

SISTEMA DE NAVEGACIÓN, GUIADO Y CONTROL PARA UN VANT MULTIROTOR

C. Pose^a, J. Giribet^{a,b}, J. Choclin^a y A. Ghersin^{c,a}

^a Grupo de Procesamiento de Señales, Identificación y Control
Departamento de Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires
Paseo Colón 850, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

^b Instituto Argentino de Matemática – CONICET

^c Departamento de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Buenos Aires
Madero 399, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

RESUMEN

Se presenta el diseño del sistema de navegación, guiado y control para un vehículo aéreo no tripulado capaz de volar en forma autónoma. La estabilización del vehículo, un helicóptero de seis rotores, se consigue a través de un lazo de control que estima la inclinación del mismo en dos ejes, ejerciendo empuje vertical y torques de control regulando las velocidades de giro de los motores. Este lazo, implementado en un micro-controlador de 32 bits a bajo nivel, estima la inclinación en base a una unidad de mediciones inerciales, la cual, junto con un magnetómetro, un receptor GPS y una cámara, permiten llevar a cabo la navegación del helicóptero, utilizando un algoritmo de navegación integrada. Este algoritmo, es implementado en una computadora embebida de nivel superior, la cual además, se encarga de la ejecución de un algoritmo de guiado, y de las comunicaciones e interacción con la estación terrena. La interfaz con el usuario es implementada en una estación de tierra multifuncional.

Palabras Clave: VANT, navegación integrada, control de orientación.

INTRODUCCIÓN

Un hexarotor es un helicóptero dotado de seis conjuntos motor-hélice que generan empuje de aire; la capacidad de ejercer torques de control sobre el vehículo, es resultado de la diferencia de empuje que se puede hacer realizar a los motores. Puede decirse que como sistema de control es subactuado, ya que para variar la posición del vehículo es necesario aplicar un cambio en la inclinación del mismo, en cabeceo y/o rolido. Por otro lado, cualquier cambio en la inclinación generará un cambio en la posición del vehículo.

En la Figura 2(b), puede verse una fotografía de un hexarotor DJI F550 utilizado para mostrar el diseño del sistema de navegación, guiado y control (NGC) llevado a cabo por el Grupo de Procesamiento de Señales Identificación y Control (GPSIC) del Departamento de Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad UBA (FIUBA). El sistema, convierte al hexarotor en un vehículo aéreo no tripulado (VANT). El esquema general del sistema, incluyendo el sistema de telemetría, computadora de abordo, sensores y enlaces de comunicación, puede verse en la Figura 1. La plataforma DJI F550 fue elegida, por su disponibilidad en el mercado local. Como es usual, este hexarotor dispone los motores de manera simétrica equiespaciada.

Para estimar la orientación y la posición del vehículo, en pos de realizar el control del mismo, es necesario contar con un sistema de navegación. Suponiendo que el vehículo opera en torno a la condición de *hovering* (cabeceo y rolido nulos), es posible estimar la inclinación del vehículo utilizando un filtro complementario sobre la información provista por una unidad de mediciones inerciales (IMU). Esta última está conformada por un acelerómetro y un giróscopo, ambos tri-axiales y de tecnología MEMS. Esta estimación, que aporta información sobre las dinámicas rápidas del vehículo, es imprescindible y suficiente para su estabilización en *hovering*. La estimación de este filtro, en caso de estar basada en la IMU solamente, tendría un error acotado en cabeceo y rolido, y no acotado en guiñada, por lo cual en el eje “z” del vehículo, solamente sería posible evitar que la velocidad angular crezca sin control. Pero no sería posible seguir una referencia, ya que

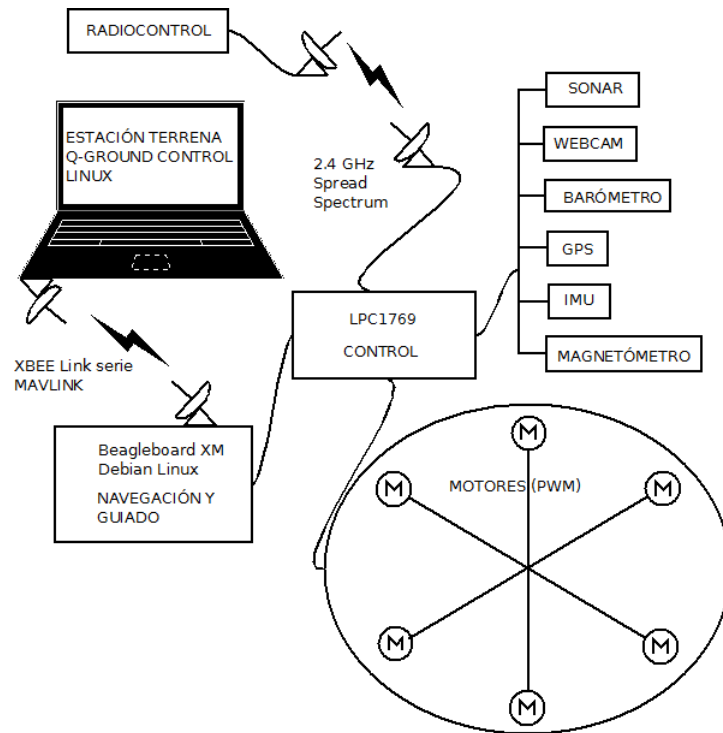


Figura 1: Esquema general del sistema.

el error divergería. A fin de evitar esto último, se incluyen las mediciones de un magnetómetro. Más aun, teniendo en cuenta que los sensores inerciales MEMS presentan sesgos y derivas térmicas importantes, resulta imprescindible contar con información de sensores adicionales, entre ellos el magnetómetro, que permitan compensar los errores mencionados. Los sistemas de navegación que hacen uso de información provista por diversos sensores se conocen como sistemas de navegación integrada. En este caso la información inercial se complementa con información provista por un receptor de GPS, el magnetómetro y una cámara, cuyos datos también aportan información sobre la posición y velocidad angular del vehículo. La información provista por estos sensores alimenta un filtro de fusión de datos cuyo fin es el de estimar la posición, velocidad y orientación del vehículo de manera más precisa. Adicionalmente, se cuenta con un sensor de ultrasonido, con el cual se pueden automatizar operaciones de despegue y aterrizaje sobre superficies regulares.

La salida del sistema de navegación es utilizada por el sistema de control del vehículo, para el cual se propone usualmente una estructura de control en cascada. En esta estructura, el lazo interno, es implementado sobre un microcontrolador de 32 bits, dando determinismo en el tiempo de ejecución. Este lazo interno controla la orientación del VANT, y la ley utilizada es de tipo PID, ya que cumple eficazmente el propósito de mantener al vehículo en la condición de *hovering*, permitiendo seguir las referencias de orientación dadas por un lazo externo. Por su parte, este lazo externo, con potencial para usar leyes de control avanzadas, garantiza la estabilidad, mejorando el desempeño y encargándose además del control de posición. El mismo es implementado sobre la computadora de alto nivel, la cual trabaja con un sistema Linux embebido.

DISEÑO DE LA COMPUTADORA DE NGC

Cuando se trabaja en NGC suele establecerse cierto compromiso entre la capacidad de cómputo y el determinismo en la ejecución de las tareas. Por un lado, los algoritmos de navegación integrada, suelen requerir mucho cómputo para tareas como procesar imágenes o correr filtros de fusión de datos. Mientras tanto, el sistema de control impone restricciones sobre el tiempo de ejecución de la ley de control. Además, para garantizar estabilidad, es necesario cierto determinismo en los tiempos de ejecución del lazo de control.

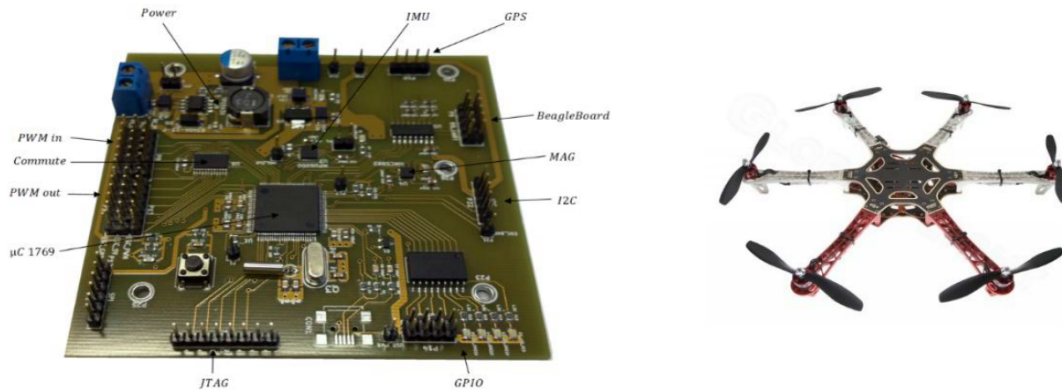


Figura 2: (a) Computadora de NGC (b) Hexarotor F550 de DJI

Por otro lado, el filtro de fusión de datos del sistema de navegación no requiere determinismo en su tiempo de ejecución, admitiendo que haya cierto retardo para entregar el dato preciso de navegación, siempre y cuando se sepa a qué instante de tiempo corresponden todos los datos de los sensores. El grado de precisión que se consiga en las etiquetas de tiempo de la información que alimenta al algoritmo de fusión, impactará directamente en el desempeño del sistema de navegación.

Teniendo en cuenta estas restricciones, para la computadora del sistema de NGC se optó por una arquitectura compuesta por dos CPUs. Una de ellas, se basa en un microcontrolador tipo ARM Cortex-M3 (LPC1769) y se utiliza para tareas de bajo nivel: adquisición de los datos de los sensores de navegación, ejecución de los lazos PID del control de orientación (en *hovering*) y envío de datos hacia el procesador de alto nivel en el cual se ejecutarán los algoritmos de navegación, procesamiento de imágenes y filtro de fusión de datos, y el lazo primario de control. Para esto último se utiliza una CPU comercial marca Beagleboard XM, dotada de un procesador tipo ARM Cortex-A8. Esta CPU también se utiliza para las comunicaciones con la estación terrena. Para esto último, se utiliza el protocolo de telemetría MAVLink ([1, 2]), basado en herramientas de software libre, lo cual permite integrar fácilmente paquetes de software de libres existentes para recepción de telemetría, visualización y configuración del VANT.

Mientras que para la CPU de alto nivel se decidió utilizar una placa comercial Beagleboard–XM, para la CPU de bajo nivel se diseñó una placa que además del microcontrolador incluye todos los sensores de navegación. Los mencionados sensores de navegación están dados por: una IMU Invensense MPU6000; un magnetómetro triaxial Honeywell HMC5883; un receptor GPS ET332 con chipset SiRF 3 y una web-cam estándar para PC con resolución VGA, aunque esta última se conecta directamente a la Beagleboard. Debe mencionarse que el magnetómetro se coloca sobre un pie de 15 cm que separa el sensor del plano en el cual se ubican los motores del VANT, de forma tal que las mediciones no sean afectadas por los campos inducidos por los motores.

El PCB diseñado para el LPC1769 cuenta con puertos de comunicaciones SPI e I²C para la conexión de los diferentes sensores. Dos puertos UART habilitan la interconexión con la Beagleboard–XM y la recepción de datos del GPS y además un puerto de entradas y salidas de propósito general (GPIO) está disponible para alertas visuales o sonoras. Por su parte, la interfaz de programación y debugging se conecta a través de un puerto JTAG, incluyendo además la placa, una fuente *switching* para adaptar los niveles de baterías LiPO de 7 a 30V (incluye los tipos 2S-6S). En la Figura 2(a), puede verse una fotografía de la placa terminada. Por su parte, la placa Beagleboard–XM es un modelo comercial y posee los puertos comúnmente más utilizados (USB, RS232, UART, ETHERNET) con lo cual no necesita de diseño o modificaciones, ya que la cámara se utilizará sobre un puerto USB y la interconexión con el LPC1769 se establece utilizando un puerto USB junto con un adaptador a UART.

Debe mencionarse como detalle técnico ([3]), que el software del LPC1769 implementa un sistema de prioridades aprovechando el *Controlador de Interrupciones Anidadas Vectorizado* (NVIC – *Nested Vector Interrupt Controller*). El mismo se utiliza para administrar las señales de interrupción internas y externas.

Tanto la IMU como el GPS, proveen señales físicas de “*dato disponible*” generadas periódicamente, las cuales se utilizan para generar una interrupción al microcontrolador, facilitando la administración de los datos de los sensores. Para los sensores que no poseen la capacidad de generar interrupciones, se genera una interrupción a través de un *timer* interno que también utiliza el NVIC. El NVIC, permite que las interrupciones del *timer* sean tratadas como si fuesen generadas por el sensor físico que se desea acceder, consiguiendo de esta forma una entrega de datos periódica. Particularmente, esto se utiliza para el magnetómetro y el sensor de ultrasonido.

Lo relevante sobre la utilización del NVIC, es que permite priorizar los datos de los sensores inerciales requeridos por el control de bajo nivel para estabilizar el vehículo, por sobre otros para los cuales puede admitirse cierta demora de procesamiento. En este caso, los sensores de este último grupo, serían el magnetómetro, la cámara y el receptor GPS.

Para enviar los datos desde el LPC1769 hacia la Beagleboard, se implementa un protocolo de comunicaciones con una cola de datos, que encola los diferentes mensajes producidos por la lectura de los diversos sensores. Para el envío se utilizan los canales de DMA disponibles en el LPC, aprovechando que la transferencia de memoria a periférico aporta velocidad y permite al microcontrolador ocuparse de otras tareas.

SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control de bajo nivel toma los ángulos estimados en el LPC1769, y ejecuta un control PID suponiendo desacoplados los ángulos de cabeceo, rolido y guiñada. De esta forma se logra mantener al vehículo cercano a la zona de referencia establecida. Siendo los ángulos de referencia de cabeceo y rolido iguales a cero, se logra el estado de *hovering*.

Como se menciona en la introducción, el sistema de control de actitud del VANT ha sido implementado en la computadora LPC1769 de bajo nivel, en la cual se cuenta con la información de los sensores inerciales y el magnetómetro. Si bien los datos del receptor GPS también son canalizados a través de esta placa para su correcta sincronización temporal, los mismos no son utilizados directamente en la misma para el control de bajo nivel. A bordo del LPC1769, se utiliza la medición de la IMU con un sobremuestreo a una tasa de 800 Hz, el cual se promedia a razón de diez muestras por cada intervalo de muestreo de control, el cual es implementado con una tasa de muestreo de 80 Hz. Una vez promediados los datos de la IMU, se procede a estimar los ángulos de inclinación en cabeceo y rolido en base a los cálculos llevados a cabo por un filtro complementario ([4, 5]), de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\theta_a = \frac{a_x}{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad \varphi_a = -\frac{a_y}{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{1}{1 + T_c s} \theta_a + \frac{T_c s}{1 + T_c s} \frac{1}{s} \omega_y \quad \varphi = \frac{1}{1 + T_c s} \varphi_a + \frac{T_c s}{1 + T_c s} \frac{1}{s} \omega_x \quad (2)$$

donde las a_i son las aceleraciones y las ω_i son las velocidades angulares del vehículo en los ejes correspondientes, medidas por la IMU. El valor de T_c utilizado en la implementación actual del Hexarotor, es de 1 segundo.

Similarmente, el ángulo de guiñada (*yaw*) se puede estimar en base a la información provista por el giróscopo que mide la velocidad angular en el eje Z del vehículo, la cual se fusiona en un filtro complementario con la información provista por el magnetómetro, de una forma similar a la del filtro complementario de la Ecuación (2). Eventualmente, en una estimación simplificada del ángulo de guiñada, se toma simplemente la salida del magnetómetro la cual es provista a una tasa de 10 Hz.

Disponiendo de las estimaciones de los ángulos y de las velocidades angulares, se implementa un control PID para cada uno de los lazos, computándose los torques deseados en los tres ejes de rotación del cuerpo. Estos torques, son luego realizados por los actuadores. En el diseño preliminar del sistema, el cual se encuentra operativo, las ganancias del control PID han sido estimadas de acuerdo a criterios control clásico, con sintonía fina en base a pruebas de campo. La altitud del Hexarotor puede manejarse de manera manual, o en base al sensor de ultrasonido para despegue y aterrizaje automatizado sobre superficies regulares.

Se contempla la incorporación de un sensor barométrico para implementar un control de altitud robusto, fusionando datos con los sensores inerciales y el GPS.

El sistema de control de alto nivel, está implementado y operando con algoritmos preliminares, que le permiten seguir una trayectoria determinada por una lista de *waypoints*, los cuales son cargados antes del vuelo como parte del perfil de misión. Este lazo se encarga de realizar el control de la posición del vehículo a partir de la información provista por el sistema de navegación.

SISTEMA DE NAVEGACIÓN

El sistema de navegación se divide en dos partes. Por un lado el filtro de fusión de datos, basado en un filtro de Kalman extendido (EKF) que corre sobre la Beagleboard y que utiliza todos los datos obtenidos para estimar la orientación y posición del VANT, así como los parámetros de error dados por los sesgos y otros factores, de los sensores inerciales. Si bien la actualización del EKF se ejecuta cuando hay datos disponibles, es decir que no es necesariamente periódico, se establece una cota superior a la velocidad de actualización para evitar una sobrecarga del microprocesador. Esta cota es de 10Hz.

Por otro lado, el LPC1769 estima la inclinación del vehículo, es decir los ángulos de cabeceo y rolido, a partir de datos de la IMU, alimentados a un filtro compensador con una tasa de actualización 80Hz. Estas estimaciones de inclinación, se necesitan para realizar el control de bajo nivel, estabilizando el hexarotor.

Este esquema fue elegido teniendo en cuenta que el tiempo en la comunicación entre la CPU de alto (Cortex-A9) y la de bajo nivel (Cortex-M3), más el tiempo de procesamiento y la potencial indeterminación en este último, introducirían un retardo inaceptable en el lazo de control interno, que estabiliza el vehículo en torno a la condición de hovering. Por el contrario, un algoritmo sencillo como el filtro compensador ejecutado en el LPC1769 provee mayor velocidad y permite lazos de control de mayor frecuencia, con alto determinismo en el sampling rate de control el cual se eligió a 80Hz, sobre la base de resultados experimentales.

Para la estimación del ángulo de guiñada fue necesario incluir la información provista por el magnetómetro que puede otorgar una referencia del norte magnético.

Una referencia de posición “absoluta” viene dada por la información del GPS y/o de la cámara. Para esto último se utilizan referencias visuales bajo la suposición que éstas son invariantes en el tiempo. No se ha implementado un algoritmo que valide esta hipótesis en tiempo y real y eventualmente descarte o permita hacer un seguimiento de estas referencias.

SISTEMA GUIADO, ESTACIÓN DE TIERRA Y COMUNICACIONES

El VANT es capaz de volar siguiendo los comandos de un piloto, para lo cual se utiliza un radio control Spektrum DX6, o puede también volar en modo autónomo. Para esto último es fundamental el algoritmo de guiado, encargado de calcular qué trayectoria debe seguir el VANT. En este caso se realiza un guiado de posición a lazo cerrado. Este algoritmo se ejecuta a 1Hz. El vuelo autónomo se configura a partir de un conjunto de *waypoints* los cuales se transmiten desde la estación de tierra al vehículo mediante módulos de comunicación ZigBee ([6]). La interfaz utilizada para la estación de tierra está basada en el programa APM Planner 2.0 ([2]), paquete de software multiplataforma muy versátil que permite configurar parámetros del vehículo, recibir el estado del mismo (posición, orientación, carga de batería, etc), mostrar en pantalla un plano con el recorrido del vehículo, seleccionar waypoints y enviar comandos para cancelar una misión, entre otras varias funciones. El APM Planner, tiene la ventaja de que es distribuido con una licencia GPL, código abierto. Para las comunicaciones entre la estación de tierra y el vehículo se utiliza el protocolo MAVLink ([1]), que es un estándar de facto utilizado por la gran mayoría de los paquetes de software que se distribuyen con licencia de código abierto para fines de supervisión y control de misión, como lo es el APM Planner ([2]). En la Figura 3, puede verse una captura de pantalla del sistema de telemetría en operación, siguiendo una trayectoria definida por *waypoints*.

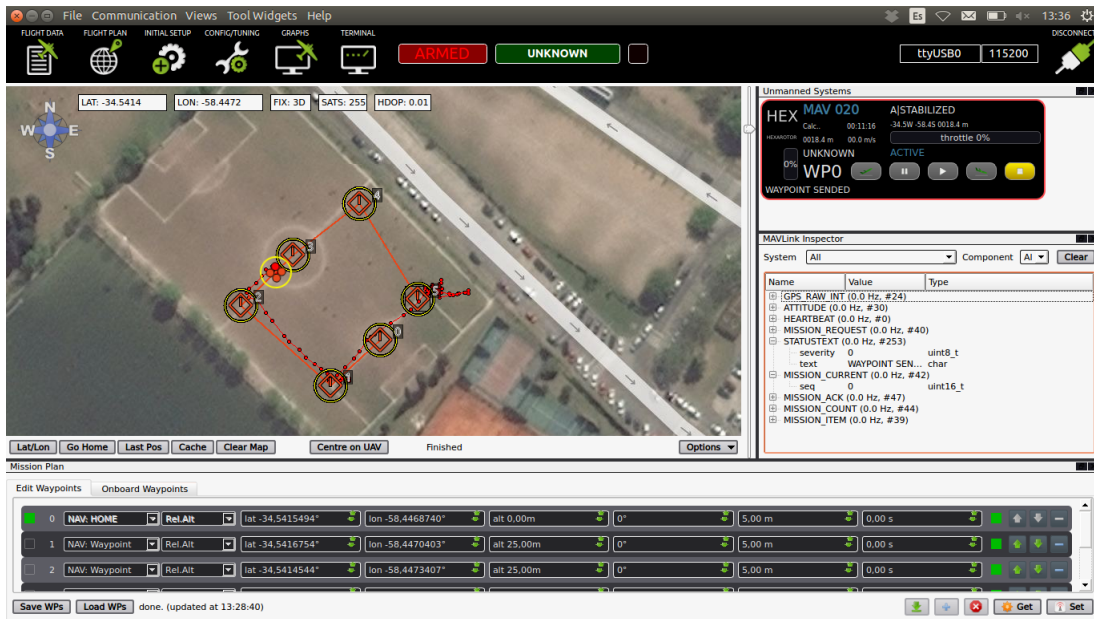


Figura 3: Captura de Pantalla de un vuelo siguiendo waypoints.

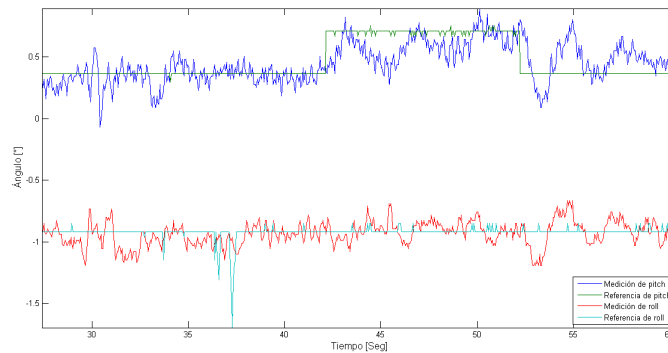


Figura 4: Pitch y Roll en Hovering.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron diversas pruebas sobre el sistema de NGC, comprobándose la correcta adquisición de todos los sensores y el correcto funcionamiento de los mismos. Por otro lado se evaluó el comportamiento del control de orientación de bajo nivel basado en un PID, en lo que respecta a estabilización y rechazo de perturbaciones. También se probó exitosamente el sistema de aterrizaje automatizado sobre superficies duras y regulares.

El comportamiento de vuelo en *hovering* puede observarse en las Figuras 4 y 6. En la Figura 4, puede verse que los ángulos de *pitch* y *roll* se mantienen dentro de un rango de $\pm 0,5^\circ$, en torno a las referencias. Estos sesgos sobre la base de los cuales se mantiene el hovering, son atribuibles a desalineados normales en el montaje de los sensores para este tipo de VANTs y el error de $\pm 0,5^\circ$, se considera adecuado.

En la Figura 5 se muestra la respuesta a perturbaciones externas simultaneas en *pitch* y *roll*. Con la pretensión de que esta sea de tipo impulsiva, se da un leve golpe sobre un brazo del hexarotor, notándose una respuesta oscilatoria levemente amortiguada.

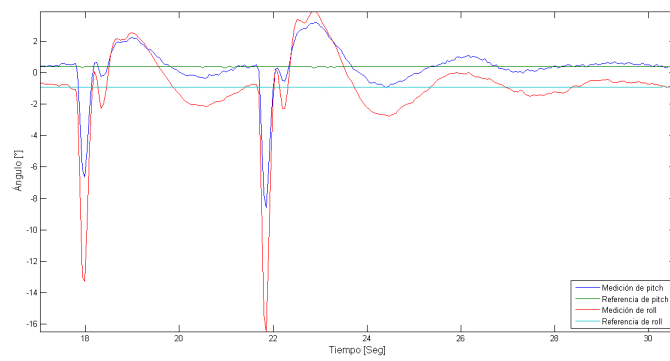


Figura 5: Perturbación en cabeceo y rolido.

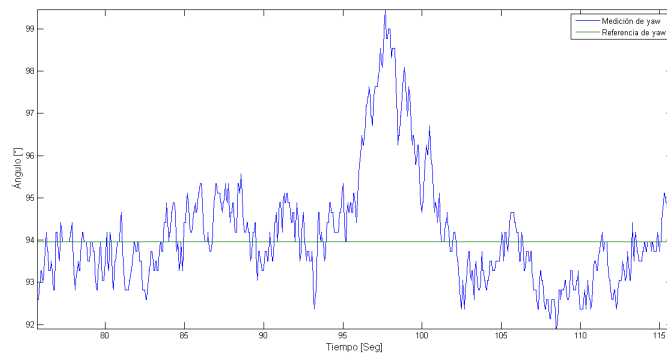


Figura 6: Yaw en Hovering.

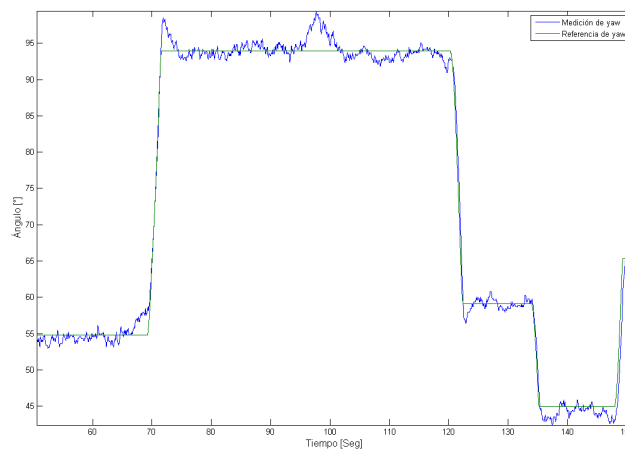


Figura 7: Referencias en yaw.

En la Figura 7, puede verse el comportamiento en *yaw* siguiendo referencias. El diseño busca que la respuesta en *yaw* sea algo más lenta, como se ve también en *hovering* (Figura 6), ya que la misma no es tan crítica para la estabilidad en el aire. Se mantiene un error $\pm 2^\circ$, lo cual se considera adecuado para este lazo.

Con las pruebas realizadas se ha logrado una autonomía de vuelo ininterrumpido de 15 min. Siendo uno de los objetivos del proyecto lograr una autonomía de 25min, en el trabajo final se discutirán los pasos a seguir en pos de lograr este objetivo.

CONCLUSIONES

Se muestra el sistema de NGC del GPSIC-FIUBA, que se ha desarrollado para un VANT, dando una descripción de los algoritmos y presentando las capacidades del sistema. El trabajo, tienen el fin de validar el hardware y los algoritmos, mostrando resultados en vuelo. Teniendo en cuenta que esta plataforma es libre y flexible se cree que puede resultar de interés para la comunidad interesada en investigaciones en VANTs y sistemas de NGC, siendo esta la principal motivación del trabajo.

REFERENCIAS

- [1] L. Meier. (2014). Mavlink, dirección: <http://qgroundcontrol.org/mavlink/start>.
- [2] Ardupilot. (2014). Apm planner 2.0, dirección: <http://planner2.ardupilot.com/>.
- [3] C. Pose, F. Roasio y J. I. Giribet, «Sincronización de sensores para un sistema de navegación integrado aplicado a un hexarotor», en *Jornadas Argentinas de Robótica, Buenos Aires, Argentina, 2014*.
- [4] C. Pose, «Diseño de algoritmos de navegación y control para un hexarotor», Tesis de grado de Ingeniería Electrónica – En revisión, Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2014. dirección: <http://psic.fi.uba.ar/index.php/publication/theses> (visitado 2014).
- [5] S. Park y J. How. (nov. de 2004). Examples of estimation filters from recent aircraft projects at mit, dirección: http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/lecture-notes/115_filter_examp.pdf (visitado 2014).
- [6] Digi International Inc., *Xbee / xbee-pro zb rf modules*, 2012. dirección: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_T.pdf (visitado 2014).