

Capítulo 1: Introducción

1.1 Descripción y objetivos

El objeto del presente Proyecto Final de Carrera, es abarcar el diseño de una interfaz gráfica para un sistema inercial de ayuda al montaje de componentes aeronáuticos. Para tal fin, hemos optado por la implantación de un software en un sistema móvil, facilitado por la empresa Arcom y encargado de gestionar las comunicaciones con todos los dispositivos.

La parte de diseño a la que se hace referencia, es la que comprende los aspectos software del mismo: interfaz gráfica, diseño de protocolos, comunicaciones RS-422, conexiones TCP y UDP, algoritmos, tratamiento de información y robustez del sistema.

1.2 Alcance del proyecto

El sistema comprende la implantación de dos computadores empotrados, similares entre sí, situados cada uno de ellos en una parte concreta del avión. Ambos computadores están conectados, mediante un enlace RS-422, a una Unidad de Medida Inercial (en adelante IMU, del inglés Inertial Measurement Unit), que proporcionan constantemente datos relativos a su posición. Además de la conexión con las IMUs, estos computadores están sincronizados entre sí mediante un enlace UDP/IP y con un monitor central por TCP/IP. En la Figura 1.1 puede observarse el sistema en su conjunto:

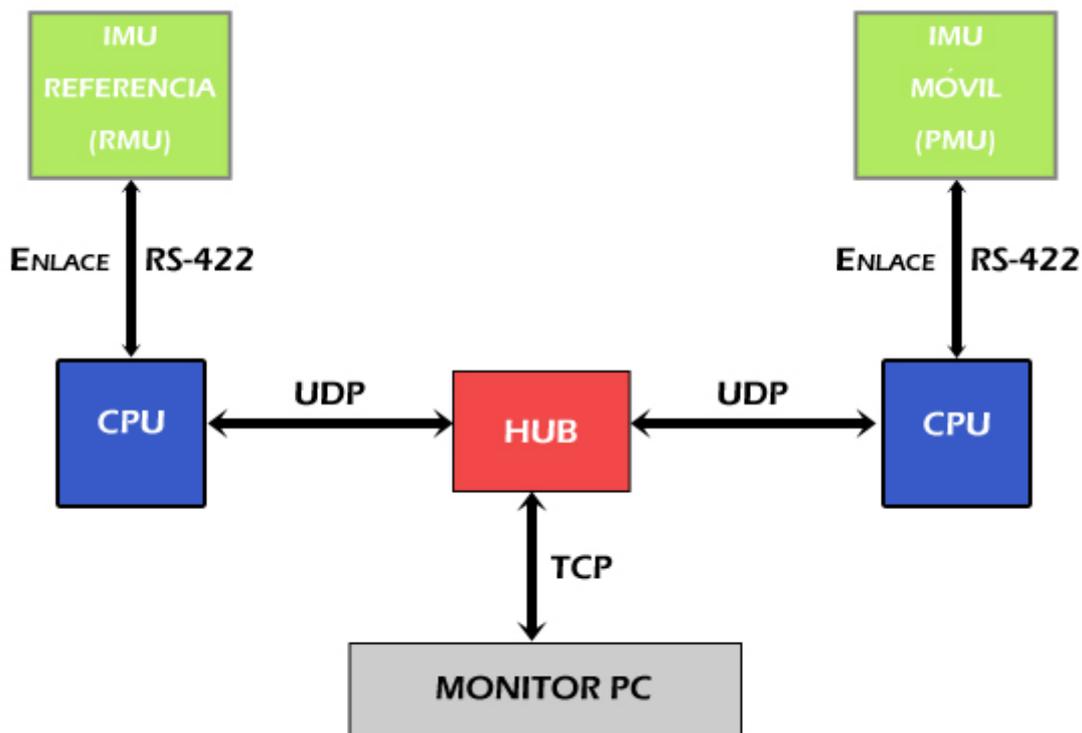


Figura 1.1 Esquema del sistema

El objetivo del proyecto consiste en realizar ciertas medidas utilizando ambas IMUs. Las medidas podrán ser elegidas, mediante la interfaz gráfica, por parte del operario. Una vez terminen, se almacenarán los resultados en unos ficheros. Tanto los ficheros de experimentos como los de resultados, se intercambian con el PC monitor mediante la conexión TCP.

En el desarrollo de los experimentos, ambos sistemas móviles (IMU y CPU) parten desde una misma posición, la posición 'A'. Una de ellas, denominada RMU (Referente Measurement Unit), permanece fija en 'A', mientras que la otra PMU (Portable Measurement Unit) realiza un trayecto desde 'A' hasta una posición 'B'.

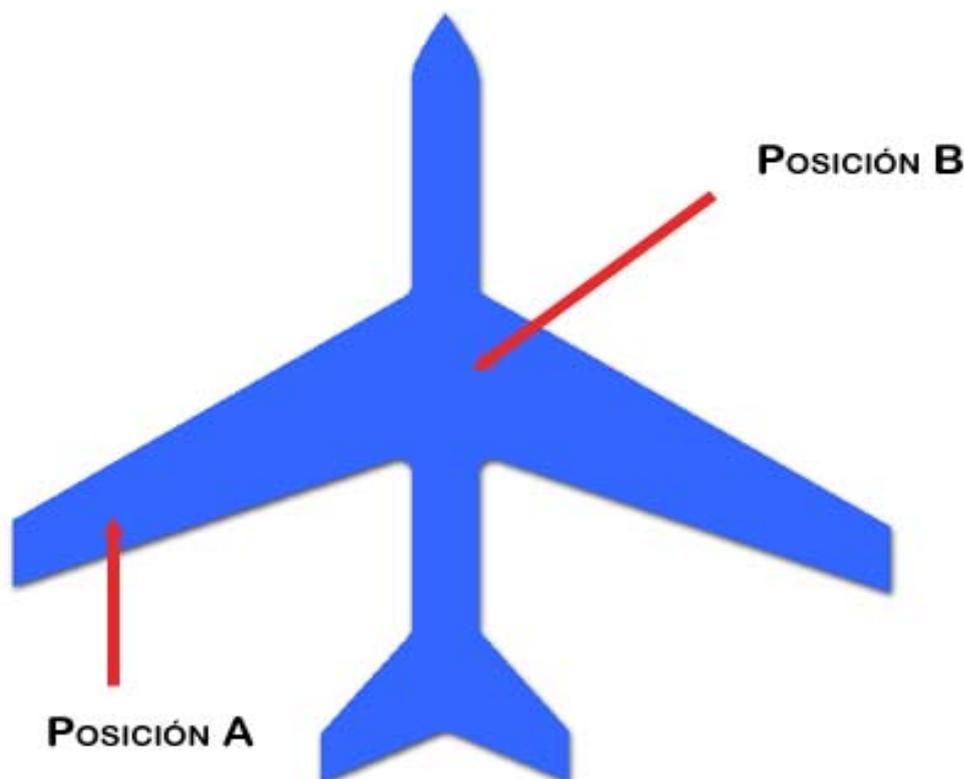


Figura 1.2 Posición de las Viper

Durante el trayecto, la IMU envía a su sistema móvil asociado un envío periódico de información. El computador la procesa y valida de acuerdo al experimento a realizar. Estos experimentos pueden ser elegidos por parte del operador, utilizando para ello la interfaz gráfica mostrada en la pantalla del computador empotrado.

En este proyecto se describen las soluciones adoptadas y el software desarrollado, así como los diferentes problemas que han aparecido para llevar a cabo tal fin.

1.3 IMU

1.3.1 Descripción general de una IMU

Una Unidad de Medidas Inerciales (IMU o UMI en español) es en general un sistema cerrado que es usado para detectar la orientación y velocidad. Típicamente se encuentra en un avión o en un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Normalmente este dispositivo usa una combinación de acelerómetros y sensores de velocidad angular (giróscopos) para conocer cómo se está moviendo éste y en qué posición se encuentra.

Típicamente, una IMU detecta la velocidad angular y los cambios de orientación instantáneamente (i.e. ángulos de roll, pitch y yaw), además los integra para averiguar el cambio total sobre la posición inicial. Esto contrasta con el sistema GPS, el cual utiliza satélites para detectar la posición. Las IMUs por tanto suelen tener un error acumulado o deriva: un error creciente entre la posición hallada por la IMU y la posición real de ésta. Porque una IMU esta sumando continuamente los cambios detectados en la posición, cualquier error en esta medida es acumulado.

Las IMUs son normalmente un componente de un sistema de navegación. Otros sistemas tales como los GPS (usados para corregir el término de deriva en la posición), un sistema barométrico (para la corrección de la altitud), o un compás magnético (para la corrección de la orientación) compensan las limitaciones de una IMU. Hay que notar que la mayoría de los otros sistemas tienen sus propios defectos los cuales son compensados entre ellos.

El término IMU esta ampliamente extendido para referirse a una caja, la cual contiene 3 acelerómetros. Estos están situados de tal forma que sus ejes de medida son mutuamente ortogonales. Miden las llamadas “fuerzas específicas” (aceleración inercial – gravedad).

Tres giróscopos están situados de forma que sus ejes de medidas sean ortogonales entre sí midiendo las velocidades de rotación. La posición angular se obtiene mediante la integración de una ecuación diferencial a partir de la velocidad angular.

La integración de la velocidad angular en los giróscopos causará el error de deriva, pero la observación del vector gravedad mediante acelerómetros sirve como una observación externa de la vertical en un punto (local). Esto unido al campo magnético terrestre corrigen la mayoría de los errores de deriva. No obstante, estos métodos no han sido empleados en nuestro proyecto.

Es importante destacar, que debido a la alta precisión exigida en el proyecto, los errores de deriva nos limitan la duración de nuestros experimentos (del orden de 15 minutos).

Para conseguir una precisión superior, la caja debe ser diseñada de forma que la temperatura sea controlada y se mantenga constante. Las paredes de la caja están hechas de materiales que minimicen la interferencia electromagnética. Si las señales de salida son analógicas, el ruido eléctrico debe ser minimizado en los cables y en el conversor analógico-digital. Si la señal de salida esta ya en formato digital, el retraso temporal se convierte en la principal preocupación.

Los datos suministrados por una caja de IMU es todo lo que se necesita para llevar a cabo la estimación de la navegación. El primer uso de tal caja fue en un barco, y actualmente los satélites también tienen una. Casi cualquier dispositivo que deba usar de alguna manera la electrónica para saber su aceleración, orientación y/o velocidad tiene una IMU.

1.3.2 Ecuaciones del giróscopo

El giróscopo es un sensor de movimiento asociado a un sistema de referencia no inercial, supongamos S.R.1, capaz de medir las tres componentes del vector de velocidad angular instantánea correspondiente a la rotación del sistema S.R.1 con respecto a otro sistema de referencia inercial, que denominaremos S.R.0.

El sistema no inercial (S.R.1) serían los ejes del cuerpo sobre el que va montado el giróscopo, en nuestro caso el elemento de ensamblaje aeronáutico. Por otro lado, la elección del sistema de referencia inercial S.R.0 es arbitraria, y por tanto elegimos S.R.0 como la orientación de S.R.1 en el instante $t = 0$. En instantes posteriores de tiempo es de esperar que los sistemas de referencia tengan trayectorias divergentes.

Nuestro sistema de navegación inercial requiere conocer en todo instante t la posición relativa de estos sistemas, es decir los ángulos de Euler $(\phi(t), \theta(t), \varphi(t))$ del sistema S.R.1 a con respecto a S.R.0, sabiendo que para $t = 0$ se tiene

$$(\phi(0), \theta(0), \varphi(0)) = (0, 0, 0).$$

Estas magnitudes deben inferirse a partir de las medidas de velocidad angular w , única magnitud conocida en el giróscopo de tres ejes. Concretamente esta magnitud se tiene en componentes del sistema S.R.1, por lo que la denominaremos

$$\omega = [\omega_x \omega_y \omega_z]^T$$

La relación entre w y los ángulos de Euler viene determinada por el conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales:

$$\dot{\phi} = (w_y \sin \phi + w_z \cos \phi) \tan \theta + w_x$$

$$\dot{\theta} = w_y \cos \phi - w_z \sin \phi$$

$$\dot{\varphi} = (w_y \sin \phi + w_z \cos \phi) \sec \theta$$

Un sistema de navegación inercial debe tomar muestras de w en instantes periódicos de tiempo $t = 0; T; 2T; \dots$, es decir $t = kT$, $k = 0; 1; \dots$ donde T es el período de muestreo, y en esos instantes deberá actualizar el valor estimado de los ángulos de Euler con arreglo a dicha ecuación diferencial. Al tratarse este proceso de una integración numérica discretizada, cualquiera que sea el algoritmo de integración se produce un error debido a las siguientes causas:

1. Cualquier algoritmo de integración tiene una exactitud limitada por el paso de integración T , ya que dependiendo de la forma de $f(\cdot)$ se pueden producir variaciones continuas de x en los instantes intermedios del intervalo de integración que el algoritmo, basado únicamente en los valores extremos, no es capaz de capturar. Esa precisión limitada introduce un error quasi-aleatorio cuya varianza crece a lo largo del tiempo al no existir refresco de los valores absolutos de los ángulos.
2. En general, existe una pérdida de información debida al muestreo de una señal externa w , salvo que ésta sea limitada en banda. Concretamente el ancho de banda máximo que debe tener la señal de velocidad angular para no perder

$$\text{dicha información es } BW(\text{rad/s}) = \frac{\pi}{T}$$

1.3.3 Historia

Desde el principio de los tiempos, el ser humano se ha movido de un lugar a otro conociendo o buscando el camino; esta habilidad es de alguna manera una forma de navegación. Debido al deseo de explorar mucho más lejos, los instrumentos se desarrollaron para aplicaciones marinas. Más recientemente, ha habido desarrollos significativos en sensores inerciales y sistemas de navegación inerciales en tierra, en el aire, sobre o bajo el agua así como en el espacio en los planetas y más allá.

Nuestros ancestros viajaban en busca de comida, normalmente en tierra firme. A medida que se desarrollaban, cruzaron ríos usando puntos de referencia, esto es navegación por observación. Mayores desarrollos en las técnicas de navegación por hitos, permitieron que los Polinesios cruzasen el Océano Pacífico hace dos mil años usando su conocimiento de las estrellas e hitos. Estas técnicas sólo pueden ser usadas en ciertas condiciones climatológicas. En el siglo XIII los chinos descubrieron las propiedades de la magnetita y aplicaron los principios del magnetismo para fabricar brújulas que usaron para navegar por los mares del sur de China. Este dispositivo podía ser usado independientemente de la visibilidad, pero era difícil de usar con aguas turbulentas. Los otros dispositivos útiles para ayudar a viajar largas distancias fueron los sextantes, los cuales habilitaban posiciones fijas para seguirlas con precisión en tierra.

En el siglo XVII Sir Isaac Newton definió las leyes de la mecánica y de la gravitación, las cuales son los fundamentos en los que se basa la navegación inercial. A pesar de esto, tuvieron que pasar dos siglos desde que se demostraron las técnicas de navegación inercial hasta que se desarrollaron los sensores inerciales. Sin embargo, a comienzos del siglo XVIII, hubo varios desarrollos significativos; Serson demostró un sextante estable y Harrison ideó un cronómetro preciso, el antiguo invento usaba las estrellas para no necesitar la referencia del horizonte y tener una estimación precisa de la longitud. Estos instrumentos, cuando se usaban con cartas de navegación y tablas de referencia de cuerpos celestes, permitían alcanzar una navegación precisa, siempre que los objetos fuesen visibles.

Normalmente se le atribuye a Foucault el descubrimiento del efecto giroscópico en 1852. Efectivamente fue el primero en usar dicha palabra. Hubo muchos, tales como Bohneberger, Jonson y Lemarle, que desarrollaron aparatos similares. Todas estas personas investigaron el movimiento de rotación terrestre y la demostración de la dinámica de rotación. Ellos usaron la capacidad del eje de un disco rotando para permanecer fijo en el espacio. Más tarde en el siglo XIX se fabricaron giroscopios bastante fiables. Además, hubo varias aplicaciones ingeniosas del fundamento giroscópico en equipamiento pesado tal como el molino.

En 1890 el Profesor G. H. Bryan hizo un descubrimiento significativo relacionado con el tañido de los cilindros huecos, este fenómeno fue aplicado más tarde a giroscopios de estado sólido. A principio del siglo XX se vio el desarrollo del girocompás para el suministro de una referencia direccional. El principio básico de este dispositivo es la indicación del norte mediante el establecimiento de un equilibrio entre el efecto del péndulo y el momento angular de la base rotatoria donde está el compás. Inicialmente, este instrumento era sensible a la aceleración. El Profesor Max Schuler diseñó un instrumento con la capacidad de mantener la vertical con precisión. Más tarde esta técnica se conoció como la sintonización de Schuler, una frase acuñada por el Dr. Walter Wrigley del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT). Este ingenioso método produjo un instrumento direccional insensible a la aceleración para usos marítimos. Elmer y Lawrence Sperry mejoró el diseño del girocompás que más tarde afinarían Brown y Perry. Estos sistemas suministraron los primeros pasos hacia la navegación autónoma y en cualquier condición climatológica. Los hermanos Sperry fueron también precursores en la aplicación del efecto giroscópico a la navegación y el control a principios del siglo XX. Construyeron el primer equipo de navegación y piloto automático para usar en aviones y giroscopios para su uso en torpedos.

Los indicadores de la velocidad de giro, horizontes artificiales y giroscopios direccionales para aviones se fabricaron en los 1920. En esa época se desarrollaron los sensores de deslizamiento lateral y los primeros acelerómetros de lazo abierto. Schuler mostró un dispositivo que era capaz de dar el Norte con una precisión de 22 segundos! Se progresó

significativamente en la primera parte de los años 20 con el desarrollo de plataformas estables para el sistema de control de fuego para cañones en barcos así como la identificación del concepto para un sistema de navegación inercial. Boykow identificó el uso de acelerómetros y giroscopios para conseguir un sistema completo de navegación inercial. Sin embargo, en esta fase, la calidad de los sensores inerciales no era adecuada para la producción y demostración de tal sistema.

La Segunda Guerra Mundial vio la manifestación de los fundamentos de la navegación inercial en los misiles V2 por los científicos alemanes, el primer paso a la existencia del uso de un sistema realimentado para conseguir navegación precisa. Esta vez hubo mucha actividad en varias partes del mundo diseñando nuevos tipos de sensores inerciales, mejorando la precisión y, en 1949, la primera sugerencia del concepto de la técnica de navegación fija, basada en una plataforma anclada (“strapdown”). Un giróscopo strapdown consiste en un circuito integrado que aunque no se mueva respecto al vehículo, si se mueve con respecto a la tierra. En vez de un sistema mecánico con realimentación, calcula la orientación mediante la integración de la velocidad.

El ritmo del desarrollo y la innovación aumentó en los años 50 con muchos desarrollos para aplicaciones aeronáuticas. Se fabricaron sensores más precisos con la mejora sustancial de la precisión del giroscopio. El error en tal sensor se redujo de los 15°/hora hasta unos 0.01°/hora, el Profesor Charles Star Draper y sus colaboradores del MIT fueron responsables de muchos avances técnicos con la manifestación de el giroscopio integrador de velocidad flotante. También durante los años 50 se aplicó la realimentación en acelerómetros para mejorar dichos instrumentos.

1.3.4 Especificaciones de la IMU

La IMU con la que se ha trabajado se corresponde con la MILNAV VRU de Kearfott. Esta IMU proporciona las siguientes medidas:

1. Posiciones verticales y horizontales en coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator).
2. Posiciones verticales y horizontales en coordenadas MGRS (versión alfanumérica de las coordenadas UTM).
3. Datos de posiciones náuticas en coordenadas Geodéticas de latitud y longitud.
4. Datos de orientación angular.
5. Velocidades angulares tales como azimuth, pitch y roll.
6. Información del estado de la IMU.
7. Datos GPS referentes a la latitud, longitud y altitud

Sin embargo, aunque el proyecto se empezó a elaborar basándose en la IMU facilitada por Kearfott, al final del proyecto este componente ha sido reemplazado por otra marca. Toda la información contenida en esta memoria, está basada en el dispositivo original.

1.3.5 Interfaz RS-422

Los datos que transmite la IMU se realizan mediante el estándar RS-422. Para interconectar la IMU con la Viper, se hace uso del conector J5 y los pines 2, 3, 8 y 9. Los datos, tanto comandos como mensajes, serán enviados en binario. A continuación se muestra una imagen de la interfaz.

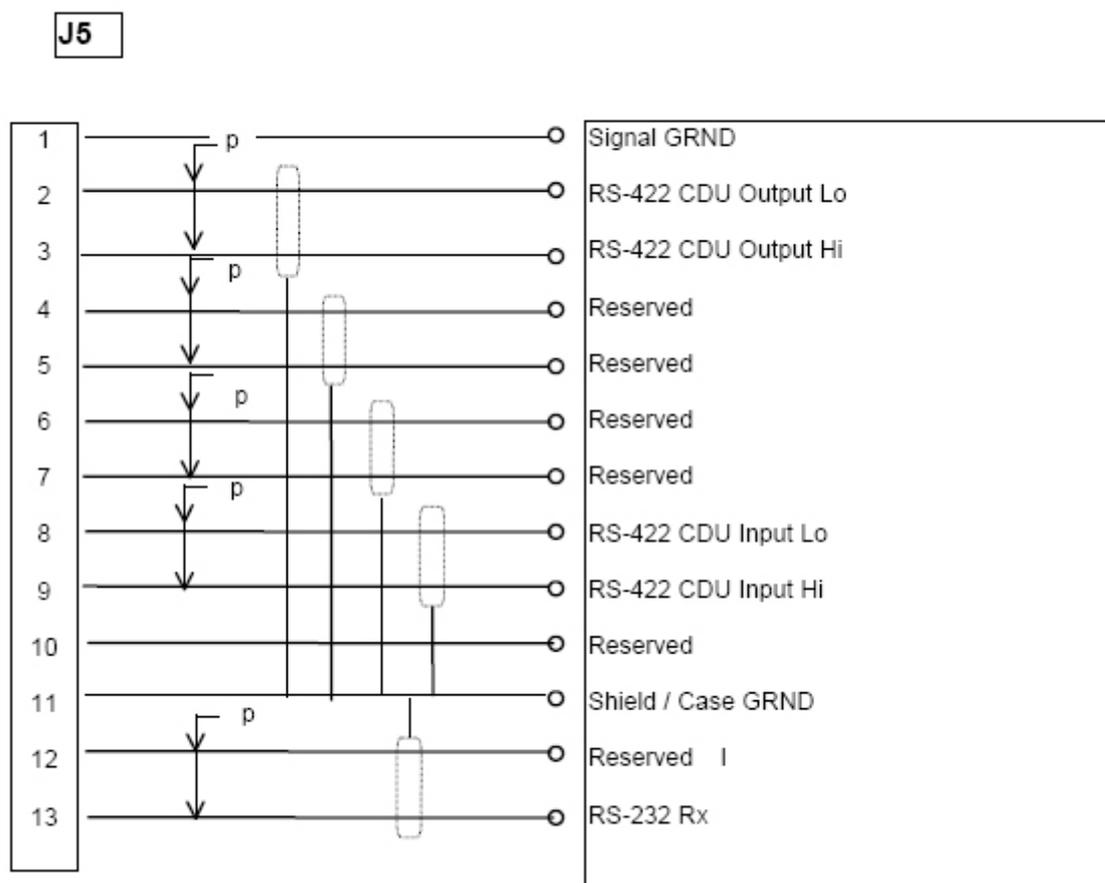


Figura 1.3 Interfaz RS-422 de la IMU

1.4 Requisitos Hardware

Para realizar el sistema existían una serie de restricciones en cuanto a la elección del sistema empotrado.

1.4.1 CPUs

- Se necesitan dos CPUs.
- Dado que con la elección de IMU realizada no es necesario calcular la integral de la trayectoria, no se estima que haya que realizar muchos cálculos. Por tanto la potencia de cálculo no va a ser un requisito limitante.
- Las necesidades de capacidad de memoria tampoco son muy grandes aunque sí nos es indispensable que parte de la memoria sea no volátil ya que, además de tener que almacenar el Sistema Operativo y el programa, es necesario memorizar los datos estadísticos de los experimentos (estos últimos difícilmente superarán 1 KB).
- Necesidades de comunicación: 1 puerto serie RS-232 para comunicación con las IMUs. Posibilidades de comunicación con PC y entre ellas (RS-232 ó Ethernet) y con el display.
- Tamaño y peso reducidos.

La opción propuesta es **VIPER de ARCOM (PC104 PXA255 XScale® Single Board Computer)**, cuya web de referencia es <http://www.arcom.com/pc104-xscale-viper.htm>

1.4.2 Display

- Tamaño y peso reducido: QVGA (un cuarto de VGA) es apropiado.
- Táctil para evitar la adición del teclado.
- Grado de protección razonable.
- Con interfaz adecuada para la CPU.

La opción propuesta es el display **NEC NL3224BC35-20/21** cuya web de referencia es http://www.eu.necel.com/products/display/color_tft_display_lineup/010_5_5_modules/NL3224BC35-20_21.html

1.4.3 Alimentación

El consumo de la IMU de IXSEA es de 12W a 24 V. Se proponen baterías para evitar el uso de cables.

- Las de Ion-Litio ofrecen una relación capacidad/peso razonable.

- Dados los requerimientos de potencia se ve posible encontrar opciones con una sola batería por cada CPU/IMU. Esto es mucho más adecuado que combinaciones de baterías en serie o paralelo.
- Necesidades de potencia:
 - IMU: 12 w a 24V
 - VIPER: 1.9w a 5 V
 - Display: 3.8 w a 5 V
 - Touchscreen (controlador TSC1): 0.175W
- Si es posible, se deben evitar elementos adicionales de protección.

La opción propuesta es la batería BP-2000 de Phylion (distribuidas a 320€ +IVA por Provideo Sevilla con web: <http://www.provideo.es/>). Los datos de la batería se encuentran en http://www.provideo.es/assets/accesorios_provideo.PDF. Tensión: 14.4 voltios, Capacidad: 9 Ah. Peso: 850 g. Si alimenta 50 W (ver 2.3.3) la autonomía sería mayor de 2 horas y media. Tiene indicador de carga por lo que es relativamente sencillo evitar dejarla con carga excesivamente baja. En la misma página se pueden ver cargadores de estas baterías: para una batería (PL-3689B 120€) o para dos (PL-3680E, 300 €). El pack PACK 2000BP por 895 € tiene las dos baterías que se necesitan y el cargador de dos baterías. En la siguiente figura se muestra la conexión entre cargador y batería.



Figura 1.4 Conexión entre el cargador y la batería

NOTA: Es de esperar que estas baterías sean bastante robustas aunque no se monitorice el nivel de carga ya que están pensadas para aplicaciones de consumo (cámaras de vídeo). Sin embargo, podría ser necesario incluir protecciones para picos de descarga (no sabemos muy bien cómo va a consumir la IMU). Aunque creemos que esto no va a ser necesario, aconsejamos consultar la opinión de expertos en el tema.

A la hora de diseñar el montaje de esta batería hay diversas opciones:

1. Dentro de esta marca existen otras baterías de las mismas características eléctricas pero con distintas dimensiones y, posiblemente, conectores

(<http://www.xingheng.com.cn/beijing/doce/cpjs.htm>): AN-2000, PK-2000. Se puede escoger la que convenga más.

2. Respecto a las configuraciones para realizar la carga de la batería hay varias opciones:
 - Batería fija en el ABS con el conector de carga accesible. Esta configuración es sencilla tanto en su diseño como para realizar la carga. Tiene el inconveniente de que mientras la batería se carga no se puede utilizar el ABS.
 - Batería desmontable. Puede ser más complicado su diseño. Para cargar la batería es necesario extraerla lo que puede dificultar la operación. Tiene la ventaja de que mediante el uso de baterías adicionales se puede utilizar el ABS mientras se cargan las baterías agotadas.

En cuanto a los convertidores adicionales:

- Es necesario generar 24 voltios (12w) para la IMU.
- Es necesario generar 5V (2W) para la placa VIPER.
- Es necesario generar 5V (3.8W) para el panel LCD.
- Es necesario generar 5V (0.175W) para el touchscreen.
- Conversor Low Voltage TTL (3.3V) a a TTL (5V) para adaptar la salida digital de la VIPER a la entrada de pulso sincronización de la IMU. La entrada del circuito de sincronización tiene una impedancia de 1KOhm.
- Tensión de entrada: la de la batería 14.4 voltios.

Opción propuesta:

- Alimentación 24V: Conversor AIA MGDM-75-HI
- Alimentación 5V (5.175W totales): Un convertidor Traco Power TEN 12-2411 (12w, 5VDC, eficiencia: 82%)
- Conversión 3.3V a 5V. Integrado de MAXIM número MAX3394E con 2 condensadores de 0.1 uF y uno de 1 uF. (Véase la web http://www.maxim-ic.com/quick_view2.cfm/qv_pk/3434)

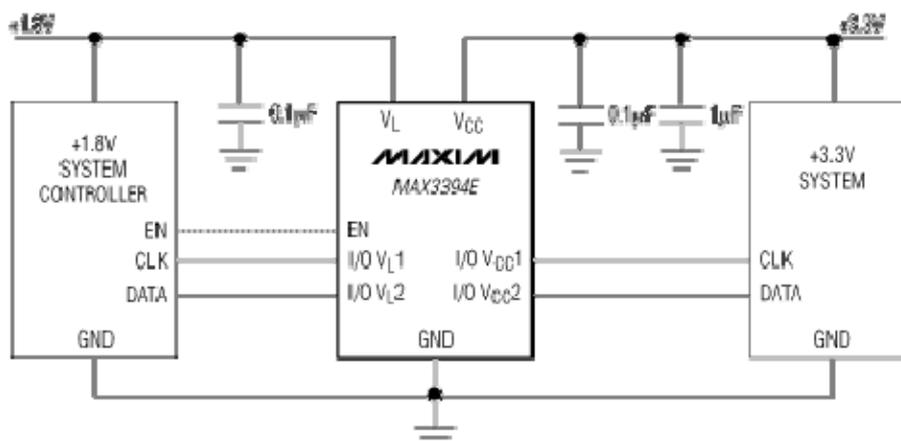


Figura 1.5 Integrado de MAXIM número MAX3394E

NOTA: En nuestra aplicación sólo se emplearía una de las dos vías (no se transmite el reloj CLK).

Para el análisis de potencia, dado que la eficiencia de los convertidores es casi la misma podemos hacer una estimación suponiendo la eficiencia menor (0.82):

$$(12+2+3.8+0.175)/0.82 = 21.92 \text{ W}$$

En el análisis de la autonomía se supusieron 50W por lo que la estimación era conservadora.

1.4.4 Propuesta final

Descripción	Marca/Fabricante	Modelo	Unidades
Placas PC-104	Eurotech (antes ARCOM)	PC104 PXA255 XScale® Single Board Computer	2
Panel TFT 5.5"	NEC	NL3224BC35-20/21	2
Pantalla táctil	Eurotech	RES-5.7-PL4 (P/N 2903-12031- 000-000)	2
Controladores PCB para pantalla táctil	Eurotech	TSC1 (ó P/N 6550- 00648-001-102)	2
Baterías 14.4V	Phylion	BP-2000	2 (o más de reserva)

Cargador 2 baterías	Phylion	PL-3680E	1
Conversor DC-DC a 24V 12W	AiA	MGDM-75-HI /T	2
Conversor DC-DC a 5V 12W	Traco Power	TEN 12-2411	2
Conversor DC-DC de 3.3V a 5V	MAXIM	MAX3394E	1
Condensadores 0.1 uF			4
Condensadores 1 uF			1