VISIÓN ELECTRÓNICA

Preparación de Artículos revista VISIÓN ELECTRÓNICA: algo más que un estado sólido
Fecha de envío:
Fecha de recepción:
Fecha de aceptación:

DISEÑAR E IMPLEMENTAR UNA PLANTA DE PRUEBAS PARA UN CUADRICOPTERO

DESING AND IMPLEMENT A PLANT FOR TESTING A QUADROTOR

Raul Alejandro Blanco Ortiz*

Resumen:

En este documento, se describe el desarrollo de una plataforma de pruebas para un cuadricóptero que realiza desplazamientos verticales. Esta plataforma se compone de una estructura de vuelo de 4 hélices, un sistema de control y una interfaz gráfica. La estructura de vuelo está hecha en fibra de carbono y consta de dos ejes cruzados a 90° grados unidos por un soporte en el centro, donde se ubica el sistema de control y la placa de potencia del cuadricóptero y en los extremos de los ejes están los motores brushless EMAX MT2204. El sistema de control implementado está desarrollado en la PSoC 5LP-CY8KIT-059, con el sensor ultrasónico HC-SR04 y el sensor de corriente ACS712. La interfaz se desarrolló en java, la cual tiene como fin controlar el desplazamiento vertical del cuadricóptero y mostrar los datos tomados durante el funcionamiento del mismo como los son la altura, la corriente consumida y el voltaje suministrado, para así calcular la potencia promedio consumida y estimar la duración de la batería.

Palabras clave: Cuadricóptero, control, desplazamiento vertical.

* Estudiante de tecnología en electrónica (ciclos propedéuticos). Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Facultad Tecnológica. E-mail: rablancoo@correo.udistrital.edu.co

Abstract: This document describes the development of a test platform of a quadrotor which does vertical moves. This platform is composed of a structure of four helix, a control system and a GUI. The structure is made in carbon fiber and is composed of two axes crossed at 90° joined by a center support, where the control system and the power board of the quadrotor is located and at the end of the axes are the brushless motors EMAX MT2204. The control system is developed and implemented on PSoC 5LP-CY8KIT-059, with the ultrasonic sensor HC-SR04 and the current sensor ACS712. The GUI is developed in java, which aims control the vertical moves and show the data taken during the quadrotor operation as the height, consumed current and voltage supplied in order to calculate the average power consumed and estimate the battery time.

Key Words: Quadrotor, control, vertical move.

1. Introducción

Durante los últimos años en el campo de los dispositivos no tripulados (UAV) se han desarrollado avances significativos debido a sus características de tamaño y control, que les permite la implementación del vuelo dirigido sin tripulación en espacios cerrados con diferentes propósitos como lo son investigativos, comerciales, militares, entre otros. Los cuadricópteros pertenecen al campo de los UAV y a pesar de la popularidad de estos dispositivos a nivel mundial, en la Universidad este campo no tiene gran trayectoria investigativa y por tanto se desconocen las principales características de funcionamiento de los cuadricópteros.

Por lo anterior, es de importancia dar inicio al desarrollo de este campo en la Universidad, pues permitirá el planteamiento y la realización de futuros trabajos en un entorno que cada día se

Fecha de envío:
Fecha de recepción:
Fecha de aceptación:

está convirtiendo en uno de los focos de progreso de la tecnología alrededor del mundo gracias a su gran versatilidad en diferentes áreas de aplicación.

En consecuencia, este proyecto busca estudiar y comprender los principios de funcionamiento de un cuadricóptero para llevar a cabo la implementación de un sistema de control de los motores y poder realizar desplazamientos verticales. Este proyecto denominado “Quadrotor F-07” fue realizado en 3 etapas: la primera fue el estudio de los principios de funcionamiento de los cuadricópteros. La segunda fue la revisión y apropiación de la tecnología para llevar a cabo el proyecto, el desarrollo del sistema de control del cuadricóptero capaz de lograr los desplazamientos verticales deseados por el usuario y de tomar los datos del funcionamiento del F-07 y en la tercera etapa se realizaron las pruebas correspondientes para verificar el sistema de control del F-07 y así corregir las posibles fallas que se pudieran encontrar.

Este documento describe el desarrollo del proyecto Quadrotor F-07 que propone dar la base de un nuevo campo investigativo en la Universidad Distrital FJDC - FT. Finalmente se enunciaran los resultados obtenidos y las conclusiones del proyecto.

2. Desarrollo del proyecto Quadrotor F-07

Quadrotor F-07 es una plataforma de pruebas para un cuadricóptero en la cual se controla, por medio de una interfaz gráfica en el pc, el desplazamiento vertical del mismo y se realizan las mediciones de voltaje, corriente, rpm y altura del UAV durante el funcionamiento. El desarrollo del proyecto se describe a continuación.

2.1. Sistema del cuadricóptero F-07

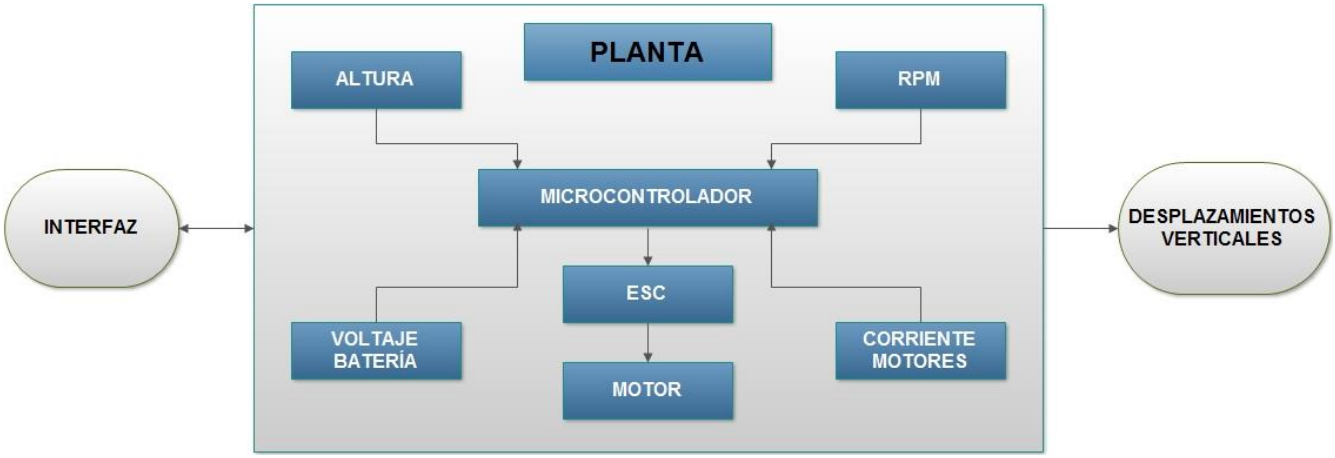


Figura 1. Sistema de control del cuadricóptero F-07

2.1.1. Control

El objetivo principal del proyecto es desarrollar un sistema de control de los motores para obtener el estado de sostenimiento hover del F-07 a la altura deseada por el usuario desde una interfaz en el pc.

La interfaz se diseñó en java con cuatro funciones, controlar los desplazamientos verticales del F-07, apagar los motores, mostrar en tiempo real la lectura de los datos obtenidos por los diferentes sensores y guardarlos en un archivo de texto plano, además de permitir la comunicación entre la PSoC 5LP y el pc. Debido a las características del proyecto y teniendo en cuenta que es un plataforma de pruebas que no tiene como propósito la implementación en campo abierto, se optó por realizar la comunicación vía serial por medio de un cable USB utilizando el protocolo RS232.

Para esto se realizó una búsqueda de como conectar un microcontrolador al pc vía serial por medio de java y se encontró la existencia de la librería java simple serial connector (jssc)[1], la cual permitió la configuración del protocolo RS232 para generar el puerto serie en el pc y así establecer la comunicación con la PSoC 5LP.

Fecha de envío:
Fecha de recepción:
Fecha de aceptación:

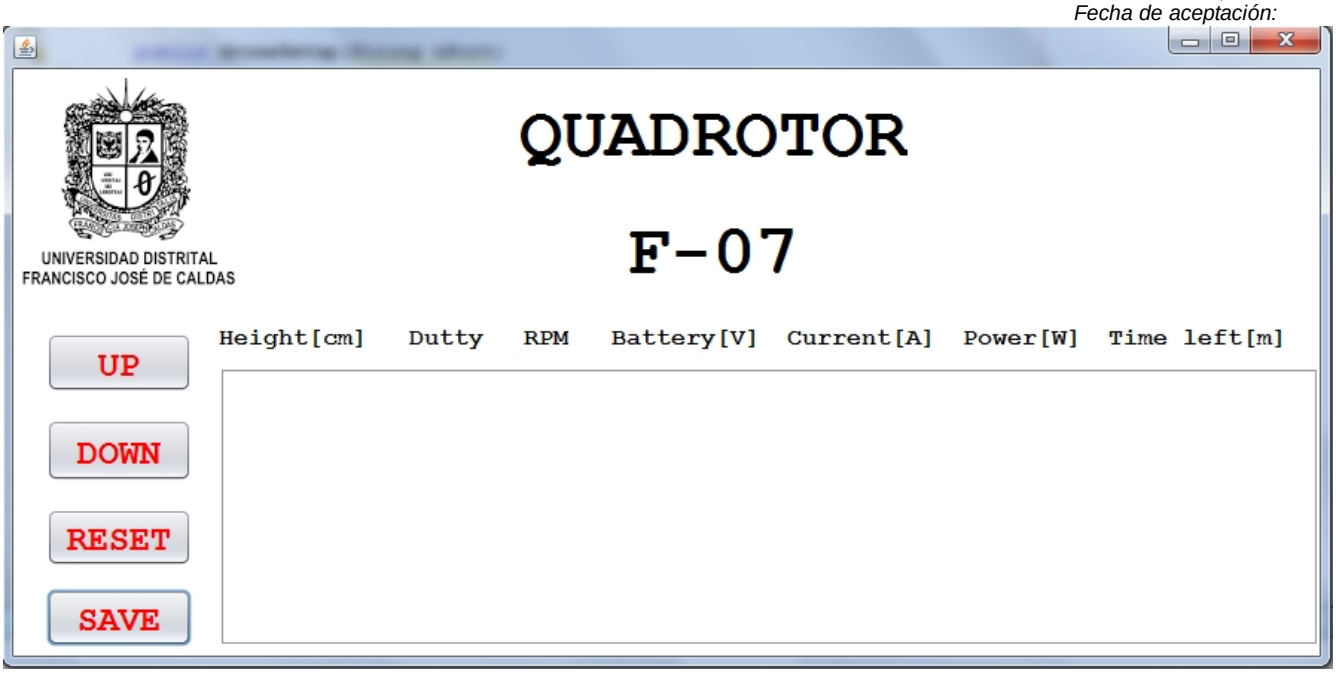


Figura 2. Interfaz de usuario del F-07.

Los cuatro botones sobre el costado izquierdo de la interfaz se encargan de indicarle al microcontrolador como modificar la variable que controla los motores, es decir, la señal PWM de los ESC y guardar los datos obtenidos de las pruebas. “UP” envía la letra ‘u’ como identificador para aumentar la potencia de los motores, “DOWN” envía la letra ‘d’ como identificador para disminuir la potencia de los motores, “RESET” envía la letra ‘r’ como identificador para apagar los motores y “SAVE” permite al usuario guardar en el pc un archivo de texto plano con los datos obtenidos durante el funcionamiento del F-07.

2.1.2. Planta

Para la implementación de un cuadricóptero es necesario hacer uso de los siguientes elementos: motores burshless, ESC (Electronic Speed Controller – Controlador Electrónico de Velocidad), batería Li-Po, microcontrolador y una estructura de vuelo.

En el desarrollo de este proyecto se realizó una revisión de las actuales estructuras comerciales, de los diferentes motores brushless y sus ESC, el microcontrolador y de las baterías Li-Po para determinar cuáles son los materiales más adecuados y asequibles para el proyecto. Se encontraron estructuras de diferentes diseños, materiales y costos, sin embargo dadas las características del proyecto se optó por adquirir e implementar un juego de motores, ESC, hélices y una estructura de vuelo para garantizar de antemano el funcionamiento de estos elementos en conjunto. Este juego consta de 4 motores brushless EMAX MT-2204, cada motor pesa 25g, tiene una capacidad máxima de empuje de 440g, puede operar con hélices de entre 5'' y 6'', con una batería Li-Po de 2 o 3 celdas y llega a consumir en condiciones máximas 11.5A. Para el funcionamiento de los motores están los ESC EMAX SIMON 12A, este dispositivo es esencial para la operación del F-07, pues se encarga de convertir la señal proporcionada por el microcontrolador en una señal trifásica la cual controla la potencia de los motores brushless. Tiene la capacidad de suministrar hasta 12A constantes, opera con una batería de 2 o 3 celdas y pesa 9g. Las hélices adquiridas son de 6'' y están hechas de plástico. La estructura adquirida es la Q250 diseñada en fibra de vidrio y fibra de carbono y pesa 108g. Para el microcontrolador se optó por usar la PSoC 5LP CY8CKIT-059 debido a su versatilidad. Además se adquirió el sensor ultrasónico HC-SR04 para identificar la altura del F-07, este tiene un rango de trabajo desde 2cm hasta 4m, opera a 5V y 15mA, el sensor de corriente ACS712 de ±30A y opera a 5V y se adquirió un CNY70 para tomar lectura de las rpm del motor que opera a 5V.



Figura 3. Motor MT2204 y ESC EMAX SIMON 12A.



Figura 4. Estructura Q250.

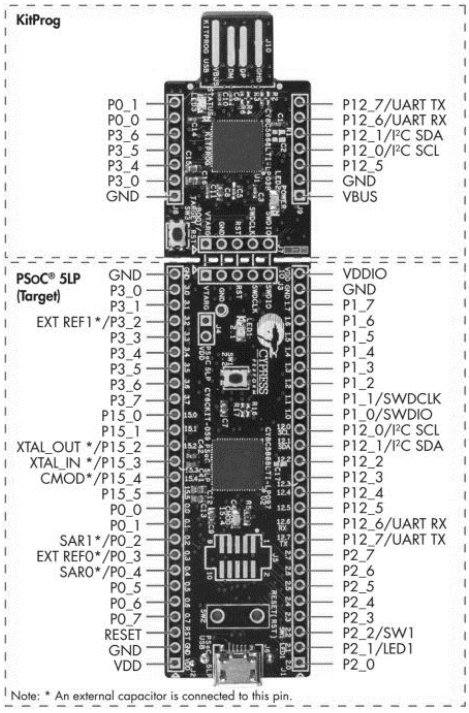


Figura 5. PSoC 5LP

Por último se adquirió una batería Li-Po con una capacidad de 1500mAh de 3 celdas capaz de entregar hasta 40A y con un peso de 125g. Estas baterías poseen dos canales de energía, uno es de alta potencia diseñado para alimentar los motores del cuadricóptero y el otro canal es de baja potencia diseñado para la carga individual de cada una de las celdas.

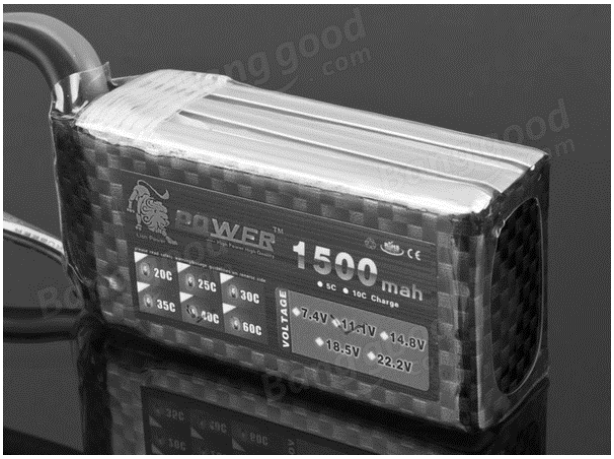


Figura 6. Batería LiPo de 1500 mAh y de 3 celdas.

Para cumplir el objetivo principal del proyecto lo esencial fue identificar el modo de operación de los motores para controlarlos adecuadamente, el cual consta de una señal PWM, con un ciclo útil de 1ms a 2ms y un periodo de 20 ms, donde en 1ms los motores están apagados y en 2ms están a su máxima potencia.

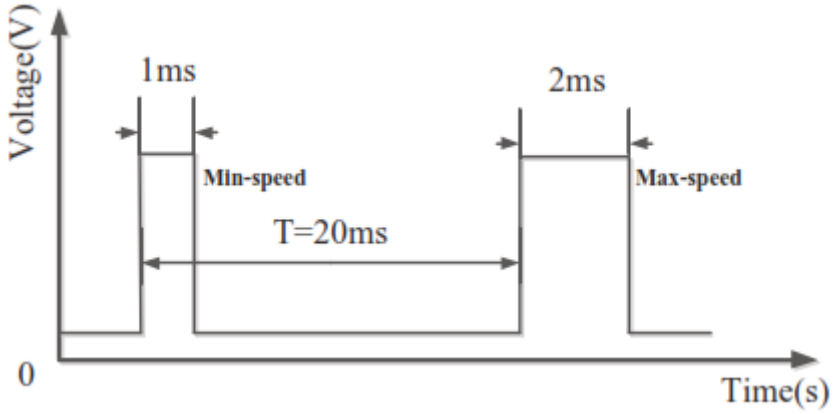


Figura 7. Señal de control de un motor brushless.

Teniendo en cuenta lo anterior, se generó cuatro señales PWM con un periodo de 20ms y un ciclo útil variable a partir de 1 ms hasta máximo 2ms en la PSoC 5LP. Por medio, de cuatro

Fecha de envío:
Fecha de recepción:
Fecha de aceptación:

módulos PWM de 16 bits se generan señales de control de los motores, las cuales son enviadas a cada uno de los ESC para controlar la potencia de cada uno de los motores de forma independiente. La señal PWM debe ser lo más exacta posible, por tanto se vio la necesidad de modificar el reloj principal de la PSoC a 36Mhz para configurar los módulos PWM con un periodo de 20ms, pues en este microcontrolador:

$$Period = \frac{\text{Re}\,solucion}{CLKpwm} \qquad (1)$$

Donde CLKpwm es el reloj de operación del módulo PWM de la PSoC y teniendo en cuenta que el periodo de los PWM debe ser de 20ms y la resolución es de 16 bits, el reloj de módulo PWM debe ser de máximo 3.276Mhz. Ajustando el reloj principal a 36Mhz se logró obtener un reloj de 3.276Mhz.

Luego, se implementó el sensor ultrasónico HC-SR04 con el fin de medir la altura del cuadricóptero el cual tiene un rango de 2cm a 4m. Para el correcto funcionamiento de este sensor se debe enviar un pulso de 10us al pin trigger, entonces el modulo envía una ráfaga de sónica de 8 ciclos y luego el pin echo devuelve un pulso con una duración proporcional a la distancia recorrida por la ráfaga sónica. El cálculo de la distancia en centímetros se realiza dividiendo el tiempo de duración del pulso del pin echo entre 58[2], para esto se utilizó un módulo timer de 16 bits de la PSoC, el cual activa su conteo una vez se desactiva el pulso en el pin trigger.

Se acopló el sensor CNY70 con una resistencia de 150 ohmios al diodo emisor de luz infrarroja y una resistencia de 20k ohmios al emisor del fototransistor para reducir los tiempos de respuesta y se tomó la señal del emisor para hacer su lectura en la PSoC, pues esta señal corresponde a la conmutación del transistor y se ve reflejada como un tren de pulsos

correspondiente a la cantidad de veces que hay reflexión sobre la hélice de uno de los motores. Estos pulsos son contabilizados durante cada segundo por el módulo counter del microcontrolador para así estimar las RPM del motor.

Y por último se adicionó el sensor de corriente ACS712 y se acopló la señal de voltaje de la batería para calcular la potencia consumida por los motores durante el funcionamiento del F-07 y estimar el tiempo de autonomía de la batería.

El sensor de corriente ACS712 tiene la capacidad de medir hasta ±30A, su funcionamiento es lineal y su resolución es de 66mV/A. Tiene la capacidad de leer corrientes positivas y negativas, por tanto el cero del sensor corresponde a la mitad de su alimentación en este caso 2.5V, entonces los voltajes por encima de este voltaje será de una corriente positiva y por debajo de una corriente negativa[3]. La salida de este sensor se envió a un pin de la PSoC configurado como ADC con una resolución de 12 bits para realizar su lectura y su posterior conversión a corriente.

El acople de la señal de voltaje de la batería a la PSoC se implementó con un divisor de voltaje con resistencias de 12k ohmios y 8.2k ohmios el cual le permitió a la PSoC tener una lectura, en un pin configurado como ADC, de 5V cuando la batería está totalmente cargada, es decir, cuando está a 12V y así calcular el voltaje suministrado por la batería donde el voltaje de la batería es igual al voltaje leído en el ADC por el cociente de la suma de las resistencias (20.2k ohmios) entre 8.2k ohmios. Con el valor del voltaje de la batería y con el valor de la corriente consumida por los motores se realizó el cálculo de la potencia consumida por el F-07.

Y para estimar el la autonomía de la batería se implementó el siguiente cálculo:

$$Duracion[m] = \frac{(60 * Ah)}{Cc} \qquad (2)$$

Donde Cc es la corriente consumida y Ah es la capacidad de la batería que para este caso es de 1.5Ah.

Fecha de envío:
Fecha de recepción:
Fecha de aceptación:

Todos estos datos obtenidos y calculados, es decir, la altura, las RPM, la corriente, el voltaje, la potencia, la autonomía de la batería y el ciclo útil del PWM que controla los motores, son visibles para el usuario en la interfaz y actualizados cada segundo.

2.3. Verificación del sistema del cuadricóptero F-07

En esta etapa se llevaron a cabo diferentes pruebas para encontrar errores en el proyecto. Primero se realizaron las pruebas de potencia de los motores donde inicialmente no se lograba conseguir que el F-07 levantará su peso de la superficie. Este test se realizó con diferentes baterías, en primer lugar se probó con un batería LiPo y los motores no lograban si quiera mover la estructura sobre la superficie en la que estaba el F-07, después se probó con una betería de moto y sucedió lo mismo, por último se empleó una de las fuentes del laboratorio de electrónica y se identificó como causa de este fallo la conexión utilizada, pues en este caso se usaron los conectores proporcionados por el laboratorio y esta vez los motores lograron mover la estructura sobre la superficie y se notó un ligero empuje venciendo la fuerza de la gravedad, sin embargo la corriente de la fuente no era suficiente para que el F-07 tomará vuelo, entonces se adquirió una batería LiPo de mayor capacidad de descarga, un par de conectores XT60 y cable multifilial número 14 para la conexión de la batería con la placa de potencia del F-07 y este problema fue solucionado.

Una vez todo en su lugar se probó que los motores fueran capaces de levantar su peso sumado al de la estructura, los sensores, la PSoC y la batería y se vio que el cuadricóptero inmediatamente tomaba vuelo se inclinaba hacia uno de los lados, parecía descompensado. Con el fin de dar solución a este problema se probó modificar los incrementos de las señales PWM independientemente y no en conjunto como se estaba haciendo, para esto se identificó

que dos motores empujaban con más fuerza que los otros dos, entonces se optó por reducir el incremento en la señal PWM de los dos motores con más fuerza para balancear la fuerza de los cuatro. Con este cambió se notó la mejoría y aunque aún el F-07 intentaba inclinarse hacia uno de los lados se procedió a seguir ajustando la señal de los dos motores hasta el punto en el cual cuadricóptero tomará vuelo lo más vertical posible y se obtuviera el estado hover, estado para el cual fue requerido aproximadamente el 25% de la capacidad del ciclo útil de la señal de control de los motores.

2.3.1. Modificación del sistema de control del cuadricóptero F-07

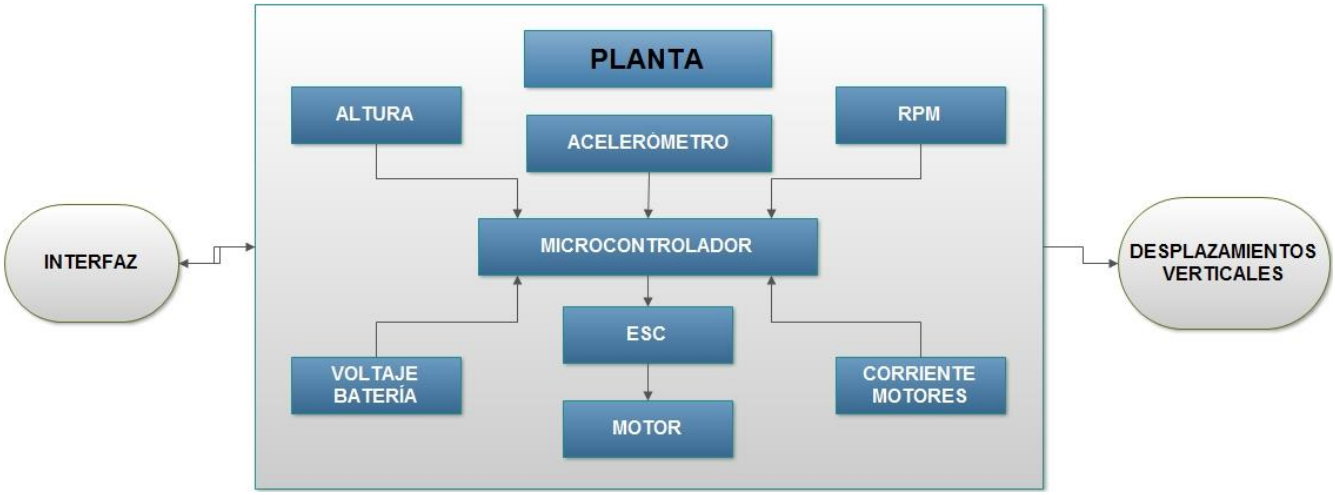


Figura 8. Sistema de control final del cuadricóptero F-07

A medida que el F-07 tomaba altura se hacía más inestable y se inclinaba hacia algún lado, por tanto se vio la necesidad de implementar el acelerómetro análogo MMA7361 de tres ejes (x, y, z) para detectar los cambios de inclinación en los dos ejes del cuadricóptero y con este dato corregir de manera automática la potencia de los motores para obtener el estado hover.

Según la hoja de datos[4] este acelerómetro basa su principio de funcionamiento en placas de condensadores variables, los cuales, poseen una superficie dieléctrica que se mueve entre sus dos placas para determinar la capacitancia de cada condensador según las fuerzas presentes. La diferencia capacitiva entre dos condensadores permite determinar la aceleración sobre cada eje, para esto cuenta con un ASIC (Application-Specific Integrated Circuit – Circuito

Fecha de envío:
Fecha de recepción:
Fecha de aceptación:

Integrado de Aplicación Especifica) el cual, utiliza técnicas de conmutación de capacitores para medir dicha diferencia y también condiciona y filtra la señal, proporcionando así una salida de voltaje lineal a la aceleración.

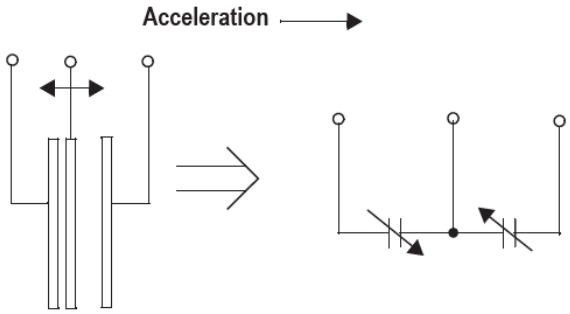


Figura 9. Sistema de control final del cuadricóptero F-07

Además, este acelerómetro permite detectar la caída libre, seleccionar dos sensibilidades (±1.5g y ±6g) y encenderlo o apagarlo. La resolución de este sensor para la sensibilidad de ±1.5g es de 800mV/g y para ±6g es de 206mV/g. Se decidió utilizar la primera configuración pues permite tener más sensibilidad.

Para determinar el ángulo de inclinación de los ejes de configuró tres pines como ADC en la PSoC para leer el voltaje de cada eje y teniendo en cuenta el sistema de referencia de un cuadricóptero de la Figura 10 se aplicó la siguiente fórmula para cálculos los grados de inclinación de los dos ejes:

$$\theta_a = \arctan\left(\frac{a}{z}\right) * \left(\frac{180}{\pi}\right) \qquad (3)$$

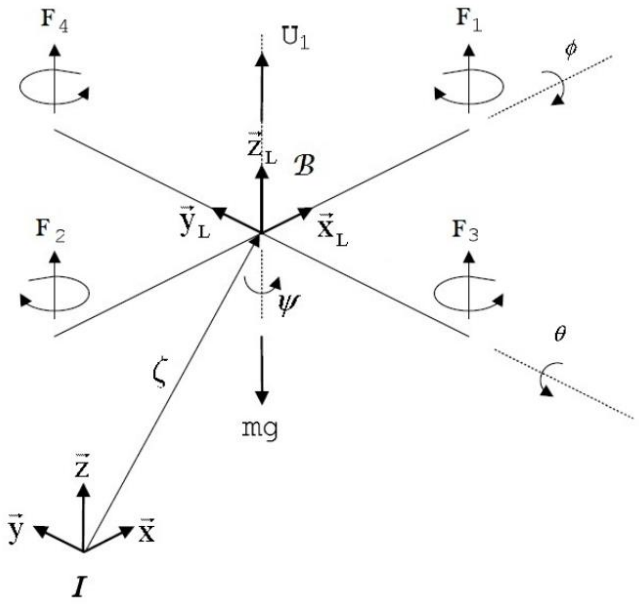
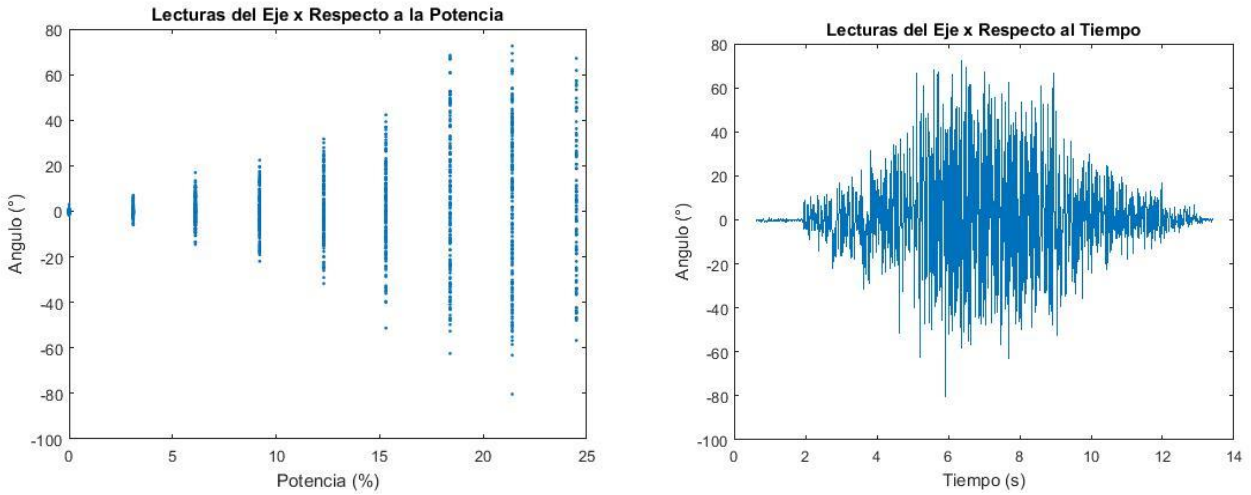


Figura 10. Sistema de referencia en el modelado dinámico de un cuadricóptero.

Donde corresponde al eje sobre el cual se hace la lectura, ya sea x o y. Dado el sentido del sensor en la estructura el eje x está asociado a los motores 2 y 4 y el eje y está asociado a los motores 1 y 3. Cuando el ángulo del eje x es negativo incremento la potencia del motor 2 aumentando el ciclo útil de su señal de control y decremento la potencia del motor 4 reduciendo el ciclo útil de su señal de control y viceversa cuando es positiva, y para el eje y cuando su ángulo es negativo aumento el ciclo útil de la señal de control del motor 3 y reduzco el ciclo útil de la señal de control del motor 1 y viceversa cuando es positiva y así controlar de forma automática la potencia de cada motor. Este control se realiza cada 10ms con el fin de brindar más estabilidad al estado hover del F-07.

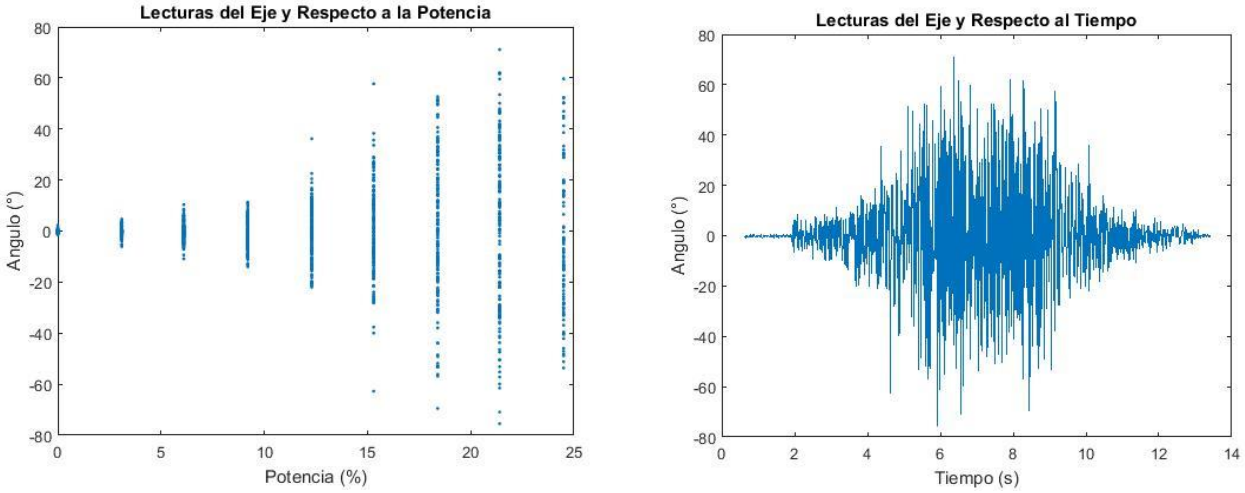
Sin embargo, después de realizar esta implementación no se obtuvo el resultado esperado, es decir, no se llegó al estado de navegación hover. Se identificó que el acelerómetro está perturbado por las constantes vibraciones que generan los cuatro motores, las cuales se propagan a través de los ejes hasta el centro de la estructura donde se encuentra el acelerómetro, esto ocasiona que los datos proporcionados por este sensor sean erróneos como se muestra en las siguientes gráficas.

Fecha de envío:
Fecha de recepción:
Fecha de aceptación:



(a) **(b)**

Figura 11. Lecturas del acelerómetro en el eje x respecto a la potencia (a) y al tiempo (b).



(a) **(b)**

Figura 12. Lecturas del acelerómetro en el eje y respecto a la potencia (a) y al tiempo (b).

En la Figura 11 y en la Figura 12 se puede identificar que tanto en el eje x como en eje y las lecturas realizadas por el acelerómetro se ven totalmente perturbadas a medida que la potencia de los motores es incrementada, es decir, cuanta más potencia tienen los motores más grande es el error presente en las lecturas del sensor y por tanto, el control sobre los

ángulos mencionado anteriormente no permite que el F-07 logre el estado de navegación hover.

La autonomía de la batería depende de la cantidad de energía consumida por los motores, por tanto con la fórmula 2, expresada anteriormente no se estaba obteniendo una estimación de la autonomía de la batería, pues sólo tiene en cuenta el consumo de la corriente más no del voltaje. Entonces para estimar la autonomía de la batería se optó por calcular la energía consumida por los motores a determinados intervalos de tiempo utilizando la potencia ya calculada. Se identificó que las lecturas de corriente presentaban picos al momento de realizar un incremento en el ciclo útil de la señal PWM, entonces se decidió calcular potencias instantáneas con las cuales se obtuvo la energía consumida durante 10 segundos, es decir, se toman 10 muestras de la energía consumida para luego promediarlas y este valor es aproximadamente la energía consumida durante los últimos 10 segundos. Luego para estimar el tiempo se sustrajo este valor de energía promedio consumida a la energía total de la batería, la cual corresponde al producto del voltaje total de la batería por su capacidad y por el tiempo, es decir:

$$Et = Vb * Ah * 60 \qquad (4)$$

Y por último se realizó el cociente entre el valor obtenido de la anterior sustracción y la potencia consumida para así estimar el tiempo de autonomía de la batería.

Fecha de envío:
Fecha de recepción:
Fecha de aceptación:

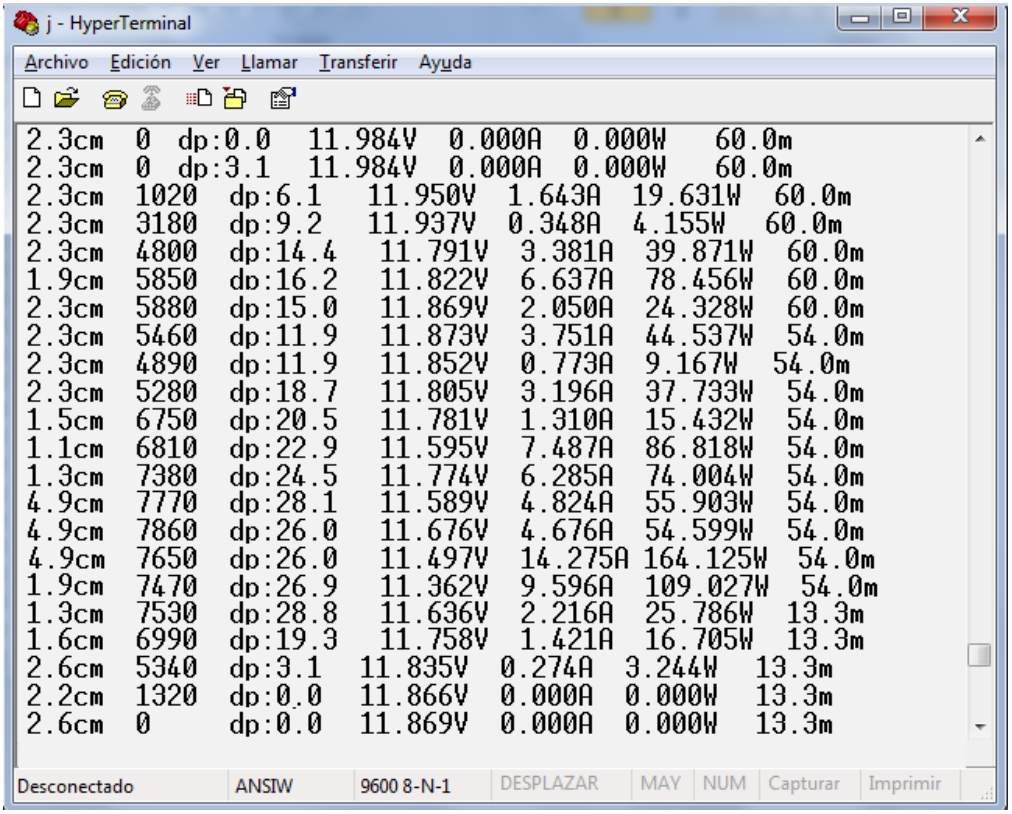


Figura 13. Ventana de hyperterminal con datos de una de las pruebas realizadas.

En la Figura 13 se puede ver los datos obtenidos del F-07 durante su funcionamiento en una de las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del sistema de control. Esta prueba, como las otras pruebas de funcionamiento, se realizaron por medio de una ventana hyperterminal. Las columnas de izquierda a derecha corresponden a los siguientes datos: altura, RPM, porcentaje del ciclo útil, voltaje de la batería, corriente de los motores, potencia de los motores y tiempo estimado de la batería. De esta forma y observando el cuadricóptero se determinaron cuales eran los cambios necesarios en el sistema mencionados anteriormente.

3 Conclusiones

3.1. Los motores brushless, a pesar de ser todos de las mismas características no son iguales debido a la estructura interna de cada uno. Lo cual llevo al rediseño del control de la velocidad de cada uno de los motores para lograr balancear la fuerza de los estos en la estructura.

3.2. La base del buen funcionamiento de un cuadricóptero está en la correcta selección de los materiales a utilizar, porque se debe garantizar que el peso a levantar por los motores no va a superar la capacidad de estos.

3.3. La selección de la batería y de los ESC's está basada en las características de los motores con el fin de garantizar la operación de los mismos y teniendo en cuenta que los ESC's se encargan de la potencia de un cuadricóptero es recomendable que tengan más capacidad que los motores para prevenir algún daño.

3.4. La autonomía de la batería depende del consumo de los motores, por tanto para prolongar este tiempo se debe buscar el mínimo peso posible de los materiales sin dejar de lado la resistencia y calidad de los mismos.

3.5. La señal PWM generada en la PSoC con una resolución de 16 bits en vez de 8 bits permitió un mejor control de la velocidad de los motores y por ende de la potencia consumida.

3.6. La implementación de la interfaz en código abierto permite el desarrollo de este proyecto en otros dispositivos. La interfaz fue desarrollada pensando en la facilidad de operación del cuadricóptero F-07 para el usuario.

3.7. A pesar de la implementación del acelerómetro para tener un mejor control sobre los motores y el balanceo de su potencia, el F-07 no alcanzó el estado hover debido a la perturbación que generan las vibraciones de los motores en la estructura sobre el acelerómetro.

3.8. Todas las hélices deben tener el mismo desgaste, de lo contrario, la hélice con mayor desgaste tendrá menos capacidad de empuje y el cuadricóptero se inclinará sobre este motor.

Referencias

[1] A. Sokolov, “JSSC,” 2014. [Online]. Available: https://github.com/scream3r/java-simple-serial-connector/releases. [Accessed: 31-Jan-2016].

[2] Indoware, “Ultrasonic Ranging Module HC - SR04,” *Datasheet*, pp. 1–4, 2013.

[3] A. MicroSystems, “Acs712,” *Datasheet*, pp. 1–15, 2012.

[4] Freescale Semiconductor, “Micromachined Accelerometer MMA7361L,” *Sensors (Peterborough, NH). Retrieved from http//www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361L.pdf*, pp. 1–11, 2008.