

Adición y Calibración de Sensores para un Cuadrotor

Gabriel Infante, Jeremías Báez Carballo, Federico Díaz Báez, Cristian David Cavenio

Departamento de Ingeniería Electrónica

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Córdoba

{g.o.infante, jere.baez91, f.diazbaez, cristian.cavenio}@gmail.com

Resumen—La utilización de vehículos aéreos no tripulados está muy difundida hoy en día dado que los mismos permiten realizar una gran cantidad de actividades con un riesgo humano mínimo. Los más utilizados son los cuadrotoros, dado que tienen un diseño sencillo, son estables y fáciles de controlar. En el presente trabajo se busca, por un lado, calibrar el juego de sensores compuesto por acelerómetros, magnetómetro, sensor de ultrasonido y barómetro de modo de proveer las señales necesarias para estimar la orientación y la altura; y por otro, desarrollar el sistema de control de altura y orientación en yaw. Todo el trabajo se realiza sobre un cuadrotor desarrollado íntegramente en el Centro de Investigación en Informática para la Ingeniería (CIII) sobre uno de los modelos construidos dentro del proyecto Cuadrotor Autónomo de Arquitectura Abierta (QA3).

I. INTRODUCCIÓN

El auge de la utilización de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para el desarrollo de tareas en el campo de la investigación reside principalmente en que son más económicos, y permiten una gran variedad de experimentos con mínimo riesgo humano. Dentro de la categoría de los UAV se encuentran los cuadrotoros, los cuales poseen características atractivas para numerosos experimentos, como lo son su bajo costo, sencillo diseño, versatilidad y mínimo mantenimiento. La utilización de este tipo de equipos cuenta con el interesante reto de realizar un sistema de control para que el cuadrotor tenga la capacidad de ejecutar tareas con la mínima intervención humana posible.

El diagrama de cuerpo libre característico de este tipo de vehículos se puede observar en la Fig.1, sobre la cual se pueden analizar los grados de libertad intervinientes y que deben ser tenidos en cuenta para el desarrollo del sistema de control. También se observan las direcciones de giro de cada motor para permitir el vuelo del cuadrotor.

La estabilidad en cada uno de los grados de libertad de orientación se alcanza cuando el módulo de todas las velocidades angulares son iguales con la dirección indicada, lo que indirectamente implica que un pequeño desbalance entre dos motores permitirá definir un nuevo ángulo, ajustando de este modo la orientación del cuadrotor.

En la Fig.2 se puede observar los distintos casos que pueden presentarse según las diferencias de velocidad angular para ajustar en la dirección de pitch (ϕ), yaw (ψ) y roll (θ). En la Fig.2a se tiene la plataforma estabilizada, mientras que en la Fig.2b se puede observar el movimiento en la dirección de ϕ debida a la modificación de la velocidad angular sobre los motores ubicados en la misma línea de acción, manteniendo invariables los dos restantes. Dicha diferencia se encuentra representada según la intensidad del indicador de dirección de rotación. Análogamente, se puede observar en las Fig. 2.c y 2.d en sus respectivas direcciones.

La necesidad de tener dos motores con giro horario y dos en antihorario existe debido a la torsión que genera cada motor y que se proyecta sobre el cuerpo central del cuadrotor, lo que hace que se produzca una rotación sobre ψ , dependiente del sentido de rotación del motor. Con esta disposición los efectos se cancelan por pares acción-reacción, de lo contrario sería muy difícil lograr un vuelo estacionario.

El presente trabajo se lleva a cabo dentro del Centro de Investigación en Informática para la Ingeniería (CIII), y consiste en la mejora de un cuadrotor construido con anterioridad. Inicialmente esta plataforma fue diseñada y desarrollada dentro del marco de una tesis de grado de Ingeniería Electrónica en el año 2011 [1], dentro de la cual se alcanzó un prototipo con estabilización utilizando giróscopos y acelerómetros. Previa a la etapa de control, se encontraba un filtro complementario [2] para mejorar las lecturas provenientes de los sensores. Junto con este prototipo se desarrolló el banco de pruebas que permitió, en una primera instancia, caracterizar la planta para establecer los algoritmos de control. Éstos últimos estaban conformados por dos lazos dobles anidados, uno interno de velocidad, y otro externo de orientación, los cuales estabilizaban la plataforma en las direcciones de pitch (ϕ) y roll (θ). El conjunto contaba con un hardware basado en un microcontrolador de núcleo ARM 7 de 32 bits sin unidad de punto flotante.

Las siguientes versiones del cuadrotor se llevaron a cabo como parte de un proyecto de investigación del mismo Centro [3]. Además de las numerosas versiones construidas, dentro de este proyecto se migró del antiguo hardware a una nueva plataforma basada en el microcontrolador LPC1769 que dispone de un núcleo ARM Cortex-M3 de 32 bits, una mayor cantidad de puertos y periféricos y se encuentra disponible en el mercado local. Además está soportado por el estándar CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard [4]), lo que permite la abstracción de hardware facilitando las migraciones o mejoras futuras. También se realizaron optimizaciones referidas al control, mejorando la sintonización de los algoritmos, y adecuándolas en función de cada modelo. En cuanto a la sensorística, se comenzó a utilizar una nueva unidad inercial, la cual además de giróscopos y acelerómetros, cuenta con un magnetómetro y un barómetro sobre la misma unidad, aunque estos últimos no fueron implementados por software en aquel momento. En el último período del proyecto se llegaron a hacer pruebas de banco con un nuevo algoritmo de estimación utilizando filtrado bayesiano, únicamente sobre pitch y roll, basado en las lecturas de los acelerómetros y giróscopos [5].

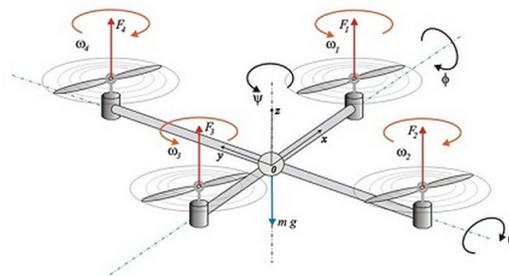


Fig. 1: Esquema de cuerpo libre y grados de libertad angular de un cuadrotor.

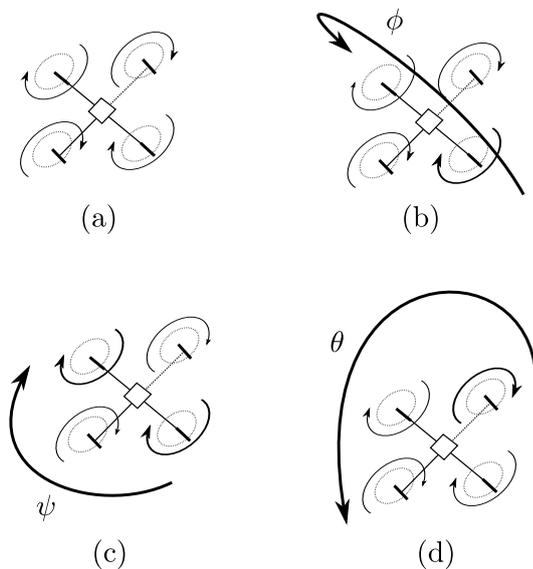


Fig. 2: Vista en perspectiva de (a) cuadrotor estabilizado, (b) movimiento en pitch, (c) yaw y (d) roll.

Uno de todos los modelos construidos es el llamado QA3-mini que se muestra en la Fig.3 y es el utilizado en la actualidad. Este trabajo viene a complementar el desarrollo ya existente, agregando a la plataforma ya descrita, la utilización de magnetómetro para la estimación de orientación sobre yaw (ψ), la implementación de un filtrado que fusione este sensor junto a los giróscopos y acelerómetros ya implementados. Además se utilizará el barómetro para la estimación de altura junto con un nuevo sensor de ultrasonidos, otorgándole al equipo la posibilidad de aterrizar, despegar y mantenerse en una altura deseada en forma autónoma, para lo cual será necesaria la modificación y el reajuste de los lazos de control.

Una noción simplista del desarrollo se puede observar en la Fig.4 donde se anotan las librerías referidas a los sensores y los actuadores ESC (del inglés *Electronic Speed Controller*) para los motores *brushless*. Dentro de la arquitectura del software se destacan las etapas de calibración de los sensores, su posterior entrada a los filtros estimadores de Kalman y aplicación a la etapa final de control de los actuadores.

En el siguiente trabajo se muestran los sistemas de control existentes y los nuevos implementados; los diferentes sensores utilizados, sus calibraciones y algunos resultados.



Fig. 3: Aspecto físico del QA3 mini.

II. ESQUEMA GENERAL DE CONTROL

El manejo del cuadrotor se hace por medio de un joystick que posee un canal de comunicación para cada uno de los ángulos yaw,

roll y pitch, además del control de *throttle* necesario para generar el empuje suficiente que permita mantener el UAV con una altura deseada.

Para mejorar la respuesta dinámica y el comportamiento en vuelo se han aplicado sobre cada uno de los grados de libertad, algoritmos de control, PI para la posición y PD para la velocidad, anidados entre si. El sistema se compone entonces de tres lazos dobles, cuya referencia de orientación se obtiene del joystick y se realimentan de la orientación estimada por el EKF.

La sintonización de los lazos de control se realizó en primera instancia sobre un banco de pruebas en tierra, al igual que el ajuste y calibración de los sensores, ya que sin los lazos de control sintonizados el vuelo es imposible. El mismo cuenta con dos grados de libertad sobre pitch y roll, haciendo posible realizar las calibraciones mínimas necesarias para aproximar la sintonización de los lazos de control, sin que el cuadrotor ni los desarrolladores sufran daños en el proceso.

Cuando las constantes de calibración de los lazos produjeron respuestas aceptables de estabilización, se pasaron a las pruebas de campo manteniendo el cuadrotor sobre una superficie elástica, que hacía las veces de contención, para impedir impactos indeseados o caídas inesperadas. En la Fig.6 se observa una de las pruebas realizadas indoor.

Durante esta etapa de desarrollo se recolectó la mayor cantidad de información posible proveniente de los sensores, a fin de observar la calidad del filtrado y de la estimación, así como también los efectos que sólo aparecen con el vehículo en pleno vuelo y que no pueden ser apreciados sobre el banco de pruebas.

Desde la utilización del banco de trabajo, incluyendo la etapa del vuelo, se utilizó el software *QGroundControl*. Este es un proyecto de software libre que sirve como estación terrena para vehículos aéreos, acuáticos o terrestres no tripulados. Este programa permite, entre otras cosas, ajustar las constantes de los PID y recopilar datos provenientes de los sensores a bordo. La comunicación *QGroundControl*-autopiloto se realiza a través del protocolo MavLink (del inglés: Micro Air Vehicle Link). En la Fig.7 se observa la interfaz de *QGroundControl* durante telemetría en vuelo.

II-A. Control de hovering

El sistema de control de hovering esta formado por cuatro lazos de control paralelo, de los cuales uno es un lazo de control simple de posición que se encarga del control de la altura del UAV, y los tres restantes son lazos de control doble de posición y velocidad

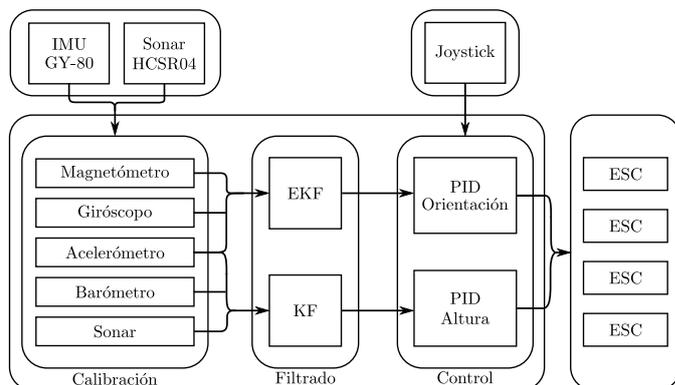


Fig. 4: Arquitectura de software implementado

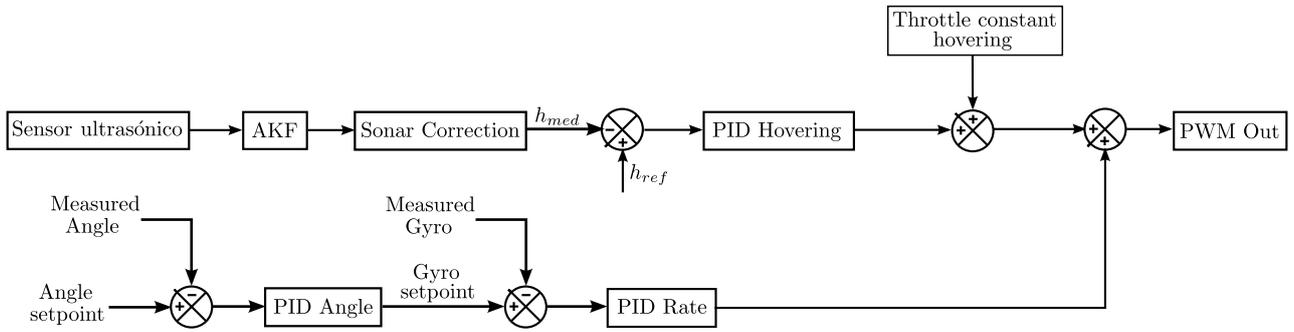


Fig. 5: Estructura generales de control implementadas sobre la plataforma.



Fig. 6: QA3 mini en pruebas indoor.



Fig. 7: Captura de pantalla de QGroundControl durante telemetría en vuelo.

angular, encargados de controlar la orientación del UAV. En la Fig.5 se observa el lazo de control de altura.

La principal referencia del sistema es la altura a la que se desea mantener el *hovering* (h_{ref}), que entra al lazo de control realimentado por la altura medida por el sensor ultrasónico filtrada y convertida (h'_{med}) como se menciona en el apartado III-D. La salida de este lazo de control de altura, se le suma a una constante de throttle, necesaria

para que se genere a la salida un empuje constante que compense el peso del UAV, de manera que las variaciones del lazo de control puedan modificar el empuje moderadamente para llegar a corregir el error de altura.

La referencia secundaria del sistema es el control de los ángulos de pitch, roll y yaw, con un setpoint fijo de cero grados para los primeros dos, para que el UAV se mantenga haciendo *hovering* en un plano paralelo al piso. El setpoint de yaw se puede variar para que el UAV mantenga la orientación de yaw que se requiera. El lazo de control de cada grado de libertad es doble, y análogo para todos. En una primera instancia se busca corregir el error angular y se genera la velocidad angular necesaria (gyro) teniendo como realimentación el ángulo actual, proveniente del EKF. En el segundo bloque PID se busca corregir el error de la velocidad angular, realimentando el valor proveniente del giroscopo y comparándolo con el valor generado por el bloque anterior, y generando el porcentaje de variación de PWM para que los ESC realicen la corrección física.

La salida de los cuatro lazos de control finalmente se suman y restan de manera ponderada para lograr que se reflejen todos los efectos de control al asignar los valores de PWM generados por todo el sistema sobre los ESC. Esta ponderación limita la salida de los tres controladores PID angulares, ya que la corrección que estos deben realizar se refleja de manera diferencial sobre el PWM asignado a cada motor como se vio previamente en la Fig.2, y de no estar limitados podrían comprometer la estabilidad del sistema.

II-B. Estimación y fusión de sensores

Cada lazo de control necesita una señal de realimentación de la variable que se está controlando. Así, por ejemplo el sistema de control del ángulo yaw requiere una realimentación del estado actual del sistema. Debido a que el estado no puede medirse directamente, se utiliza un estimador de estado. Este estado está conformado por la orientación (yaw, roll, pitch) y la altura a la que se encuentra el UAV. El estimador fusiona los distintos sensores disponibles a bordo. Para estimar la orientación se utilizan las mediciones provenientes de los giróscopos, acelerómetros y del magnetómetro, mientras que para estimar la altura se utilizan las lecturas de los acelerómetros y del barómetro o del sensor ultrasónico dependiendo de la altura de operación del cuadrotor.

III. SENSORES

Para la estimación de la orientación se utiliza un filtro extendido de kalman (EKF) como el desarrollado en [5]. Para el correcto funcionamiento del mismo, es necesario calibrar los sensores que intervienen en el proceso, de modo de obtener lecturas que se condigan con las magnitudes físicas reales y al sistema de coordenadas definido sobre el cuadrotor. Además, un filtro de Kalman requiere que se conozcan

los parámetros estadísticos del ruido presente en las mediciones. Dado que el mismo se considera gaussiano, solo es necesario determinar su varianza, ya que la media es asume cero.

En los siguientes apartados se describen configuraciones, características, calibraciones y caracterizaciones realizadas a cada uno de los sensores.

III-A. Acelerómetros

Los acelerómetros utilizados están integrados en el ADXL345 [6]. Este cuenta con 3 ejes de medición (x, y, z). Cuenta con la posibilidad de obtener lecturas a una tasa máxima de 3200Hz pero la precisión de la medición resulta ser muy baja. Para mejorar la precisión, internamente, el sensor cuenta con filtros pasa bajos configurables a distintas frecuencias de corte. Una disminución en el ancho de banda, trae aparejada una menor tasa de refresco.

Dado que la tasa de refresco máxima de los actuadores (ESC) es 400Hz, la configuración óptima en nuestro sistema se corresponde con esta tasa de refresco, lo que limita el ancho de banda a 200Hz según el fabricante [6]. Se configuró un rango dinámico de $\pm 8g$.

Durante la fabricación y montaje del sensor sobre la placa de circuito impreso (PCB) se producen errores, como por ejemplo desalineación del sensor con su encapsulado, o de este último con la PCB. Esto se traduce en una relación de conversión *cuentas de ADC-gravedad* distinta a la dada por el fabricante (0.04 g/cuentas) y *offsets* en todos los ejes de medición, haciendo necesario llevar a cabo una calibración. El método aquí mostrado está basado en un modelo lineal de 6 elementos [7] que se corresponden con ganancias y *offsets*. Es decir, este método considera las mediciones obtenidas en cada eje independientes entre sí.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x & 0 & 0 \\ 0 & G_y & 0 \\ 0 & 0 & G_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ADC_x \\ ADC_y \\ ADC_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde a_x, a_y, a_z, q_x, q_y y q_z están expresados en g .

Para determinar las 6 constantes se realizan 6 mediciones. Sistemáticamente se miden los valores crudos entregados por el conversor analógico-digital sometiendo a cada eje a aceleraciones de $1g$ y $-1g$. Por ejemplo, para el caso del eje x se tiene

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ADC_{x_{1g}} & 1 \\ ADC_{x_{-1g}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_x \\ q_x \end{bmatrix}$$

Donde $ADC_{x_{1g}}$ y $ADC_{x_{-1g}}$ son las lecturas del ADC en el eje x cuando es sometido a aceleraciones de $1g$ y $-1g$, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} ADC_{x_{1g}} & 1 \\ ADC_{x_{-1g}} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x \\ q_x \end{bmatrix} \quad (2)$$

Finalmente, las matrices de ganancias y *offsets* obtenidas son:

$$G = \begin{bmatrix} 0,003389 & 0 & 0 \\ 0 & 0,003342 & 0 \\ 0 & 0 & 0,003891 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$q = \begin{bmatrix} -0,964192 \\ -0,365995 \\ -4,551956 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Cada vez que hay disponibles nuevos datos del sensor se realiza la transformación lineal aquí descrita.

III-B. Magnetómetro

El sensor utilizado es el HMC5883L [8]. Los distintos valores de campo capaz de medir varían de $\pm 0,88$ a $\pm 8,1G$, afectando la resolución disponible. En esta aplicación el sensor se va a usar solo para medir el campo terrestre. La magnitud de dicho campo varía,

dependiendo de la ubicación, desde 0,2 hasta 0,65G. En la ciudad de Córdoba este valor es de alrededor de 0,24G [9]. Luego, se configura el sensor para que trabaje en el rango $\pm 0,88G$, obteniendo así, la mayor resolución posible.

Cuando un sensor magnetómetro es utilizado en un espacio abierto sin la influencia de elementos ferromagnéticos, no se producen distorsiones en el campo magnético terrestre. Sin embargo, en la realidad los sensores se utilizan indefectiblemente en presencia de materiales ferrosos como así también de conductores por los que circula corriente. Las construcciones (debido a la gran cantidad de hierro presente en las columnas), postes de luz, composición del suelo, etc, también producen deformaciones, aunque en menor medida. Otro factor influyente son los materiales ferromagnéticos y las redes de distribución de energía montados sobre el cuerpo del cuadrotor.

Estas situaciones hacen necesaria una calibración del sensor para que sus mediciones se condigan con la realidad. La rutina de calibración que aquí se muestra, solo comprende a los ejes x e y , debido a que la información sobre el ángulo *yaw* está disponible en las lecturas de dichos ejes. Las lecturas en el eje z no se utilizan.

Este método consiste en leer los valores crudos obtenidos por el sensor mientras se realizan giros en un plano paralelo al suelo. En nuestro caso, luego de realizar 4 vueltas se obtuvo la gráfica que se muestra en la Fig. 8a. En ella se observan las mediciones de los ejes x e y . Estas deberían verse como dos sinusoidales desfasadas pero con el mismo valor medio (cercano a 0).

Luego se aplica el método descrito en [10], que determina el *offset* en cada eje a partir de los valores máximos y mínimos obtenidos en cada eje.

Luego, se realiza nuevamente el ensayo pero teniendo en cuenta los *offsets* calculados. La gráfica obtenida anteriormente sin calibración se muestra, ahora con calibración en la Fig. 8b.

III-C. Barómetro

El sensor utilizado es el BMP085 [11], que es en esencia un medidor de presión absoluta. Utilizando la fórmula barométrica internacional (5) es posible determinar la altura relativa a un punto si se conocen las presiones absolutas en ambos puntos.

$$h = 44330 \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5,255}} \right) \quad (5)$$

donde h es la altura relativa al punto de presión p_0 , medida en metros.

En cuanto a la configuración del sensor, se puede elegir entre 4 modos de trabajo: *ultra bajo consumo*, *estándar*, *alta resolución* y *ultra alta resolución*. La elección de cada uno de ellos determina la velocidad de salida de los datos y la resolución. En nuestro caso, el modo de trabajo elegido es el modo *alta resolución*, ya que ofrece un equilibrio entre velocidad de refresco (74Hz) y resolución.

III-D. Sensor de ultrasonido

El sensor utilizado es el HCSR04 [12]. El principio de funcionamiento consiste en emitir un pulso de ultrasonido durante un tiempo determinado (alrededor de $12\mu s$). A la salida se obtiene un pulso con un tiempo de alto proporcional a la distancia a la que el pulso colisiona y retorna al sensor. De esta manera, con este tiempo se puede calcular la distancia al objeto más cercano.

La función primaria de este sensor es la de posibilitar el control de hovering a bajas alturas, ya que está montado para medir la distancia normal al piso desde el cuadrotor. Sin embargo, se necesita hacer una corrección previa a la asignación de la altura, ya que si el UAV

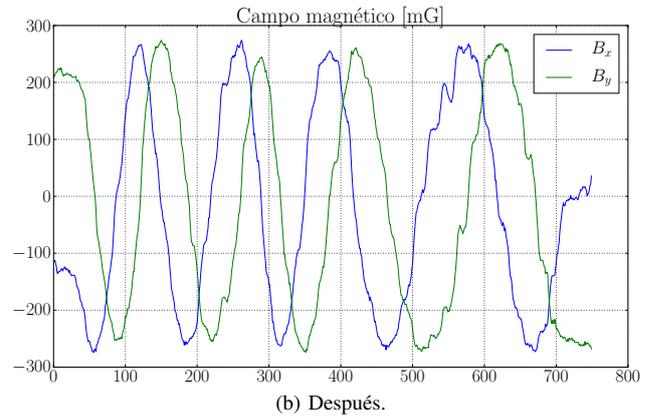
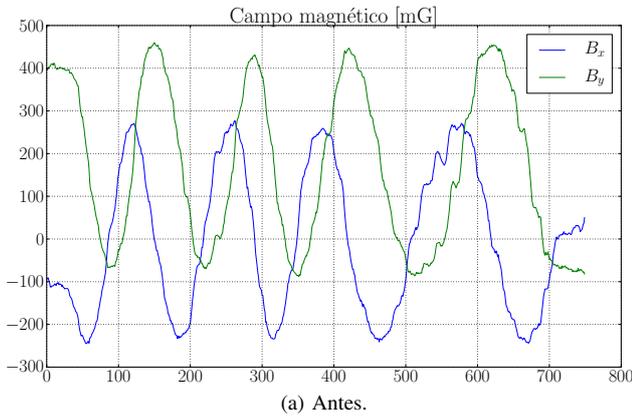


Fig. 8: Comparación del campo magnético obtenido antes y después de la calibración.

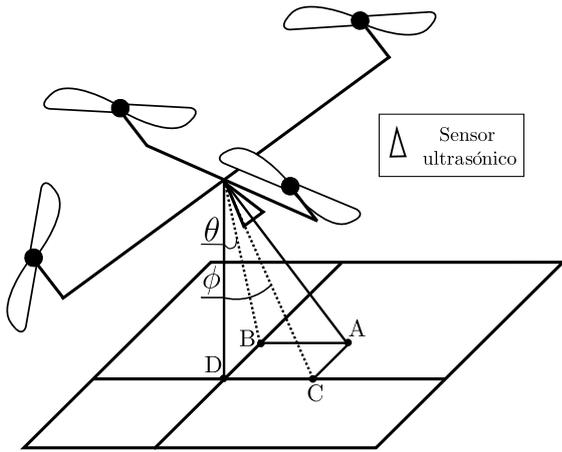


Fig. 9: Corrección del error de altura medida debido a la orientación

no se encuentra en un plano paralelo al piso, no se estaría midiendo la altura real, sino la distancia a un punto arbitrario del piso. En la Fig.9 se puede observar un diagrama que muestra el problema y su corrección.

Se debe trasladar la distancia medida al punto A mediante un cálculo trigonométrico, que utilizando los ángulos de pitch y roll, nos traslade a los ejes x e y, con respecto al sistema de coordenadas del cuadrotor, para así obtener el valor de la altura real, que sería la distancia al punto D. En la ecuación 6 se muestra el cálculo de corrección implementado sobre el autopiloto.

$$h'_{med} = h_{med} * \cos(\theta) * \cos(\phi) \quad (6)$$

Con esta corrección se puede asegurar que el sensor ultrasónico, dentro de un margen razonable, nos permita conocer la distancia al plano del piso para su correcto control.

IV. EVALUACIÓN Y RESULTADOS

En la Fig. 10 se observa la implementación del lazo de control de ángulo yaw durante un vuelo de prueba de aproximadamente 2 minutos de duración. En el gráfico se muestra el set point, como así también la estimación del EKF. El set point era obtenido del joystick controlado por el piloto.

En la Fig. 11 se observan los datos crudos provenientes del sensor de ultrasonido durante un vuelo de elevación a una altura de dos metros y luego un descenso. En un principio las mediciones en vacío del sensor, sin el cuadrotor en vuelo mostraban una salida correcta

hasta los dos metros. Luego de las pruebas experimentales con el cuadrotor con los motores encendidos se llegó a la conclusión, luego de descartar los ruidos eléctricos y mecánicos, de que la turbulencia del aire provocada por los motores en funcionamiento produce que el sensor permanezca midiendo una altura errónea de 60cm cuando el cuadrotor se eleva por encima de este valor.

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló el sistema de control de yaw para el cuadrotor de arquitectura abierta (QA3) y se calibraron los sensores requeridos para el control y la estimación de orientación.

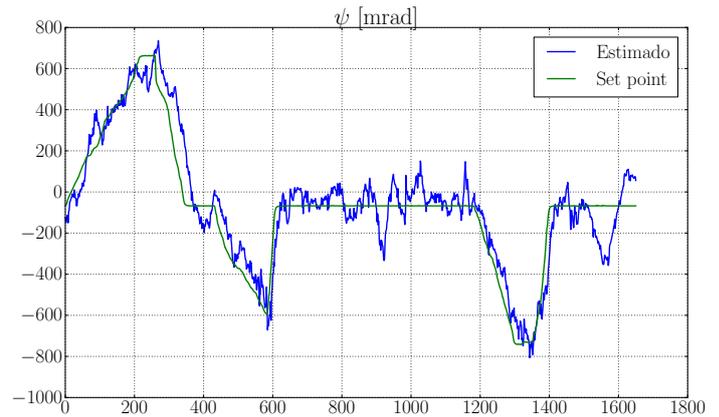


Fig. 10: Implementación de lazo de control yaw.

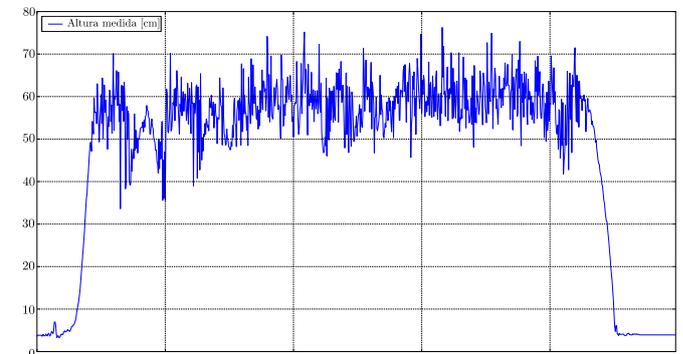


Fig. 11: Datos crudos obtenidos del sensor ultrasónico.

En cuanto a la calibración de los sensores utilizados, no se presentaron mayores complicaciones, dado que los métodos de calibración utilizados son sencillos. Particularmente en la calibración del magnetómetro se presentó una dificultad a la hora de determinar la dirección del norte magnético terrestre, dado que el campo varía notablemente con cualquier material ferromagnético que se encuentre en las cercanías. Para solventar este problema, la calibración debió ser realizada en un área a cielo abierto.

A la hora de calibrar el sistema de control de altura, se tuvo en cuenta que la realimentación de altura se puede realizar por medio del sensor de ultrasonidos o mediante el barómetro, lo que llevó a realizar dos calibraciones diferentes, dado que los errores y sensibilidades que presentan cada uno de los sensores son muy diferentes. Una de las calibraciones sirve para realizar tareas de precisión mediante la realimentación del sensor de ultrasonidos, como lo son el despegue y el aterrizaje. La otra es para el vuelo exterior y a mayores alturas, donde es viable utilizar el barómetro como realimentación.

La calibración general de todo el sistema se logró con éxito, obteniendo como resultado una plataforma funcional, de manejo sencillo y con la posibilidad de realizar un vuelo estacionario en un ambiente interior.

Como trabajo futuro se propone la integración de un sistema posicionamiento global (GPS) para permitir la realización de tareas autónomas como trasladar una carga útil entre dos ubicaciones y permitir la funcionalidad clásica de regresar al punto de partida. También se propone la integración de un sistema de estimación de posición por flujo óptico, utilizando una cámara a bordo y procesando los datos in situ con la inclusión de una unidad de procesamiento gráfico (GPU), o transmitiendo por RF los datos obtenidos a tierra, para disminuir los costos y el tamaño de cada módulo, haciendo posible la construcción de nuevos módulos para investigaciones que involucren varios cuadrotoros.

En lo que respecta al problema del sensor de ultrasonido implementado, las posibles soluciones son cambiar el transductor utilizado, cambiándolo por uno que funcione a una mayor frecuencia y con mayor potencia para poder evitar que el cambio de medio al medio turbulento produzca el error de medición. La otra solución posible es alejar los motores del centro del cuadrotor, para alejar los conos de turbulencia. Finalmente se plantea como posible ampliación medir la altura con un láser en cruz y una cámara orientadas hacia el piso.

REFERENCIAS

- [1] J. Redolfi and A. Henze, "Quadricóptero de arquitectura abierta," Master's thesis, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba, 2011.
- [2] D. Gaydou, J. Redolfi, and A. Henze, "Filtro complementario para estimación de actitud aplicado al controlador embebido de un cuatrorrotor," in *Proceedings of the Argentine Conference on Embedded Systems (CASE)*, 2011.
- [3] D. Gaydou, "Quadrotor autónomo de arquitectura abierta," 2011-2013, ciii.frc.utn.edu.ar/ProyPID2011QA3.
- [4] Cortex microcontroller software interface standard (cmsis). [Online]. Available: www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/group__group_matrix.html
- [5] C. Paz, G. Infante, J. B. Carballo, F. D. Báez, and C. Cavenio, "Implementación de un filtro extendido de kalman para la estimación de la orientación de un uav utilizando el estándar cmsis," in *Proceedings of the Microelectrónica Aplicada*, 2014.
- [6] *Digital Accelerometer, ADXL345 Datasheet*, Analog Devices.
- [7] M. Pedley, *High Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometer*, Freescale Semiconductor.
- [8] *Digital Compass IC, HMC5883L Datasheet*, Honeywell.
- [9] Earth's magnetic field. [Online]. Available: en.wikipedia.org/wiki/Earth's_magnetic_field#Geographical_variation
- [10] M. J. Caruso, *Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems*, Honeywell.
- [11] *Digital Pressure Sensor, BMP085 Datasheet*, Bosch.
- [12] *HC-SR04 Ultrasonic Sensor - Product's User Manual*, Cytron Technologies.