

# SISTEMA DE ORIENTACIÓN BASADO EN BRÚJULA ELECTRÓNICA PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS

J. M. HINOJO, D. GUTIÉRREZ, E. MARSAL, M. SOTO, F. CORTÉS, F. BARRERO, S. TORAL  
*Departamento de Ingeniería Electrónica. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.*

*España*

*jhinojo@us.es, dgutierrezreina@us.es, estebanmarsal@us.es, msoto@us.es, fcortes1@us.es,  
fbarrero@esi.us.es, toral@esi.us.es*

*En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema electrónico de orientación, basado en diferentes brújulas electrónicas comerciales, para la enseñanza práctica en un Laboratorio de Instrumentación Electrónica. Se han analizado diferentes tipos de brújulas electrónicas de dos y tres ejes para determinar la precisión obtenida con vistas a ser usadas como sistemas de orientación electrónica. El sistema desarrollado forma parte de un plan de renovación docente llevado a cabo en la asignatura, adscrita a la titulación de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Sevilla, con vistas a aumentar la motivación de los alumnos en clase.*

## 1. Introducción

En la actualidad, los terminales móviles, tales como teléfonos móviles, PDAs o Pocket PCs, se han convertido en dispositivos multimedia que son capaces de ofrecer una gran cantidad de servicios y funciones muy diferentes de la principal. Este hecho se debe sobre todo al bajo coste que supone fabricar los sensores necesarios para poder dotar a dichos dispositivos de esas funcionalidades añadidas. La extraordinaria difusión en dispositivos comerciales de elementos tales como acelerómetros o brújulas electrónicas motivan a los usuarios de estos, entre los que se encuentran especialmente los alumnos de Ingeniería. Este interés hacia dispositivos habitualmente asociados a consolas para juegos y terminales móviles de última generación, pretende ser aprovechado para incrementar la atención y la motivación de los alumnos adscritos a la titulación de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Sevilla. Se ha desarrollado un sencillo sistema digital de orientación, basado en una brújula electrónica y conectado a un microprocesador empleando un puerto I2C. El objetivo perseguido es disponer de un dispositivo versátil que pueda ser empleado en las prácticas de la asignatura para que el alumno adquiera conocimientos prácticos sobre el diseño de circuitos de adaptación de señales, manejo e interpretación de instrumentación electrónica como analizadores lógicos, programación de microprocesadores y gestión de periféricos de comunicaciones como el I2C o el SPI, y desarrollo de aplicaciones relacionadas con la gestión del sistema de orientación como la realización de algoritmos que permitan optimizar el proceso de orientación haciendo uso del sensor magnético.

## 2. Descripción del sistema

El sistema desarrollado se corresponde con un equipo prototipo destinado a la orientación electrónica basado en una brújula digital, que es la encargada de realizar las mediciones del campo magnético terrestre y determinar la desviación del sistema frente al norte magnético. Para desarrollarlo, se analizaron diferentes sensores que actúan como brújulas electrónicas (Tabla 1).

Los criterios de selección del sensor empleado son la precisión del sensor, su precio, las características eléctricas del sensor y la forma de acceder al dispositivo. Los componentes analizados pueden ser clasificados en dos grandes grupos: brújulas electrónicas de dos ejes y de tres ejes. La principal diferencia entre ellas es la obtención de la medida del campo magnético terrestre en el plano XY, o en un sistema de tres coordenadas. Puesto que el objetivo es poder realizar una orientación fiable, el hecho de obtener el vector del campo magnético terrestre en una base tridimensional permite tener caracterizado a dicho vector completamente, por lo que el resultado obtenido podrá ser más

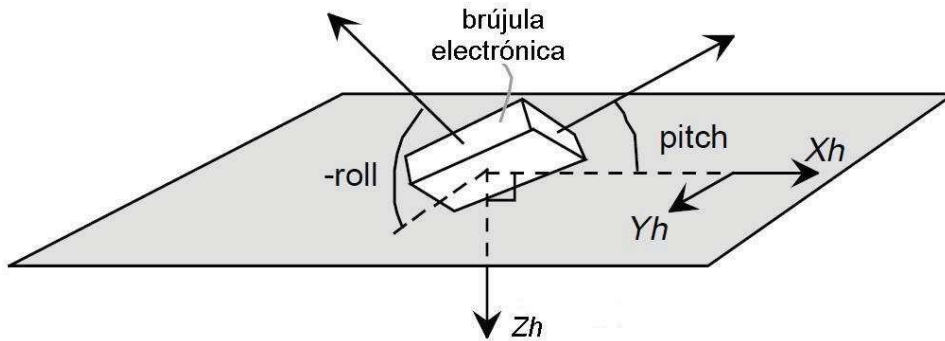
preciso sin encarecer sobremanera el dispositivo final.

Modelo	Hitachi HM55B	HMC 6352	V2Xe	HMC 5843	1490
Alimentación [V]	2,7 – 3,3	2,7 – 5,2	3	1,8 – 3,3	5
Sensibilidad [uT]	1 – 1.6	10 – 75	1100	-	-
Consumo activo [mA]	9 - 13	1	2	-	25
Consumo pasivo [uA]	1 - 5	1	0,2	-	-
Ejes	2	2	2	3	-
Resolución	3°	0,5 °	0,01°	1°	45°
Precisión	-	2,5 °	2°	-	-
Interfaz	SSI	I2C	SPI	I2C	-
Tiempo de medida [s]	0.040	-	-	0,02-2	2,5
Dimensiones [mmxmm]	0,762 x 0,762	6,6 x 6,5 x 1x5	2,54 x 2,54 x 1,2	0,4 x 0,4 x 0,13	-
Encapsulado	6 pin DIP	24 pin LCC	-	25 pin LCC	-
Precio [€]	14	26	50	19	15

**Tabla 1.** Sensores magnéticos analizados tras el proceso de búsqueda.

Por otro lado, una vez se seleccione la brújula es necesario considerar la problemática de su sistema de referencia al adquirir las medidas[8,9]. Este efecto puede observarse en la figura 1. Cuando la brújula digital inicia el muestreo de los valores del campo magnético, éste los expresa con respecto a su base, determinada por la posición en la que se haya el integrado con respecto al suelo. Por tanto, necesitamos aplicar una transformación a los valores medidos para poder obtener las proyecciones de los mismos en una base que pueda servir de referencia para operar de forma independiente de la orientación del dispositivo. En concreto, si tomamos el PCB del hardware desarrollado como el plano XY del sistema de referencia de la brújula, el eje Z será el eje perpendicular a este plano. Si a continuación, tomamos la superficie de la Tierra (las distancias manejadas en la aplicación permiten aproximar la Tierra como una superficie plana) como el sistema de referencia en el que operar (Fig. 1), la brújula tendrá una cierta orientación definida unívocamente mediante dos ángulos:

- Roll o ángulo formado entre el eje Y de la brújula y el eje Yh del sistema de referencia ubicado en la Tierra.
- Pitch, que se corresponde con el ángulo formado por el eje X del sistema de referencia de la brújula con el eje Xh de la Tierra.



**Figura 1.** Disposición de los ejes de la brújula y de la Tierra.

La orientación del PCB y, por extensión, de la brújula no tiene por qué coincidir con el sistema de referencia tomado. Por tanto, las medidas que dé el sensor deberán ser corregidas en la medida de lo posible. Para ello, se pueden usar distintas técnicas para resolver el problema:

1. Usar un inclinómetro. Esta solución contemplaría añadir un sensor más al sistema para conocer en todo momento la inclinación de la brújula. De esta forma, los ángulos de roll y pitch se podrían determinar de una manera muy sencilla puesto que tan sólo sería necesario efectuar una lectura de los valores y sustituir en las fórmulas de corrección que se adjuntan, para obtener los valores del campo proyectados en el sistema de referencia ubicado en la Tierra. Así, sólo restaría realizar el arcotangente del cociente entre  $Y_h$  y  $X_h$  para obtener el ángulo de desviación con respecto al norte magnético (Ec. 1)[1].

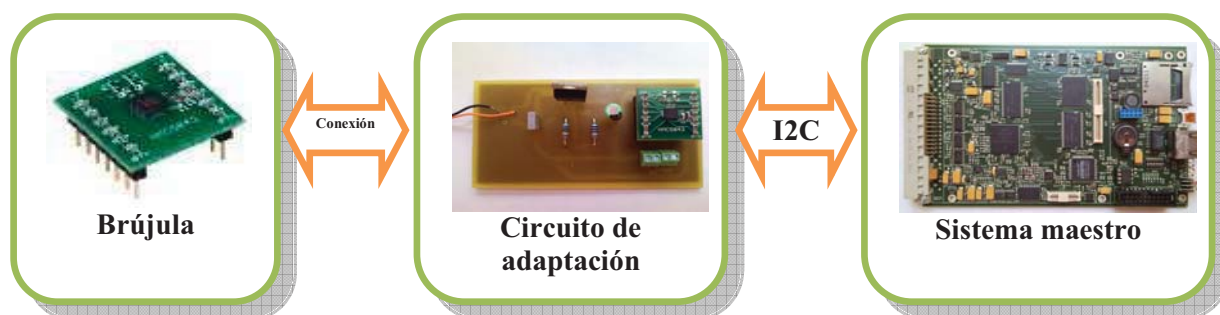
$$\begin{aligned}
 X_h &= X \cdot \cos(\varphi) + Y \cdot \sin(\theta) \sin(\varphi) - Z \cdot \sin(\varphi) \\
 Y_h &= Y \cdot \cos(\theta) + Z \cdot \sin(\theta) \\
 \theta &= \text{roll} \\
 \varphi &= \text{pitch}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

2. Usar un acelerómetro. Esta segunda solución permitiría detectar los cambios de aceleración que sufriese el dispositivo de forma que, analizando los signos del módulo de la aceleración, se podría sacar la posición del PCB, es decir, los ángulos de roll y pitch. Nuevamente, deberíamos aplicar las correcciones anteriores para poder obtener la proyección del campo magnético terrestre en un sistema de ejes estático como resulta ser el ubicado en la superficie de la Tierra.
3. Aplicar aproximaciones y cálculos matemáticos. Esta tercera opción es especialmente interesante si se utiliza una brújula de tres ejes, y permite, a partir de las medidas obtenidas por el sensor, realizar transformaciones para rotar la base de la brújula al sistema de referencia ubicado en la Tierra. Para ello, es necesario conocer los ángulos de roll y pitch del PCB respecto de la base terrestre. No obstante, si se presupone que el usuario dispone del PCB en posición horizontal (cosa habitual al realizar el alumno la práctica), se puede asumir que el ángulo roll puede ser pequeño, inferior a  $20^\circ$ . En este supuesto, se pueden aproximar las funciones trigonométricas por sus series de Taylor truncadas hasta el primer orden. Por tanto, el coseno se aproximaría como la unidad y el seno se podría aproximar por su argumento. Con dicha aproximación, se elimina una de las incógnitas y bastaría conocer el ángulo de pitch para poder obtener una medida fiable del campo magnético terrestre.

Como se puede observar, las alternativas propuestas para resolver el problema de conocer la orientación del dispositivo se han clasificado según la facilidad de la solución. La primera solución resulta eficaz, rápida y sencilla. Sin embargo, el introducir un sensor más implicaría complicar el hardware excesivamente. La segunda solución, basada en acelerómetro, permite obtener medidas del

ángulo de desviación de manera precisa a base de complicar más el software y el hardware; necesitaríamos un algoritmo para determinar el ángulo del receptor respecto del eje X e Y según las aceleraciones registradas. Además, se debería incluir un segundo sensor, aumentando nuevamente la complejidad del PCB. La ventaja de esta solución frente a la primera es que aunque acelerómetro complica el software, ofrece mayor versatilidad al sistema desarrollado, pudiéndose emplear en un mayor número de aplicaciones. Finalmente, la tercera solución es la menos precisa de todas, puesto que se basa en aproximaciones. No obstante, es la solución más simple de las tres, dado que sólo requeriría una brújula electrónica de tres ejes para llevar a cabo la determinación del ángulo de desviación con respecto al norte magnético.

Tras el análisis de la problemática asociada a la medida, se opta por emplear una brújula de 3 ejes por lo que de las brújulas analizadas (Tabla 1), la única que se adapta es el modelo HMC5843 del fabricante Honeywell. El resto de brújulas sólo disponen de las medidas del campo magnético en 2 ejes, cometiendo un error de precisión elevado (alcanzando hasta 20° de error como en el caso de la brújula HM55B). La conexión al microprocesador del sistema es simple al tratarse de una comunicación I2C que tan sólo utiliza dos líneas: I2C\_DATA e I2C\_CLOCK (Fig. 2)[2].



**Figura 2.** Esquema de conexionado de la brújula.

Finalmente, el último componente está constituido por un sistema empujado gobernado por un procesador con arquitectura ARM desarrollado por la compañía Freescale. En concreto, el núcleo del mismo corresponde con una arquitectura ARM926J-S cuya velocidad de funcionamiento es de 266 MHz. Por tanto, se corresponde con un dispositivo que posee un gran potencial tanto en aplicaciones de cómputo como en aquellas situaciones donde se requiera una gran conectividad. Se caracteriza por presentar un puerto I2C, al cual conectaremos nuestro sistema de orientación, cuatro UART, tres puertos CSPI, dos SSI y un puerto destinado a aplicaciones de audio. Además, presenta tres temporizadores para poder realizar mediciones de tiempo, un módulo PWM, líneas de entrada/salida de propósito general y diversos periféricos más (Fig. 3)[5].

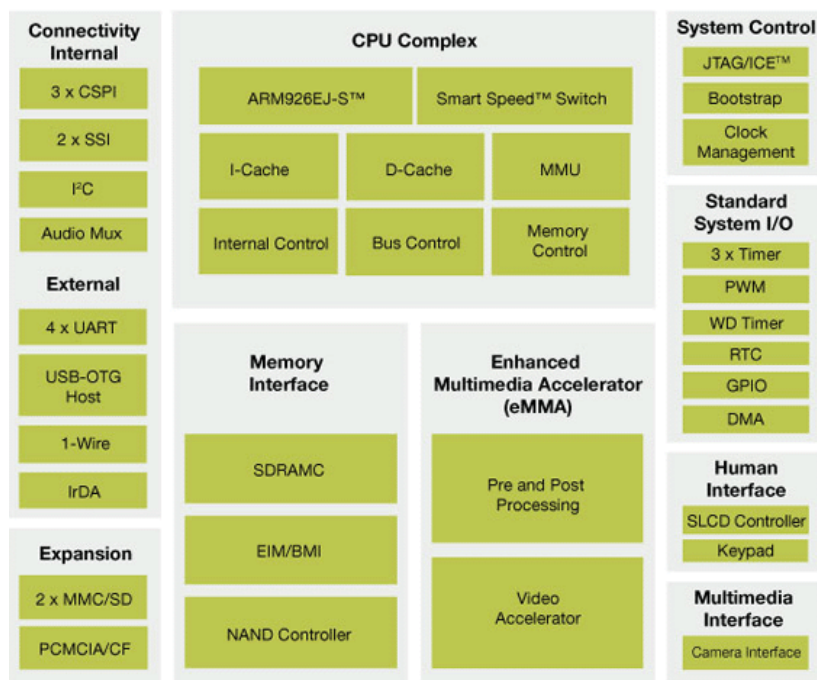


Figura 3. Diagrama de bloques del procesador ARM utilizado.

### 3. Aplicación del sistema

El sistema presentado anteriormente se ha desarrollado para usarse en la asignatura denominada “Complementos de Sistemas Electrónicos Digitales”, perteneciente al 3<sup>er</sup> curso de la titulación de Ingeniero de Telecomunicación. La idea es emplearlo como sistema de adquisición de datos y periférico externo a un sistema empujado basado en una CPU con arquitectura ARM9. El microprocesador seleccionado dispone de una distribución de Linux completamente funcional en su interior, lo que permitirá al alumno familiarizarse con las técnicas de programación de periféricos en sistemas empujados a alto nivel (sobre GNU/ Linux).

El dispositivo desarrollado posee una doble finalidad. Por un lado, se pretende que el alumno potencie sus habilidades como diseñador de circuitos electrónicos interconectando el sistema electrónico de orientación (periférico externo)[7] al sistema empujado mediante el bus I2C. Para ello deberá hacer un esfuerzo por entender los manuales de instrucciones de ambos dispositivos y profundizar en el conocimiento del bus I2C. Por otro lado, el alumno deberá desarrollar aplicaciones sobre sistemas operativos GNU/Linux, mediante el uso de APIs.

En consecuencia, se consigue ofrecer un entorno de desarrollo similar a otros comerciales y usados en la industria electrónica. Además de esta labor, se tendrá que enfrentar también a la tarea de interpretar los datos obtenidos del sensor y diseñar un algoritmo que pueda ser implementable en el sistema empujado. El objetivo final es que, en grupos de trabajo, se desarrolle un sistema de orientación electrónico que pueda ser usado en aplicaciones de campo. Para ello, el estudiante desarrollará una aplicación software que: permita fijar el norte geográfico mediante un proceso de calibración, lea y procese los valores del campo magnético terrestre obtenidos de la brújula electrónica y genere una salida con la desviación que el dispositivo presente con respecto al norte geográfico (Fig. 4).

```

# ./test
Directorio actual: /root
IR A:0x48      IR B:0x34      IR C:0x33
Brújula encontrada
Registro A: 0x10
Registro B: 0x20
Registro Mode: 0x0
La brújula ha sido configurada correctamente
Registro de estado: 0x1
Valor Ready: 0x1
Valor Lock: 0x0
Valor Ren: 0x0
X: -49 Y: -207 Z: -122
Declinacion=256.682366

```

**Figura 4.** Captura de la comunicación entre la brújula electrónica y el sistema empotrado.

#### 4. Conclusión

En este artículo se ha presentado una nueva implementación electrónica a emplear en las prácticas de la asignatura denominada “Complementos de Sistemas Electrónicos Digitales”, de 3<sup>er</sup> curso de la titulación de Ingeniero de Telecomunicación de la Universidad de Sevilla. Se ha desarrollado un sistema de orientación electrónico que conecta dos dispositivos independientes mediante un bus I2C: una brújula electrónica y un DSP con núcleo ARM. El objetivo perseguido es el aprendizaje de conceptos básicos de diseño digital y análisis de sistemas electrónicos digitales, así como de desarrollo de aplicaciones software para dispositivos empotrados. La implementación presentada constituirá una herramienta docente útil en asignaturas de introducción a los sistemas basados en microprocesadores, donde el alumno podrá comprobar de forma práctica y con aplicaciones conceptualmente sencillas, el interés de este tipo de dispositivos en la tecnología electrónica actual, así como sus posibilidades. Además, permitirá instruir al alumno en una metodología de diseño y programación cercana a la realidad, permitiéndole poner en práctica conceptos teóricos estudiados en otras asignaturas.

#### Referencias

- [1] Michael J. Caruso. *Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems*. Honeywell, SSEC.
- [2] Dominique Paret. *El Bus I2C: de la teoría a la práctica*. Paraninfo (1995).
- [3] Francisco Rogelio Palomo Pinto, Alfredo Pérez Vega-Leal, Eduardo Galván. *Problemas resueltos de instrumentación electrónica*. Universidad de Sevilla (2006).
- [4] Miguel A. Pérez García. *Instrumentación electrónica*. Thomson-Paraninfo (2008).
- [5] Karim Yaghmour. *Building Embedded Linux Systems*. O'Reilly Media (2003).
- [6] Gert van der Horn, Johan L. Huijsing. *Integrated smart sensors: design and calibration*. Kluwer Academic Publishers (1998).
- [7] F. Cortés, S. Gallardo, F. Barrero, S. Toral. *Plataforma para el desarrollo de sensores inteligentes y sistemas microprocesados*. 7<sup>o</sup> Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica (TAEE2006). Madrid (2006).
- [8] Hua Sun, Peike Yang. *Design and Research on Errors Compensation of Digital Compass*. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. pp. 4742-4747.
- [9] Zhi Li, Xiang Li, Youngjun Wang. *A Calibration Method for Magnetic Sensors and Accelerometer in Tilt-compensated Digital Compass*. The Ninth International Conference on Electronic Measurement and Instruments. pp. 868-871, vol. 2, (2009).
- [10] Hong-Shik Kim, Jong-Suk Choi. *Advanced indoor localization using ultrasonic sensor and digital compass*. International Conference on Control, Automation and Systems. pp. 223-226. (2008)