

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## ELECCIÓN DE HARDWARE

La elección del Hardware significa una parte muy importante del Proyecto, ya que las decisiones tomadas condicionan el resto del mismo. Una mala elección de alguno de los componentes puede resultar en complicaciones no previstas a la hora de la ejecución, causando contratiempos inesperados y trabajo excesivo. Es necesario entonces para evitar dichos problemas el estudio detallado de cada uno de los componentes a utilizar, comparando características, rendimientos y utilidades. Elegir adecuadamente el Hardware necesario agiliza las etapas siguientes de todo el Proyecto. Resulta fundamental la toma de buenas decisiones, las cuales deben estar basadas en un previo estudio de cada etapa del proyecto, sus requerimientos, un estudio comparativo de las posibles soluciones y el conocimiento cabal de los componentes a utilizar.

### 1.1. Elección de plataforma Cuadricópteros

A la hora de la planificación del Proyecto se plantean dos opciones que se diferencian básicamente en el punto de partida. Ambas tienen como objetivo principal diseñar e integrar un sistema de control que permita al Cuadricóptero mantener un vuelo autónomo, pero una de ellas consta además del en el diseño y el armado del mismo.

Esta última incluye desafíos de ingeniería mecánica, conocimientos de resistencia, flexibilidad y peso de materiales, así como también diversas complicaciones a la hora de fabricar y armar las partes.

Teniendo en cuenta que se trata de un proyecto con tiempo acotado y su objetivo se centra en el control del vehículo, la necesidad de partir de con un hardware ya construido resulta imperiosa. Por ello se realiza un estudio sobre las opciones que el mercado ofrece en esta materia. Desafortunadamente las opciones no son muy numerosas, disponiendo de Cuadricópteros comerciales controlados a control remoto. Todos ellos incluyen un pequeño sistema de control integrado de los cuales no es posible obtener información ya que se trata de software privativo. Las opciones que el mercado ofrece son:

- Gauí 330X

- XAircraft X650
- Turbo Ace X720

Se procede a la comparación de los equipos mencionados y se analizan algunos aspectos fundamentales y críticos, como puede ser por ejemplo el peso del dispositivo y la carga útil que puede soportar.

## Motor

Al estudiar las posibilidades nos encontramos con que en todos los casos los motores se controlan con modulación por ancho de pulsos, de ahora en más **PWM** por sus siglas en inglés, técnica en la cual se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para controlar la cantidad de energía que se entrega a una carga.

En la tabla 1.1 se muestran las características de los motores de los 3 Cuadricópteros considerados.

	GAUI 330X	XAircraft X650	Turbo Ace X720
Motor	Hélices de 8 pulgadas, 4 motores brushless con 4 ESCs de 10A	Hélices de 12 pulgadas, 4 motores brushless con 4 ESCs de 10A. Las hélices impulsadas por el motor tienen una eficiencia de 9g/W bajo carga nominal.	Hélices de 12 pulgadas, 4 motores brushless con 4 ESCs de 10A. Las hélices impulsadas por el motor tienen una eficiencia de 12g/W bajo carga nominal.

Cuadro 1.1: Comparación motores

Los motores *Brushless* son motores eléctricos alimentados con corriente continua. Tienen un sistema de conmutación eléctrico y presentan relaciones lineales entre *Corriente* y *Torque* y entre *Frecuencia* y *velocidad*. Son comúnmente utilizados en vehículos radio-controlados por su gran eficiencia, potencia, durabilidad y su bajo peso en comparación con los tradicionales motores *Brushed*. Sin embargo, los motores de CC *Brushless* son mucho más complicados de controlar, ya que la fase varía con la rotación del motor. Para controlarlos se utilizan unos dispositivos llamados *Controladores eléctricos de velocidad*, o **ESCs**. Comúnmente los ESCs se clasifican según su corriente máxima, por ejemplo 10 amperes o 10A.

Como se puede ver en la tabla 1.1, todos los dispositivos utilizan motores similares y la única diferencia radica en que la eficiencia de los motores del *Turbo Ace X720* es mayor.

## Tiempo de vuelo

El tiempo de vuelo puede resultar crítico según la aplicación considerada. En la tabla 1.2 se muestran los datos que se obtuvieron para los 3 Cuadricópteros considerados.

	GAUI 330X	XAircraft X650	Turbo Ace X720
Tiempo de vuelo	Con batería de 2200mAh vuela entre 7 y 20 minutos	Vuela 12 minutos con batería de 2200mAh y carga menor a 1,5kg	Con batería de 2200mAh vuela 15 minutos a carga nominal y puede llegar a la media hora de vuelo con una batería de 10,000mAh

Cuadro 1.2: Comparación Tiempo de vuelo

Como se puede apreciar los tiempos de vuelo son similares en los 3 dispositivos, por lo que no será un factor determinante a la hora de tomar la decisión.

Un factor determinante en el tiempo de vuelo es la batería a utilizar. Deben considerarse 2 aspectos importantes: la capacidad de la batería y su peso. Si bien una batería con mayor capacidad permitirá mayor autonomía de vuelo, es claro que su peso también aumentará, lo cual a su vez, causará un mayor consumo. Los 3 Cuadricópteros en consideración incluyen una batería de 3 celdas de Litio de 2200mAh.

### Peso

La carga útil que el dispositivo pueda soportar juega un papel fundamental. Vale recordar que además de toda la instrumentación que incluye el Cuadricóptero, se incorporará un Microprocesador, una batería independiente para su alimentación, un giróscopo, un acelerómetro, un GPS y alguna interfaz para la comunicación. A su vez es interesante conservar la posibilidad de integrar una cámara fotográfica convencional ya que puede ser de gran utilidad para numerosas aplicaciones. La fuerza que los motores pueden realizar es acotada, por lo que el peso del dispositivo influye directamente en la carga útil del mismo.

	GAUI 330X	XAircraft X650	Turbo Ace X720
Peso	700g	Versión de fibra de vidrio: 1100g. Versión de fibra de carbono: 950g.	990g
Carga útil	500g	Versión de fibra de vidrio: 700g. Versión de fibra de carbono: 850g.	1300g

Cuadro 1.3: Comparación peso y carga útil

Como se puede ver en la tabla 1.3, no cabe duda que el dispositivo que puede cargar con más peso es el *Turbo Ace X720*, lo cual constituye una ventaja considerable de este dispositivo frente a los otros.

### Instrumentación

Toda la instrumentación que los dispositivos brindan está originalmente destinada al manejo mediante el control remoto. Todos ellos incluyen un acelerómetro y un giróscopo de 3 ejes y traen algún sistema de estabilización incluido de modo de

facilitar su control.

Como ya se mencionó, se añadirá al Cuadricóptero la instrumentación necesaria para su control automático, por lo cual la instrumentación incluida en el dispositivo carece de gran importancia. Sin embargo, resulta interesante conservar la posibilidad de controlarlo mediante el control remoto, ya que puede ser útil tanto en determinadas aplicaciones, como para evitar eventualidades en las primeras pruebas donde se testean los algoritmos de control desarrollados. El algoritmo de control deberá poder alternar entre estos dos modos de vuelo dándole prioridad al control remoto, de modo de conservar la integridad física del dispositivo ante fallas en los algoritmos de control.

	<b>GAUI 330X</b>	<b>XAircraft X650</b>	<b>Turbo Ace X720</b>
<b>Instru- men- tación</b>	Sistema de estabilización integrado <i>GU344</i> : incluye giróscopo de 3 ejes y acelerómetro.	Giróscopo de 3 ejes y acelerómetro. Puede usar hasta 13 sensores para chequear actitud de vuelo, altitud, dirección, posición, temperatura, consumo energético, etc.	Giróscopo y acelerómetro de 3 ejes integrados. Se vende por separado el módulo GPS que incluye barómetro como medidor de altitud y el compás electrónico.

Cuadro 1.4: Comparación instrumentación

En la tabla 1.4 se muestra un resumen de la instrumentación incluida en cada Cuadricóptero.

## Control

El control mediante el mando remoto requiere de cierta práctica y habilidad para ejecutarlo de buena forma, por lo cual todos los algoritmos de control integrados que el dispositivo incluya significarán una interesante ventaja. Por otro lado se debe tener en cuenta que el control remoto se utilizará en reducidos casos, siendo el control automático el verdadero interés del proyecto. Es importante tener en cuenta que dichos algoritmos encarecen el precio del dispositivo y no serán utilizados con mucha frecuencia.

	<b>GAUI 330X</b>	<b>XAircraft X650</b>	<b>Turbo Ace X720</b>
<b>Control</b>	-	Software de configuración incluido. Dispositivo de control de 4 velocidades diseñado todo en 1. Soporta protocolos <i>Ultra PWM</i> y control de frecuencia hasta $500Hz$ . Posee algoritmos de control de vuelo incorporados que hacen q sea mas fácil volarlo	Nivelación automática con control de altitud

Cuadro 1.5: Comparación control

Si bien el *XAircraft X650* es el que tiene más algoritmos de control implementados que facilitan su mando, se considera que el dispositivo que se adecuaba más a

nuestras necesidades es el *Turbo Ace X720*. Tiene un pequeño sistema de estabilización que ayuda a la hora de su control, pero no incluye demasiado software ni hardware que no será utilizado y encarecen al producto, como el *XAircraft X650*.

## Dimensiones

Las dimensiones de los 3 Cuadricópteros considerados se pueden apreciar en la tabla 1.6.

	GAUI 330X	XAircraft X650	Turbo Ace X720
Dimensiones	33 cm entre ejes diagonalmente opuestos	61.5 cm entre ejes diagonalmente opuestos	61.5 cm entre ejes diagonalmente opuestos

Cuadro 1.6: Comparación dimensiones

Como se puede ver el *GAUI* es el más pequeño, mientras que los otros dos tienen el mismo tamaño aproximadamente

En la figura 1.1 se pueden apreciar fotografías de los 3 equipos considerados.



Figura 1.1: Fotos de las posibles plataformas a utilizar

### 1.1.1. Definición de la plataforma - Cuadricóptero

- El *Turbo Ace X720* tiene hélices de 12 pulgadas y el grupo hélice motor proporciona una eficiencia de  $12\text{ g/W}$ , superando a los otros dos Cuadricópteros considerados.
- La carga útil que puede transportar el *Turbo Ace X720* es la mayor de todos los considerados
- El *Turbo Ace X720* trae un sistema de nivelación automática y estabilización que resultará útil al momento de controlarlo con el mando remoto. Además no incluye excesivas utilidades para este mando que no serán utilizadas y contribuyen a encarecer el precio.

Por todas las razones expuestas anteriormente y los análisis comparativos realizados se tiene que la opción que mejor se adecuía a nuestro proyecto es el **Turbo Ace X720**.

## **1.2. Inteligencia**

Micro. decir pa q lo usamos, q tiene q hacer. pagar

### **1.2.1. Definición de la inteligencia**

## **1.3. Comunicación**

La inteligencia debe comunicarse con dos bloques del sistema: el de los sensores y el de los motores sobre los cuales se actúa. Además es necesario comunicar a la inteligencia con una PC con el objetivo de programar tanto los algoritmos de control como los rumbos del sistema.

### **1.3.1. Comunicación con PC**

La placa elegida posee diversos puertos USB, por dicho motivo se pueden utilizar dichos puertos para obtener una comunicación directa con la PC. Dicha comunicación sirve para programar el sistema en una primera etapa, sin embargo no parece la forma más adecuada de comunicarse con el quadcopter mientras el mismo se encuentra en el aire para reprogramar una ruta, o para modificar algún detalle de un algoritmo. Por dicho motivo se opta por alguna comunicación de tipo inalámbrica. Las opciones que consideradas fueron: WiFi, Bluetooth y GSM. Al poseer en la inteligencia un kernel de linux, la comunicación vía WiFi es muy sencilla de implementar. Por dicho motivo se opta por este tipo de comunicación. Al disponer de diversos puertos USB en la inteligencia se opta por un módulo WiFi USB.

### **1.3.2. Comunicación con instrumentación**

En lo que respecta a la comunicación con la instrumentación se disponen de diversas opciones. Se tiene la posibilidad de comunicarse a través de un protocolo serie, I2C o incluso puertos USB. Por dicho motivo este aspecto no será analizado cabalmente en esta sección sino que se realizará al momento de analizar las opciones de comunicación.

### **1.3.3. Comunicación con motores**

Los motores como se explicó anteriormente funcionan mediante PWM. Por lo tanto, la comunicación entre la inteligencia y los motores será cableada. La señal de entrada de los ESC's se conectará directamente a los pines de salida de la inteligencia donde se programen los PWM.

## 1.4. Instrumentación

Para poder controlar el sistema es importante poder conocer los valores que toman las variables del mismo. Como se verá en el capítulo sobre el desarrollo del modelo físico del quadcopter, las variables que es necesario conocer son: La aceleración en las tres coordenadas y la velocidad angular del sistema. Por dicho motivo parece imprescindible dotar al sistema de sensores capaces de medir dichas magnitudes.

### 1.4.1. Acelerómetro

Previo a definir el acelerómetro, su principio básico de funcionamiento y su interés en la aplicación presentada se debe realizar una discusión física sobre la caída libre como sistema de referencia. En la física clásica, la fuerza gravitatoria que se ejerce sobre una masa es proporcional a la intensidad del campo gravitatorio en la posición en la cual se encuentra. La teoría general de la relatividad es una teoría métrica de la gravitación. Los fenómenos que en la mecánica clásica se le atribuyen a la acción de la fuerza de gravedad, corresponden a movimientos inerciales en una geometría curvada del espacio-tiempo en la teoría de la relatividad general.

Por lo tanto, desde el punto de vista de la física clásica, un sistema de referencia en caída libre es un sistema acelerado por la fuerza de la gravedad, y como tal, es no inercial. Por el contrario, desde el punto de vista de la física relativista, el sistema está acelerado en el espacio, pero no en el espacio-tiempo, por lo tanto el sistema de referencia es inercial.

Saldada esta discusión se define un acelerómetro como un dispositivo capaz de medir su aceleración propia en el marco de referencia de la caída libre relativista. Esto implica que el dispositivo no mide siempre su cambio de velocidad en el espacio. Por ejemplo, la medida de un acelerómetro en caída libre será cero a pesar de que su velocidad crezca, de la misma forma se puede observar que un acelerómetro en reposo respecto de la Tierra, no dará una medida nula, sino que por el contrario medirá como aceleración  $g$ . Existen diversos tipos de acelerómetro, en este caso se eligió trabajar con un acelerómetro contenido en un circuito integrado (tecnología MEMS). Las razones de esta elección son fundamentalmente, tamaño y peso (críticos en la aplicación) y económicos. Los mismos son más pequeños, livianos y baratos que otras tecnologías. Dicho acelerómetro, procesa las medidas y las convierte a una salida eléctrica, la forma de dicha salida depende si el integrado es analógico, o digital. Los acelerómetros basados en tecnologías MEMS 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. Ya que la masa de prueba en el diseño de los sensores MEMS son moléculas de gas, las estructuras móviles mecánicas son eliminadas dentro del acelerómetro.

Un acelerómetro de tres ejes, no es otra cosa que un acelerómetro capaz de medir su aceleración propia en tres ejes de coordenadas.

Resulta fundamental dotar al uQuad de un acelerómetro, el mismo será utilizado para obtener la aceleración lineal en cada instante. Integrando esta información se puede obtener la velocidad con la que se desplaza el sistema y por ende se puede obtener la posición del mismo conociendo la posición de partida. Este instrumento, no provee toda la información necesaria, para realizar el control del sistema. El sistema, presenta 6 grados de libertad; las tres coordenadas de su centro de masa, y los tres ángulos que determinan su orientación. En particular, el acelerómetro no detecta giros. Por lo tanto es incapaz de aportarnos toda la información necesaria. Es imprescindible entonces dotar al uQuad de un giróscopo.



### 1.4.2. Gir6scopo

Un gir6scopo es un instrumento que mide la velocidad angular del sistema en un marco de referencia inercial como el definido en la secci3n anterior. Las mismas restricciones sobre tama1o, peso y costos que se aplicaban para el aceler6metro se aplican aqu4. Por dicho motivo vuelve a optar por un instrumento de tecnolog4a MEMS. Los gir6scopos construidos con esta tecnolog4a basan su funcionamiento

Desde el punto de vista te6rico, procesando la informaci3n obtenida a partir del aceler6metro y del gir6scopo se puede conocer en todo momento la posici3n del sistema y su orientaci3n a partir de las condiciones iniciales. Sin embargo, en la pr6ctica esto no sucede as4. Todas las medidas realizadas tienen un cierto error. Para obtener la orientaci3n y la posici3n a cada instante se deben integrar las medidas obtenidas. Por lo tanto, se integra tambi3n el error. Esto produce una acumulaci3n de errores que afecta de forma considerable el resultado final luego de cierta cantidad de muestras. Por lo tanto parece razonable, poder cotejar los datos que se obtienen mediante este m3todo con datos obtenidos mediante otras fuentes. Es a partir de esta problem6tica que surge la necesidad de contar con un GPS. Se puede, cada cierto intervalo de tiempo, observar en cuanto difieren los resultados obtenidos integrando las medidas de los sensores con los datos que aporta el GPS, de esta forma se pueden corregir los errores debido al *integration drift*.

### 1.4.3. GPS

#### 1.4.4. Definición de instrumentación

En la secciones 1.4.1 y 1.4.2 se detalló el porqué de la elección de la tecnología MEMS para el acelerómetro y el giróscopo. Las razones fundamentales son el costo, tamaño y peso de los instrumentos, siendo los últimos dos críticos en la aplicación. A partir de esta definición surgen dos posibilidades, integrar los instrumentos diseñando un PCB o adquirir uno en el cual se encuentren los dos sensores. Al diseñar un PCB se reduce el costo de la instrumentación. El precio de cada chip ronda los 5 U\$, sumado al precio de algunas resistencias, capacitores y otros materiales necesarios para la construcción del PCB (Placa de cobre, percloruro, estaño, etc) hacen un total muy inferior al costo de comprar una placa ya armada (más de 60 U\$). Sin embargo, el proceso de diseño del PCB extiende los plazos en gran medida, se debe diseñar el circuito, construir y verificar su funcionamiento. El proceso mencionado tendrá probablemente una duración superior a las dos semanas, lo cual implica un retraso en varios aspectos del proyecto ya que diversas tareas previamente definidas dependen fuertemente del funcionamiento de la instrumentación. Por otra parte el peso que representa el costo de adquirir una placa en la que se incluyan ambos sensores (acelerómetro y giróscopo) en el presupuesto total es muy bajo (4 %).

A partir de el análisis realizado se decide por adquirir una placa ya diseñada que contenga los sensores necesarios. Existe una gran diversidad de soluciones de instrumentación en el mercado. Debido a los requerimientos del proyecto se descartaron muchas de ellas. Las opciones consideradas finalmente se resumen en una tabla en el anexo. La característica común a todas ellas es que pueden medir 6 grados de libertad, la misma cantidad de variables del sistema a controlar (tres coordenadas correspondientes a la posición del centro de masa, raw, yaw, pitch)

Los criterios que se fijaron para definir la instrumentación fueron los siguientes:

- Rango de medidas de los sensores
- Capacidad de cómputo
- Facilidad de programación (algunas placas incluyen microprocesadores)
- Comunicación disponible
- Compatibilidad con el resto del sistema
- Costo

En lo que respecta al rango de medida de los acelerómetros se definió que el mismo fuera de 3g. Dicha elección está fundamentada en que se planea un vuelo en el cual no se precisen considerar aceleraciones que sean muy superiores a la de la caída libre. Asimismo, se definió como rango de medida de los giróscopos un valor superior a los 300°/s, de forma que el sistema pueda realizar un giro casi completo en cualquiera de los tres ejes en 1 segundo. Lo que se observa es que todos los acelerómetros y giroscopos de las placas de esta preselección cumplen con dicho requerimiento.

	Rango del acelerómetro	Sensibilidad del ace- lerómetro	Rango del giróscopo	Sensibilidad del giróscopo
<b>CHR-6d</b>	3g	300mV/g	400°/s 100°/s	2.5mV/(°/s) 2.5mV/(°/s)
<b>Atomic IMU</b>	1.5g 6g	800mV/g 200mV/g	300°/s	3.3mV/(°/s)
<b>IMU Digi- tal Combo Board</b>	2g 16g	356LSB/g 321LSB/g	2000°/s	14.375 LSB/(°/s)
<b>IMU Anal- go Combo Board Razor</b>	3g	300mV/g	300°/s 1200°/s	3.3mV/(°/s) 0.83mV/(°/s)
<b>IMU Fusion Board</b>	2g	256 LSB/g	250°/s 2000°/s	131 LSB/(°/s) 16.4 LSB/(°/s)

Cuadro 1.7: Sensores

Resulta conveniente que la instrumentación posea un microprocesador, la razón es que le ahorra tiempo a la inteligencia del sistema en el procesamiento de las medidas crudas de los sensores. Los sensores presentan sus medidas constantemente en forma analógica o digital dependiendo del sensor en cuestión. En caso de ser una medida analógica se debe en primer lugar digitalizar. Una vez que se tiene la medida digitalizada se debe realizar un procesamiento que consiste básicamente en ponerle una marca de tiempo a cada medida y asociarle una etiqueta correspondiente al sensor que la realizó. Resulta sumamente interesante que no sea el *core* quien se encarga de esta identificación, sino que obtenga los datos pre-procesados. Por esta razón se favorecieron las placas que incluyeran un microprocesador.

	Frecuencia del reloj	Largo de palabra	RAM	Flash
<b>CHR-6d</b>	72MHz	32 bits	20Kb	64Kb
<b>Atomic IMU</b>	10MHz	8 bits	2Kb	32Kb
<b>IMU Digital Combo Board</b>	-	-	-	-
<b>IMU Analog Combo Board Razor</b>	-	-	-	-
<b>IMU Fusion Board</b>	-	-	-	-

Cuadro 1.8: Características de los microprocesadores

En caso de optar por una placa con microprocesador resulta fundamental que la misma sea sencilla de programar. Las razones son evidentes, si los algoritmos que vienen programados de fábrica no resultan adecuados para la aplicación se pueden modificar fácilmente. También parece importante que el código de fábrica sea abierto; en primer lugar para comprender su funcionamiento y poder procesar adecuadamente los datos que se obtengan de los sensores. Es interesante además poder modificar secciones puntuales de código, sin necesidad de reprogramar completamente el microprocesador.

La comunicación no resultó un factor crítico ya que todos los candidatos a *core* poseen diversas interfaces (UART, I2C, Conversores AD). Sin embargo, debido a la familiarización que se tenía con las comunicaciones serie se prefirió dar prioridad a aquellas placas que se comunicaran Via UART (en caso que se optara por una placa con microprocesador).

En lo que respecta a compatibilidad con el sistema, se buscó que la alimentación de la placa sea la misma que la del microprocesador principal. Por dicha razón lo ideal es que la placa pueda ser alimentada a 5V.

A partir de las consideraciones anteriores, se considera que la solución más adecuada para el objetivo que se plantea en esta sección es la placa Atomic IMU. Dicha placa cumple con los rangos de medida especificados anteriormente, posee un microprocesador de 8 bits con un reloj de 10MHz. Existe ya un código en c disponible para programar el dispositivo. El mismo puede ser modificado en caso de no cumplir con todos los requerimientos necesarios. La placa dispone de un puerto JTAG para la programación del mismo. La forma que tiene la placa de presentar los datos obtenidos de los sensores es a través de un puerto serie capaz de transmitir datos con una tasa de transferencia de 115.200bps. Cabe aclarar que la Atomic IMU es la única de las soluciones consideradas que puede ser alimentada con una fuente de tensión de 5V. Por otra parte el costo de la misma es de los más bajos dentro de las posibilidades consideradas.