



# Desarrollo de un sistema embebido para proyectos mecatrónicos basados en motores brushless

Hernández Barrón Lorena Anaid<sup>1</sup>, Vargas Soto José Emilio, Ramos Arreguín Juan Manuel, Pedraza Ortega Jesús Carlos.

Universidad Autónoma de Querétaro  
loana.heba@hotmail.com<sup>1</sup>

## Resumen

*El interés por la implementación de sistemas que ayuden a la realización de tareas complejas, repetitivas o peligrosas ha desembocado en grandes avances tecnológicos a lo largo de la historia, que van desde compuertas mecánicas a cámaras secretas en antiguas pirámides, hasta los sistemas de guía en las naves de misiones espaciales. Estos tienen un principio de funcionamiento en común: un conjunto de elementos y características que les permiten una operación local o embebida. En la actualidad la tecnología se enfoca en el desarrollo de hardware y software que en conjunto puedan desempeñar tareas de control en tiempo real. En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema embebido pequeño y de bajo consumo, para proyectos mecatrónicos, orientado al monitoreo y control remoto de motores tipo brushless mediante el uso de una plataforma Intel® y tecnología Open Hardware.*

**Palabras clave:** Brushless, Intel®, Open Hardware, Sistema Embebido.

## 1. Introducción

El desarrollo de elementos y componentes utilizados para realizar acciones locales de control ha sido un tema de estudio desde tiempos remotos. Por ejemplo, En la antigua Etiopía, 1500 a. C., Amenhotep, desarrolló una estatua del rey de Etiopía llamado: Memon, dicha estatua mediante sistemas mecánicos podía controlar la emisión de sonidos cuando era iluminada por los rayos del sol al amanecer [1]. Durante el transcurso de la historia han acontecido hechos y situaciones que han favorecido el desarrollo de las tecnologías actuales que requieren una determinada acción local.

En este sentido, las tecnologías actuales se orientan en desarrollar sistemas embebidos capaces de realizar operaciones de control en tiempo real. En este trabajo se concibe un sistema embebido como la unión de software y hardware especializado capaz de procesar información proveniente de uno o más sensores con el propósito de realizar acciones correctivas de forma local.

Uno de los primeros sistemas embebidos fue el computador utilizado para el sistema de guía del Apolo, el cual fue desarrollado por el Laboratorio de Desarrollo del MIT a principios de los años 60s [2]. Desde entonces, diversas aplicaciones en la industria aeronáutica han contribuido en mejorar aspectos como eficiencia y seguridad, entre otros. A finales del siglo pasado se desarrolló un sistema embebido basado en microcontrolador 80C51, el cual permitía controlar las acciones de un radar [3].

Sin duda, investigaciones en nuevos materiales y las innovaciones en las tecnologías de los semiconductores seguirán contribuyendo de forma notable en el desarrollo de los sistemas embebidos, tal como ocurrió en el siglo pasado, cuando se lograron capacidades de memoria flash EEPROM con 32 bits y memoria no volátil [4], [5] y [6].

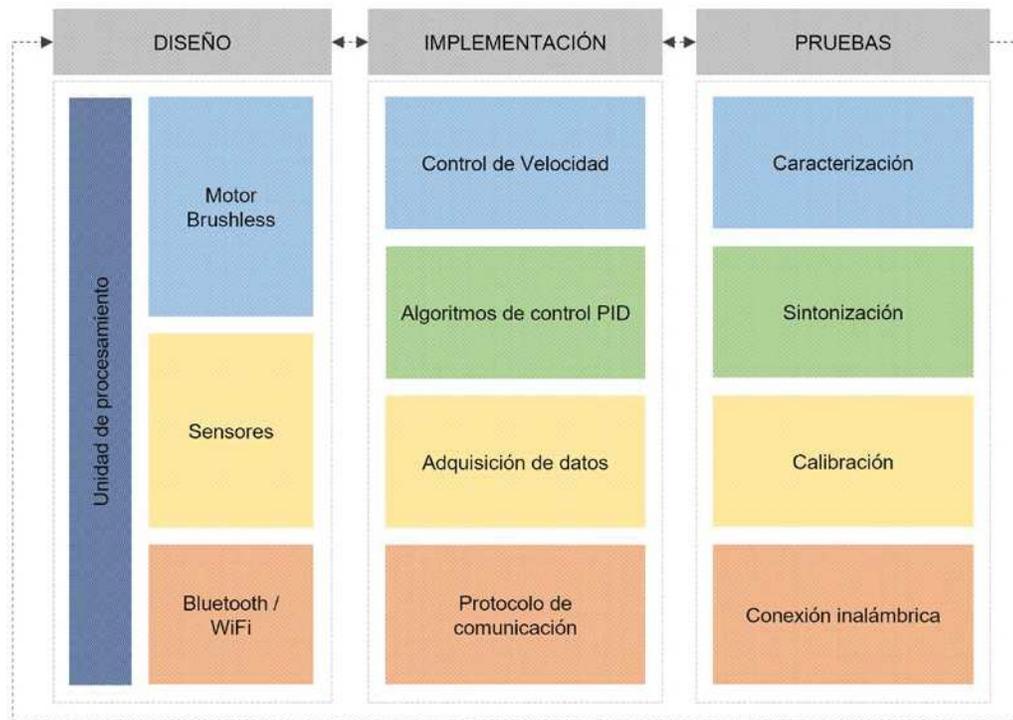


Dado el carácter específico de diseño que tienen los sistemas embebidos, existe una amplia gama de aplicaciones en prácticamente cualquier sector. Los podemos encontrar como elementos de control en instrumentos o aparatos médicos [7], [8], [9] y [10], en sistemas industriales que permiten gestionar mejor los recursos y generar ahorros [11], [12], [13] y [14]. Así como en sistemas inteligentes y de reconocimiento de huellas digitales [15] y [16], entre otros.

Diversas tarjetas y sistemas embebidos se han desarrollado para controlar motores eléctricos [17], [18] y [19]. En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema embebido orientado al control de un motor de tipo brushless.

## 2. Desarrollo del proyecto

El desarrollo del proyecto consistió en tres etapas principales: diseño, implementación y pruebas, respectivamente. Cada una de estas etapas está conformada por bloques elementales como se muestra en la Figura 56:



**Figura 56. Metodología utilizada para el desarrollo del proyecto**

La metodología propuesta describe la composición de un sistema embebido: una unidad de procesamiento, sensores y actuadores. Adicionalmente para este proyecto se incorpora una vía de comunicación inalámbrica. De manera sencilla la metodología ilustra interacción que existe entre las etapas de diseño, implementación y pruebas, así como la relación vertical entre los bloques que conforman cada etapa. A continuación, se describe la metodología utilizada.

### 2.1 Etapa de diseño

Consiste en la selección de componentes que integrarán el sistema. Ésta etapa está conformada por cuatro bloques elementales que se describen a continuación.



### 2.1.1 Unidad de Procesamiento

La unidad de procesamiento se encarga de coordinar y mantener comunicación con los demás bloques que conforman el sistema, estableciendo enlaces a través de los distintos protocolos o técnicas de con las cuales se enviarán las señales de potencia a los motores para las variaciones de velocidad a través los Controladores Electrónicos de Velocidad (o ESC, por sus siglas en inglés), se adquirirán los datos de las mediciones de los sensores y el establecimiento de una comunicación inalámbrica y el envío y recepción de datos desde o hacia un dispositivo externo al sistema.

Se seleccionó una plataforma computacional para proyectos embebidos que presenta características suficientes para el control e interconectividad de los dispositivos que conforman el sistema. Intel® Edison (Figura 57), es una plataforma de hardware pequeña, potente y adaptable basada en la arquitectura x86, cuyas características principales se resumen en la

Tabla 9.



Figura 57. Intel® Edison

Tabla 9 Características de la plataforma Intel® Edison

Característica	Descripción
Precio	\$49.95 USD
Flash	4GB, interface SDIO.
RAM	1GB
Procesador	Procesador Atom Dual-core. 100MHz Quark MCU
GPIO	70 pines
Wi-Fi	802.11 (a/b/g/n)
Bluetooth	Bluetooth 2.1/4.0
USB	1 USB-OTG
Otras interfaces	SPI, UART, I2C, PWM
Consumo	3.3V - 4.5V @ <1W
Dimensiones	60mm x 29mm x 8mm
Peso	23g
Programación	C, C++, Python, Node.js

Una ventaja que esta plataforma provee es la opción de incorporar placas de expansión para facilitar el diseño del proyecto total y aportar flexibilidad. Además, para



el desarrollo de aplicaciones, la plataforma puede programarse desde distintos entornos de desarrollo integrado (IDEs), como Arduino y Eclipse, entre otros [20].

### 2.1.2 Motor Brushless

Los motores BLDC (Brushless Direct Current) son ampliamente utilizados en aplicaciones en sector automotriz, aeroespacial, medico, de consumo e incluso en aplicaciones industriales y de instrumentación. Como su nombre lo indica, estos motores son eléctricamente conmutados por interruptores en lugar de las escobillas. Los motores sin escobillas son síncronos, lo que significa que el campo magnético generado por el estator y el campo magnético generado por el rotor, suceden a la misma frecuencia. Estos motores pueden encontrarse en diferentes configuraciones, para este proyecto se utilizó un motor trifásico AX-4008D que se muestra a continuación en la Figura 58.



Figura 58. Motor BLDC AX4008D 620KV

Para facilitar el control de estos motores y aminorar la carga de procesamiento de la unidad de control, se utilizó un controlador de velocidad, el cual se describe a continuación.

### 2.1.3 Control Electrónico de Velocidad (ESC)

Un ESC (Figura 4) es un dispositivo electrónico que sirve para controlar la velocidad de un motor brushless. Este dispositivo recibe una señal de control desde la unidad de procesamiento y dependiendo de ésta, el controlador entregará la corriente y el voltaje necesarios al motor para obtener la velocidad angular o la fuerza de empuje deseadas.

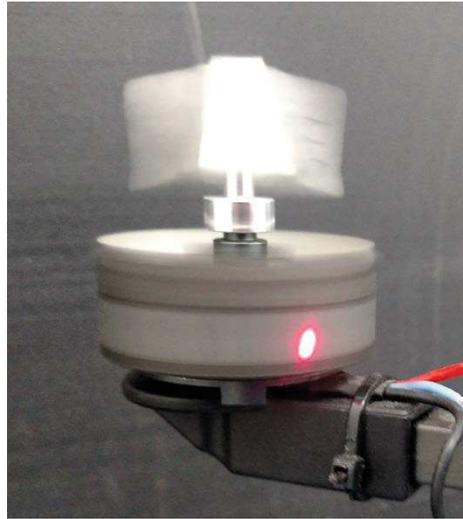


Figura 59. Control Electrónico de Velocidad Mystery de 30<sup>a</sup>

Con ayuda de un ESC, el control de un motor brushless desde la unidad de procesamiento se vuelve una tarea relativamente sencilla. Más adelante en la sección de resultados, en la Figura 66 se muestra la gráfica de comportamiento de las revoluciones por minuto o RPMs promedio alcanzadas por

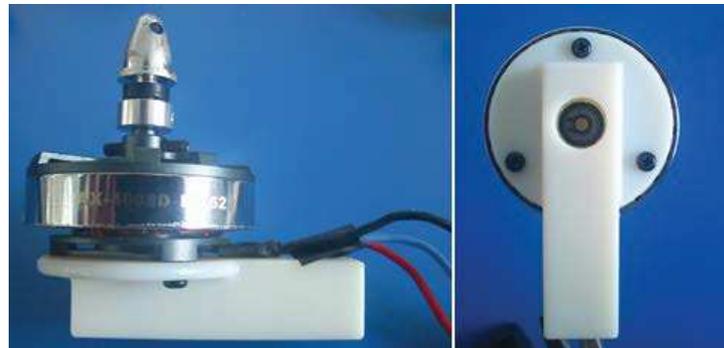


el modelo AX-4008D en función del porcentaje de ancho de pulso entregado al ESC desde la unidad de procesamiento.



**Figura 60. Medición de la velocidad angular de un motor AX-4008D con un tacómetro digital.**

Para un mejor desempeño, se maquilaron montajes de sujeción especialmente diseñados para el modelo AX-4008D que, a diferencia de otros modelos de motores, estos cuentan con tres puntos de apoyo en su base, que permitieran un ensamble adecuado del motor previniendo la generación de vibraciones y ruido en las mediciones. Estos montajes se maquilaron con ayuda de una impresora 3D y software CAD (Computer Asisted Design), el resultado final se muestra a continuación en la Figura 61.



**Figura 61. Montajes para motor brushless AX-4008D maquilaros con ayuda de software CAD e Impresión 3D.**

A pesar de contar con montajes especialmente diseñados, el impacto de señales externas al sistema, también llamadas perturbaciones, pueden producir un comportamiento diferente al esperado, provocando una variación no deseada en la velocidad angular. Es por ello que se agregaron al sistema, un conjunto de sensores que además de monitorear el comportamiento de los motores, pudieran proveer a la unidad de procesamiento de información valiosa del entorno del sistema, si así es requerido.

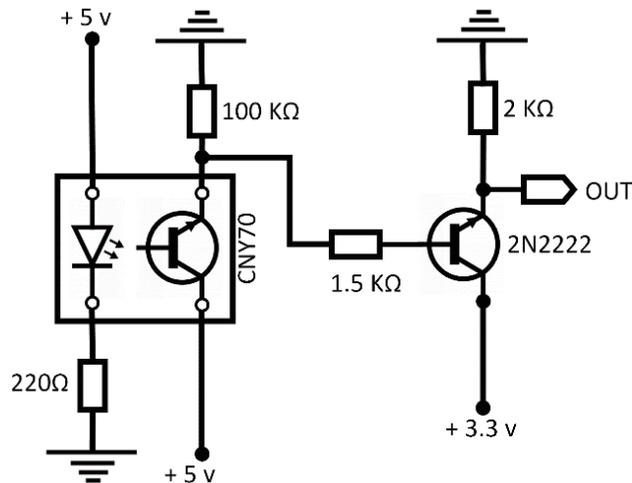
Existen varias técnicas para medir la velocidad angular de un motor acorde a las necesidades del proyecto, que van desde la medición de la Fuerza Contraelectromotriz (o Back EMF por sus siglas en inglés) hasta la implementación de encoders y sensores Hall [21]. En la siguiente sección se describen los sensores implementados en este trabajo.



### 2.1.4 Sensores

Una parte importante en un sistema embebido es la integración de dispositivos que provean información del comportamiento o estado actual del sistema. Para este proyecto se incorporan cuatro diferentes sensores que proveen de datos al sistema para ser procesados.

En primer lugar, se implementó un circuito sencillo que permite medir la velocidad angular del motor de manera similar a como lo hace un encoder, otorgando una retroalimentación al sistema embebido y así la posibilidad de controlar su comportamiento. El circuito implementado consta de un sensor CNY70 y un arreglo de resistencias para adecuar la sensibilidad del circuito, además de un transistor 2N2222 a modo de switch que responderá a la señal de salida del sensor, para ser leída en el pin seleccionado de la unidad de procesamiento que requiere del uso de un Pull Down, que se encargará de reestablecer la señal a un nivel bajo o apagado para que la unidad de procesamiento pueda procesarla en un contador de flancos para determinar la velocidad angular del motor monitoreado. El circuito completo se muestra a continuación:



**Figura 62. Circuito implementado para la medición de velocidad angular de un motor brushless.**

La implementación de este circuito requiere de la colocación de marcas binarias en el motor, las cuales son detectadas por el sensor para el conteo de flancos y la determinación de la velocidad angular con una resolución óptima experimental de seis flancos por revolución. Este proceso se muestra en la Figura 63, donde se puede apreciar el barrido que dejan las marcas binarias por efecto de la velocidad de giro del motor.

Este circuito permite tener una retroalimentación del comportamiento de los actuadores y la posibilidad de implementar una técnica de control para el sistema. Al contar con la información proporcionada por el circuito mostrado en la Figura 62, se recurrió a una estrategia de control de lazo cerrado.

Más de la mitad de los controladores industriales que se usan en la actualidad, se basan en el esquema de control Proporcional, Integral y Derivativo [22]. La función primordial de un controlador es ejecutar un algoritmo basado en los datos de entrada, el valor deseado y el valor real, con el objetivo de aproximar el valor sentido lo más posible al valor deseado [23], es decir, se reduzca el error entre el valor real y el *setpoint*, realizando las correcciones necesarias en futuras iteraciones.



**Figura 63. Medición de la velocidad angular del motor AX-4008D utilizando un sensor CNY70 y marcadores monocromáticos.**

Como su nombre lo sugiere, estos controladores constan de tres tipos: el proporcional (P), el integral (I) y el derivativo (D). Acorde a las necesidades de la implementación se pueden tener controles de tipo P, PI, PID. En este trabajo se implementó un controlador de tipo proporcional para disminuir el impacto de una posible perturbación en la velocidad angular deseada. La siguiente ecuación define el controlador implementado, que consiste en ajustar el valor de la salida en proporción al valor de entrada o velocidad deseada:

$$Y(t) = K_p * e(t) \quad (1)$$

Donde Y(t) es la salida o RPMs, Kp la ganancia del controlador y e(t) el error en función del tiempo.

Como se mencionó con anterioridad, una de las ventajas del sistema es la posibilidad de incorporación de placas o bloques de expansión. En este proyecto se acopló un módulo integrado por tres sensores: un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro de tres ejes cada uno. De los cuales se pueden adquirir y procesar los datos de velocidad angular, aceleración lineal y orientación magnética a través de una conexión mediante el protocolo I<sup>2</sup>C (Inter-Interconnected Circuit) con la unidad de procesamiento.

### **2.1.1 Comunicación Inalámbrica**

Aprovechando las características de la unidad de procesamiento, se utilizó la tecnología Bluetooth incorporada como medio de comunicación inalámbrico, que permite el intercambio de información entre el sistema y un dispositivo externo como un teléfono celular. A través de este medio, y desde una aplicación disponible en el Play Store de manera gratuita como lo es "*Bluetooth spp tools pro*", instalada en un dispositivo móvil, se puede realizar el envío de valores numéricos hacia el sistema que indican la velocidad a la cual debe girar el motor, así como recibir en el mismo los valores de los sensores incorporados.

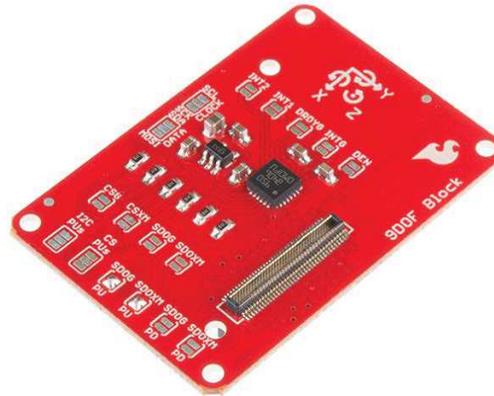


Figura 64 9DOF Block Sparkfun for Intel® Edison.

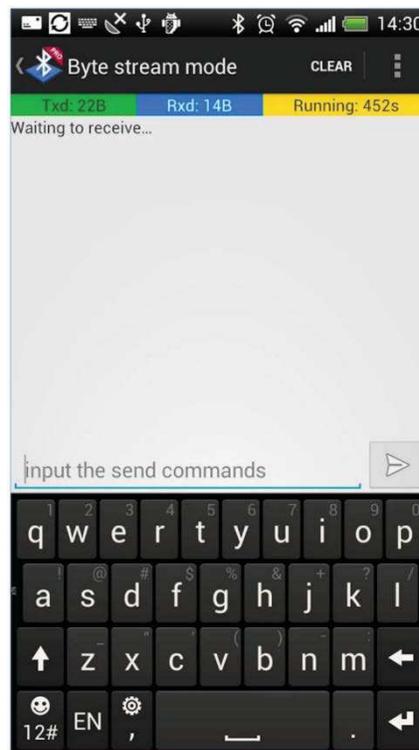


Figura 65 Bluetooth spp tools pro, disponible de manera gratuita en Play Store.

### 3. Resultados

Se construyó un sistema embebido pequeño y de bajo consumo, tipo torre, enfocado al control y monitoreo remoto de motores tipo brushless haciendo uso de tecnología Open Hardware en base a una plataforma Intel®. El sistema tiene la capacidad de controlar y monitorear de manera inalámbrica hasta cuatro motores tipo brushless a través de la conexión bluetooth con un dispositivo móvil, así como de adquirir y procesar los datos obtenidos de los sensores incorporados. El desarrollo incorpora la implementación de un controlador proporcional de lazo cerrado que disminuye el error en el valor real de la velocidad.



Derivado de la caracterización del modelo de motor utilizado para este proyecto, se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 66, que representa los datos obtenidos como resultado estadístico del total de 2400 mediciones realizadas a cuatro motores modelo AX-4008D. Cada punto de la gráfica representa el valor medio de 120 datos experimentales. Se aprecia un comportamiento no lineal que tiende a un valor asintótico de aproximadamente 7000 RPM. La gráfica muestra un cambio en la velocidad del motor a partir de un porcentaje de ancho de pulso mayor al 5%, esto debido a las características electromecánicas de este modelo. En la Figura 5 se muestra el experimento realizado en la medición de velocidad angular de cada motor, utilizando un tacómetro digital que emite un rayo láser apuntando a una estampilla reflectora colocada en el rotor. Como se aprecia en la Figura 66 la velocidad del motor varía en función del porcentaje del ancho de pulso entregado al controlador de velocidad.

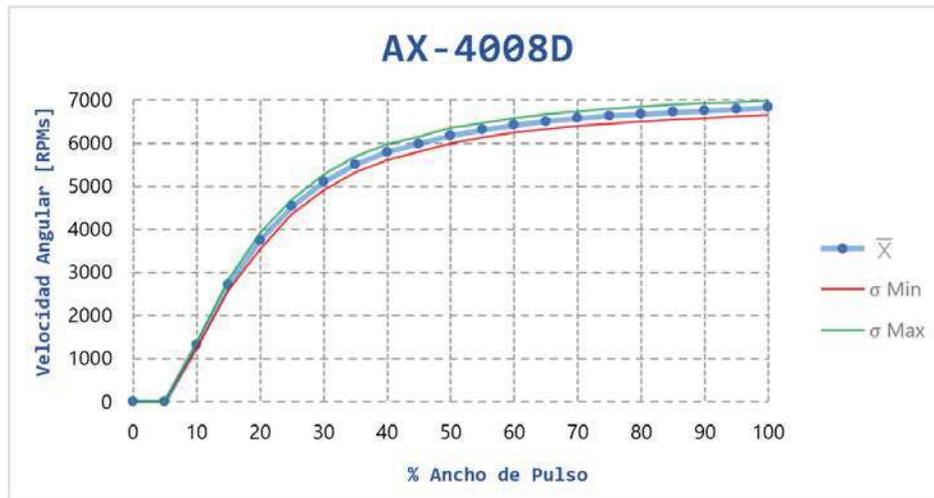


Figura 66 Gráfica de velocidad angular obtenida.

#### 4. Conclusiones

El desarrollo de sistema embebido desarrollado en el presente trabajo pretende ser un punto de partida para la fácil implementación de proyectos mecatrónicos que requieran la utilización de motores de alto rendimiento y poco mantenimiento así como monitoreo y acción local, que provean de un entorno fácilmente reprogramable, configurables y de bajo consumo en áreas como la domótica, aeronáutica, entre muchas otras.

#### Referencias

- [1] Dormido S. "Control Automático: Evolución Histórica". Curso de Verano de Control de Procesos: de la Teoría a la práctica. Departamento de Informática y Automática. UNED, Julio, 1995.
- [2] Labre S., Suárez C. E.J., "Control de motores sin escobillas (BLDC) y sin sensores usando el microcontrolador ARM Cortex3 con 32 bits de Lpcxpresso", Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería y Computación. Tesis, Ecuador 2012.
- [3] Binney R., Riblett L., "Using Embedded Microcontrollers in Radar Test Equipment" ARFTG Conference Digest-Spring, 35th, Dallas, TX, USA, 1990, pp. 37-46.
- [4] Kuo C., et al., "A 32 bit microcontroller with an embedded flash EEPROM" VLSI Technology, Systems, and Applications, 1991. Proceedings of Technical Papers, 1991 International Symposium on, Taipei, 1991, pp. 94-98.
- [5] Kuo C., et al., "A microcontroller with 100 K bytes embedded flash EEPROM" Solid-State and Integrated Circuit Technology, 1995 4th International Conference on, Beijing, 1995, pp. 138-140.
- [6] Fukushima T., et al., "A microcontroller embedded with 4 Kbit ferroelectric non-volatile memory" VLSI Circuits, 1996. Digest of Technical Papers. 1996 Symposium on, Honolulu, HI, USA, 1996, pp. 46-47.



- [7] Hitzelberger C., Manoli Y., Hakenes R., and Gross S., "A microcontroller embedded ASIC for an implantable electro-neural stimulator" Solid-State Circuits Conference, 2001. ESSCIRC 2001. Proceedings of the 27th European, Villach, Austria, 2001, pp. 413-416.
- [8] Jin-Seung K., Rahman M., Jang B., Kim K. and Kim B., "DSP embeded hardware for non-contact bio-radar heart and respiration rate monitoring system" 2009 International Conference on Future BioMedical Information Engineering (FBIE), Sanya, 2009, pp. 560-563.
- [9] Aishwarya V., Bai V., "Design and development of an embedded system for measuring hardness of foot in diabetic patients" Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT), 2010 IEEE Conference on, Petaling Jaya, 2010, pp. 81-85.
- [10] Sutar R., Kothari A., Keskar A., "Development of an embedded system for real time Heart Rate Variability analysis" Communications and Information Technologies (ISCIT), 2013 13th International Symposium on, Surat Thani, 2013, pp. 288-292.
- [11] De la Fuente M., Echanobe J., Campo I., Susperregui L., Mautua I., "Development of an embedded system for visual servoing in an industrial scenario" International Symposium on Industrial Embedded System (SIES), Trento, 2010, pp. 192-196.
- [12] Yan X., Zhou L., Qu W., Kang W., "The research and development of data acquisition card for on-line monitoring system of power quality based on Windows CE" 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, 2008, pp. 1986-1990.
- [13] Reddy A., Kanchi R., "Design and development of an embedded system for thermal conductivity measurement of polymer thin films" Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE), 2010 2nd International Conference on, Kyoto, 2010, pp. V1-454-V1-459.
- [14] Chayalakshmi C., Jangamshetti D., Sonoli S., "Design and development of an ARM platform based embedded system for measurement of boiler efficiency" Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2013 IEEE Symposium on, Kuching, 2013, pp. 39-43.
- [15] Herburger G., Fickenscher M., Leibl P., Sedlmeier P., "Development of a low-cost embedded system for an optical-forensic device" Multimedia & Expo Workshops (ICMEW), 2015 IEEE International Conference on, Turin, 2015, pp. 1-5.
- [16] Acevedo D., Duarte J, "Development of an embedded system for classification of EMG signals" Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), 2014 III International Congress of, Cartagena, 2014, pp. 1-5.
- [17] Sathyan A., Krishnamurthy M., Milivojevic N., Emadi A., "A low-cost digital control scheme for Brushless DC motor drives in domestic applications" Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International, Miami, Florida, USA. Page(s): 76 – 82, E-ISBN 978-1-4244-4252-2, Print ISBN: 978-1-4244-4251-5, DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075186
- [18] Kang Y., Lee S., and Yoo J., "A microcontroller embedded AD converter based low cost sensorless technique for brushless DC motor drives" Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005. 2005, pp. 2176-2181 Vol. 3.
- [19] O'Sullivan, D., Sorensen, J., & Murray, A. "Model-Based Design Streamlines Embedded Motor Control System Development", 2015 Analog Divices Inc., TA13139-0-4/15.
- [20] Intel® Edison. *Intel® Edison Development Platform*. Pag 1. Recuperado de [http://download.intel.com/support/edison/sb/edison\\_pb\\_331179002.pdf](http://download.intel.com/support/edison/sb/edison_pb_331179002.pdf)
- [21] Yedamale, P. (2003). *Brushless DC (BLDC) motor fundamentals*. Microchip Technology Inc, 20, 3-15.
- [22] Katsuhiko, O. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Minnesota, PEARSON EDUCACION, 5ta edición.
- [23] Willis M. (1999) *PID Control Theory Tutorial*. Dept. of Chemical and Process Engineering University of Newcastle.