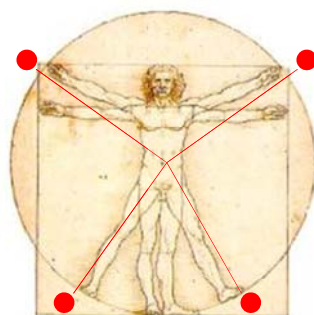


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XIV. AÑO 2016

SEPARATA



SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE BAJO COSTE PARA BARCOS A VELA

David Asiain Ansorena, Basil M. Al-Hadithi, Francisco Javier Gabiola Ondarra



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: David Asiain Ansorena, Basil M. Al-Hadithi, Francisco Javier Gabiola Ondarra
Mayo, 2016.
<http://www.uax.es/publicacion/sistema-de-instrumentacion-electronica-de-bajo-coste-para-barcos-a-vela.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*
Escuela Politécnica Superior.
Universidad Alfonso X el Sabio.
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).
ISSN: 1696-8085
Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE BAJO COSTE PARA BARCOS A VELA.

David Asiain Ansorena(1), Basil M. Al-Hadithi(2,3), Francisco Javier Gabiola Ondarra(4)

- (1) Ingeniero Industrial, Departamento de Electrónica de la Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia, Universidad Zaragoza C^a\Mayor s/n 50100La almunia de D^a Godina, Zaragoza. España. Tlf.:976600813, email: dasiain@unizar.es
- (2) Dr. Ingeniero Industrial, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Física Aplicada, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, email: basil.alhadithi@upm.es
- (3) Grupo de Control Inteligente, Centro de Automática y Robótica (CAR), UPM-CSIC, Tlf.: 913366879, C/ J. Gutiérrez Abascal, 2, 28006 Madrid, España
- (4) Dr. Ingeniero de Telecomunicación, Departamento de Electrónica y Sistemas, Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio. Avda. De la Universidad nº1, Villanueva de la Cañada, 28691 Madrid. España. Tlf.:918105035, email: fgabiola@uax.es

RESUMEN: En los últimos años la evolución tecnológica de los sensores MEMS (Microelectromechanical Systems) y las mejoras continuas en receptores GPS (Global Positioning System) han revolucionado los sistemas de navegación en cuanto a la precisión, tamaño y consumo. Simultáneamente la proliferación de plataformas de hardware y software abierto ha impulsado la creación de nuevas aplicaciones con prestaciones elevadas y bajos costes de implementación. El presente artículo describe el diseño de un procesador de bajo coste para embarcaciones de vela, implementado en una plataforma Yún basada en la unión puente entre un microcontrolador y un microprocesador que soporta una distribución linux OpenWrt. La plataforma es escalable mediante el uso de escudos “Shield” y el conjunto entre la placa base Yún, el escudo CAN BUS y el escudo que es diseñado específicamente para las interfaces y acondicionamiento de los sensores de navegación componen el procesador.

PALABRAS CLAVE: Sistema de navegación, Instrumentos náuticos, Rendimiento de veleros.

ABSTRACT:

In recent years the technological evolution of the MEMS (Microelectromechanical Systems) and continuous improvements in GPS (Global Positioning System) have revolutionized navigation systems in terms of accuracy, size and consumption. Simultaneously, the proliferation of hardware platforms and open software has promoted the creation of new applications with high performance and low implementation costs. This article describes the design of a low cost processor for sailing boats, implemented in a YUN-based platform bridge connection between a microcontroller and a microprocessor that supports Linux distribution OpenWrt. The platform is scalable by using shields and set between the motherboard yun, CAN BUS shield and shield that is designed specifically for interfaces and conditioning of navigation sensors make up the processor.

KEY-WORDS: *Sailing system, Mautical instruments, Sailboat performance.*

1. Introducción.

En los últimos años la evolución tecnológica de los sensores inerciales basados en MEMS (Microelectromechanical Systems) y las continuas mejoras en receptores GPS (Global Positioning System) han revolucionado los sistemas de navegación en cuanto a la precisión, tamaño y consumo. Simultáneamente la proliferación de plataformas de hardware y software abierto ha impulsado la creación de nuevas aplicaciones con prestaciones elevadas y bajos costes de implementación.

En este artículo, se presenta el diseño e implementación de un sistema de navegación para embarcaciones propulsadas a vela aplicando estos últimos progresos.

En muchos aspectos, la historia de los instrumentos electrónicos y el software de navegación es la historia de la Copa América de vela ya que la mayoría de las principales evoluciones fueron impulsadas por las necesidades de dicha competición, compartiendo la misma reflexión que (Nick White 2014).

Durante los años 80, los instrumentos electrónicos se fueron incorporando a las embarcaciones de vela hasta que adquirieron la dimensión actual (Alfredo Pons et al. 2004). La proliferación de proyectos de software abierto ha culminado en la creación de diferentes herramientas. A continuación describimos algunas de ellas. OpenCPN (OpenCPN 2010) es un software de código abierto con cartas de navegación e información de instrumentos para crear planificación de rutas. OpenPlotter (Saillog Openplotter 2015) es una combinación de software e integración hardware que funciona en ordenadores ARM como la Raspberry Pi. FreeBoard unifica software e integra un conjunto de hardware basado en una interfaz con Arduino Mega (Freeboard 2013). Navgauge es un software que permite personalizar displays en el navegador. La información la obtiene vía interface NMEA 0183 y NMEA 2000 (N2K) (Teppo Kurki 2014). El software canboat es una aplicación de comandos de línea que permite obtener información de las redes NMEA 2000 y NMEA 0183 de las embarcaciones (Kees Verruijt 2012).

1.1. *Sistemas de navegación para veleros.*

Un sistema de navegación para embarcaciones propulsadas a vela unifica un conjunto de sensores transductores con un sistema electro-informático para realizar las diferentes tareas. Como se indica en el manual de (OCKAM SYSTEM 2009).

- Computación de variables viento (cálculo del viento real).
- Computación de variables rendimiento.
- Sistema de navegación (Posición velocidad).
- Software Táctico.

Los sistemas de navegación electrónicos requieren como mínimo los siguientes sensores:

- Unidad de viento, formado por anemómetro y veleta
- Corredera, para la obtención de la velocidad de embarcación en el casco.
- Compas o IMU (Unidad de Medición Inercial) para la información del rumbo, escora y cabeceo.
- GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para la obtención de la latitud, longitud así como el rumbo y la velocidad sobre la tierra.

La información recogida por estos cuatro sensores primarios se utiliza para calcular todas las variables de viento y rendimiento que se muestra en las pantallas de instrumentos. Adicionalmente se

pueden incorporar otros sensores para obtener información adicional de profundidad, posición y fuerzas de otros apéndices del barco.

La topología de los sistemas puede ser centralizada o distribuida como se representa en la figura 1.1. A la derecha se observa un procesador H3000 de la compañía B&G el cual centraliza todos los sensores, y a la izquierda un sistema Racing Bravo completamente distribuido. En la actualidad, con la aparición del estándar N2K(NMEA 2000 n.d.) para la conexión de sensores náuticos, todos los fabricantes tienden a la topología distribuida o parcialmente distribuida.

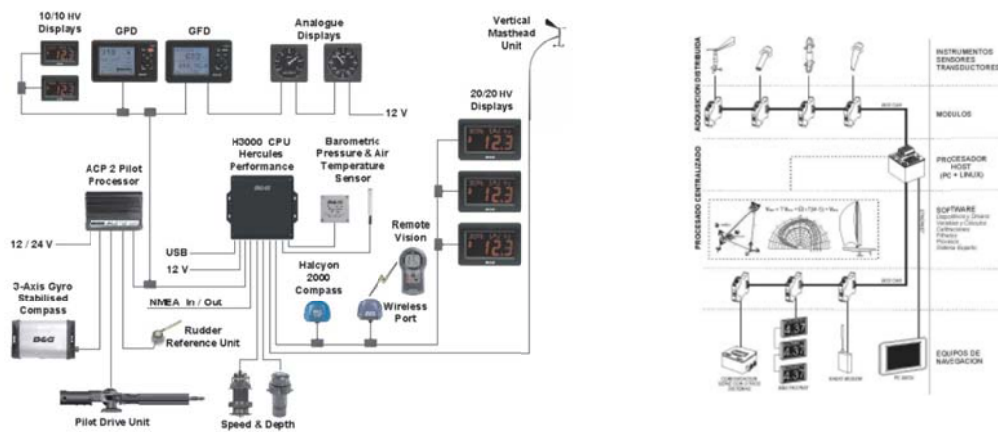


Fig. 1.1 Sistema centralizado y distribuido.

Uno de los aspectos más importantes del sistema corresponde a una medición precisa y fiable del viento. El objetivo fundamental es obtener las variables calculadas de viento real en intensidad TWS (True Wind Speed) y dirección TWA (True Wind Angle) a partir de la medida de viento aparente AWA (Apparent Wind Angle) y AWS (Apparent Wind Speed). Los sensores básicos que contribuyen en esta medida son la corredera, la veleta y el anemómetro; cuanto mayor sea la resolución y linealidad de los mismos, con mayor precisión se realizará la medida. Adicionalmente, se hace necesario incorporar en el cálculo básico de viento un compás con objeto de poder referenciar la dirección de viento al norte magnético TWD (True Wind direction), magnitud vital en el seguimiento de roles de viento.

La corrección de desalineado del equipo de viento, la torsión del palo, el viento generado por inercias y las proyecciones de planos (upwash, windshear) son algunos ejemplos de parámetros que se deben tener en cuenta para obtener una medida precisa del viento (AWS, AWA, TWS, TWA y TWD). Una variable de viento muy importante en cuanto al rendimiento del barco es la velocidad en la dirección del viento VMG (Velocity Made Good), ya que en regata siempre se intenta navegar de tal forma que el VMG sea máximo, pues ésta es la situación que indica que se está navegando en el rumbo y velocidad que mayor avance contra el viento se está produciendo.

Las variables de rendimiento de un barco se obtienen a partir de las curvas polares (funciones de transferencia que relacionan la velocidad del barco BS (Boat Speed) y el ángulo de viento real (TWA) para diferentes intensidades de viento (TWS). Los porcentajes de las variables de navegación frente a las velocidades, ángulos y rumbos óptimos al viento y a marcas, proporcionan una medida del rendimiento con el que navega el velero.

La combinación de estas variables junto a la monitorización de algunas partes de la embarcación como el timón o Rudder (RUD), el alerón de quilla o trimtab (TAB), el ángulo de caída del mástil o

mastraked (RKE), las cargas en estay, burdas, escotas y drizas, etc., proporcionan una herramienta muy adecuada para encontrar el punto óptimo de ajuste de la embarcación.

Las polares de la embarcación son obtenidas mediante el ajuste de curvas en puntos discretos obtenidos numéricamente mediante un software específico denominado programa de predicción de velocidad VPP (Velocity Prediction Program). Con este software, conociendo los puntos de aplicación de las fuerzas y disponiendo de datos de ensayos en canales de viento y agua, se resuelven las ecuaciones de equilibrio, prediciendo las velocidades teóricas del barco por cuestiones de diseño. Partiendo de estos datos y optimizándolos con pruebas de navegación real se pueden llegar a encontrar unas curvas polares bastante ajustadas a la realidad, en cuanto al comportamiento del barco.

El modelado de la superficie terrestre (ya sea como un plano, esfera o elipsoide) permite el cálculo de tiempos, demoras y distancias entre diferentes posiciones facilitando información táctica vital en regata, como puede ser el tiempo a línea de salida, la distancia a layline, etc.

El navegante realiza tareas de calibración periódicas para disponer de información útil de rendimiento. En el libro (chisnell, 1992) explica los principales procedimientos de calibración de los instrumentos. Los sistemas de navegación precisan de numerosas tablas de calibración de diferentes dimensiones que requieren ser cumplimentadas correctamente mediante técnicas de procesado de datos.

2. Descripción del sistema.

Como se muestra en la figura 2.1 todos estos sensores son interconectados por medio de diferentes interfaces al procesador central:

- Entradas analógicas en tensión y en lazo de corriente.
- Entradas de pulsos en colector abierto y sensores generadores.
- Buses digitales como NMEA0183 y NMEA2000, estándares náuticos y otros protocolos a medida que vienen dados por diferentes normas eléctricas RS232, RS422, RS485, etc...
- Redes Ethernet y WIFI.

El procesador central realiza las tareas de adquisición, procesado, cálculos, correcciones y filtrado así como la difusión de dicha información a los diferentes interfaces de salida como displays, tabletas y ordenadores u otros subsistemas como piloto automático, sistemas de telemetría, sistemas de visión etc... Toda la información obtenida tiene la posibilidad de ser registrada.

Como se observa en el diagrama de bloques de la figura 2.1 la arquitectura del sistema es centralizada a un único procesador central P que integra los interfaces hardware así como los sensores GPS e IMU. A la izquierda se encuentran los bloques D, T y L que corresponden a los dispositivos de salida de datos. A la derecha se encuentra el conjunto de sensores heterogéneo formado por la unidad de viento M, la corredera P, la sonda de profundidad S, el ángulo de timo R, la carga en el estay L y el sensor potenciómetro de hilo para la medida de posición de apéndices S.



Fig 2.1 Diagrama de bloques del sistema.

2.1. *Sensores e interfaces.*

Son numerosos los fabricantes de sensores e instrumentos náuticos de los que se dispone actualmente en el mercado. En este artículo se propone los interfaces a los instrumentos más utilizados en las embarcaciones de competición a vela.

2.2. *MHU (Mastheadunit).*

Es el instrumento que se instala en la perilla del mástil para observar el viento aparente. Tradicionalmente este instrumento ha estado compuesto por un anemómetro de cazoletas y una veleta, ambos montados en un mástil o percha para evitar las turbulencias generadas por las velas. Principalmente existen tres tipos, dos con partes móviles formados por anemómetro de cazoletas o por anemómetro de molinete y veleta y un tercero sin partes móviles, basados en el principio de los ultrasonidos y el efecto doppler.

Como se observa en la tabla 2.1, las interfaces eléctricas de los diferentes MHU corresponden al principio de funcionamiento básico del transductor excepto los anemómetros ultrasónicos biaxiales que disponen de interfaces digitales NMEA puesto que internamente disponen de un procesador para la obtención de los datos. Los equipos que usan principios electromagnéticos disponen de interfaces analógicas de tres fases desfasadas 120° entre sí o de dos salidas analógicas en las cuales codifica el seno y el coseno provenientes de dos sondas hall situadas ortogonalmente. En ambos casos, la interfaz del anemómetro es mediante un canal de pulsos en colector abierto. Por último en el caso de anemómetro de molinete y veleta la salida se codifica en dos canales de PWM, en ambos canales la frecuencia de modulación corresponde a la intensidad del viento y el ángulo se codifica seno coseno en función de ancho de pulso de la modulación de cada canal. Este principio se basa en un generador tacométrico óptico, que utiliza dos fototransistores situados ortogonalmente que leen una esfera que gira el rotor del molinete.

Referencia	Fabricante	Tipo	Interfaces	DC
MK154	SIGNETMARINE	Anemómetro de cazoletas y veleta.	Angulo 3 fases 0-5V 120° Intensidad 1 frecuencia pullup 3600ohms	5V
mhub&g 213	B&G	Anemómetro de cazoletas y veleta.	Angulo 3 fases 0-6.5V 120° Intensidad 1 frecuencia colector abierto	6.5
ST60	Raymarine	Anemómetro de cazoletas y veleta.	Angulo 2 Seno Coseno amplitud de 1Vpp y desplazamiento de Vcc/2 Intensidad 1 frecuencia colector abierto	8V
Mast Head Unit	NASA Marine	Anemómetro de cazoletas y veleta.	Angulo 2 Seno Coseno 1-4V Intensidad 1 frecuencia colector abierto	5V
NX2 Windtransducer	Nexus	Anemómetro de molinete y veleta	2 salidas PWM Angulo anchura de pulso seno coseno. Frecuencia de la modulación intensidad	10-16V
Airmar PB100	Airmar	Anemómetro ultrasónico biaxial sin partes móviles.	NMEA 0183 o NMEA 2000	9-16V
WSO100	Maretron	Anemómetro ultrasónico biaxial sin partes móviles.	NMEA 2000	9-16V

Tabla 2.1 Masthead Unit

En las tablas anexas de conexionado se describe la norma entre MHUB&G 213 y el procesador.

2.3. Corredera.

Instrumento cuya misión es medir la velocidad y la distancia navegada por la embarcación. Por lo general estas mediciones son sobre el agua, aunque algunas correderas más avanzadas, como la Doppler y correderas de correlación con el sonido en el agua, pueden ser usadas para determinar la velocidad y la distancia navegada respecto a tierra. Este dato se integra a otros sistemas de navegación para proveer mayores funcionalidades, como por ejemplo la navegación por estima.

Referencia	Fabricante	Tipo	Interfaces	DC	Hz/Kt
Signet 515	Signet	Paletas	1 analógico impedancia 8KOhms. 3.3 V p/p por m/s nominal	ninguno	10Hz
Signet 2536	Signet	Paletas	1 frecuencia colector abierto	5-24V	25Hz
202-00-129	B&G	paddlewheel	1 frecuencia colector abierto	5-12V	6.25Hz
90-60-002	Nke	Electromagnética	Con interfaces NMEA0183	10-15V	-
ST650	Airmar	paletas	1 Frecuencia	5-25V	5.6Hz
CS4500	Airmar	Ultrasonidos doppler	1 Frecuencia	10-15V	5.6Hz
DST900	Airmar	paletas	NMEA 2000	9-16V	-

Tabla 2.2 Comparativa de correderas.

Como se observa en la tabla 2.2, existen numerosos fabricantes así como tecnologías. Las más utilizadas son las correderas de paletas o “paddlewheel”, puesto que las más avanzadas basadas en Ultrasonidos doppler o Electromagnética son más precisas pero generan incertidumbre en determinadas condiciones de agua.

En las tablas anexas de conexionado se describe el conexionado al sistema de la Signet515 con salida analógica y la B&G en colector abierto.

2.4. Sonda de profundidad.

Una sonda ecoica es un instrumento para determinar la distancia vertical entre el fondo del lecho marino y una parte determinada del casco de una embarcación. En función de la localización del sensor habrá que corregir el desplazamiento para obtener el valor deseado. En los veleros se compensa con el punto más sumergido, quedando la compensación la distancia entre la posición del sensor y el final de la quilla. Estos dispositivos son instalados en el casco por delante de la quilla y posterior a la corredera. Internamente constan de un emisor y un receptor de señales ultrasónicas. Midiendo el tiempo entre emisión y recepción, dado que la velocidad de propagación del sonido en el agua es un valor conocido, se puede determinar el camino recorrido por la onda y por tanto la distancia al punto de reflexión. La velocidad del sonido en el agua varía de acuerdo a densidad, temperatura y presión, pero se adopta un valor medio en condiciones normales y sobre la base de él se determina la profundidad.

La interfaz eléctrica puede ser de dos tipos, únicamente el transductor piezoeléctrico o directamente procesado y con salida digital con estándar NMEA. Los primeros están en desuso debido a los inconvenientes de la distancia del cable entre el sensor y el procesador. Dentro de la salida digital se disponen de los estándares NMEA0183 y NMEA2000.

NMEA 0183 Sentence Structure

\$SDDBT, DDPT... Depth

\$YXMTW..... Water Temperature

NMEA 2000® Supported PGNs

128267.....Water Depth (With Transducer Offset)

130310.....Environmental Parameters (Water Temperature)

130311.....Environmental Parameters (Water Temperature)

130312.....Environmental Parameters (Water Temperature)

La conexión eléctrica se realiza mediante el conector P6 para una interfaces de entrada estándar NMEA0183 o el conector DB9 del CAN bus. Para más información ver anexos de conexionado.

2.5. Posición y carga.

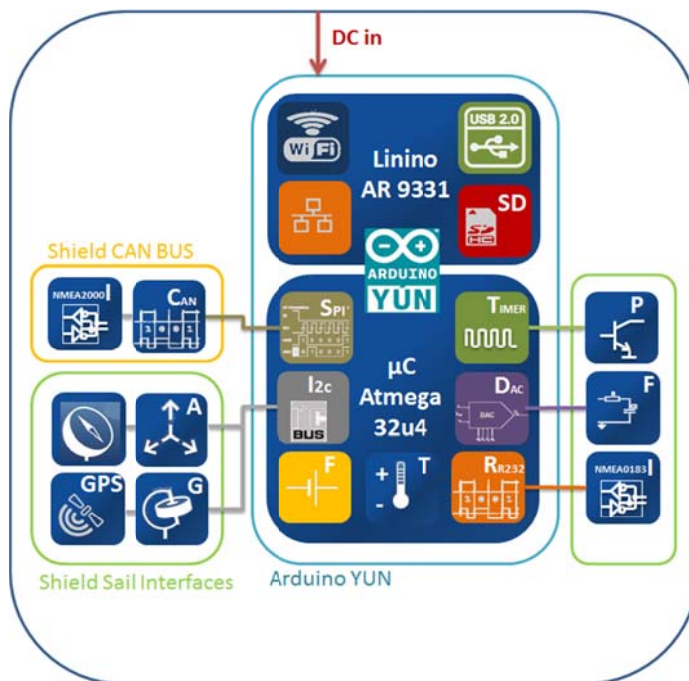
Este tipo de sensores proporcionan informaciones acerca de los apéndices del barco, posición, ángulo respecto al centro de la embarcación, distancia, etc. Además de su uso por motivos de seguridad, mediante los cuales podemos establecer rangos y límites de uso o alarmas entorno a estos, la información que proporcionan sirve a la tripulación para obtener el máximo rendimiento del barco y realizar los ajustes necesarios en la embarcación. Para la medida de posición se emplean sensores potenciómetros de hilo (StringPot), rotacionales con brazo y lineal. La conexión se realiza alimentando los extremos de potenciómetro con la alimentación de referencia y el cursor llevándolo a la entrada analógica correspondiente. En el caso de la medida de esfuerzo se emplean las células de carga a tracción, a cortadura integrada en los propios pasadores del aparejo, integradas en grilletes y con tecnología wireless. Estos dispositivos necesitan de un sistema de acondicionamiento que provee de una salida analógica.

La conexión al sistema es promedio del conector P5, se utiliza el canal auxiliar CH3 ya que los otros se utilizan para la conexión de la unidad de viento. Para más información ver anexos de conexionado.

2.6. *Procesador.*

Como se observa en la figura 3.1 el procesador lo componen tres subsistemas Arduino YÚN, ShieldCAN BUS Y ShieldSail interfaces. El subsistema principal corresponde a una plataforma Arduino YUN que es escalable mediante el uso de escudos "Shield", que son tarjetas electrónicas que se apilan de forma vertical y que permiten escalar la arquitectura interconectado buses, entradas salidas y alimentación. Está formada por un procesador AtherosAR9331MIPS@400MHz y un microcontrolador ATmega32U4 de 8bits conectado mediante una interfaz serie TTL(transistor-transistor logic) tal como se indica en la documentación online (Arduino YUN 2007). El procesador Atheros soporta un sistema operativo linux basado en la distribución de OpenWrt(OpenWrt 2004) diseñada para sistemas embebidos. La placa cuenta con un puerto Ethernet, WIFI, puerto USB y un zócalo para una tarjeta de memoria Micro-SD. El ATmega provee de la interfaces estándar de expansión como si se tratara de un Arduino Leonardo con 20 entras y salidas digitales, de las cuales 7 se pueden configurar como salidas en PWM (modulación en ancho de pulso) y 12 como entradas analógicas. Adicionalmente incluye una conexión micro USB y un conector ISP (In-system programming).

El escudo de Bus CAN (Controller Area Network) provee al sistema de dicho bus cuyas principales características son: Prioridad de mensajes, garantía de tiempos de latencia, flexibilidad en la configuración, recepción por multidifusión (multicast) con sincronización de tiempos, sistema robusto en cuanto a consistencia de datos, sistema multimaestro y retransmisión automática de tramas erróneas.



Se ha diseñado especialmente para el sector del automóvil, pero se expandió en otros sectores, entre ellos el náutico con el protocolo NMEA2000. El escudo lo conforma un controlador CAN Bus MCP2515 V2.0B SPI (Serial Peripheral Interface) con velocidad máxima de 1 Mb/s, formatos de trama estándar y extendida de 11 y 29 bits respectivamente. El controlador se adapta al medio mediante un transceptor MCP2551 que implementa los requerimientos de la capa física ISO-11898-2 de par diferencial. Y por último, el escudo Sail Interfaces, implementa el acondicionamiento electrónico para los sensores externos con entradas de tipo analógicas y de pulsos. También incorpora una unidad de medidas inerciales, el receptor GPS y el interfaz NMEA0183. Ver anexo esquema SailSys.

Fig. 3.1 Diagrama de bloques del procesador de navegación.

a) Las entradas analógicas cuentan con un filtro EMI (interferencia electromagnética) conectado a un divisor de tensión para ajustar el rango de la entrada externa al margen dinámico del convertor ADC

interno de 10 bits de resolución del microcontrolador. Como muestra la figura 3.2, cada una de las entradas implementa este circuito. El procesador dispone de un total de 4 entradas analógicas.



Fig. 3.2 Diseño electrónico entrada analógica.

b) Las entradas de pulsos disponen de dos acondicionamientos de señal diferentes. Como se observa en la figura 3.3, en el margen derecho se encuentra la implementación de la entrada de pulsos para sensores generadores o transductores. Este circuito consta de un amplificador con masa flotante cuya salida ataca la base del transistor que conforma los pulsos. En el margen izquierdo de la figura 3.3 se observa una entrada digital con la resistencia de polarización para los sensores con salida en colector abierto, un filtro EMI y un inversor Schmitt. Ambos circuitos están conectados a las entradas de interrupción del microcontrolador. Mediante el jumper se puede desactivar el acondicionamiento para transductores y poder utilizarla entrada digital en colector abierto.

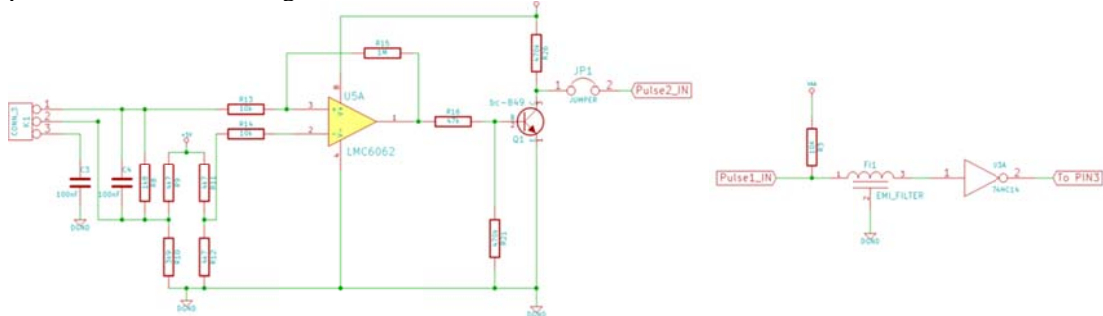


Fig. 3.3 Diseño electrónico entrada pulsos para sensores generadores o colector abierto.

c) La IMU (Unidad de medida inercial) GY-81 incorpora un acelerómetro tri-axial BMA180, un giroscopio tri-axial ITG-3205, un magnetómetro tri-axial HMC5833L y un sensor de presión barométrica BMP085. El dispositivo se conecta al procesador por medio del bus I2C y sus principales características son:

BMA180

- Múltiples rangos de medida ($\pm 1g$, 1.5g, 2g, 3g, 4g, 8g and 16g)
- Conversor ADC de 14 o 12bit
- Filtro digital programable (sin necesidad de componentes externos) 8 filtro paso bajo, 1 filtro paso alto, 1 filtro paso banda.
- Dos modos de trabajo: bajo ruido y baja potencia.
- Capacidad de auto verificación.

ITG-3205

- Múltiples rangos de medida ($\pm 250, 500, 1000, 2000$ grados/seg)
- Conversor ADC de 16 bit
- Filtro digital programable paso bajo.
- Corriente de Standby 5uA.
- Sensor digital de temperature.
- Modo de transferencia I2C de alta velocidad de 400kHz.

HMC5833L

- Múltiples rangos de medida ($\pm 0.88, 1.3, 1.9, 2.5, 4.0, 4.7, 5.6, 8.1$ gauss)
- Conversor ADC de 12bit
- Frecuencia máxima de muestreo de 160Hz.
- Corriente de Standby 100uA.
- Modo de transferencia I2C de alta velocidad de 400kHz.
- Capacidad de auto verificación.

d) El GPS (Sistema de posición Global) El modulo u-blox7 es un receptor estándar de GNSS y su principal beneficio es su elevado rendimiento frente a su bajo consumo. Sus principales características son:

- 56 canales de recepción GPS L1 C/A, GLONASS L1 FDMA, QZSS L1 C/A SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS
- Frecuencia de actualización hasta de 10 Hz GPS GLONASS
- Exactitud de la posición de 2.5 m CEP, 4 m SBAS y 2.0 m CEP n.a.
- Tiempo de arranque en frio 29 s 30 s.
- Sensibilidad de navegación de -162 dBm -158 dBm
- Interfaces serie estándar UART.
- Protocolos NMEA, binario UBX y RTCM.

e) La Interfaz eléctrica NMEA0183 permite un solo transmisor y múltiples oyentes en un mismo bus. El cableado de interconexión es un par trenzado apantallado con norma eléctrica EIA RS-422. El estándar, no especifica el uso de un conector en particular. Los dispositivos que se conectan al bus NMEA0183 se configuran como maestros o esclavos. El bus se implementa sobre una comunicación serie asíncrona con una velocidad de transmisión de 4800 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de stop y sin paridad ni control de flujo. El transceiver MAX485 de la compañía "Maxin integrated" cumple con los estándares RS-422 y RS485. Las líneas de transmisión, recepción y control, son rutadas al uC ATmega pero no a la UART sino a líneas de puertos convencionales en la cuales se implementa una UART software. Esto es debido a que el ATmega únicamente dispone de una UART hardware que se encuentra conectada al procesador principal.

El prototipo de procesador se ensambla con el apilado de los tres escudos tal como se ve representa en la figura 3.4. En la parte superior se encuentra el escudo Sail Interfaces con el fin de no apantallar la antena del receptor GPS y favorecer el cableado. Todo el conjunto se fija en el interior de una caja con protección IP67 con la tapa de policarbonato y se mecanizan cuatro pasamuros para las mangueras procedentes de los sensores externos.

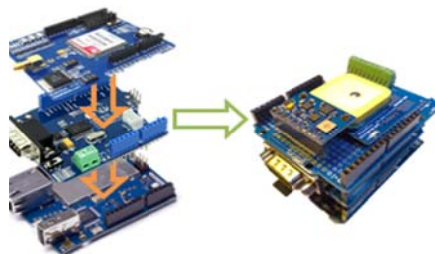


Fig.3.4 Descripción del ensamblaje del prototipo

3. Obtención de las variables brutas.

3.1. Sistema de referencia y ángulos de Euler.

Un barco, al igual que un avión, es libre de moverse en las tres dimensiones. El sistema de referencia constará de tres ejes que parten de un origen común en el interior del barco, ubicado en el plano de crujía. En la figura 4.1 se representan los tres ejes, X,Y y Z perpendiculares entre si y formando a su vez los tres planos.

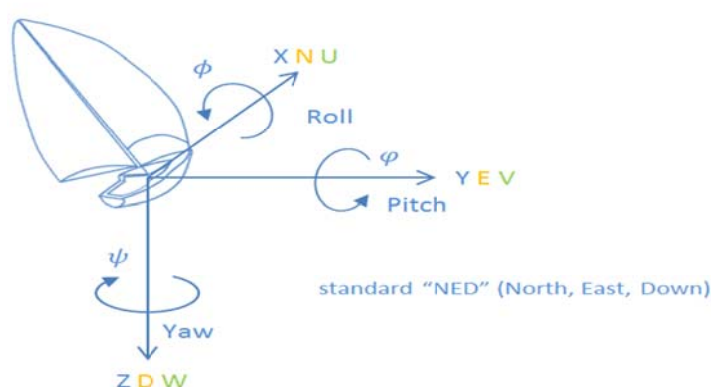


Fig.4.1 Sistema de coordenadas.

El plano XY es paralelo al plano de flotación, XZ es el de crujía y el YZ paralelo a la sección maestra. Tendremos traslaciones rectilíneas a lo largo de cada eje, y rotaciones circulares alrededor de ellos individualmente.

- Avance, movimiento rectilíneo sobre el eje X.
- Abatimiento, movimiento rectilíneo lateral sobre el eje Y.
- Heaving, se trata de un movimiento corto arriba y abajo a lo largo del eje Z.

En el caso de las rotaciones se empleara la convención de ángulos de Euler Tait-Bryan utilizando, rotaciones intrínsecas alrededor de los ejes en el ZYX. A estas rotaciones les llamaremos Guiñada, Cabeceo y Alabeo “yaw, pitch y roll” en términos aeronáuticos o en términos náuticos:

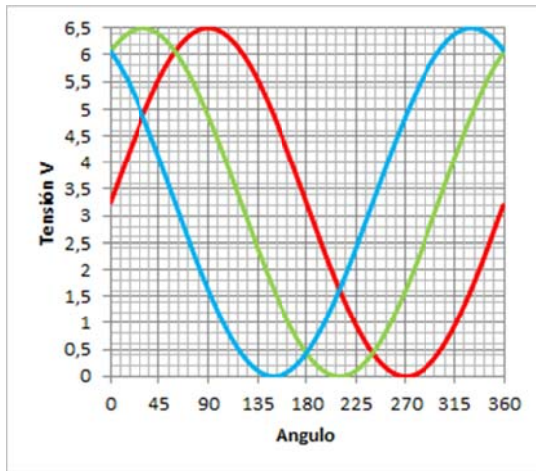
- Rodillo, movimiento babor estribor alrededor del eje X.
- Cabeceo, movimiento de proa a popa girando alrededor del eje Y.
- Giñada, movimiento alrededor del eje Z.
- Escora, giro detenido alrededor del eje X.
- Asiento longitudinal, giro detenido alrededor del eje y.
- Cambio de rumbo, el velero evoluciona con un giro detenido alrededor del eje Z.

3.2. Anemómetro y veleta B&G MHU 213.

Como muestra la figura 4.2 el ángulo de la veleta se encuentra codificada en tres fases desfasadas 120° entre sí.

$$V_r = \frac{V_{Ref}}{2^{10}} Ch_0; V_g = \frac{V_{Ref}}{2^{10}} Ch_1; V_b = \frac{V_{Ref}}{2^{10}} Ch_2; \quad Eq. 4.1$$

siendo V_r, V_g, V_b las tensiones de las tres fases de la veleta. La tensión de referencia V_{Ref} es de 6,5V y 2^{10} la resolución del convertor analógico digital de 10bits.



$$\begin{cases} V_x = V_r - V_g \cdot \cos \frac{\pi}{3} - V_b \cdot \cos \frac{\pi}{3} \\ V_y = V_g \cdot \sin \frac{\pi}{3} - V_b \cdot \sin \frac{\pi}{3} \end{cases} \quad Eq. 4.2$$

Donde V_x, V_y son las componentes cartesianas obtenidas a partir de las 3 entradas V_r, V_g, V_b desfasadas entre sí $\frac{\pi}{3}$.

$$\psi = \text{atan2}(V_x, V_y) - \pi \quad Eq. 4.3$$

Fig.4.2 Codificación de las Fases de la veleta.

Por consiguiente, el ángulo de la veleta ψ es el resultado de la ecuación 4.3 donde cabe destacar que se resta 180° con la finalidad de alinear el ángulo del sensor respecto el soporte del mismo.

Para el caso del anemómetro, la señal de pulsos eléctricos es procesada para adquirir el periodo y frecuencia. Aplicando la siguiente ecuación:

$$V_a = \frac{f_{in}}{K_a} \quad Eq. 4.4$$

donde V_a es la velocidad del viento en el plano U, V y K_a es la constante de calibración del anemómetro en Hz/nudos y f_{in} la frecuencia de entrada registrada del instrumento.

$$\begin{cases} U \\ V \end{cases} = \frac{f_{in}}{K} \begin{cases} \cos \psi_a \\ \sin \psi_a \end{cases} \quad Eq. 4.5$$

Por ultimo podemos observar las componentes cartesianas U, V , donde U está en la dirección de estribor y V se encuentra en la dirección hacia proa alineado a la crujía de la embarcación.

3.3. Anemómetro y veleta ST60 Raymarine.

La interfaz entre la veleta y el procesador es por medio de dos señales analógicas identificadas por el color azul y verde que identifica el seno y coseno del ángulo del viento. Ambas señales tiene una amplitud

de aproximadamente 1Vpp y un desplazamiento de la mitad de la tensión de alimentación 4V. Por lo tanto, las tensiones varían de 3V a 5V como se puede observar en la figura 4.3. El rango exacto depende de la longitud del cable así como del estado del mismo.

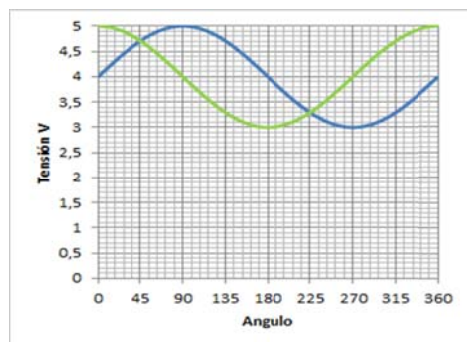


Fig.4.3 Codificación seno coseno de la veleta.

De igual manera que en el apartado anterior, la señal de pulsos eléctricos del anemómetro es procesada para adquirir el periodo y frecuencia. Aplicando la siguiente ecuación:

$$V_a = \frac{f_{in}}{K_a} \quad Eq. 4.8$$

donde V_a es la velocidad del viento en el plano U, V y K_a es la constante de calibración del anemómetro en Hz/nudos y f_{in} la frecuencia de entrada registrada del instrumento.

$$\begin{Bmatrix} U \\ V \end{Bmatrix} = \frac{f_{in}}{K} \begin{Bmatrix} \cos \psi_a \\ \sin \psi_a \end{Bmatrix} \quad Eq. 4.9$$

Como en el caso anterior, las componente U y V se expresan en forma cartesiana por medio de la ecuación 4.9.

3.4. *Corredera, velocidad de la embarcación.*

Igual que en el caso del anemómetro, la interfaz de la corredera es una señal de pulsos eléctricos proporcional a la velocidad con la que gira el rotor de paletas. Aplicando la siguiente ecuación:

$$V_b = \frac{f_{in}}{K_b} \quad Eq. 4.10$$

donde V_b es la velocidad del casco del velero sobre el agua, K_b es la constante de calibración del de la corredera en Hz/nudos y f_{in} la frecuencia de entrada registrada del instrumento.

3.5. *Aceleraciones BMA180.*

Con la información suministrada por el fabricante se establece el rango y se adquiere la aceleración en G mediante la siguiente expresión.

$$A_x = \frac{g_{range}}{2^{14}} acc_x; A_y = \frac{g_{range}}{2^{14}} acc_y; A_z = \frac{g_{range}}{2^{14}} acc_z; \quad Eq. 4.11$$

Donde g_{range} es el rango configurado, en este caso de $\pm 2g$.

$acc_{x|y|z}$ es el valor obtenido del conversor en complemento a dos y 2^{14} la resolución.

El valor promedio de la salida del acelerómetro durante un tiempo predeterminado que no tiene relación con la aceleración de entrada se denomina Bias. Este fenómeno es debido a la imperfección en la fabricación del dispositivo. Otro fenómeno es el denominado factor de escala, que es la relación de un cambio en la salida respecto la entrada medida. A estos dos fenómenos propios del sensor se deben añadir los errores producidos por la instalación. Estos errores son los de mayor influencia y son debidos a la desalineación entre los ejes sensibles de los sensores inerciales y los ejes ortogonales de la envolvente del dispositivo.

Para evitar los errores anteriormente descritos se aplica la ecuación 4.12.

$$a = V^{-1}A - b_0 \quad Eq. 4.12$$

$$a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} A = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} V = \begin{bmatrix} s_{ax}a_{11} & s_{ay}a_{12} & s_{az}a_{13} \\ s_{ax}a_{21} & s_{ay}a_{22} & s_{az}a_{23} \\ s_{ax}a_{31} & s_{ay}a_{32} & s_{az}a_{33} \end{bmatrix} b_0 = \begin{bmatrix} b_{x0} \\ b_{y0} \\ b_{z0} \end{bmatrix}$$

Donde A_x, A_y, A_z es la salida sin procesar del sensor acelerómetro triaxial, a_x, a_y, a_z es el vector normalizado de la gravedad de la tierra respecto la envolvente del dispositivo, s_{ax}, s_{ay}, s_{az} son los factores de escala para cada uno de los ejes, b_{x0}, b_{y0}, b_{z0} son el Bias o desplazamiento para sus respectivos ejes y por último la matriz de transformación de coordenadas entre los ejes sensibles de los sensores acelerómetros y los ejes ortogonales de la envolvente del dispositivo $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33}$.

3.6. *Giroscopios ITG-3205.*

En primer lugar se obtienen las variables brutas con la información técnica del giróscopo.

$$W_x = \frac{Range}{2^{16}} gyro_x; W_y = \frac{Range}{2^{16}} gyro_y; W_z = \frac{Range}{2^{16}} gyro_z; \quad Eq. 4.13$$

donde $Range$ es el rango en toda la escala, en este caso de $\pm 2000^\circ/s$.

$gyro_{x|y|z}$ es el valor obtenido del conversor en complemento a dos y 2^{16} la resolución.

De igual forma que en los acelerómetros, es necesario eliminar los errores producidos por el Bias, factor de escala y ajuste a los ejes ortogonales del sistema de referencia. Para ello se aplica la ecuación 4.14.

$$w = M^{-1}W - b_0 \quad Eq. 4.14$$

$$w = \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} W = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} M = \begin{bmatrix} s_{wx}a_{11} & s_{wy}a_{12} & s_{wz}a_{13} \\ s_{wx}a_{21} & s_{wy}a_{22} & s_{wz}a_{23} \\ s_{wx}a_{31} & s_{wy}a_{32} & s_{wz}a_{33} \end{bmatrix} b_0 = \begin{bmatrix} b_{x0} \\ b_{y0} \\ b_{z0} \end{bmatrix}$$

donde W_x, W_y, W_z es la salida sin calibrar del sensor giroscopio triaxial, w_x, w_y, w_z es el vector calibrado respecto la envolvente del dispositivo, s_{wx}, s_{wy}, s_{wz} son los factores de escala para cada uno de los ejes, b_{x0}, b_{y0}, b_{z0} son el Bias o desplazamiento para sus respectivos ejes y por último la matriz de transformación de coordenadas entre los ejes sensibles de los sensores acelerómetros y los ejes ortogonales de la envolvente del dispositivo $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33}$.

3.7. Magnetómetro HMC5833L.

Continuando con el mismo procedimiento que los sensores anteriores, se cuantifica la salida bruta del sensor mediante la información suministrada por el fabricante.

$$M_x = K_s \cdot mag_x; M_y = K_s \cdot mag_y; M_z = K_s \cdot mag_z; \quad Eq. 4.15$$

donde K_s es la resolución digital $0,92 \text{ mG/LSb}$ para el rango de $\pm 1.3\text{Ga}$.

$mag_{x|y|z}$ los valores adquiridos por el convertor en complemento a dos $0xF800-0x07FF$ (-2048-2047) y $M_{x|y|z}$ son los valores resultantes en mG.

Exactamente igual que los apartados anteriores se debe realizar un proceso de calibración para eliminar los errores del magnetómetro mediante la aplicación de la siguiente expresión.

$$m = Q^{-1} \cdot (M - b_0) \quad Eq. 4.16$$

$$m = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} M = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} Q = \begin{bmatrix} s_{mx}a_{11} & s_{my}a_{12} & s_{mz}a_{13} \\ s_{mx}a_{21} & s_{my}a_{22} & s_{mz}a_{23} \\ s_{mx}a_{31} & s_{my}a_{32} & s_{mz}a_{33} \end{bmatrix} b_0 = \begin{bmatrix} b_{x0} \\ b_{y0} \\ b_{z0} \end{bmatrix}$$

Donde M_x, M_y, M_z es la salida sin calibrar del sensor, m_x, m_y, m_z es el vector calibrado respecto la envolvente del dispositivo, s_{mx}, s_{my}, s_{mz} son los factores de escala para cada uno de los ejes, b_{x0}, b_{y0}, b_{z0} son el Bias o desplazamiento para sus respectivos ejes y por último la matriz de transformación de coordenadas entre los ejes sensibles de los sensores y los ejes ortogonales de la envolvente del dispositivo $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33}$.

3.8. Estrada auxiliar de tensión.

Resulta de utilidad disponer de entradas analógicas auxiliares para la adquisición de datos de carácter genérico. Multitud de sensores disponen de salida analógica en tensión y mediante la expresión 4.17 se cuantifica en voltios y posteriormente se introducirá la calibración propia del sensor respecto la salida en tensión del mismo.

$$V_3 = \frac{Range}{2^{10}} value_{ch3} \quad Eq. 4.17$$

3.9. GPS

El receptor GPS envía de forma periódica un conjunto de mensajes con formato estándar de protocolo NMEA0183, de los cuales se va a decodificar en variables los siguientes datagramas: GGA (Global positioning system fix data), GLL (Latitude and longitude, with time of position fix and status), RMC (Recommended Minimum data) y VTG (Course over ground and Groundspeed).

Obteniendo las siguientes variables:

- Latitude, longitude, altitude.
- Course over ground, Speed over ground
- Time Date UTC (Coordinated Universal Time).
- Quality (0 No Fix, 1 Standard GPS (2D/3D), 2 Differential GPS, 6 Estimated (DR) Fix).

3.10. Sonda náutica.

De igual modo que el GPS, la sonda de profundidad dispone de interface NMEA0183. Únicamente es necesario decodificar los mensajes: DBT (Depth Below Transducer), DPT (Depth) y MTW (Mean Temperature of Water). Para obtener las variables de profundidad y temperatura del agua.

3.11. Compás electrónico.

En términos náuticos un compás es un instrumento para determinar el rumbo a bordo de un barco. Mediante los ejes X e Y del magnetómetro sería suficiente para calcular el rumbo pero es necesario aplicar una compensación de inclinación respecto al plano horizontal. En primer lugar, obtendremos los ángulos de inclinación pitch φ y roll ϕ respecto al plano horizontal mediante las ecuaciones 4.18 y 4.19.

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2+a_z^2}}\right) \quad \text{Eq. 4.18}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2+a_z^2}}\right) \quad \text{Eq. 4.19}$$

A continuación, se rotará el vector del magnetómetro aplicando la convención de ángulos de Euler Tait-Bryan.

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$

Como muestra la ecuación 4.20, la compensación consta de girar en sentido opuesto respecto al eje X e Y.

$$H = R_x(-\varphi) \cdot R_y(-\phi) \cdot m \quad \text{Eq. 4.20}$$

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \cdot \sin\phi & \sin\varphi \cdot \cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \cdot \sin\phi & \cos\varphi \cdot \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.21}$$

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x \cos\varphi + m_y \sin\varphi \sin\phi + m_z \sin\varphi \cos\phi \\ m_y \cos\phi - m_z \sin\phi \\ -m_x \sin\varphi + m_y \cos\varphi \sin\phi + m_z \cos\varphi \cos\phi \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.22}$$

donde M_x, M_y, M_z es el vector del magnetómetro y H_x, H_y, H_z es el vector compensado respecto a el plano horizontal XY.

$$\psi = \text{atan2}(-H_y, H_x) \quad \text{Eq. 4.23}$$

Por último, se aplicará la ecuación 4.23 para determinar el ángulo de giñada. Al aplicar la implementación software del ATAN2 el resultado estará comprendido en el rango de -180° a 180° y será necesario convertirlo a la convención estándar de 0° a 360° .

3.12. *Viento Aparente.*

El viento aparente es la suma vectorial del viento verdadero más el viento generado por el movimiento de la embarcación. En este caso el observado es el sensor MHU. Al igual que el compás, es necesario aplicar una compensación por la escora y cabeceo.

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$

$$[A] = R_y(-\varphi) \cdot R_x(-\phi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \cdot \sin\phi & \sin\varphi \cdot \cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \cdot \sin\phi & \cos\varphi \cdot \cos\phi \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.24}$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos\varphi + v \sin\varphi \sin\phi + w \sin\varphi \cos\phi \\ v \cos\phi - w \sin\phi \\ -u \sin\varphi + v \cos\varphi \sin\phi + w \cos\varphi \cos\phi \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.25}$$

donde u, v, w es el vector del viento aparente adquirido por el sensor MHU y U, V, W es el vector compensado respecto a el plano horizontal XY.

$$\psi = \text{atan2}(-V, U) \quad \text{Eq. 4.26}$$

4. Obtención de las variables de navegación.

Notaciones y coordenadas.

R_0	Sistema de referencia en relación a la tierra. El eje X_0 hacia el norte geográfico.
R_B	Sistema de referencia respecto el centro de gravedad del barco
ϕ	Angulo de escora.
φ	Angulo de asiento longitudinal.
ψ	Angulo rumbo verdadero.
\vec{P}_B	Vector de posición respecto el centro de gravedad del barco R_B .
U, V	Componentes del vector velocidad del barco.
\vec{V}_B	Velocidad respecto el centro de gravedad del barco R_B .
$\vec{V}_{AW}, \vec{V}_{TW}$	Viento aparente y viento real.
\vec{V}_{GW}	Viento real respecto tierra.
V_{MG}	Velocity Made Good.
β_{AW}	Angulo del viento aparente entre \vec{V}_{AW} y X_1 .
β_{TW}	Angulo del viento real entre \vec{V}_{TW} y X_1 .
β_{TWD}	Angulo del viento real respecto el norte geográfico sobre la superficie del agua.
β_{GW}	Angulo del viento real respecto el norte geográfico \vec{V}_{TW} y X_0 .
\vec{V}_L	Abatimiento
β	Angulo de abatimiento
\vec{V}_{tide}	Corriente
β_{tide}	Angulo la corriente entre \vec{V}_{tide} y X_1 .
ψ_m	Angulo del rumbo magnético.
ψ_{cse}	Angulo del curso o rumbo de superficie del agua.
ψ_{cog}	Angulo del curso sobre el fondo, \vec{V}_{sog} y X_0
\vec{V}_{sog}	Velocidad respecto el fondo.
D_m	Declinación magnética.
VPP	Velocity prediction program

4.1. *Corrección por upwash del viento aparente.*

Tal como se ha introducido en los anteriores apartados, la unidad de viento se localiza en la parte superior del mástil. El upwash es un efecto aerodinámico que aparece en la sustentación del perfil

aerodinámico desarrollado por la vela, causando que el flujo tienda a curvarse en sentido ascendente o axialmente.

La unidad de viento se encuentra ubicada dentro de esta perturbación y por ello uno de los elementos que forman la unidad de viento es la percha. Esta eleva y traslada los sensores de viento hacia la proa para evitar en mayor medida la zona de flujo perturbado. En función de la superficie de la vela o la altura del mástil, la longitud de la percha aumenta. El efecto sobre el viento aparente registrado por la veleta es que el ángulo es más cerrado del que realmente existe; a este fenómeno se denomina upwash. Una función que corrige este fenómeno es la implementada en el sistema (OCKAM SYSTEM 2009).

$$\beta_{UW} = [K_{UW} + K_{UWS} \times (\min(|\vec{V}_{TW}|, 35) - 12)] \times \text{sign}(\beta_{AW}) \times \sin^{2.5}(0.6 \times (180 - |\beta_{AW}|)) \times Reef^2 \times Flat \quad \text{Eq. 5.1}$$

Donde, las funciones “min” y “sign” retornan el mínimo y el signo de la variable. *Reef* y *Flat* son las variables que ajustan la ecuación cuando por causa de fuertes vientos la vela no es izada completamente. K_{UW} , K_{UWS} son las constantes que ajustan la amplitud de la expresión.

4.2. Triangulo de viento

Una vez obtenido el viento aparente que experimenta el velero, se está en disposición de poder conocer el viento que realmente hay en el entorno. Ya que la reacción al movimiento del barco es la creación de un viento ficticio de la misma intensidad del movimiento del barco (velocidad) pero de sentido opuesto a éste. La ecuación vectorial que relaciona el viento aparente y el viento real se expresa de la forma:

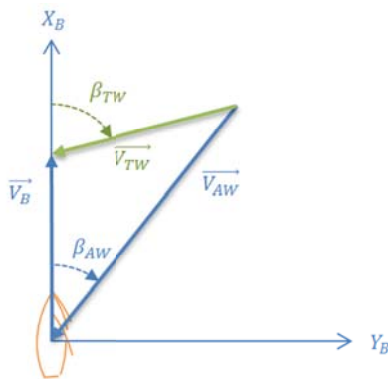


Fig. 5.1 Triangulo de viento.

$$\vec{V}_{TW} = \vec{V}_{AW} - \vec{V}_B \quad \text{Eq. 5.2}$$

siendo \vec{V}_{TW} el viento real, \vec{V}_B la velocidad del barco y \vec{V}_{AW} el viento aparente.

$$V_{B_x} = |\vec{V}_B|, V_{AW_x} = |\vec{V}_{AW}| \cos \beta_{AW} \quad \text{Eq. 5.3}$$

$$V_{B_y} = 0, V_{AW_y} = |\vec{V}_{AW}| \sin \beta_{AW}$$

$$V_{TW_x} = |\vec{V}_{AW}| \cos \beta_{AW} - V_{B_x} \quad \text{Eq. 5.4}$$

$$V_{TW_y} = |\vec{V}_{AW}| \sin \beta_{AW}$$

Por consiguiente, el ángulo real TWA y la intensidad TWS se expresan:

$$\beta_{TW} = TWA = \text{atag2}(V_{TW_y}, V_{TW_x}) \quad \text{Eq. 5.5}$$

$$|\vec{V}_{TW}| = |TWS| = (V_{TW_x}^2 + V_{TW_y}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 5.6}$$

4.3. Rumbo magnético y rumbo verdadero.

Se define el rumbo como el ángulo medido en el plano horizontal entre el norte y la dirección de avance del barco. El rumbo magnético es el ángulo formado entre el norte magnético y la crujía de la

embarcación sin desvíos y el rumbo verdadero es el formado por el norte verdadero o geográfico. La diferencia se denomina declinación magnética.

$$\psi = \psi_m \pm D_m \quad \text{Eq. 5.7}$$

4.4. Abatimiento y rumbo en superficie o efectivo.

Desviación del rumbo a sotavento que sufre un barco debido a la acción del viento.

Puede expresarse como diferencia angular entre el rumbo verdadero de la proa (R_v) y el rumbo de superficie (R_s) o derrota real sobre el fondo. Si el viento incide en el costado de babor, el abatimiento es a estribor o positivo. Por el contrario, si el viento incide en el costado de estribor el abatimiento es a Babor o negativo. En otras palabras, el abatimiento es el ángulo formado entre el rumbo en superficie o curso del velero y la dirección en la que apunta la proa.

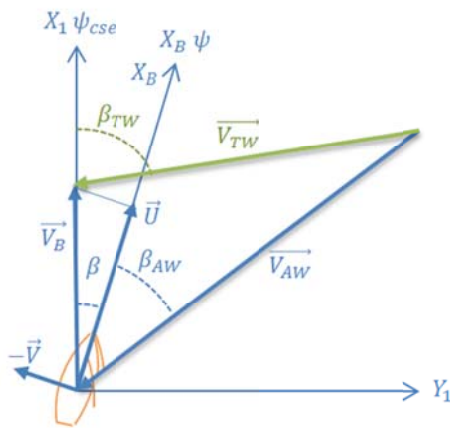
$$\beta = K \cdot \frac{\phi}{|\bar{u}|^2} \quad \text{Eq. 5.8}$$

Como se expresa en la ecuación 5.8 la fuerza lateral de abatimiento es proporcional a la escora e inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad del barco.

El rumbo en superficie o curso será la suma del rumbo verdadero más menos el abatimiento. Si el viento incide en el costado de babor, el abatimiento es a estribor o positivo, y si el viento incide en el costado de estribor el abatimiento es a babor o negativo.

4.5. Triangulo de viento con compensación por abatimiento.

Debido a la deriva que experimenta un barco, el rumbo que este lleva está levemente modificado, por lo que hay que tener en cuenta este pequeño ángulo de deriva para poder corregir el eje sobre el que se mide el viento, ya que tanto intensidad como ángulo de viento se refieren al rumbo que lleva el barco.



$$\vec{V}_{TW} = \vec{V}_{AW} - (\vec{U} + \vec{V}) \quad \text{Eq. 5.9}$$

$$\begin{aligned} U_{x1} &= |\vec{U}| \cos \beta, \quad \vec{V}_{Bx1} = \frac{|\vec{u}|}{\cos \beta} \\ U_{y1} &= |\vec{U}| \sin \beta, \quad \vec{V}_{By1} = 0 \end{aligned} \quad \text{Eq. 5.10}$$

$$\begin{aligned} V_{AWx1} &= |\vec{V}_{AW}| \cos(\beta_{AW} + \beta) \\ V_{AWy1} &= |\vec{V}_{AW}| \sin(\beta_{AW} + \beta) \end{aligned} \quad \text{Eq. 5.11}$$

$$\begin{aligned} V_{TWx1} &= |\vec{V}_{AW}| \cos(\beta_{AW} + \beta) - \frac{|\vec{u}|}{\cos \beta} \\ V_{TWy1} &= |\vec{V}_{AW}| \sin(\beta_{AW} + \beta) \end{aligned} \quad \text{Eq. 5.12}$$

Fig. 5.2 Triangulo de viento.

$$TWA = \beta_{TW} = \text{atag2}(TW_{y1}, TW_{x1}) \quad \text{Eq. 5.13}$$

$$TWS = |\vec{V}_{TW}| = (TW_{x1}^2 + TW_{y1}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 5.14}$$

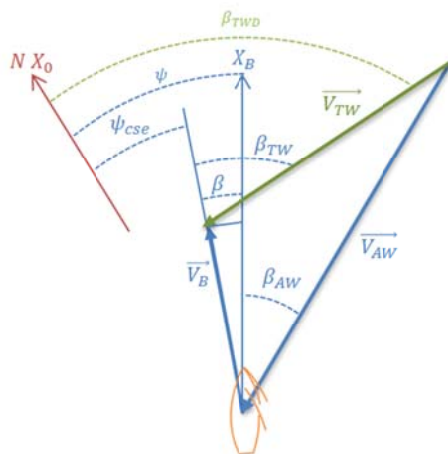
Estos dos parámetros son fundamentales, pues son la base de cálculo para medir el rendimiento que obtiene un velero. Así pues es de vital importancia que ambos sean lo más precisos y fiables que se pueda.

4.6. Dirección de viento respecto al Norte geográfico.

Viento Real - True Wind es el viento que se percibe si no hay movimiento del barco a través del agua. Representa el viento percibido por un objeto estacionario en el agua, pero que se mueve con la marea o corriente.

Una vez obtenido el ángulo de incidencia real del viento del velero, un parámetro importante que se puede derivar es el conocer la dirección del viento con referencia al Norte magnético de la Tierra. De esta forma se obtiene un dato de la dirección del viento con independencia de nuestra situación y estado del velero. Este parámetro es muy importante, ya que se puede observar de aquí la evolución a lo largo del tiempo que sigue el viento y ver así las desviaciones que va sufriendo éste y que son tan significativas a la hora de plantear una táctica de regata.

La manera de obtener pues el True Wind Direction (TWD) es:



$$\beta_{TWD} = \psi_{cse} + \beta_{TW} = \psi - \beta + \beta_{TW} \quad \text{Eq. 5.15}$$

Fig.5.3 Representación $Cse=Hdg+Lwy$ con el criterio de signos aplicados.

Ya que el TWA es el ángulo de incidencia del viento sobre mi rumbo, basta con sumarle el rumbo efectivo (Course) para obtener la dirección del viento referida al Norte.

El rumbo efectivo es la suma del rumbo, dirección de la línea de crujía, y la deriva que lleva el velero, pues así tenemos la dirección real de avance del velero, como podemos apreciar en la figura 5.3.

4.7. Corriente marina.

Es un movimiento superficial de las aguas de los océanos y mares respecto a la tierra e influye considerablemente en la velocidad y rumbo que el velero que es capaz de adoptar. Así pues con el fin de conocer el vector corriente que le afecta al velero, podemos proceder de la siguiente manera.

Como COG y SOG son parámetros computados con un GPS, estos representan la velocidad y rumbo real que lleva el velero respecto a la tierra. Así pues, la diferencia entre estos y la velocidad sobre el agua y rumbo en superficie corresponde a la corriente.

$$U_{x0} = |\vec{U}| \cos(\psi), \quad U_{y0} = |\vec{U}| \sin(\psi) \quad \text{Eq. 5.16}$$

$$\vec{V}_{Bx0} = |(\vec{U} + \vec{V})| \cos(\psi - \beta), \quad \vec{V}_{By0} = |(\vec{U} + \vec{V})| \sin(\psi - \beta) \quad \text{Eq. 5.17}$$

$$\vec{V}_{Bx0} = \frac{|\vec{U}|}{\cos\beta} \cos(\psi_{cse}), \quad \vec{V}_{By0} = \frac{|\vec{U}|}{\cos\beta} \sin(\psi_{cse}) \quad \text{Eq. 5.18}$$

$$V_{sog_{x0}} = |\vec{V}_{sog}| \cos(\psi_{cog}), \quad V_{sog_{y0}} = |\vec{V}_{sog}| \sin(\psi_{cog}) \quad \text{Eq. 5.19}$$

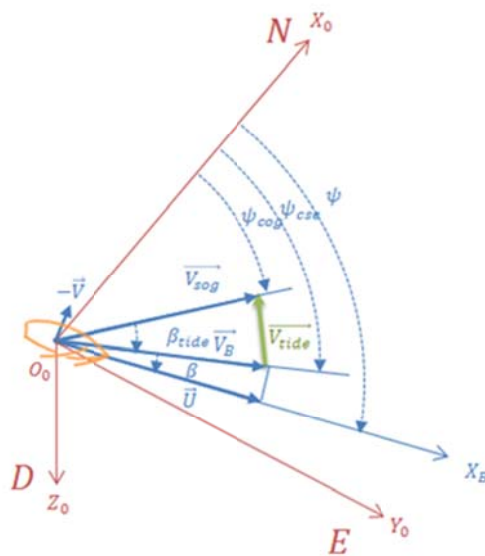


Fig. 5.4 Representación vector corriente del mar.

4.8. Viento respecto a la tierra.

Es el viento que se percibiría en la embarcación si estuviera quieta sobre la tierra o el fondo sin los efectos de la corriente ni deriva. En otras palabras, es la suma del vector de viento real magnético y la corriente del mar. Cabe destacar que el vector viento real respecto el norte verdadero incluye el abatimiento de la embarcación.

$$\vec{V}_{tide} = \vec{V}_B - \vec{V}_{sog} \quad \text{Eq. 5.20}$$

$$V_{tide_{x0}} = \left| \frac{|\vec{U}|}{\cos\beta} \sin(\psi_{cse}) - |\vec{V}_{sog}| \cos(\psi_{cog}) \right| \quad \text{Eq. 5.21}$$

$$V_{tide_{y0}} = \frac{|\vec{U}|}{\cos\beta} \sin(\psi_{cse}) - |\vec{V}_{sog}| \sin(\psi_{cog})$$

$$TA = \beta_{tide} = \text{atag2}(V_{tide_{y0}}, V_{tide_{x0}}) \quad \text{Eq. 5.22}$$

$$TS = |\vec{V}_{tide}| = (V_{tide_{x0}}^2 + V_{tide_{y0}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 5.23}$$

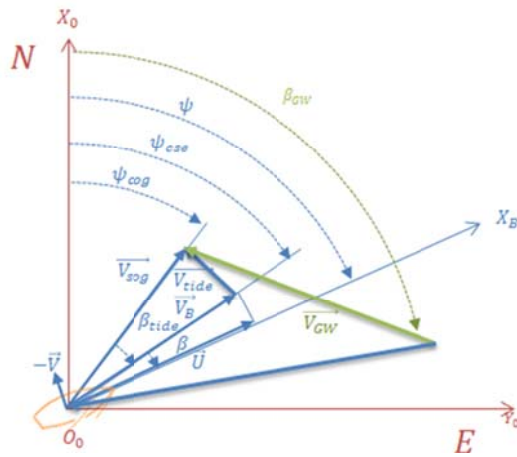


Fig. 5.5 Viento respecto la tierra.

$$\begin{aligned} V_{TWN_x} &= |V_{TW}| \cos \beta_{TWD} \\ V_{TWN_y} &= |V_{TW}| \sin \beta_{TWD} \end{aligned} \quad Eq. 5.24$$

$$\begin{aligned} V_{tide_x} &= |\overrightarrow{V_{tide}}| \cos \beta_{tide} \\ V_{tide_y} &= |\overrightarrow{V_{tide}}| \sin \beta_{tide} \end{aligned} \quad Eq. 5.25$$

$$\overrightarrow{V_{GW}} = \overrightarrow{V_{TWN}} + \overrightarrow{V_{tide}} \quad Eq. 5.26$$

$$GWA = \beta_{GW} = \text{atag2}(V_{GW_y}, V_{GW_x}) \quad Eq. 5.27$$

$$GWS = |\overrightarrow{V_{GW}}| = (V_{GW_x}^2 + V_{GW_y}^2)^{\frac{1}{2}} \quad Eq. 5.28$$

4.9. Velocidad en la dirección del viento.

Si nuestro destino (waypoint) está en un rumbo en la misma dirección del viento, dado que un velero no puede navegar en contra del viento sino es con un determinado ángulo de ataque respecto a éste, un parámetro de mucha utilidad es saber cuál es la velocidad efectiva con la que el barco remonta el viento.

Para calcular la velocidad del barco en la dirección del viento (Velocity Made Good) basta con proyectar la velocidad en mi rumbo sobre el eje del viento. Como el ángulo que forma el vector Boat Speed con el eje del viento es el True Wind Angle obtenemos la relación.

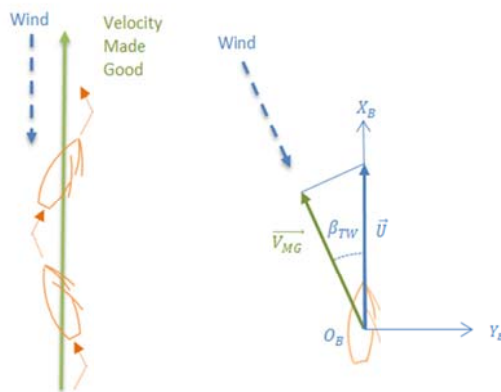


Fig. 5.6 Representación rumbo de ceñida.

$$V_{MG} = |U| \cos \beta_{TW} \quad Eq. 5.29$$

Este parámetro también es muy significativo a la hora de una regata ya que siempre se intenta navegar de tal forma que el VMG sea máximo, pues en ese caso nos indica que estamos navegando en el rumbo y velocidad que mejor remonta el viento, según se esté en una ceñida o en una popa.

La velocidad efectiva en la dirección del viento es una proyección de la velocidad del velero sobre el eje de viento.

5. Implementación numérica en el procesador.

Como hemos visto en el apartado anterior, el procesador consta de un microcontrolador y un procesador unido por una interfaz serie. Como se observa en la figura 6.1 las tareas de adquisición y calibración las realiza el microcontrolador y las tareas de filtraje, corrección, cálculo de viento e interfaz de salida las realiza el procesador. Estas últimas tareas precisan de mayor capacidad de proceso y de un sistema operativo.

Tal como vimos en el apartado 3, las variables brutas son adquiridas y calibradas a una frecuencia de muestreo de 50Hz. El microcontrolador genera un datagrama con todas las variables brutas e incluye una marca de tiempo de forma que el procesador decodifique dichas variables para su posterior procesamiento.

Antes de proceder al cálculo de viento, es necesario realizar un filtraje de las señales. Se aplican dos tipos de filtros. Suavizado exponencial o filtro exponencial y un filtro Kalman extendido. El primero se aplica en las señales provenientes de la unidad de viento y corredera, aplicando los algoritmos descritos en los siguientes artículos (Feng et al. 2012) (Morimoto et al. 2004). El segundo se aplica en el conjunto de la unidad de medida inercia formada por los acelerómetros, giróscopos y magnetómetros. El filtro se implementa con cuaternos y el algoritmo de gradiente descendente para la obtención del vector de observaciones aplicando las mismas técnicas que en los trabajos (Madgwick 2010) (Comotti 2011) (Wang, Zhang, and Sun 2015). En el caso del receptor GPS no se aplica ningún filtro ya que la información está previamente filtrada. Al utilizar diferentes tipos de filtros es muy importante que los desfases sean coincidentes incluyendo también la constante de tiempo del GPS.

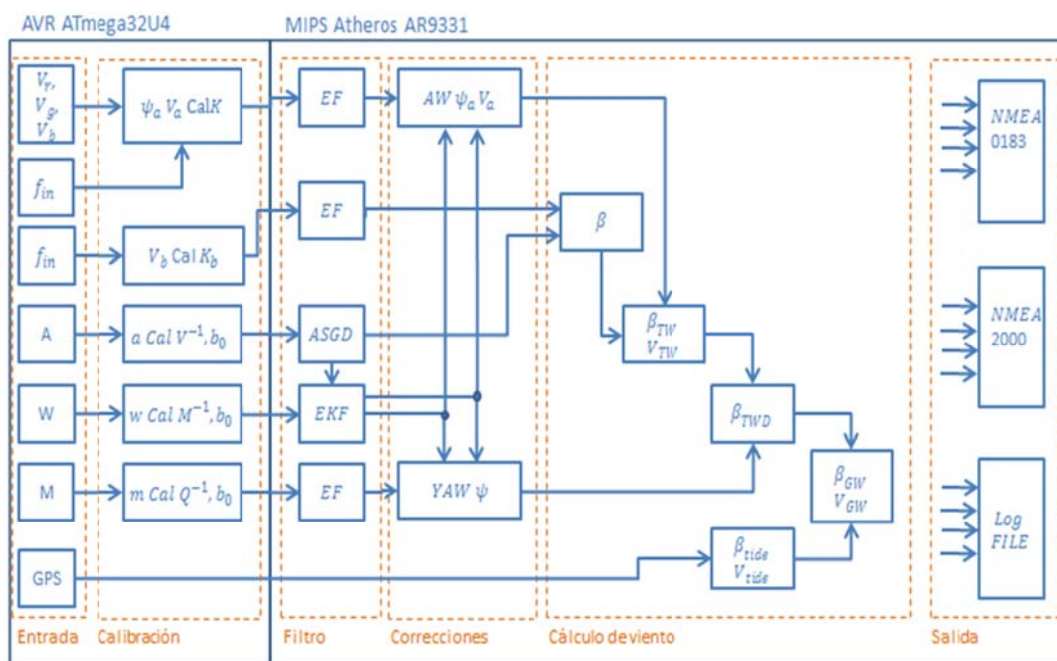


Fig. 6.1 Diagrama de bloques del procesado.

A continuación se realiza la corrección de inclinación respecto al plano horizontal. En otras palabras, se rota en sentido inverso la escora y el asiento horizontal. En el caso de la unidad de viento se aplica la

Eq(4.26), y para el compás la Eq(4.23). Llegado a este punto, comienza el procesado de viento con el cálculo de abatimiento Eq(5.8) necesario para el cálculo de viento real Eq(5.13)(5.14) que a su vez, con el rumbo obtenemos la dirección de viento respecto al norte magnético Eq(5.15).

Con las variables obtenidas por el GPS dirección y velocidad respecto a tierra y la resta vectorial del curso y velocidad de la embarcación obtenemos la corriente Eq(5.22)(5.23) que nos permite estimar el viento real respecto a tierra.

Por último, el bloque de salida suministra las variables procesadas a otros subsistemas así como el registro a fichero. Los interface estándar son el NMEA0183 y NMEA2000 y en este trabajo se ha implementado un NMEA0183 rutado por TCP-IP al software OpenCPM.

6. Calibración de los instrumentos.

En este apartado se ha procedido a la verificación y calibración de los instrumentos que componen el sistema de navegación. Como se observa en la figura 7.1 serán utilizados diferentes sensores y utillajes para cada sensor.



Fig. 7.1 Medios de calibración.

6.1. Anemómetro

Antes de proceder a la calibración del sensor en el túnel de viento, se evalúa las condiciones y posición de referencia donde se procederá a situar el anemómetro. Se establece el cálculo de las velocidades del viento a partir de las mediciones de carga dinámica y la densidad del aire, teniendo en cuenta que la densidad del aire se basa en la medición de la temperatura ambiente, presión barométrica y humedad relativa. Posteriormente se ha calibrado en intervalos discretos de 1m/s en el rango de 3 a 12 m/s. Los intervalos de muestreo se establecen en periodos de 30 segundos por cada punto a calibrar. Los coeficientes de calibración se obtienen mediante la realización de una línea de regresión entre la velocidad del viento y la salida promediada del anemómetro. Los resultados obtenidos se exponen en la siguiente figura 7.2.

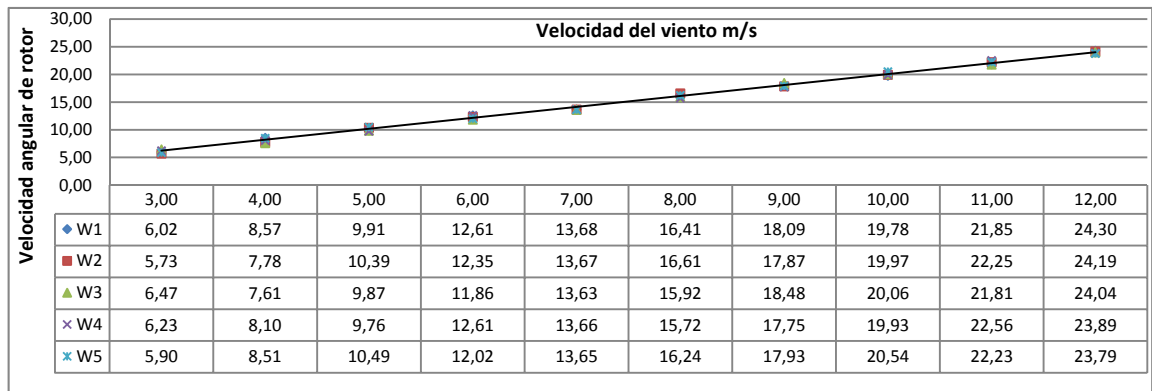


Fig. 7.2 Calibración anemómetro.

6.2. Veleta.

En primer lugar, se preparan los equipos auxiliares y se configura el sistema completo para la adquisición de datos. Se procede a la instalación del sensor sobre el soporte universal tratando así de conservar la máxima perpendicularidad posible sobre la superficie de medida. La colocación del sensor se debe realizar sobre la superficie de la plantilla de giro, coincidiendo con el punto del centro de la circunferencia. Para ello se utilizan escuadras de precisión. Seguidamente se conecta el sensor al procesador y se coloca el puntero laser sobre un extremo de la veleta de forma que sea capaz de recorrer toda la zona marcada de la plantilla. Una vez colocados los sensores se establecen las pautas de medida, precisión, recorrido y estabilidad. Inicialmente se lleva al indicador laser hasta la posición que se va a considerar cero. El valor indicado en el software se toma como primer punto.

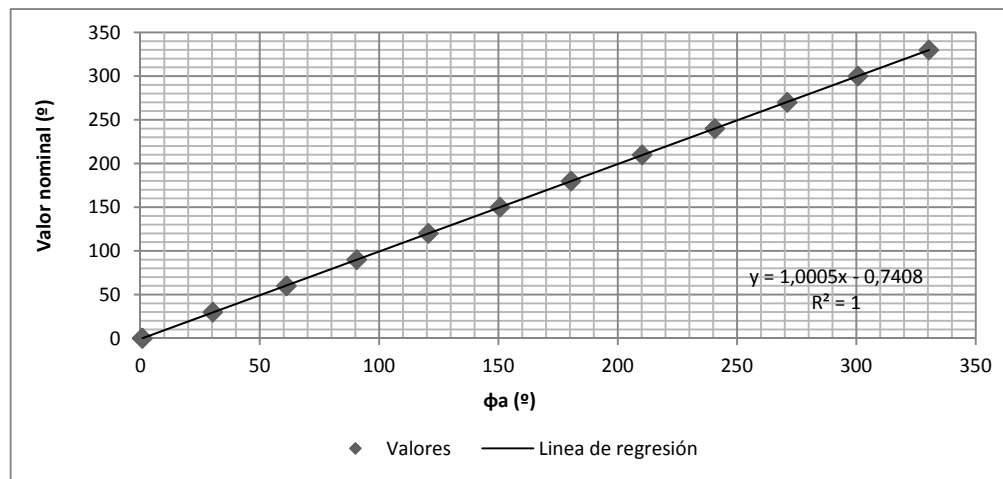


Fig. 7.3 Calibración Veleta.

El número de puntos tomados se encuentran en función del rango de ensayo, y la precisión seleccionada. En este caso se considera la toma de 13 puntos en todo el rango de medida. Esta toma de medidas se repite por dos veces. Una vez obtenidos todos los valores se procede a realizar los cálculos.

Los coeficientes de calibración se obtienen mediante la realización de una línea de regresión entre el ángulo leído en la plantilla y la salida promediada del anemómetro.

6.3. Calibración Corredera.

Antes de proceder a la calibración se prepara el canal hidráulico multipropósito C4MKII canal abierto de 76mm de ancho, 250mm de alto y 5 m de longitud. Se fija el sensor al canal mediante un soporte ajustable en profundidad. Se verifica el alineamiento del sensor respecto al canal y se ajusta la profundidad según manual de referencia. Se procede a calibrar en intervalos discretos de 1m/s comprendidos en el rango de 1 a 6 m/s mediante la regulación de caudal y el accesorio ajustable “undershot”. Para cada uno de ellos se promedian los datos durante un intervalo de tiempo de 30s. Los coeficientes de calibración se obtienen mediante la realización de una línea de regresión entre la velocidad del fluido y la salida promediada de la corredera. Los resultados obtenidos se exponen en la siguiente figura 7.4. Estos resultados no son extrapolables al comportamiento del sensor montado en el casco de una embarcación, puesto que varían por los efectos hidrodinámicos del casco.

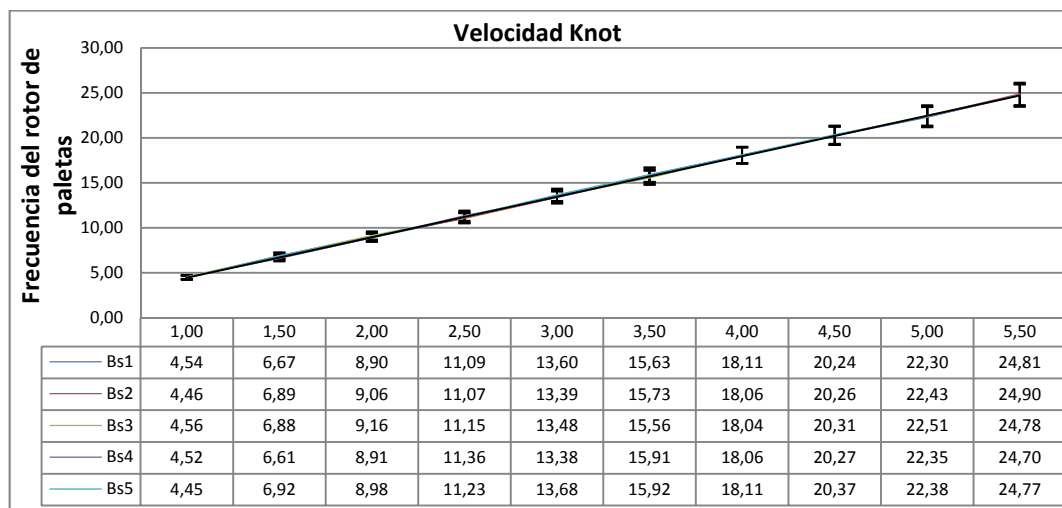


Fig. 7.4 Calibración corredera.

6.4. Calibración acelerómetros, giróscopos.

En primer lugar, se preparan los equipos auxiliares “PRO 3600 Digital Protractor” y “Microstrain 3DM-GX1” se configura el sistema completo de adquisición de datos. Y se procede a la instalación del sensor sobre el soporte universal y la bancada. Se establece el sistema de referencia previamente alineado todo el conjunto. Se procede a realizar una calibración estándar de seis puntos como el desarrollado en el artículo (Wei et al. 2013). Los intervalos de muestreo se definen con una duración de 30 segundos por cada punto a calibrar. Obtenemos la matriz de calibración usando el método de estimación de mínimos cuadrados. A continuación se introduce la corrección y se realiza una verificación mutua con el sensor inercial IMU 3DM-GX1. En el caso de los giróscopos se procede con la misma técnica de calibración pero con la utilización de una plataforma giratoria formada por una base niveladora laser y un motor paso a paso. El equipo se coloca sobre el soporte y se fija con la mordaza. Cabe destacar que al equipo se le incorpora una pequeña batería que permite convertir al sistema en un equipo inalámbrico y autónomo.

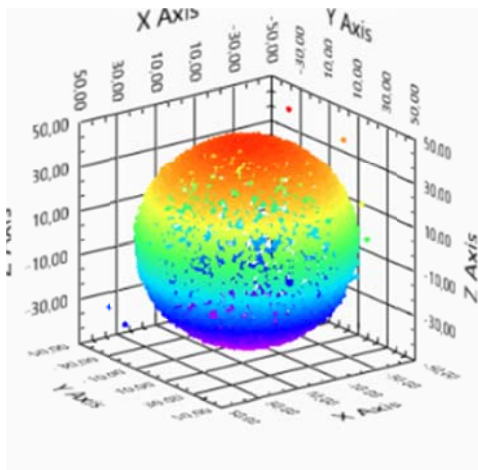
$$V^{-1} = \begin{bmatrix} 1.00582 & -0.000321 & 0.001982 \\ -0.000321 & 0.99431 & 0.00057 \\ 0.001982 & 0.00057 & 1.00143 \end{bmatrix} b_0 = \begin{bmatrix} -175.93 \\ 151.94 \\ -39.036 \end{bmatrix} \text{ Eq. 7.1}$$

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} 1.00232 & 0.000021 & -0.00011 \\ 0.000021 & 1.0052 & 0.00036 \\ -0.00011 & 0.00036 & 1.0028 \end{bmatrix} b_0 = \begin{bmatrix} - \\ - \\ - \end{bmatrix} \text{ Eq. 7.2}$$

Las matrices de calibración Eq.7.1 corresponde a la calibración de acelerómetro triaxial y la Eq.7.2 a los giróscopos el vector de bias se compensa mediante algoritmo de compensación de cero.

6.5. Calibración magnetómetro.

En este proceso no es necesario ningún elemento externo. El procedimiento de calibración se basa en adquirir los datos brutos de los tres magnetómetros mientras se realizan esferas con la ayuda de las manos. Las consideraciones que hay que tener son intentar hacer que cada eje se alinee en algún momento con el norte y sur magnético y evitar movimientos bruscos. A continuación se debe conocer la intensidad del campo magnético de la ubicación o utilizar un patrón IMU 3DM-GX1 cuando el eje se encuentra alineado al norte. Aplicando una regresión por mínimos cuadrados a una elipsoide (Jiancheng Fang et al. 2011)(Li and Griffiths 2004) obtenemos el vector de desviación bias y la matriz de calibración.



$$Q^{-1} = \begin{bmatrix} 0.088871 & -0.00000721 & 0.00119682 \\ -0.00000721 & 0.0904341 & 0.00140587 \\ 0.00119682 & 0.00140587 & 0.0914308 \end{bmatrix}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} -178.93 \\ 171.94 \\ -39.036 \end{bmatrix} \text{ Eq. 7.3}$$

Fig 7.5 Calibración magnetómetro.

7. Resultados experimentales.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos después de realizar los procedimientos de calibración de los diferentes instrumentos. En el caso de la unidad de viento y corredera se aplica la línea de tendencia obtenida previamente y se acotan los errores absolutos máximos.

Ángulo °	0.0	30.0	60.0	90.0	120.0	150.0	180.0	210.0	240.0	270.0	300.0	330.0
Valor °	1.17	31.03	60.03	90.53	121.6	150.8	181.6	209.4	239.9	270.1	300.9	331.5
Error Abs. ° Max	1.17	1.03	0.03	0.53	1.6	0.8	1.6	0.6	0.1	0.1	0.9	1.5

Tabla 8.1 Error absoluto veleta.

Velocidad m/s	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00
Error Abs. Max m/s	0.12	0.15	0.14	0.10	0.12	0.11	0.09	0.10	0.09	0.08

Tabla 8.2 Error absoluto anemómetro.

Los errores calculados en la tabla 8.1 y 8.2 corresponden a la unidad de viento una vez calibrada. La veleta muestra una buena respetabilidad pero con error absoluto > 1°. Se puede reducir el error ajustando la calibración por un polinomio de grado superior o una aproximación geométrica.

Como se observa en la tabla 8.3, el error absoluto máximo queda comprendido en los siguientes valores no superando el 0.3 nudos. Tal y como se explicó en el apartado anterior, estos resultados son los adquiridos en el canal y no están afectados por el uso del pasacascos o los efectos hidrodinámico del casco de la embarcación.

Velocidad Knot	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	4.50	5.00	5.50
Error Abs. Max Knot	1,7	3,3	2,1	2,8	3,0	2,8	3,0	3,3	3,3

Tabla 8.3 Error absoluto máximo sensor corredera.

Aplicadas las matrices de calibración de los acelerómetros, giroscopios y magnetómetros se realiza una verificación estática de los ángulos de orientación Pitch, Roll y Yaw, con la finalidad de comprobar y acotar los errores.

	Pitch	Roll	Pitch	Roll	Pitch	Roll	Pitch	Roll	Pitch	Roll
Valor real (°)	0	0	0	15	15	0	-15	0	0	-15

Medida (°)	0,01	0,11	0,13	14,8	15,1	-0,15	-14,8	0,26	0,21	-15,2
Error abs (°)	0,01	0,11	0,13	0,2	0,1	0,15	0,2	0,26	0,21	0,2

Tabla 8.4 Error absoluto Pitch y Roll.

En la tabla 8.4, se observa el error absoluto del ángulo de inclinación respecto el plano horizontal. La máxima desviación no supera un cuarto de grado, que satisface la tolerancia precisada para este tipo de aplicación.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la variable del rumbo magnético Yaw. Los errores absolutos son calculados en intervalos discretos de 15°. Para cada intervalo se realiza la media de las medidas obtenidas en el mismo rumbo pero diferentes planos creados por las combinaciones de inclinaciones de Pitch y Roll de -15°, 0° y 15°.

Yaw								
Valor real (°)	0	15	30	45	60	75	90	105
Media (°)	0,905	15,85	30,42	45,1	60,1	74,9	89,5	104,6
Error abs (°)	0,905	0,85	0,42	0,1	0,1	0,1	0,5	0,4
Yaw								
Valor real (°)	120	135	150	165	180	195	210	225
Media (°)	118,8	133,9	148,8	164,5	178,5	194,35	210,08	225,7
Error abs (°)	1,2	1,1	1,2	0,5	1,5	0,65	0,08	0,7
Yaw								
Valor real (°)	240	255	270	285	300	315	330	345
Media (°)	241,1	256,2	271,4	286,6	309,5	316,3	332,1	346,3
Error abs (°)	1,1	1,2	1,4	1,6	9,5	1,3	2,1	1,3

Tabla 8.5 Error absoluto YAW.

Como se observa en la tabla 8.5 el error absoluto máximo es de 2.1° y el error medio es < 0.5°. Estas desviaciones y distorsiones magnéticas se pueden minimizar aplicando curvas de compensación.

En la siguiente tabla 8.6 muestra el consumo medio en vatios en tres modos de operación. El primer modo corresponde al consumo medio del procesador e instrumentos GPS, IMU, MHU y corredera. Los otros dos modos corresponden al consumo medio más el consumo por cada interfaz de red.

Modo de operación	Consumo medio	+ Wifi	+ Wifi + ethernet
Potencias W	2.7	3.2	5.9

Tabla 8.6 Consumo medio en diferentes Modo de OPERACIÓN.

Adicionalmente el consumo puede incrementarse con la conexión de instrumentos opcionales como las sonda de profundidad, carga en el estay, sensor de ángulo de timo, etc...

8. Conclusiones

Con un coste de al menos diez veces inferior al de los sistemas comerciales y un consumo de energía con una reducción del mismo orden, el diseño posee una elevada capacidad de proceso además de una alta conectividad gracias a todos los interfaces que dispone.

El diseño compacto incluyendo adicionalmente el receptor GPS e IMU en el propio procesador, mejora notablemente numerosas características, entre ellas, la robustez y el ancho de banda con el procesador, puesto que utilizan buses estándar cercanos al procesador en lugar de buses de campo, lo que permite aumentar considerablemente la frecuencia de muestreo del proceso de adquisición. Como consecuencia, permite implementar algoritmos de fusión sensorial o de navegación por estima con mayor exactitud. Las características avanzadas del procesador Atheros admite implementar compensaciones, cálculos y filtros complejos como el filtro extendido Kalman. También simplifica el cableado al procesador, puesto que solo es necesario conectar la unidad de viento y la corredera para configurar un sistema mínimo de navegación.

Las interfaces estándar NMEA0183, NMEA2000 permiten interconectar y escalar diferentes sensores al sistema. A estas interfaces se añade la red TCP/IP (wifi, ethernet), que amplía su conectividad otros subsistemas inteligentes como: software táctico, displays, tabletas o pilotos automáticos.

El procesador también realiza tareas de registrador de datos, implementadas con las tecnologías robustas de los sistemas de archivos soportados en los sistemas operativos Linux.

Su bajo consumo eléctrico así como su elevada precisión y pequeño volumen permite adaptarse a otras aplicaciones como la robótica náutica, plataformas de observación marítima, boyas meteorológica etc...

9. Bibliografía.

Alfredo Pons, David Asiaín, Fernando Quero, et al.

2004 Racing Bravo. Un sistema de navegación para alta competición. *INGENIERIA NAVAL 1. Diseño de Yates 2004 (MDY'04)*: 83–94.

Arduino YUN

2007 Arduino Board Yun. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardYun>, accessed November 2, 2015.

Comotti, Daniele

2011 Orientation Estimation Based on Gauss-Newton Method and Implementation of a Quaternion Complementary Filter. tech. rep. https://9dof-orientation-estimation.googlecode.com/files/GaussNewton_QuaternionComplemFilter_V13.pdf, accessed November 16, 2015.

Feng, Guo, Liu Chen-Yu, Zhou Bin, and Zhang Su-Qin

2012 Spares Consumption Combination Forecasting Based on Genetic Algorithm and Exponential Smoothing Method. *In Pp.* 198–201. IEEE. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6405964>, accessed November 16, 2015.

Freeboard

2013 FreeBoard Is a New Way to Provide Navigation Instruments on Your Boat. <http://www.42.co.nz/freeboard/>, accessed November 2, 2015.

Jiancheng Fang, Hongwei Sun, Juanjuan Cao, Xiao Zhang, and Ye Tao

2011 A Novel Calibration Method of Magnetic Compass Based on Ellipsoid Fitting. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60(6): 2053–2061.

Kees Verruijt

2012 Canboat. <https://github.com/canboat/canboat>, accessed November 2, 2015.

Li, Qingde, and John G. Griffiths

2004 Least Squares Ellipsoid Specific Fitting. *In Geometric Modeling and Processing, 2004. Proceedings Pp.* 335–340. IEEE. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1290055, accessed November 16, 2015.

Madgwick, Sebastian OH

2010 An Efficient Orientation Filter for Inertial and Inertial/magnetic Sensor Arrays. Report X-Io and University of Bristol (UK). http://sharenet-wii-motion-trac.googlecode.com/files/An_efficient_orientation_filter_for_inertial_and_inertialmagnetic_sensor_array_s.pdf, accessed November 16, 2015.

Morimoto, J., H. Kasamatsu, A. Higuchi, T. Yoshida, and T. Tabuchi

2004 Setting Method of Smoothing Constant in Exponential Smoothing. *In SICE 2004 Annual Conference Pp.* 1735–1738 vol. 2.

Nick White

2014 History of Sailing Instruments. <http://www.expeditionmarine.com/history.htm>, accessed November 2, 2015.

NMEA 2000

N.d. National Marine Electronics Association.

http://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_2000_ed3_10.asp, accessed November 2, 2015.

OCKAM SYSTEM

2009 OCKAM SYSTEM MANUAL.

OpenCPN

2010 A Chartplotter and GPS Navigation Software. <http://opencpn.org/ocpn/about>, accessed November 2, 2015.

OpenWrt

2004 OpenWrt is described as a Linux distribution for embedded devices. <https://openwrt.org/>, accessed November 2, 2015.

Sailoog Openplotter

2015. <https://github.com/sailoog/openplotter>, accessed November 2, 2015.

Teppo Kurki

2014 Navgauge. Navgauge Makes Navigation Data Available via NMEA 0183 and NMEA 2000 (N2K) Available on Your Browser in Customizable Displays. <https://github.com/tkurki/navgauge>, accessed November 2, 2015.

Wang, Li, Zheng Zhang, and Ping Sun

2015 Quaternion-Based Kalman Filter for AHRS Using an Adaptive-Step Gradient Descent Algorithm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*: 1.

Wei, Ren, Zhang Tao, Zhang Hai-yun, et al.

2013 A Research on Calibration of Low-Precision MEMS Inertial Sensors. *In* Pp. 3243–3247. IEEE. <http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=6561506>, accessed November 26, 2015.

10. Anexos.

10.1. Conexionado de sensores.

Cable B&G MHU 213			Conector P5 (ShieldSail Interfaces)		
Color	N	Código	N	Código	Detalles
	2	Vin	1	VAA	Tensión de Alimentación
	1	GND	2	GND	Masa
	6	F_Red	3	CH0	Fase roja
	7	F_Green	4	CH1	Fase verde
	5	F_Blue	5	CH2	Fase azul
			6	CH3	
	4	Pulse	7	CH1_Pulse	Entrada de frecuencias
			8	GND	
			9	CH2_Pulse	
			10	GND	

ST60 Raymarine			Conector P5 (Shield Sail Interfaces)		
Color	Código	N	Código	Detalles	
	Vin	1	VAA	Tensión de Alimentación	
	GND	2	GND	Masa	
	Seno	3	CH0	Entrada Analógica Seno	
	Coseno	4	CH1	Entrada Analógica Coseno	
		5	CH2		
		6	CH3		
	Pulse	7	CH1_Pulse	Entrada de frecuencias	
		8	GND		
		9	CH2_Pulse		
		10	GND		

Cable Signet 515			Conector P6 (Shield Sail Interfaces)		
Color	Código	N	Código	Detalles JP1 cerrado	
	Frequency (+)	1	In +	Entrada positiva del comparador	
	Frequency (-)	2	In -	Entrada negativa del comparador	
	ShieldGround	4	GND	Masa	

Cable B&G 202-00-129			Conector P5 (Shield Sail Interfaces)		
Color	Código	N	Código	Detalles JP1 abierto	
	Powersupply	1	VAA	Tensión de Alimentación	
		2	GND		
		3	CH0		
		4	CH1		
		5	CH2		
		6	CH3		
		7	CH1_Pulse		
		8	GND		
	Frequency	9	CH2_Pulse	Entrada de frecuencias	
	ShieldGround	10	GND	Masa	

Cable DT800 Airmar 44-076-1-01			Conector P6 (Shield Sail Interfaces)		
Color	Código	N	Código	Detalles	
	+12-24V	1	I2 V	Tensión de alimentación	
	NMEA+	2	A	Terminal + RS422	
	NMEA-	3	B	Terminal - RS422	
	GND &Shield	4	GND	Masa	

Cable B&G 202-00-129			Conector P5 (Shield Sail Interfaces)		
Color	Código	N	Código	Detalles JP1 abierto	
	Powersupply	1	VAA	Tensión de Alimentación	
		2	GND		
		3	CH0		
		4	CH1		
		5	CH2		
		6	CH3	Entrada analógica.	
		7	CH1_Pulse		
		8	GND		
		9	CH2_Pulse		
	ShieldGround	10	GND	Masa	

10.2. Esquema shieldSailSys.

