

## Sistema de monitoreo de bajo costo para procesos mecánicos

Alberto Villalonga<sup>1</sup>, Ramón Quiza<sup>2</sup>, Gerardo Beruvides<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Estudio en Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas, Cuba, alberto.villalonga@umcc.cu, <sup>2</sup> Centro de Estudio en Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas, Cuba, ramon.quiza@umcc.cu, <sup>3</sup> GAMHE: Group of advanced Automation of Machines, Highly complex processes and Environments Centre for Automation and Robotics, Madrid, España gerardo.beruvides@car.upm-csic.es

### RESUMEN

El diseño e implementación de sistemas de monitoreo es de vital importancia para la economía puesto que los mismos posibilitan conocer las variables de los procesos en tiempo real y, por lo tanto, permiten explotar de una manera eficiente cualquier sistema productivo. A pesar de lo anterior, su aplicación se ve limitada seriamente por los altos precios que poseen los elementos necesarios para la implementación de dichos sistemas; a lo que hay que sumar que la mayoría de ellos son de importación. En este trabajo se brinda una alternativa a estos elevados precios, pues se presenta un sistema de monitoreo, específicamente para procesos mecánicos, de bajo costo, basado en un ordenador de placa reducida Raspberry Pi 2 modelo B, configurable, con comunicación Ethernet, que permite la conexión de sensores con los estándares del mercado y posee una aplicación (multiplataforma) para ordenador, desarrollada en Qt, que actúa como servidor y permite la monitorización del proceso, así como el almacenamiento de datos, para el posterior análisis de los mismos, así la modelación del proceso.

PALABRAS CLAVE: Sistemas de Monitoreo, Raspberry Pi.

## Low cost Monitoring System for Mechanical Process

### ABSTRACT

Designing and implementing monitoring systems are vital for the economy because they enable the knowing of process variables in real time and, therefore, allow efficiently exploit any production system. Despite this, its application is limited severely by the high prices that have the necessary elements for the implementation of such systems; to which must be added that most of them are imported. This paper presents, as an alternative to these high prices, a low cost monitoring system for mechanical processes, based on a single board computer Raspberry Pi 2 Model B, configurable with Ethernet communication, which allows connecting sensors with market standards and has a computer application (multiplatform), developed in Qt, which acts as a server and allows process monitoring and data storage for subsequent analysis, and process modeling.

KEY WORDS: Monitoring Systems, Raspberry Pi.

### 1. INTRODUCCIÓN

La realización un proceso industrial requiere no sólo administrar la mano de obra, la materia prima y la maquinaria de la planta, sino también disponer de la información necesaria para la toma de decisiones. Por eso es importante poseer una herramienta que permita visualizar, almacenar y manejar la información del proceso industrial en cuestión.

Los sistemas de monitoreo son de vital importancia para el funcionamiento de cualquier proceso productivo pues nos brinda la posibilidad de comprender de una manera detallada su dinámica de trabajo lo que

posibilita que se realice corrección sobre sus principales parámetros de ajuste con la meta de lograr un funcionamiento más óptimo y eficiente.

Las computadoras son herramientas capaces de almacenar, procesar y presentar información en forma atractiva y confiable, por lo que sea fomentado como tendencia en las industrias modernas el asociar sus procesos automatizados a programas que posean un ambiente en el cual el usuario pueda tener acceso para monitorear y modificar los distintos elementos que conforman su sistema de control.

En la actualidad el creciente desarrollo experimentado por las nuevas tecnologías en la informática y las telecomunicaciones, y las diferentes herramientas computacionales desarrolladas, así como el vertiginoso desarrollo de la electrónica brindan posibilidades más eficientes para la obtención, procesamiento y transporte de la información en todo tipo de entornos que requieran acceso a ésta de forma constante. En el ambiente industrial, el acceso a la información es indispensable para el monitoreo y control de los diferentes procesos y, por ende, para la optimización de los recursos, la calidad y la eficiencia.

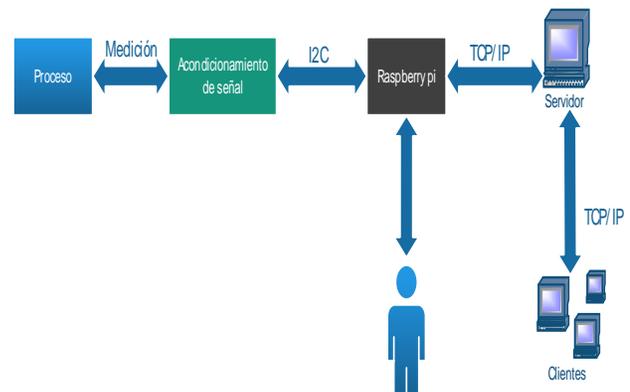
Este amplio desarrollo tecnológico ha posibilitado potenciar las capacidades de los sistemas embebidos y entre ellos particularmente, los FPGA (arreglo de compuertas programables, por sus siglas en ingles), los microcontroladores y los ordenadores de placas reducidas, incrementado así su uso en otras esferas y aplicaciones como el monitoreo y control de procesos industriales explotando sobre todas las bondades de conectividad que presentan permitiendo así la supervisión de sistemas a distancia tanto haciendo uso de redes inalámbricas (Priyanka & Mahesh, 2016) (Rawat, Kumar, & Jain, 2016; Singh, Lingaiah, & Satish, 2016) como alámbricas (Patel, Wadekar, Wabale, & Datkhore, 2015; Zhanitta & Sathya, 2015), también simplemente beneficiándose de su portabilidad y bajos costos (Rahim, Zainudin, Ismail, & Othman, 2014; Suresh, Balaji, Jeffry, & Jenith, 2014; Swaroop, Sheshank Reddy, Syed Saif, & Sasikala, 2015), para la medición de variables ambientales en lugares de difícil acceso (Darshini & Esakki, 2016; Ferdoush & Li, 2014) e incluso en zona de desastres para ayuda humanitaria (Schumann-Bölsche & Schön, 2015; Tomar & Bhatia, 2015).

En este trabajo, se presenta un sistema de monitoreo de bajo costo para procesos mecánicos el cual utiliza como base uno de los ordenadores de placa reducida más populares, Raspberry Pi para la recolección de datos, y una arquitectura cliente-servidor para la visualización del proceso.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Diseño conceptual

La arquitectura de hardware del sistema propuesto se muestra en la figura 1, está formada por tres elementos fundamentales un sistema de acondicionamiento de señal, un ordenador de placa reducida, y el servidor. El sistema de acondicionamiento de señales está compuesto por una etapa inicial que se encarga de transformar la señal entregada por los sensores conectados al sistema para su adecuación a los niveles de voltajes de trabajo de los conversores análogo-digitales (ADC) de la tarjeta de adquisición de datos que se encuentra conectada por el bus i2c a la Raspberry Pi, que es la encargada de la recolección de los datos para su envío a través de un interface ethernet que se encuentra conectada a un servidor en el cual una aplicación recibe los datos y brinda opciones de visualización de gráficos de históricos y tendencias, y permite además la configuración del hardware de manera remota, así como la obtención de modelos del proceso a través de la utilización de algoritmos de modelación basados en elementos de inteligencia artificial. Por cuestiones de seguridad esta aplicación requiere autenticación.



**Figura 1. Arquitectura de conexión del hardware**

### 2.2 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos está compuesto por dos etapas fundamentales, la primera etapa el acondicionamiento de señal y la segunda la convección de la señal analógica de entrada a digital. La primera etapa como indica su nombre es la encargada de modificar

la señal de entrada hasta llevarla al rango de valores que acepta el convertor analógico-digital (0...5)V, esta consta tres de versiones, una versión para la conexión de sensores con salidas digitales (sensores que conmutan su salida entre uno y cero donde los voltajes pueden variar hasta 24V máximo), otra para sensores con salidas analógicas de corriente ya sea 0...20mA o 4...20mA y una última para sensores con salidas de voltaje de 0...10V.

La segunda etapa del sistema de adquisición de datos se encarga de la convección de las señales analógicas a digitales, para lo que se utiliza un ADC-Pi Plus. El ADC-Pi Plus (mostrado en la figura 2) es un circuito integrado diseñado para trabajar en el rango de voltajes de 0 ... 5.06V y está compuesto por dos adc MCP3424 de Microchip configurados para trabajar de manera diferencial lo que brinda un total de ocho canales (cuatro canales diferenciales por cada uno), que se comunican a través del bus i2c, y un convertidor de nivel que permite la comunicación por i2c de componentes que funcionan a 5V sin dañar el bus i2c de la Raspberry Pi que trabaja a 3.3V. Además, posee la opción de programar la ganancia de la salida. Este se conecta a la Raspberry Pi a través del puerto GPIO (entradas salidas de propósito general, por sus siglas en ingles). Cada MCP3424 soporta ocho direcciones i2c y cada placa consta de dos por lo que permite como máximo la conexión de cuatro ADC-Pi Plus brindando un número máximo de 32 entradas.

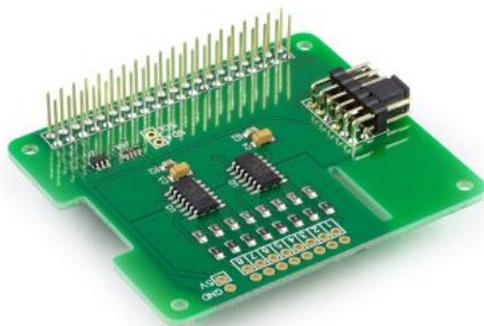


Figura 2. ADC-PI Plus

### 2.3 Raspberry-Pi

Raspberry Pi es un ordenador de placa reducida o SBC (single board computing) de

bajo coste, cuyo objetivo es el de estimular la enseñanza de las ciencias de la computación. La Raspberry Pi 2 modelo B (mostrada en la figura 3) está basada en el chip Broadcom BCM2836 que incluye un procesador central quadcore a 900MHz de 32-bit arquitectura ARM Cortex-A7 y 1GB de RAM por lo que es de 4 a 6 veces más potente que sus predecesores, además incluye también cuatro puertos USB 2.0 interfaces para conexión de displays y camera, salida de video HDMI y un puerto GPIO de 40 pines. Raspberry Pi usa mayoritariamente sistemas operativos basados en el núcleo Linux. Raspbian, una distribución derivada de Debian que está optimizada para el hardware de Raspberry Pi, es reconocida como la distribución oficial y es el sistema sobre el cual se realizó la programación de los módulos utilizados en este trabajo.



Figura 3. Raspberry-Pi

### 2.4 Servidor: conexión de red

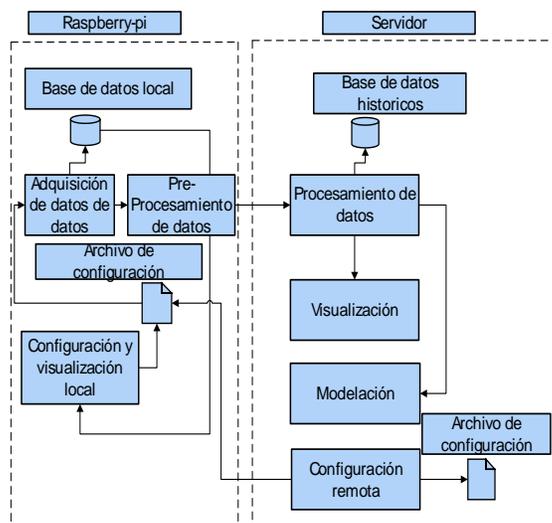
El servidor se encarga de la recepción de los datos y su almacenamiento para su posterior visualización y análisis. El objetivo de esta arquitectura es monitorear el proceso a distancia, lo cual se puede lograr a través de la conexión en red de todos los elementos, (Raspberry Pi, servidor y clientes) la cual se realiza a través del estándar Ethernet.

Ethernet es un estándar de redes de área local para computadores, con acceso al medio por detección de la onda portadora y con detección de colisiones (CSMA/CD)(Peterson & Davie, 2012). Se puede clasificar en Ethernet clásico o conmutado. La diferencia fundamental entre ambos es la velocidad de acceso al medio, el ethernet clásico permite velocidades hasta 10

Mbps mientras el conmutado hasta 10000 Mbps (Tanenbaum & Wetherall, 2011), la arquitectura propuesta trabaja a 100 Mbps por lo que se utiliza Ethernet conmutado.

### 2.5 Bases del software.

Para el correcto funcionamiento del sistema, los softwares que se diseñaron, sobre todo los que se ejecutan sobre la Raspberry Pi, se deben cumplir las ventanas de tiempo necesarias para que no ocurran pérdida de información del proceso, deben garantizar también una correcta y eficiente configuración de la red para evitar la pérdida de paquetes que se traducirían en demoras de tiempo. En la figura 4 se muestra la arquitectura general del software del sistema.



**Figura 4. Arquitectura general del software**

### 2.6 Software Raspberry-Pi.

Se diseñó una aplicación en consola en el entorno de desarrollo integrado (IDE) Qt, lenguaje de programación C++, sobre el sistema operativo Raspbian, la cual constaba de una interfaz para el control de la comunicación con el adc a través del puerto GPIO (utilizando los pines correspondientes al i2c), otra interfaz que permite la conexión y la comunicación con el servidor del sistema para el envío de los datos recolectados del campo y los posibles errores a través del adaptador ethernet de la placa. Además, brinda la opción de realizar el filtrado de las señales muestreadas y de almacenamiento de

información, utilizando como base de datos sqlite, de soporte en caso de la pérdida de comunicación con el servidor.

Se diseñó también una aplicación visual para realizar la configuración local del hardware (número de canales y ganancia a utilizar por cada conversor, tipo de variable a medir), la cual además permite la visualización de los parámetros más importantes del proceso.

### 2.7 Software Servidor.

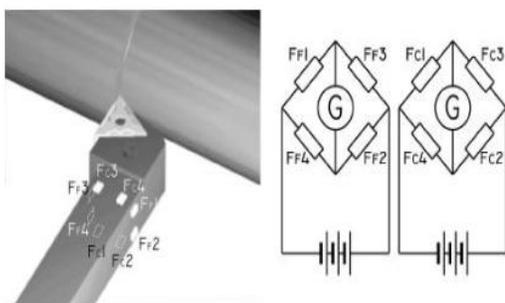
El servidor consta de una aplicación visual diseñada en Qt y un servidor web programado en php. La aplicación servidor es la encargada de la recepción de la información enviada por la Raspberry Pi, su almacenamiento, así como su procesamiento y presentación. Para ello consta de una interfaz de red, la cual utiliza el protocolo TCP/IP para garantizar el establecimiento de las conexiones y el intercambio confiable de datos. Sin embargo debido a que TCP/IP pertenece a las capas de transporte (TCP) y red (IP) del modelo OSI de la ISO (Fall & Stevens, 2012) y no es responsable de darle el formato deseado por una determinada aplicación a su campo de datos ni de la lógica en el intercambio de los mismos, para ello se hace necesario la creación de un protocolo sobre la capa de aplicación de dicho modelo que se adapte a las necesidades del sistema, por lo que se implementó una trama de datos personalizada, a la cual se le realiza el chequeo de errores a través de una comprobación de redundancia cíclica (CRC); debido también a que TCP/IP no posee seguridad intrínseca, se brinda la opción para entornos donde la seguridad informática es de vital importancia la transmisión de la información de manera encriptada, mediante el uso del Protocolo de Capa de Conexión Segura (SSL). Presenta también una interfaz visual para la presentación de los valores del proceso, lo que permite la toma de decisiones acerca del funcionamiento de los componentes del proceso, así como visualizar y exportar a tablas o gráficos de valores históricos del proceso contenidos en una base de datos históricos. Por cuestiones de seguridad la aplicación se encuentra protegida mediante el uso de usuario y contraseña. La modelación permite la obtención de modelos matemáticos que describan la dinámica del proceso monitoreado, esta se realiza fundamentalmente a través del

método de los mínimos cuadrados ordinarios, para la implementación de este método se hizo uso de la biblioteca gsl (GNU Scientific Library) 1.16 la cual es distribuida bajo la Licencia Pública General de GNU y para el procesamiento de datos se ofrecen una serie de filtros digitales, además se posibilita también la aplicación de transformadas como Fourier y wavelet y una serie de estadígrafos como kourtosis, rms (raíz cuadrática media por sus siglas en ingles), desviación estándar, pico máximo, entre otros

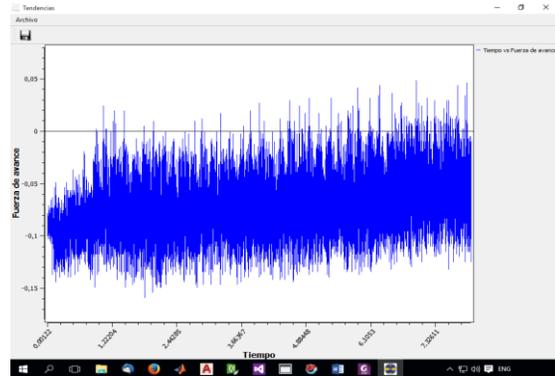
### 3. Análisis de Resultados

Para la prueba del sistema, el mismo se aplicó a un proceso de torneado de semiacabado, en el cual se midieron las componentes de la fuerza de corte axial y tangencial. Para ello, se conectaron dos puentes de Wheatstone formados por cuatro extensómetros como se muestra en la figura 5, y la salida de ambos puentes fueron conectados a los canales 1 y 2 del ADC-Pi Plus.

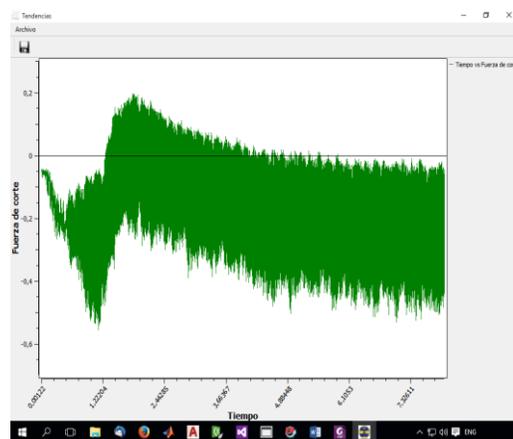
En las figuras 6 y 7 se muestran las capturas de las pantallas de los gráficos generados para la fuerza de corte axial y tangencial respectivamente. De manera general el sistema de monitoreo tuvo un comportamiento estable puesto que las mediciones y las gráficas se comportaron de acorde a los valores esperados.



**Figura 5. Esquema de los puentes de Wheatstone extensométricos para la medición de las componentes tangencial y axial de la fuerza de corte**



**Figura 6. Captura de pantalla gráfico fuerza de corte axial**



**Figura 7. Captura de pantalla gráfico fuerza de corte transversal.**

### 3.4 Conclusiones

La implementación de sistemas de monitoreo brinda grandes beneficios y efectos favorables sobre la calidad y la productividad del proceso pues permite realizar el control de los parámetros de los procesos productivos de manera que se logren mantener en el régimen óptimo de trabajo además de la realización de análisis a posterior como la detección de posibles fallas del algún componente del sistema permitiendo así reducir los tiempos de paradas por roturas y además que los mantenimientos sean más cortos y eficientes.

### RECONOCIMIENTOS

Es recomendable que los autores agradezcan a los que han permitido, ayudado y colaborado con la obtención de los resultados referidos en el artículo. En caso de que sea procedente

expresar agradecimientos, se sugiere utilizar un encabezamiento típico como: “Los autores desean agradecer...”

## REFERENCIAS

1. Darshini, B., & Esakki, E. (2016). Industrial Process Monitoring and Control using Raspberry Pi. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(2), 1384-1387.
2. Fall, K. R., & Stevens, W. R. (2012). *TCP/IP illustrated: Addison Weasly*.
3. Ferdoush, S., & Li, X. (2014). Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications. *Procedia Computer Science*, 34, 103-110. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.059>
4. Patel, T. K., Wadekar, U., Wabale, A., & Datkhore, S. (2015). Appliances Control Using Ethernet and Raspberry PI. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 5(3), 494-497.
5. Peterson, L., & Davie, B. (2012). *Computer networks: a systems approach: Elsevier*.
6. Priyanka, L., & Mahesh, K. (2016). A Raspberry Pi Based Global Industrial Process Monitoring through Wireless Communication. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(9), 468-471.
7. Rahim, R., Zainudin, M., Ismail, M., & Othman, M. (2014). Image-based Solar Tracker Using Raspberry Pi. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 1(5).
8. Rawat, S., Kumar, P., & Jain, G. (2016). Implementation of the Principle of Jamming for Hulk Gripper Remotely Controlled by Raspberry Pi. In M. Pant, K. Deep, J. C. Bansal, A. Nagar & K. N. Das (Eds.), *Proceedings of Fifth International Conference on Soft Computing for Problem Solving: SocProS 2015, Volume 1* (pp. 199-208). Singapore: Springer Singapore.
9. Schumann-Bölsche, D., & Schön, A.-M. (2015). A Raspberry in Sub-Saharan Africa? Chances and Challenges of Raspberry Pi and Sensor Networking in Humanitarian Logistics. *Procedia Engineering*, 107, 263-272. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.081>
10. Singh, K., Lingaiah, J., & Satish, B. P. (2016). Raspberry Pi Based Global Industrial Process Monitoring Through Wireless Communication. *International Journal of Innovative Technology*, 4(13), 2413-2422.
11. Suresh, N., Balaji, E., Jeffry, K., & Jenith, J. (2014). Raspberry Pi Based Liquid Flow Monitoring and Control. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(7), 122-125.
12. Swaroop, P., Sheshank Reddy, Y., Syed Saif, E., & Sasikala, S. (2015). The Real Time Temperature Sensing using Raspberry PI. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(12).
13. Tanenbaum, A., & Wetherall, D. (2011). *Computer Networks* (5th Ed.). USA: PRENTICE HALL.
14. Tomar, V. S., & Bhatia, V. (2015). Low Cost and Power Software Defined Radio Using Raspberry Pi for Disaster Affected Regions. *Procedia Computer Science*, 58, 401-407. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.047>
15. Zhanitta, J., & Sathya, B. (2015). Industrial Application Monitoring and Control using Raspberry pi and TCP/IP Protocol. *International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology*, 2(13), 110-115.

## SOBRE LOS AUTORES

Alberto Villalonga. Recibió el título de Ingeniero Automático (título de oro) en 2012 en la Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE). Recibe el título de Master en Ingeniería Asistida por Computadora en la Universidad de Matanzas en enero del año 2017. En la actualidad se desempeña como profesor asistente de la Universidad de Matanzas y pertenece al Centro de Estudio en Fabricación Avanzada y Sostenible. Principales

líneas de investigación: sistemas ciberfísicos, sistemas inteligentes y modelado y simulación.

Ramón Quiza. Recibió el título de Ingeniero Mecánico (título de oro) en 1999 y el título de doctorado en Ciencia Técnicas en el 2004 en la Universidad de Matanzas donde en la actualidad se desempeña como jefe del Grupo de Investigación en Fabricación Avanzada y Sostenible. Sus principales líneas de investigación son: modelación y optimización de procesos de maquinado y aplicaciones de inteligencia artificial.

Graduado de Ingeniería Mecánica (título de oro) en 2010 y de Master en Ingeniería Asistida por Computadora en 2012 ambos en la Universidad de Matanzas (Cuba). Posteriormente trabajó como profesor asistente en dicha universidad desde el 2010 hasta 2014. Actualmente, posee una beca completa de doctorado para Formación de Personal Investigador (FPI), concedida por el Ministerio de Economía y Competitividad de España. Desde el año 2014, forma parte del grupo GAMHE perteneciente al Centro de Automática y Robótica (CAR) de Madrid. Sus líneas de investigación se centran en el modelado y la optimización de los procesos de micro y macro-mecanizado basado en técnicas de inteligencia artificial. Ha publicado varios artículos sobre estos temas y es miembro de la junta revisora de algunas revistas internacionales