

---

# CAPÍTULO 1

---

## HARDWARE

La elección del hardware representa una parte muy importante del Proyecto. Una mala elección de alguno de los componentes puede acarrear complicaciones no previstas a la hora de la ejecución, causando contratiempos inesperados y trabajo excesivo. Es necesario, entonces, el estudio detallado de cada uno de los componentes a utilizar.

### 1.1. Plataforma física: Cuadricópteros

A la hora de la planificación del Proyecto se plantea la opción de partir de cero, diseñando completamente el cuadricóptero. Si bien esta opción tiene la ventaja de que se puede conocer completamente su funcionamiento, implica problemas de ingeniería mecánica que no se pretenden resolver, conocimientos de resistencia, flexibilidad y peso de materiales, así como también diversas complicaciones adicionales a la hora de fabricar y armar los distintos componentes. Dados los plazos del proyecto, y que su objetivo se centra en el control del vehículo, la necesidad de partir de un dispositivo electromecánico ya construido resulta imperiosa.



Figura 1.1: Turbo Ace X720

La plataforma escogida es el cuadricóptero **Turbo Ace X720**. Esta plataforma es controlada por un usuario a través de un control remoto comercial estándar (Walkera 2801). El sistema receptor se encarga de *setear* la velocidad angular de cada motor en función de la señal recibida.

La plataforma escogida consta de un receptor, una CPU, una batería, 4 motores y 4 ESCs<sup>1</sup> montados sobre un cuerpo de fibra de carbono. Además incluye un transmisor (control remoto), imprescindible para volarlo. La electrónica original (ESCs y CPU)

---

<sup>1</sup>Electronic Speed Controller

también se puede encontrar bajo el nombre de **Lotus RC T580**, otra plataforma comercial.

## Motores

Los motores de la plataforma son de tipo *Brushless* (sin escobillas): son eléctricos con el rotor de imán permanente y tres pares de bobinas en el estator alimentados con corriente continua conmutada. Necesitan de un sistema de conmutación eléctrico (**ESC**) que los controlen, y presentan relaciones lineales entre corriente y torque, y entre frecuencia y velocidad. Son comúnmente utilizados en vehículos radio-controlados por su eficiencia, potencia, durabilidad y su bajo peso (en comparación con los de tipo *Brushed*).

Como se explica en [?], la energía eléctrica es convertida a mecánica mediante las fuerzas de atracción magnéticas entre el imán permanente del rotor y el campo magnético giratorio inducido por los devanados del rotor. En la figura 1.2, también tomada de [?], se muestra un diagrama simplificado de un motor *Brushless*.

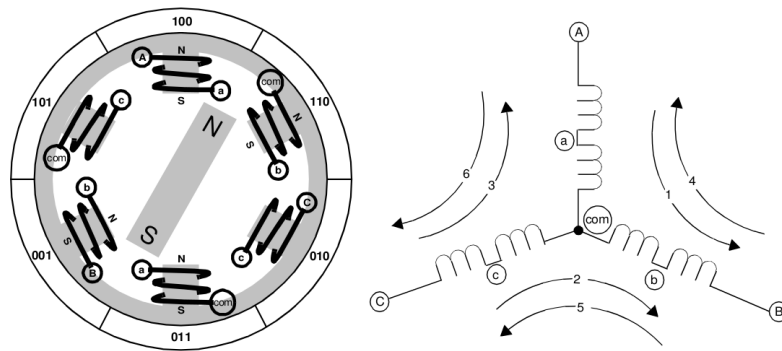


Figura 1.2: Esquema simplificado de motor *Brushless*

En este ejemplo se muestran 3 circuitos electromecánicos conectados a un punto común y separados en el centro para permitir el movimiento del rotor. La mayoría de los motores *Brushless* tienen un devanado en 3 fases con topología de estrella, como se muestra en la figura anterior. Un motor con esta topología se maneja energizando 2 de las fases al mismo tiempo. Para energizar en el momento adecuado cada pareja de fases se utiliza un controlador electrónico de velocidad, como se explicó anteriormente.

### Controlador electrónico de velocidad (ESC)

Los ESCs incluidos en la plataforma reciben comandos mediante el protocolo  $I^2C$ , a  $333kHz$ . Se encargan de conmutar la corriente continua que reciben los motores de modo de energizar la pareja de fases correspondiente en el momento justo para que el campo electromagnético inducido genere el máximo torque posible sobre el imán del rotor. En la práctica el máximo torque es alcanzado cuando el imán permanente del rotor está desfasado  $90^\circ$  respecto del campo magnético resultante en el rotor.

La clave del funcionamiento de un motor *Brushless* es poder sensar la posición del rotor y en función de ello energizar las fases que ejercerán mayor torque. Para dicho sensado comúnmente se utiliza un sensor de posición de 3 elementos basado

en el efecto Hall.

El rotor se mueve 60 grados por cada paso de la conmutación. La ruta apropiada para la corriente del estator es activada cuando el rotor se encuentra a  $120^\circ$  de la dirección del campo magnético del estator y es desactivada cuando el rotor pasa  $60^\circ$  dicha dirección, momento en el cual se activa el siguiente circuito y se repite el proceso. En cada instante una de las fases del motor es conducida a nivel alto, otra a nivel bajo y la restante se deja “flotando”.

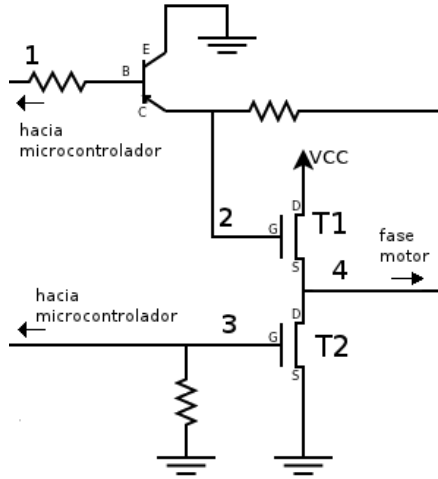


Figura 1.3: Conmutación BLDC

Para realizar la conmutación se utiliza una configuración conocida como “puente H”, donde por cada fase se utilizan 2 transistores encargados de conducir a los niveles alto y bajo y un tercer transistor (*driver*) que maneja al primero. En la figura 1.3 se muestra un diagrama típico de un circuito utilizado para conmutar corriente continua en una fase de un motor *Brushless*. Una precaución muy importante que se debe considerar para este tipo de motores es no activar nunca al mismo tiempo los caminos al nivel bajo y al nivel alto, es decir que nunca conduzcan al mismo tiempo los transistores *T1* y *T2*. Los estados viables para los transistores son las mostradas en la tabla 1.1.

Configuración	T1	T2	Fase
A	Cortado	Cortado	Flotando
B	Conduciendo	Cortado	Nivel alto
C	Cortado	Conduciendo	Nivel bajo

Cuadro 1.1: Configuraciones posibles para los transistores

Si se impone un voltaje mayor a  $0,7V$  en la base del *driver* (punto 1 de la figura 1.3), dicho transistor conducirá, lo cual fijará un voltaje de  $0,2V$  en el punto 2 del diagrama, correspondiente al *gate* del transistor **T1**. Este voltaje en el *gate* provoca que el transistor quede cortado, no dejando pasar corriente entre el *source* y el *drain*. En esta situación hay 2 escenarios posibles: que el transistor **T2** se encuentre conduciendo o que se encuentre cortado. Para que se de el primer escenario (configuración **C**) es necesario que el microcontrolador imponga un voltaje positivo en el gate del transistor **T2**, logrando un camino de baja impedancia entre tierra y la fase en cuestión del motor. En este caso se estaría conduciendo dicha fase a nivel bajo. El otro escenario implica que dicha fase quede en estado “flotando” (configuración **A**) ya que ambos transistores permanecen cortados. Por último la otra situación posible es que el transistor **T1** conduzca (configuración **B**), situación en la cual el transistor **T2** deberá permanecer cortado, lo cual se logra llevando a  $0V$  el punto 1 del diagrama.

En la figura 1.4 se muestra el diagrama de un ESC obtenido al relevar el con-

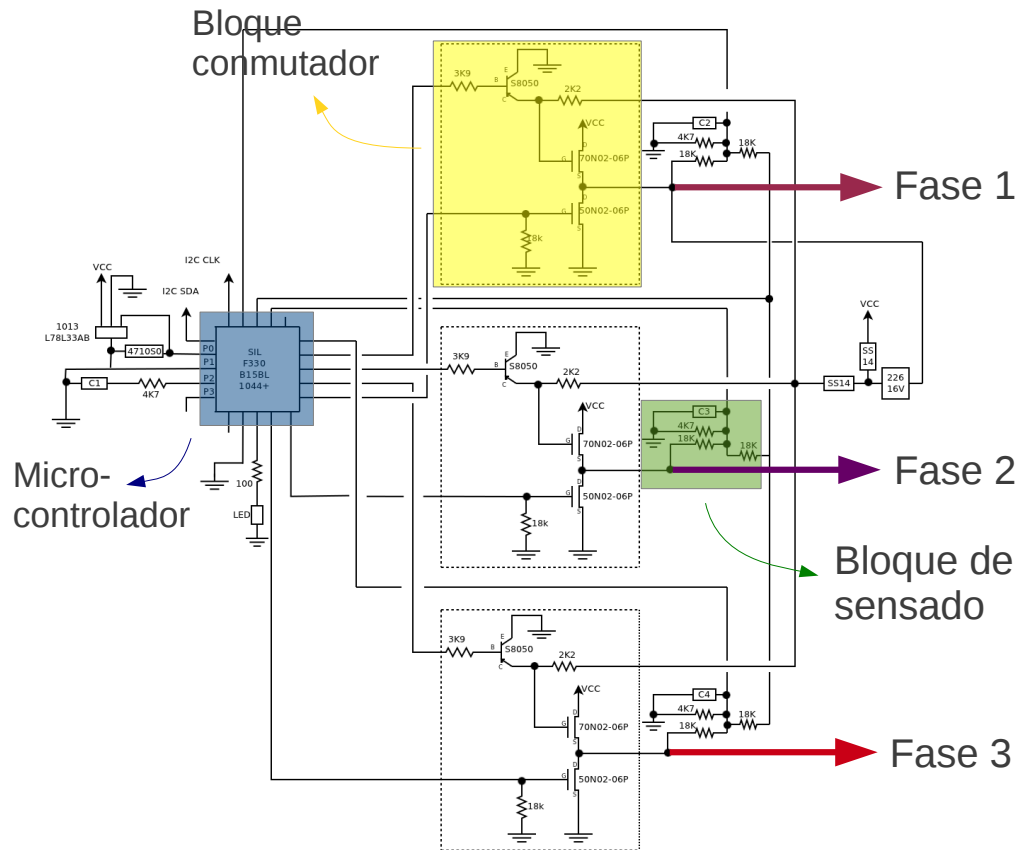


Figura 1.4: Esquemático de un ESC

trolador que originalmente incluía el cuadricóptero comercial adquirido<sup>2</sup>. Se pueden identificar los diversos bloques mencionados a lo largo de esta sección. El bloque de sensado es utilizado para obtener la posición del rotor en cada instante de tiempo, el bloque de conmutación es el encargado de energizar las fases correspondientes en cada paso y microcontrolador es el encargado de interpretar la información del sensado de la posición del rotor y actuar sobre los transistores para generar el campo magnético rotatorio. Las fases 1, 2 y 3 se conectan a los terminales A, B y C mostrados en la figura 1.2. El denominado “puente H” se forma entre cada pareja de bloques de conmutación y las bobinas del motor que quedan energizadas.

## Instrumentación e inteligencia

La instrumentación con la que cuenta el dispositivo está destinada a simplificar el manejo a control remoto, estabilizando el sistema. La misma incluye un barómetro y acelerómetro y giróscopo de 3 ejes. Cuenta además con una CPU que se encarga de la lectura de los datos proporcionados por los sensores y de definir las acciones

<sup>2</sup>Este controlador se dejó de fabricar, existen dos versiones nuevas de ESC, una de ellas mantiene el mismo protocolo de comunicación que el aquí presentado, esto fue verificado, ya que en la última versión de la plataforma implementada se utilizó este controlador. Los fabricantes indican que hay la otra versión utiliza un protocolo de comunicación distinto, no se trabajó con estos ESC.

de control sobre los motores. No se dispone del código del programa presente en la CPU, y por lo tanto no es posible reutilizarlo, ni tampoco obtener la lectura de los sensores presentes. Se realizaron esfuerzos para conseguir dicha información del fabricante, quien se negó a proporcionarla. Por dicho motivo se opta por dotar al sistema de instrumentación adicional.

### Tiempo de vuelo

El tiempo de vuelo utilizando una batería de LiPo de 5300mAh (450g) y una carga de 500g es cercano a los 10-15 minutos.

### Carga útil

Además de toda la instrumentación que incluye el cuadricóptero, se incorporará una placa de desarrollo, una de sensores (IMU), un GPS, una interfaz para comunicación Wi-Fi, y una batería dedicada exclusivamente a alimentar la electrónica agregada. Es de interés conservar la posibilidad de integrar una cámara fotográfica. La carga que puede levantar el cuadricóptero es de 1300g, de la que se debe descontar el peso de las baterías de la electrónica y de la alimentación a los motores.

## 1.2. Inteligencia

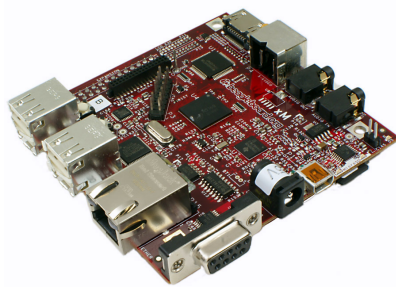


Figura 1.5: Beagleboard

Además de la plataforma física, deben seleccionarse componentes electrónicos capaces de procesar la información proveniente de los sensores, computar y ejecutar los algoritmos de control, y generar las señales necesarias para transmitir las instrucciones a los motores.

La solución implementada se basa en la plataforma de desarrollo *Beagleboard*. Esta plataforma posee un microprocesador TI ARM Cortex A8 de 1GHz y un DSP TMS320C64x+ de 800MHz. La memoria RAM es de 512 Mb. No tiene memoria no volátil, pero soporta tarjetas SD de hasta 4GB y es posible conectar memorias flash USB. Ver figura 1.5.

### Dimensiones y peso

Cuanto menor sean las dimensiones y peso de la placa elegida, mayor carga útil quedará disponible. El peso total de la BeagleBoard con una batería, diseñada especialmente alimentarla es de aproximadamente 200 gramos, y sus dimensiones son de  $10\text{cm} \times 8,5\text{cm} \times 5\text{cm}$ . La autonomía de dicha batería es de aproximadamente 2 horas.

### Sistema Operativo, Puertos y I/O

La BeagleBoard ofrece la posibilidad de cargar un kernel de *Linux* desde una tarjeta SD. El sistema operativo permite:

- Comunicación a través de una interfaz ethernet.

- Conexión de cuatro dispositivos USB de manera simultánea.
- Debugging a través de un puerto serie.
- Uso de bibliotecas para visión por computadora.
- Compatibilidad con módulos de cámaras VGA.

Existen *drivers* que permiten agregar una interfaz para WiFi conectando un módulo USB (Belkin wireless G).

La BeagleBoard cuenta con un puerto de expansión de 28 pines de propósito general. Los pines 23 y 24 de dicho puerto pueden ser configurados para exponer un puerto  $I^2C$ , fundamental para enviar comandos a los ESC. Los pines 23 y 24 corresponden a las líneas de datos y al reloj respectivamente. Por otra parte, los pines 8 y 6 pueden ser configurados para funcionar como pines de transmisión y recepción de un puerto serie, esto será fundamental para la comunicación con algunos de los sensores.

### 1.3. Instrumentación

Para poder controlar el sistema es importante poder conocer los valores que toman las variables de estado del mismo. Como se verá en el capítulo sobre el desarrollo del modelo físico del cuadricóptero, las variables que se deben conocer son:

- La orientación.
- La posición.
- La velocidad.
- La velocidad angular.

Por dicho motivo resulta imprescindible dotar al sistema de sensores capaces de medir dichas magnitudes, directa o indirectamente. Se compararon distintas alternativas comerciales, finalmente se optó por un dispositivo que integra varios sensores y un GPS.

#### 1.3.1. IMU

##### Acelerómetro

Un acelerómetro es un dispositivo capaz de medir su aceleración propia en el marco de referencia de un sistema en caída libre. Se encarga de procesar las medidas, y convertirlas a una señal eléctrica (puede ser analógica o digital).

Existen diversos tipos de acelerómetros. Se eligió trabajar con un acelerómetro contenido en un circuito integrado, tecnología MEMS. Los acelerómetros basados en esta tecnología miden cambios internos de la transferencia de calor causada por la aceleración, ofreciendo ventajas significativas sobre el empleo de una estructura tradicional sólida de masas de prueba.

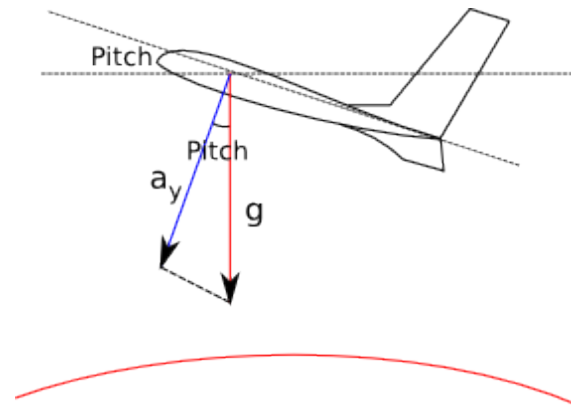


Figura 1.6: Determinación del ángulo de Pitch

Se optó por utilizar tecnología MEMS fundamentalmente por tamaño, peso y costo. Los mismos son más pequeños, livianos y baratos que otras tecnologías.

El acelerómetro cumple dos roles fundamentales:

1. Bajo la hipótesis de que las aceleraciones a las cuales se verá sometido el sistema **no** son comparables con  $g$ , sirve para determinar los ángulos de Pitch y de Roll. En la figura 1.6 se ilustra la forma de lograr esto para el ángulo de Pitch. Las ecuaciones utilizadas pueden encontrarse en ??.
2. Permite obtener una estimación de la velocidad, integrando su medida.

### Giróscopo

Un giróscopo es un instrumento capaz de medir la velocidad angular de un sistema solidario a sí mismo respecto a un sistema inercial. Las mismas restricciones sobre tamaño, peso y costo que se aplicaban para el acelerómetro se aplican aquí. Se vuelve a optar por tecnología MEMS.

Desde el punto de vista teórico, procesando la información obtenida a partir del acelerómetro y del giróscopo y partiendo de condiciones iniciales conocidas, se puede conocer, en todo momento, la posición del sistema y su orientación. En la práctica, sin embargo, esto no es así, ya que todas las medidas tienen un cierto error. Para obtener la orientación y la posición en cada instante se debe integrar y, por lo tanto, se integra también el error cometido. Esto produce una acumulación de errores que afecta, de forma considerable, el resultado final luego de cierta cantidad de muestras. Este problema se puede resolver integrando un GPS. Este último permitiría, cada cierto intervalo de tiempo, contar con una medida absoluta para comparar contra los resultados obtenidos de la integral de las medidas del acelerómetro y del giróscopo, permitiendo corregir errores debido a la deriva por integración del error.

### Sensor de presión

El GPS, mencionado en la sección anterior, provee una estimación de la altura absoluta, pero es poco precisa. Depende fuertemente de la cantidad de satélites disponibles y se ve fuertemente deteriorada por el efecto del rebote de las ondas en estructuras cercanas (en especial por los rebotes en el piso, que deterioran la

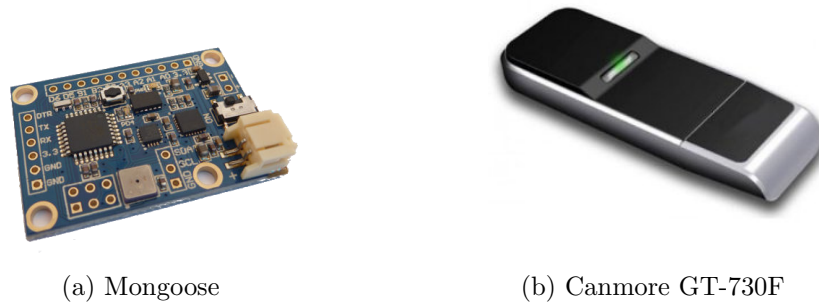


Figura 1.7: Instrumentación

precisión en la medida de altura cuando se está muy cerca del suelo). Por este motivo es necesario contar con otra fuente de información. Se optó por incorporar un barómetro que, midiendo la presión absoluta, permite determinar la altura del cuadricóptero en forma independiente al resto de los sensores.

### Magnetómetro

El *drift* en la estimación del ángulo de Yaw a partir de la integración de datos del giróscopo y la falta de una referencia absoluta en dicha estimación, se resuelven agregando un magnetómetro. Permite ubicar el norte magnético (medida absoluta), complementando la información diferencial obtenida del giróscopo.

### Sensor de temperatura

El control del sistema no depende directamente de la temperatura, pero la instrumentación presenta una dependencia con (y por ende tendrá errores asociados a) la temperatura. El contar con un sensor de temperatura permitirá utilizar una calibración que tome en cuenta dicha dependencia.

La Mongoose 9DoF IMU (1.7a) posee todos los sensores que se han nombrado hasta aquí, excepto el GPS. Las características de dichos sensores se resumen en el anexo ???. Posee además un microprocesador sencillo de programar, lo que permite realizar un preprocesamiento de los datos antes de la estimación del estado. Las modificaciones realizadas al código original se explican en el anexo ??.

### 1.3.2. GPS

La elección del GPS se basó fundamentalmente en lograr la simplicidad del sistema. Existían muchas opciones, placas de diversos tamaños, con distintos tipos de antenas, pero todas con especificaciones similares.

Se optó por utilizar un GPS *Canmore GT-730F*, como el mostrado en la figura 1.7b. Dentro de un margen de precios razonable las características de los distintos GPS comerciales no difieren considerablemente en lo que refiere a tasa de muestreo, resolución y exactitud. La razón fundamental para elegir dicho instrumento sobre otros fue la facilidad de conexión ya que permite utilizar los puertos USB de la plataforma a cargo de la inteligencia y los drivers existentes para linux.



### 1.3.3. Resumen de sensores

A continuación se presenta un resumen de las prestaciones de los sensores a utilizar, en la configuración en la que se utilizaron. Por más detalles referirse a ??.

	Dato nuevo	Resolución
Acelerómetro XY	10ms (x2)	4mg
Acelerómetro Z	10ms (x2)	4mg
Giróscopo XY	10ms (x2)	$0.07^{\circ}/s$
Giróscopo Z	10ms (x2)	$0.07^{\circ}/s$
Barómetro	10ms	1Pa
Magnetómetro XY	10ms (x2)	5 mGa
Magnetómetro Z	10ms (x2)	5 mGa
GPS	1s	-