Capítulo 2

ARQUITECTURA DEL SISTEMA.

2.1. Contexto tecnológico.

Hacemos una breve descripción de las tecnologías utilizadas en el proyecto:

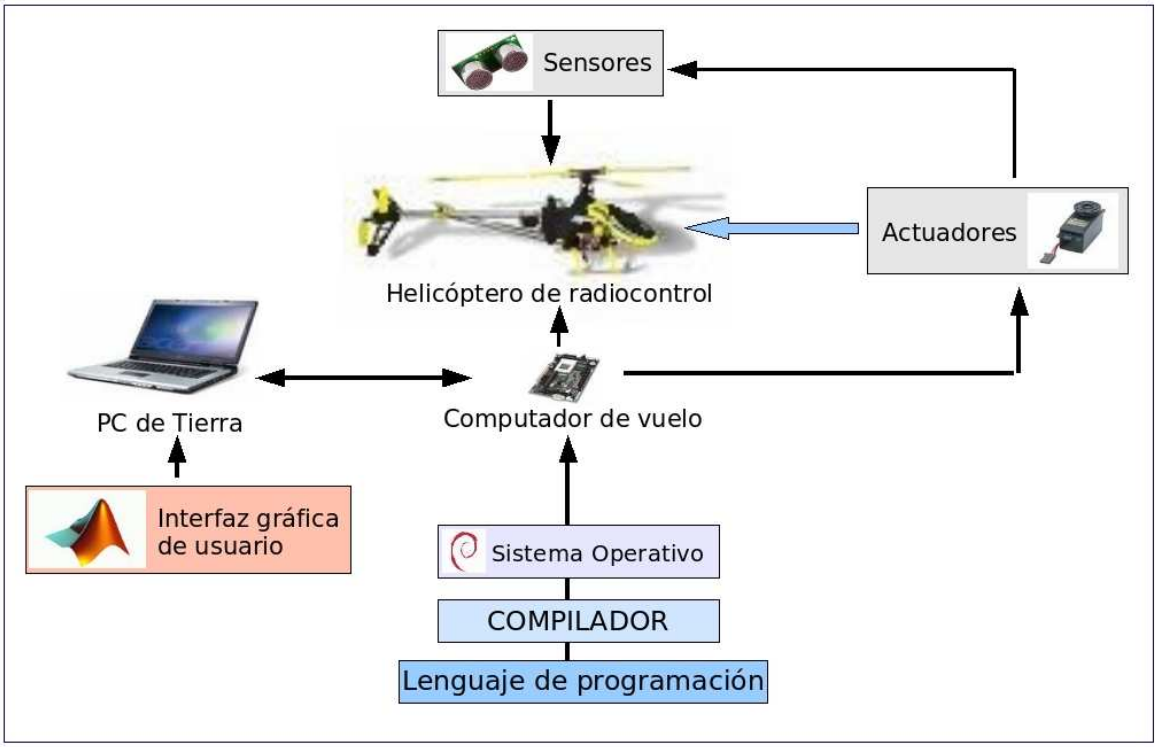

Figura 2.1: Esquema de las tecnologías utilizadas en el proyecto.

2.1.1. Helicóptero de radiocontrol.

Marca: X-Cell-Spectra (Modelo G-3D).
Motor: Zenoah G26.
Características dimensionales:

-Longitud: 1320 mm.

- Ancho de fuselaje: 250 mm.

- Altura: 450 mm.

- Diámetro del rotor principal: 1620 mm.

- Diámetro del rotor de cola: 290 mm.

Figura 2.2: Helicóptero X-Cell-Spectra sin carenado.

2.1.2. Actuadores.

Son los dispositivos encargados de mover los distintos controles de la aeronave. Como ya se ha visto, la planta de actuadores de nuestro helicóptero consta de cinco servomotores alimentados a 5v: uno en el colectivo, dos en el cíclico, uno en el rotor de cola y el último en el motor.

Un servomotor es un motor que es capaz de posicionarse de manera precisa dentro de un rango angular y de mantenerse estable en dicha posición. Son controlados por señales PWM: señales cuadradas a 50Hz de frecuencia y cuyo ancho de pulso es el que dictamina la posición angular del servo (ver figura 2.3).

2.1.3. Computador de vuelo.

El computador de vuelo es la placa Hércules EBX (modelo HRC400), que posee un microprocesador a 400MHz, una flash disk de 128Mb donde va alojado el Sistema Operativo y una memoria RAM de 128Mb.

La placa, que funciona como un ordenador embebido, está colocada dentro de una caja de acero y a ella se conectan los sensores y los actuadores. Los canales de entrada y salida de la CPU incluyen 4 puertos serie (RS-232 y RS-485). La placa tiene además un circuito de adquisición de datos (DAQ) que permite tener 32 E/S analógicas y 40 E/S digitales (de las cuales 4 son canales PWM).

Otra característica importante es el driver de la placa ('DSCud 5.7') el cual nos da la funcionalidad para el uso y control de la placa, de sus puertos y de funciones muy útiles como el control del ancho del pulso PWM o la generación de interrupciones.

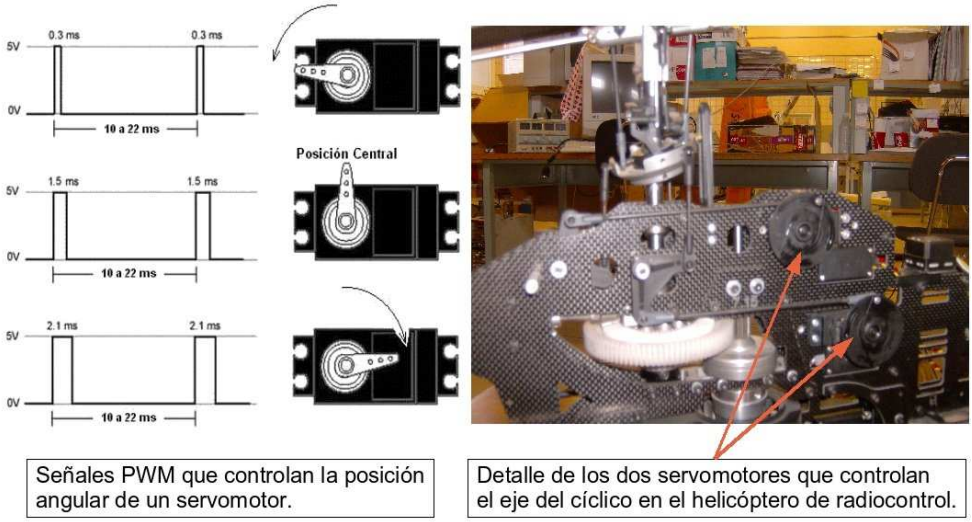

Figura 2.3: Detalles sobre los actuadores que controlan un helicóptero.

Durante las pruebas en vuelo, la placa no podrá tener conectados periféricos como discos duros o lectores de CD por problemas derivados del exceso de peso y de las vibraciones generadas por el rotor. Sin embargo, para todo el proceso de puesta a punto de nuestro proyecto, se tendrán conectados a la placa todos los periféricos que confieren a la placa las funcionalidades típicas de un PC: monitor, ratón, teclado, disco duro y en ocasiones, una disketera.

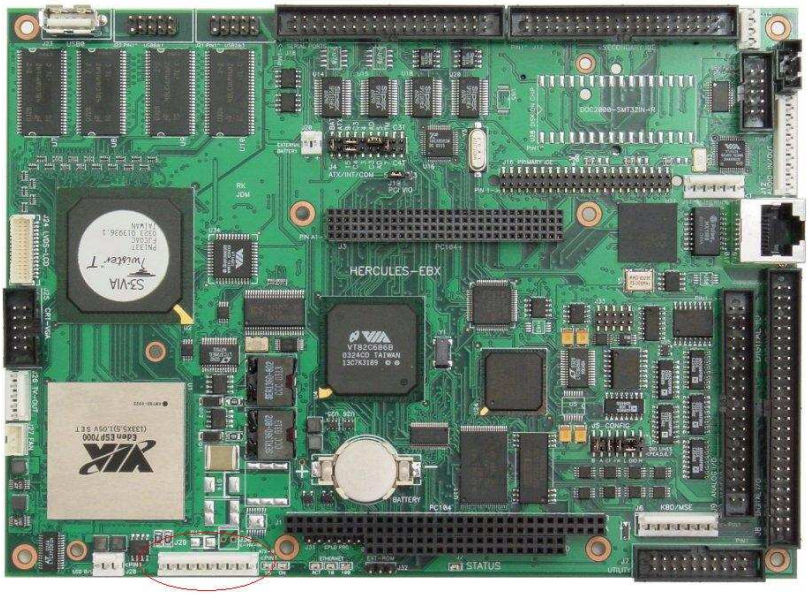

Figura 2.4: Placa Hércules EBX.

Resumen de características de la placa Hércules EBX:
Dimensiones: 8.00”x5.75” formato EBX.
Peso: 285g.
Temperatura de operación: -40 a 85ºC.

CPU	
Procesador	VIA Eden P-3, 400MHz.
Memoria SDRAM	128Mb.
Memoria Flash	2MB.
E/S del sistema	4 USB 1.1, PS/2 kbd/mousse.
Puertos Serie	2 RS-232 establecidos (o RS-485).2 RS-232/485 configurables.
Máxima tasa de datos	460.8 kbps en todos los puertos.
Conexiones IDE	1 conector de 44 pines para Flash disk; 1 UDMA-100 de 40 pines de canal dual; zócalo para compact flash.
Ethernet	10/100 Mbps.
Consola serie	COM1 / COM2 seleccionable.
Disquetera	USB.
PC/104+bus	+5V / +3.3V seleccionable.

ALIMENTACIÓN	
Tensión de entrada	5-28VDC std., 20-48VDC opt.
Potencia total de salida	Son 40W en total (30W, 28W ó 24W según velocidad de la placa.)
Consumo de potencia	12W a 550MHz y 16W a 750MHz.
Tensión de salida	+5V, +3.3V (en el bus PCI).
Salidas conmutadas	+5V, +12V, +3.3V.

CIRCUITERÍA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	
Entradas analógicas	32, resolución A/D de 16 bits.
Máxima tasa de muestreo	250KHz en total.
Modos de entrada	Común o diferencial.
Rangos de entrada	+/-10V, +/-5V, +/-2.5V, +/-1.25V, 0-10V, 0-5V, 0-1.25V.
Exactitud	<+/-2LSB tras la autocalibración.
Salidas analógicas	4, resolución D/A de 12 bits.
Impedancia de entrada	10 ohm.
Corriente de salida	+/- 5mA máx, 2Kohm min. de carga.
E/S digitales	40 líneas, compatible con la lógica de 5V con protección ESD.
Dirección	Programable en los puertos de 8 bits.
Corriente de salida	0: 12mA máx; 1: 4mA máx.
Contadores/temporizadores	1 para el control de la tasa de muestreo A/D de 24 bits. 1 de propósito general de 16 bits.
PWM	4 salidas PWM (Pulse-Width Modulation) independientes y programables.

2.1.4. Sistema Operativo.

El sistema operativo instalado en el computador de vuelo es Linux, concretamente la versión Debian 3.0 Woody(r4.0). Vemos los motivos de la utilización de Linux frente a otros sistemas operativos:

- El kernel de Linux es uno de los más robustos y versátiles de todos los sistemas operativos conocidos. Esta bajo licencia pública general de GNU (software open source), con lo cual el sistema original ha recibido y recibe continuas aportaciones de miles de programadores miembros de las comunidades Linux, lo que permite el desarrollo continuo del núcleo.

- Linux es un sistema de distribución gratuita, lo que quiere decir que no se ha de pagar ningún

tipo de licencia a casa desarrolladora alguna por su utilización. Además, el código fuente de sus programas suele ser accesible al público general.

- Alta configurabilidad.

- Por las tres características anteriores, este sistema operativo en sus distintas versiones es utilizado por un elevadísimo número de usuarios en todo el mundo, lo cual favorece que exista una gran cantidad de información sobre su uso, sobre todo en la red.

- Buena respuesta en tiempo real.

Por su parte, las razones principales por las que se escogió la distribución Debian 3.0 Woody son:

- Esta versión ocupa muy poco espacio en disco, lo cual nos permite instalarlo en la flash disk de 128Mb (la instalación en su modalidad mínima sólo ocupó 90Mb del disco duro).

- La instalación desde la página web oficial de Debian es fácil y guiada.

- Debian posee un sistema de integración de paquetes muy coherente, eliminando gran parte de los problemas por complejas dependencias. Esta característica fue muy útil en la desinstalación de los módulos no necesarios para que lo ocupación de espacio en disco fuera la mínima posible.

- Es un sistema de gran estabilidad y seguridad, ya que al estar disponible su código fuente su robustez es evaluada de manera abierta y continua.

El sistema operativo irá instalado tanto en la flash disk de la placa como en el disco duro externo. Al encender la placa, el gestor de arranque Debian (LILO) permitirá seleccionar con cual de los dos sistemas operativos se desea arrancar. Normalmente las pruebas en tierra, sin poner el helicóptero en vuelo, se harán arrancando desde el disco duro auxiliar y con todos los periféricos conectados, de manera que se podrá trabajar en el entorno gráfico. Se utilizará la opción de la flash disk para trabajar en modo comando, o incluso sin la pantalla, el ratón y el teclado. De este modo se pueden hacer las pruebas con el helicóptero en marcha y utilizando la teleoperación desde el ordenador de tierra. Para ello programaremos y compilaremos arrancando desde el disco duro y una vez validado el código se pasarán los ejecutables a la flash disk.

2.1.5. Lenguaje de programación en la aplicación del computador de vuelo.

El lenguaje en el cual se programa la aplicación que se ejecuta en la placa Hércules es C. Éste es un lenguaje de uso general con una síntesis sumamente compacta y de alta portabilidad.

Se trata de un lenguaje de medio nivel, pero con muchas características de bajo nivel. Los compiladores suelen ofrecer extensiones que posibilitan mezclar código en ensamblador con código C o acceder directamente a memoria o dispositivos periféricos, y una de sus principales características es el uso de librerías externas que contienen la definición de funciones.

Además de las funciones de C y de diversas librerías ampliamente usadas, se utilizan las librerías del 'driver' de la placa: DSCud V5.7, que contienen entre otras las funciones que permiten crear las interrupciones de usuario, la toma de datos AD, controlar las salidas PWM y la toma de tiempos.

2.1.6. Compilador del computador de vuelo.

Se utiliza el compilador GCC de linux, un compilador integrado del proyecto GNU para C, C++, Objective C y Fortran. Es capaz de recibir un programa fuente en cualquiera de estos lenguajes y generar un programa ejecutable binario en el lenguaje de la máquina donde va a correr. Es un compilador rápido, muy flexible y riguroso con el estándar de C ANSI.

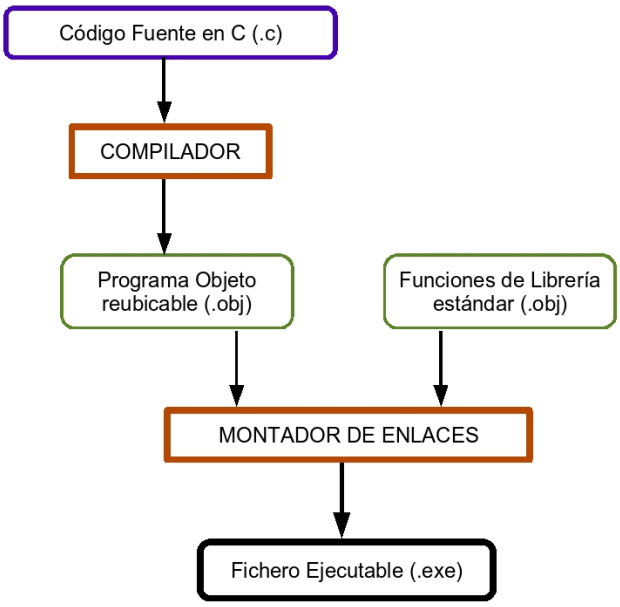

Figura 2.5: Esquema de compilación.

Para compilar se usará la utilidad 'make'. 'Make' es una herramienta que simplifica los ciclos de compilación y enlazado; ayuda a construir rápidamente grandes proyectos porque permite compilar sólo aquellas fuentes que han sufrido modificación desde la última compilación y reconstruir los ejecutables que dependen de los objetos resultantes. Además, permite establecer una serie de reglas que que especifican cómo debe procederse con las circunstancias especiales de cada caso.

Pero 'make' es algo más que una utilidad ligada a la compilación y enlazado: se trata de una herramienta genérica para ejecutar comandos en base a ciertas dependencias, y aunque generalmente está ligado a las operaciones de compilar y enlazar ficheros, puede especificarse prácticamente cualquier comando aceptado por el Sistema Operativo.

En el 'make' hacemos referencia a las siguientes librerías:

LIB=-L/usr/local/dscud5 -L/opt/dscud5 -ldscud5 -pthread -lm
INC=-I/usr/local/dscud5 -I/opt/dscud5

Al hacer *make* se ejecutará la orden de compilación y se creará un archivo ejecutable llamado ***main***, y en el que han participado todos los programas .c. Con la orden *make clean* se borrará el ejecutable ***main*** pudiendo así volver a hacer la compilación.

2.1.7. Sensores.

Para la caracterización completa del helicóptero se optó por la instalación de dos tipos de sensores: uno que nos diera información completa sobre su actitud, y otro que proporcionara datos sobre la altura de la aeronave. Dado que el helicóptero hará sus experimentos de vuelo iniciales sobre una plataforma adaptada para ello, los datos de altura son suficientes para conocer su posición.

El sensor encargado de proporcionar la orientación de la aeronave será una unidad de medida inercial dentro de la caja aviónica adherida al helicóptero, y para las medidas de altura, la solución adoptada finalmente fue doble: dos altímetros de distinta naturaleza acoplados a la plataforma para dar más fiabilidad a las medidas. El primero es un potenciómetro y el segundo es un sensor de ultrasonidos.

2.1.7.1. Unidad de medida inercial UMI.

Marca: Microstrain.Inc (Modelo 3DM-GX1).
Dimensiones: 65x90x25mm.
Peso: 75g.

La unidad de medida inercial está compuesta de tres acelerómetros y tres giróscopos y su misión es proporcionar las medidas necesarias para conocer la actitud del vehículo. Se conecta a la placa Hércules a través del puerto RS-232 y proporciona los siguientes datos:

-Timer ticks (tiempos de muestreo).

-Temperatura en el interior del sensor.

-Ángulos de Euler: Pitch, Roll y Yaw.

-Velocidades angulares.

-Matriz de quaternions y matriz de orientación.

Figura 2.6: Unidad de medida inercial 3DM-GX.

La UMI posee dos modos de funcionamiento: el método continuo y el polling (discontinuo). En nuestro caso el sensor está configurado para funcionar en modo continuo, de manera que los nuevos datos obtenidos estén siempre listos para ser leídos por la placa.

2.1.7.2. Potenciómetro

Marca: Vishay Spectrol (Modelo 357).
Dimensiones: 40x75x35mm (con carcasa protectora).
Peso: 80g (con carcasa protectora).

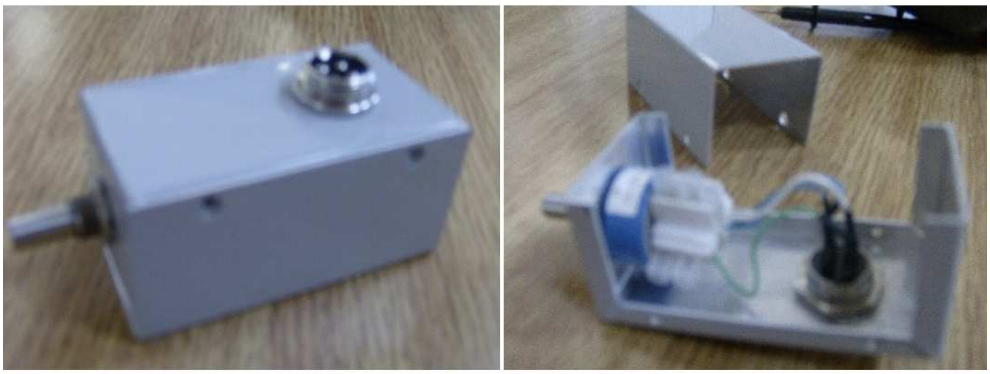

Figura 2.7: Vistas del potenciómetro dentro de su carcasa.

Un potenciómetro está concebido en un principio como instrumento de medida de voltajes, sin embargo su uso como sensores de giro está muy extendido puesto que se trata de una forma muy barata y sencilla de obtener una medida de ángulos. Así pues, este sensor es colocado en el eje del brazo de la plataforma obteniendo el ángulo que éste forma con el plano horizontal y del que, por relaciones trigonométricas se calculará la altura. La salida de este sensor es analógica, con lo cual estará conectada al conversor A/D del computador de vuelo (ver figura 2.12).

2.1.7.3. Sensor de ultrasonidos.

Marca: SRF05.
Dimensiones: 55x105x35mm (con carcasa protectora).
Peso: 120g (con carcasa protectora).

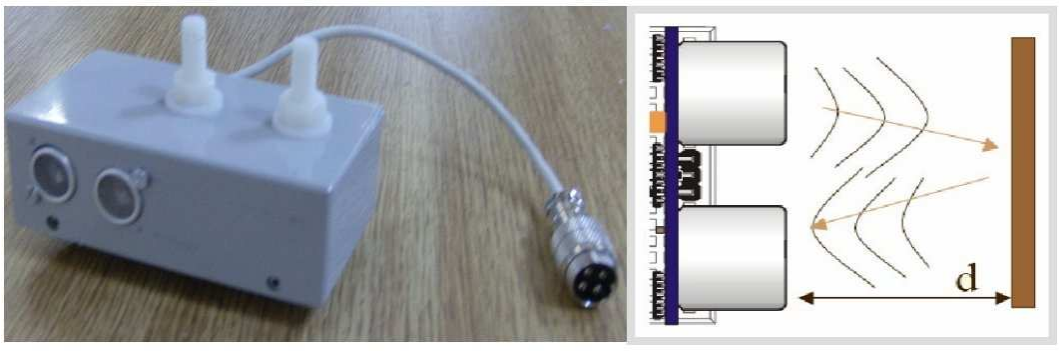

Figura 2.8: Sensor de ultrasonido en su carcasa.

El de ultrasonidos es un sensor de distancias por sónar. Funcionan por tiempo de vuelo y son más precisos que los potenciómetros, aunque más sensibles al ruido y a las perturbaciones. Este sensor se

coloca en el extremo del brazo que soporta al helicóptero apuntando hacia el suelo, de manera que obtendrá medidas directas de la altura del aparato (ver figura 2.12).

2.1.8. Puente inalámbrico.

Para comunicar el helicóptero con tierra se conecta un puente inalámbrico Wi-Fi (IEEE 802.11) al conector de red Ethernet (RJ-45) de la placa Hércules.

Marca: D-Link (Modelo DWL-G810.).

Dimensiones: 92x149x25mm.

Peso: 500g.

Figura 2.9: Puente ethernet inalámbrico.

Dado que la aeronave no deberá tener conectado en vuelo ningún periférico como el ratón, el teclado y la pantalla, se realiza una teleoperación desde el ordenador de tierra, por lo tanto hay una comunicación bidireccional habilitada que permite que desde tierra se envíen ordenes al helicóptero, y que éste a su vez envíe los datos de los sensores, bien en tiempo real, bien en un archivo bajo demanda.

2.1.9. Batería LiPo

Marca: RCMaterial (Modelo NanoPack 3S2P).

Dimensiones: 185x50x23mm.

Peso: 381g.

La capacidad de la batería es de 11.1V y 3400 mAh, y ha de cubrir las siguientes necesidades eléctricas:

- Placa Hércules: 5-28 VDC, 12W.
- UMI: 5.2-12 VDC, 90mA.
- Potenciómetro: 10V
- Sensor de ultrasonido: 5V.
- Puente Ethernet: 12 VDC.

Con estas especificaciones de consumo, con este modelo de batería se tienen hasta 3 horas de autonomía, suficiente teniendo en cuenta que un depósito de combustible del minihelicóptero dura aproximadamente 20 minutos.

2.1.10. Plataforma de vuelo.

Para las pruebas de identificación y primeros ensayos se ha adquirido una plataforma de pruebas para helicóptero. Para encontrar tanto el modelo matemático del helicóptero como los parámetros de los controladores se harán una serie de pruebas en las que se combinen las excitaciones en alguno de sus actuadores en algunos casos con los controladores en otros, sacando conclusiones a través de los datos que la Hércules recibirá de sus sensores. La función principal que tendrá esta plataforma será la de posibilitar todos estos experimentos evitando en todo momento cualquier riesgo de accidente en el que pudiesen ser dañados el helicóptero o la electrónica interna de la caja aviónica.

Figura 2.10: Estructura de la plataforma, situada en la azotea del edificio L1 de los laboratorios de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

La plataforma consta de un brazo articulado en cuyo extremo irá situado el helicóptero que tendrá libres sus 6 grados de libertad, aunque gracias a la plataforma se podrá restringir alguno de ellos. Está realizada en aluminio y su brazo principal tiene movimientos rotatorios sobre eje vertical y rotatorio sobre eje horizontal. En el extremo de éste brazo, hay una plataforma con giro sobre eje vertical y horizontal donde irá el helicóptero, y una rueda para su apoyo en el suelo.

Figura 2.11: Vuelo de un helicóptero de radiocontrol sobre una plataforma de pruebas.

Además, a la estructura original adquirida mediante su compra en la empresa británica Active Distribution Limited, se le han hecho pequeñas modificaciones: se la ha dotado de un anillo de aluminio en su base, que servirá como apoyo para el extremo del brazo donde iría situada la aeronave, y en las zonas de fricción se ha cuidado que el rozamiento sea mínimo utilizando casquillos de ny-

lon, debido a que el rozamiento excesivo provoca ruido eléctrico que interfiere con la electrónica del helicóptero.

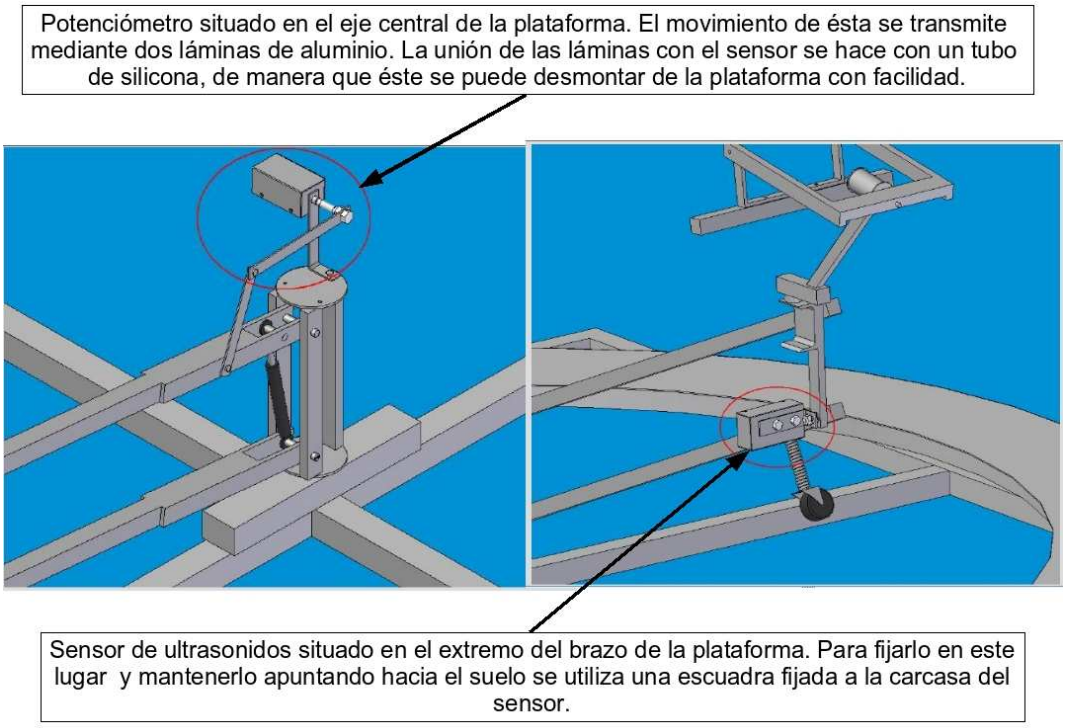

Figura 2.12: Situación de los sensores de altura dentro de la plataforma de pruebas.

2.1.11. Caja aviónica

Dimensiones: 300x250x100mm (con antena y batería).
Peso: 2.3Kg.
Temperatura de funcionamiento: 8^{o}C a 40^{o}C.

Todos los componentes seleccionados para llevar a cabo la teleoperación y control de la aeronave desde el control de tierra deben ser integrados dentro de la caja aviónica.

Figura 2.13: Caja aviónica con las conexiones a la izquierda y sin las conexiones a la derecha.

Los materiales escogidos para la fabricación de la caja y la distribución de los componentes dentro de la misma atienden a dos propósitos principales:

-Reducción de dimensiones y peso equilibrado: los dispositivos se han colocado de forma que ocupe el menor espacio y además se encuentre en equilibrio para no dificultar ó condicionar los movimientos del helicóptero.

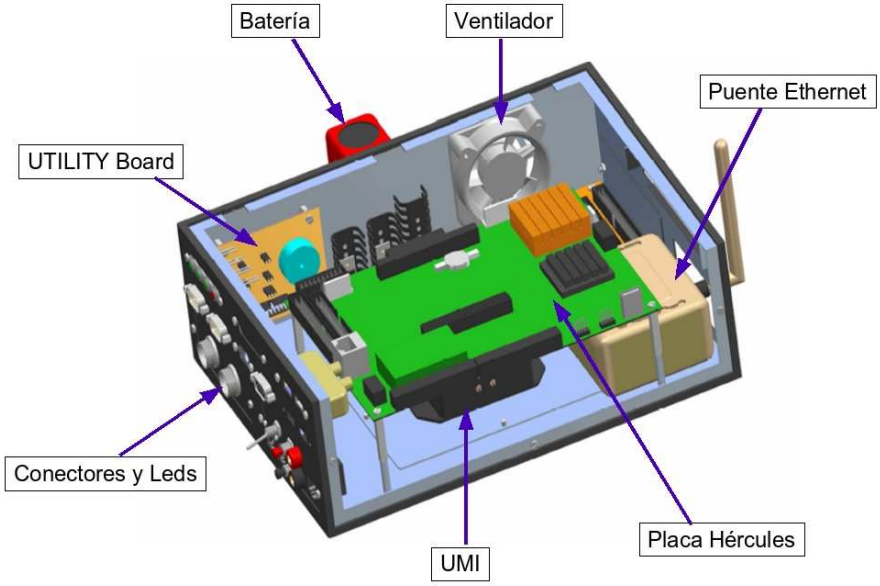

Figura 2.14: Esquema en Solid Edge de la distribución de los componentes más importantes dentro de la caja.

-Adaptación de sus dimensiones a los patines del helicóptero para sus sujeción en vuelo.

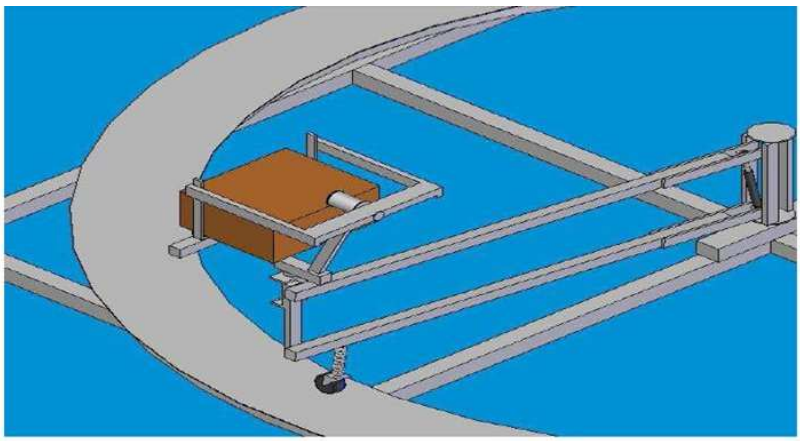

Figura 2.15: Esquema en Solid Edge de la fijación de la caja aviónica en el brazo de la plataforma de vuelo.

2.1.12. Ordenador de tierra

El ordenador de tierra sólo habría de cumplir las especificaciones propias de un PC normal. En nuestro caso el procesador es un PIII y su sistema operativo es Windows XP Las características de procesador y memoria RAM permiten la instalación de Matlab 7.0, plataforma en la cual se desarrollará el entorno de control de tierra.

2.2. Aplicación en tiempo real en el computador de vuelo.

2.2.1. Requisitos.

Memoria RAM.

De los 128 Mb de que se disponen se pueden utilizar hasta 50Mb para el almacenamiento de datos de vuelo, que posteriormente se volcarán a la flash disk. Siendo flotantes (4 bytes) los datos a almacenar, se podrán guardar 50Mb/4=12.5M datos. Si muestreamos a una media de 50Hz, se podrán hacer experimento de 12.5M/50=250.000s para un sólo canal. Normalmente se utilizarán alrededor de 25 canales, por lo tanto se dispondrá de unos 166.6 minutos para el experimento.

Disco duro.

De los 128Mb de la flash disk se utilizan:

-90Mb para el Sistema Operativo.

-5Mb para los distintos programas y drivers.

-32Mb para los datos registrados en los experimentos.

Velocidad.

El micro de la Hércules funciona a 400MHz, siendo esta velocidad suficiente para cumplir los objetivos del proyecto. Donde se emplea más tiempo es en la lectura de los datos de la UMI a través del puerto RS-232, lo que hace que el resto del tiempo de cómputo sea mínimo con respecto a éste.

2.2.2. Captura de datos.

Los datos que van a ser capturados por la placa Hércules son previamente seleccionados desde el ordenador de tierra, que mandará una trama con esta información a través de la red IP al helicóptero. Estos datos son:

-Desde la UMI: el pitch, el roll y el yaw. La captura se hace a través del puerto RS-232.

-Desde el potenciómetro: la altura. Su captura se hace a través de la entrada analógica.

-Desde el sensor de ultrasonidos: la altura. Su captura se hace a través de la entrada digital.

Para cada uno de estos datos podrá seleccionarse si es capturado, y si tras la captura es almacenado en una cola circular o bien es mandado por red en tiempo real al ordenador de tierra. La cola circular es de tipo FIFO (first input first output). Tras una orden del control de tierra, todos los datos guardados en ella serán volcados al disco duro.

2.2.3. Comunicación con tierra.

La comunicación entre el helicóptero y tierra se hace a través de la red IP. Para ello, se utiliza el puente inalámbrico Wi-Fi, que irá conectado a conector RJ-45 de la placa Hércules. La comunicación está concebida para ser bidireccional: el computador de vuelo suele actuar como servidor a la espera de alguna solicitud del control de tierra. Así pues la Hércules responderá a estas órdenes ejecutando alguna acción o enviando los datos capturados.

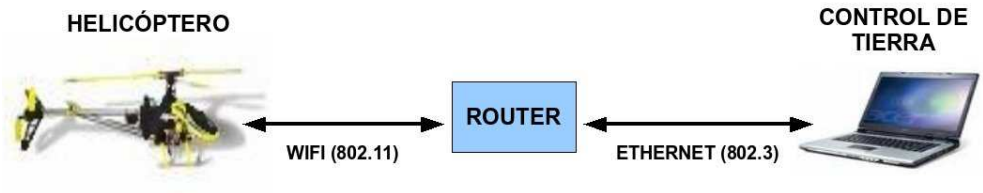

Figura 2.16: Protocolos de nivel de enlace para el tramo helicóptero-router y el tramo router-tierra.

La comunicación helicóptero-tierra soluciona las siguientes necesidades: envío de órdenes y datos de configuración de la placa desde el control de tierra al helicóptero, y el envío de los datos capturados en el experimento, ya sea en tiempo real o dentro de un archivo que la aplicación crea al acabar el experimento. Se utilizan distintos canales para cada tipo de comunicación:

Helicóptero a tierra:

Puerto 4950: para el envío en tiempo real de los datos muestreados al control de tierra. Este envío se hará en cada interrupción de usuario.

Puerto 4954: para el envío del archivo de datos creado. Se realizará por demanda del ordenador de tierra.

Puerto 4955: para los mensajes de error.

Tierra a helicóptero:

Puerto 4951: para la recepción de la trama que contiene los parámetros para configurar el experimento al inicio.

Puerto 4952: para la recepción de diversas directivas desde tierra.

Puerto 4953: para la recepción de tramas que se utilizarán para la excitación de alguno de los ejes en los experimentos de identificación de parámetros.