realizar despegues, desplazamientos y descensos.

### 3.1.7 Teleoperación

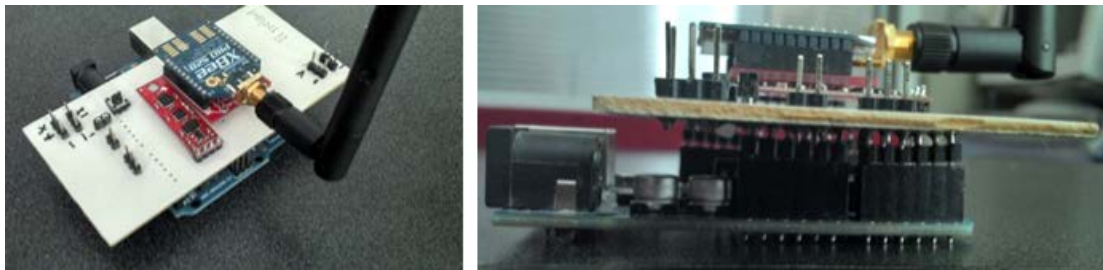
#### 3.1.7.1 XBee

Digi International manufactura una extensa y desconcertante gama de radios XBee. En total hay al menos 30 combinaciones diferentes de componentes de hardware, protocolos de firmware, potencias de transmisión y antenas. Para el propósito de este proyecto se trabajó con un par de módulos XBee S2B con una antena RPSMA para una mejor transmisión (Figura 12) aprovechando todas las características de los mismos, formando una conexión punto a punto (escalable a una red en malla) con propiedades ideales para un proyecto de esta naturaleza, como lo son un rango Urbano/interiores por encima de los 90m, Poder de transmisión de 63mW (+18dBm) y una velocidad de transmisión con interface serial de 1200 bps a 1Mbps [6].



**Figura 12. Módulo XBee S2B con antena RPSMA**

En base a las características de los componentes que requerían de una conexión con la tarjeta de control, se diseñó un circuito sobre una placa de cobre de 10x5cm (Figura 13) de construcción casera, desmontable, pequeña y ligera tipo "shield", que incorpora un botón de *reset* para la tarjeta de control y LEDs que indican el estado de la conexión del módulo para comunicación inalámbrica, así como el estado ON/OFF de la tarjeta y placa de control.



**Figura 13. (Izquierda) Placa de control desarrollada conectada a la tarjeta de control Arduino en la que se aprecian claramente los módulos de comunicación inalámbrica y sensado (Derecha) Placa de control tipo shield montada sobre la tarjeta Arduino.**

### **3.2 Estructura**

Como anteriormente se mencionó, existen principalmente dos tipos de configuraciones para la estructura de un cuadricóptero, en este caso se utilizó una configuración plus, que se muestra en la REFERENCIA. El cuerpo del vehículo fue construido de 3 piezas de aluminio que para un mejor agarre fueron soldadas, las dimensiones son 60 x 60 cm.

## **4. Aplicaciones de control desarrolladas**

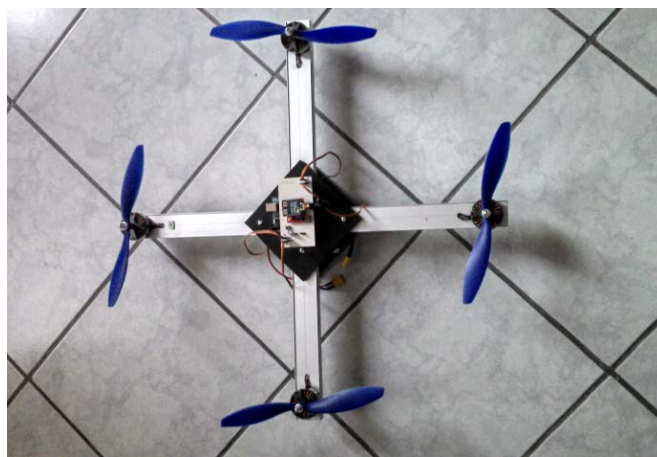
Como anteriormente se mencionó, son necesarios dos módulos, un receptor y un transmisor. El primero se monta sobre el dron y mientras que el segundo se puede conectar a las dos diferentes interfaces de control. La primera de ellas es una aplicación de escritorio para el control del cuadricóptero desde una computadora portátil. La segunda es una aplicación para dispositivos tipo Tablet con sistema operativo Android (Figura 14).



**Figura 14. (Izquierda) Interface gráfica de usuario de la aplicación desarrollada en Processing. (Derecha) Interface gráfica de usuario de la aplicación desarrollada para dispositivos móviles Android tipo tablet.**

## 5. Resultados

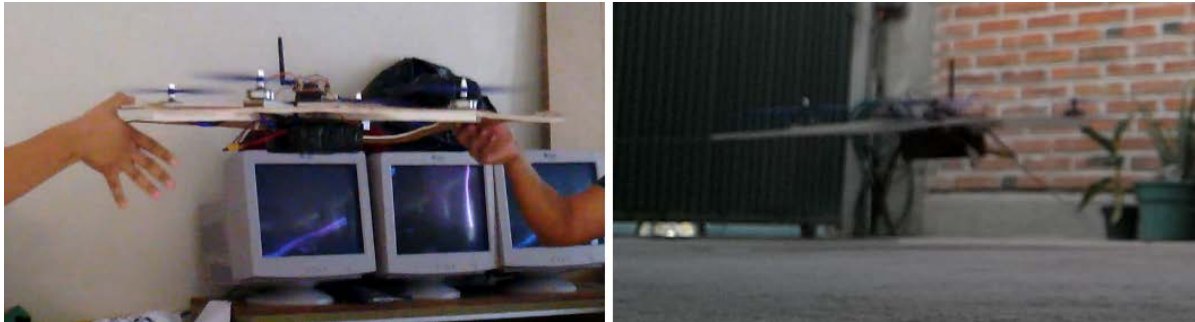
Por sí misma la construcción de un vehículo de radio control multirotor como lo es un cuadricóptero es sencilla, no así el diseño, en el cual influyen un gran número de variables, como lo son la calidad, peso, costo y calidad de los materiales a utilizar, así como la dificultad para conseguir este tipo de componentes, que en su mayoría fueron adquiridos en el extranjero. A pesar de los mínimos inconvenientes en el desarrollo, diseño y construcción del UAV, como la corta distancia de elevación, y las aplicaciones de control, lo convirtieron en un dispositivo funcional de arquitectura abierta (Figura 15), con un amplio rango de operación de hasta dos millas, de bajo consumo, con características escalables, habiendo cabida para mejoras y ampliación de características tanto en la estructura como en la programación.



**Figura 15. Cuadricóptero ensamblado.**

A continuación se muestra el cuadricóptero durante la realización de un vuelo asistido a aproximadamente 1.40m de altura (Figura 16 - Izquierda). Así mismo se aprecia en la Figura 16 del

lado derecho, el dispositivo realizando un despegue vertical, en un vuelo sin asistencia a una altura aproximada de 25 cm. En ambos casos el prototipo hace uso de la protección para interiores hecha a base de poliestireno expandido y cartón. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los materiales utilizados en la construcción y ensamble de la aeronave, detalles de pesos y costos de cada artículo, así como el peso y el costo total del cuadricóptero construido.



**Figura 16. (Izquierda)Cuadricóptero en vuelo asistido a una altura de 1.40m. (Derecha) Cuadricóptero realizando despegue vertical sin asistencia a una altura aprox de 25cm sobre el suelo.**

**Tabla 1. Principales características del cuadricóptero construido**

Precio	Peso	Comunicación. Inalámbrica	Tiempo de Vuelo	Altura máxima alcanzada	Rango de Operación (Interiores)	Rango de Operación (Exteriores)	Suministro máximo
\$446.52 USD	1.132 Kg	RF	3.54min	25 cm Sin asistencia.	90m	1,500m	9.9A

A diferencia de proyectos similares el desarrollo de este vehículo derivó en el diseño de una tarjeta montable para Arduino Uno tipo "Shield" de arquitectura abierta, con la cual se puede realizar el control de hasta cuatro motores BLDC, la adquisición de datos desde tres sensores que conforman una IMU y un XBee Breakout board para montaje de módulos de radiofrecuencia para comunicación inalámbrica. Para el control del dron (de manera alámbrica e inalámbrica a través de los módulos XBee) se desarrollaron dos aplicaciones de mando, una de ellas puede ser ejecutada en computadoras de escritorio o laptops con Sistemas Operativos como iOS, sistemas Linux o Windows a través de Processing. La otra aplicación está diseñada para ejecutarse en dispositivos móviles tipo tableta, Android.

Al tratarse de un prototipo, el cuadricóptero construido brinda la posibilidad de realizar un escalamiento o modificación en la totalidad de sus características. Sin embargo, un aspecto importante a desarrollar como parte del trabajo futuro es el desarrollo de un algoritmo de estabilización de vuelo mejorado basado en la implementación de control proporcional, integral y derivativo o PID, así como de algoritmos de control inteligente (lógica difusa, redes neuronales, etc), que permitan al cuadricóptero realizar vuelos y cambios de trayectoria con una estabilidad superior a la presentada en este trabajo, además de buscar reducir el consumo eléctrico del dispositivo reemplazando el tipo de motores por unos de menor consumo, mejorar la calidad de la tarjeta de control que además se encarga de la distribución de energía al resto de los componentes de medición y comunicación. Finalmente, una medida más para reducir el consumo de energía consiste en el cambio de la estructura del cuadricóptero, considerando materiales más ligeros como la fibra de carbón, que

disminuiría el peso del dispositivo, repercutiendo directamente en un menor esfuerzo por parte de los motores para un despegue y así en el consumo de energía.

## 6. Conclusiones

La construcción de aeronaves no tripuladas multirrotor de radio control conlleva mucho trabajo, tiempo de planeación y pruebas, necesita de dedicación y esfuerzo. Existen una gran variedad de plataformas, sistemas, componentes y entornos de programación de libre distribución que facilitan algunas tareas de producción y diseño y en costos accesibles. El cuadricóptero construido para este artículo con un costo de producción menor a \$500.00 USD, es una muestra funcional del alcance que este tipo de herramientas puede llegar a tener; al ser un dispositivo de arquitectura abierta, permite el uso, modificación y mejora total o parcial del diseño, es decir se trata de un dispositivo escalable y configurable a necesidad.

## Referencias

- [1] Asensio J., Pérez F. y Morán P. “*Aeronaves no tripuladas, beneficios y límites*”. I.E.S Leonardo Da Vinci. <http://www.cursoleo.aulaleonardo.com/raul.banos/IASS/IASS.htm>, 2008.
- [2] Basta O. Peter. (2012). “*Quad Copter Fligh*”. (Tesis de Maestría, California State University, Northridge).
- [3] Hydra-Technologies. Recuperado de <http://www.hydra-technologies.com/>. Última revisión Agosto de 2013.
- [4] Oemiohem, E. “*My experiments with Helicopters*”. Memorándum técnico, National Advisory Commite for Aeronautics. Estados Unidos, 1923.
- [5] Burka A. y Foster S. “*Neato Quadcopters*”. Estados Unidos, 2012.
- [6] Faludi R. “*Building Wireless Sensor Networks*”. O’Reilly, Estados Unidos Americanos. Primera edición, 2010.
- [7] Padmaraja, Y. (2003) “*Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*”. Microchip Technology Inc.
- [8] Vorkoetter, S. (2003) “*The Battery Eliminator Circuit*” Recuperado de QuietFlyer Magazine. <http://www.stefanv.com/electronics/qf200312.html>