

## Arquitectura de monitoreo inteligente y de bajo costo para sistemas y procesos mecánicos

### Low-cost intelligent monitoring architecture for mechanical systems and processes

Ramón Quiza<sup>1</sup>, Luis Andrés Valido Fajardo<sup>2</sup>, Yarens Joaquín Cruz Hernández<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas, Cuba. Email: ramon.quiza@umcc.cu

<sup>2</sup> Dpto. de Tecnologías Educativas, Universidad de Matanzas, Cuba. Email: luis.valido@umcc.cu

<sup>3</sup> Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas, Cuba, Email: yarens.cruz@umcc.cu

#### RESUMEN

El monitoreo de los sistemas y procesos mecánicos es un componente importante de cualquier industria manufacturera moderna, ya que permite obtener información clave para tomar las acciones correctivas adecuadas. Sin embargo, los sistemas de monitoreo suelen ser muy costosos, lo que los hace prohibitivos para muchos talleres, especialmente en pequeñas y medianas empresas. Este trabajo propone una arquitectura para monitorear sistemas y procesos mecánicos, que se basa en componentes de bajo costo. El marco propuesto es descrito y formalizado, definiendo todos los componentes requeridos. Se describen los cuatro módulos principales. El primero es el módulo de captura de datos, que toma las señales de los sensores, las procesa y las envía al servidor. El módulo del servidor toma las señales preprocesadas de los módulos de captura de datos y las almacena en una base de datos. Además, envía los datos monitoreados a los módulos de visualización o, al interactuar con el módulo de modelado basado en inteligencia artificial, ajusta y utiliza los modelos adecuados para relacionar las diferentes variables. También se presentan varias aplicaciones futuras de la arquitectura propuesta para monitorear los procesos de fabricación.

Palabras clave: Monitoreo; Sistemas y procesos mecánicos; Inteligencia artificial.

#### ABSTRACT

Monitoring mechanical systems and processes is an important component of any modern manufacturing industry, as it allows to obtain key information for taking the proper corrective actions. However, monitoring systems use to be highly expensive, which makes them prohibitive for many workshops, especially in small- and medium-sized enterprises. This work proposes an architecture for monitoring mechanical systems and processes, which is based on low-cost components. The proposed framework is described and formalized, defining all the required components. The four main moduli are described. The first one is the data capture modulus, which takes the signals from the sensors, preprocesses it and send it to the server. The server modulus takes the preprocessed signals from the data capture moduli and storages them in a database. Also, it sends the monitored data to the visualization moduli or, by interacting with the artificial intelligence-based modelling modulus, fits and uses the proper models relating the different variables. Several future applications of the proposed architecture for monitoring manufacturing processes, are also presented.

Keywords: Monitoring; Mechanical systems and processes; Artificial intelligence.

## 1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo juega un papel clave en la industria manufacturera moderna, al permitir disponer, en tiempo real, de la información necesaria para la toma de decisiones. Los sistemas de monitoreo son aquellos que permiten la vigilancia del proceso, dotando al operario de los mecanismos necesarios para su alerta, así como la interacción amigable con el proceso y el registro de su evolución (Villalonga 2017).

Hoy en día, existe una amplia variedad de sistemas de control supervisado y adquisición de datos (*supervisory control and data acquisition*, SCADA) que integran controladores de lógica programable (*programmable logic controllers*, PLC), interfaces hombre-máquina (*human machine interface*, HMI) y las redes de comunicación (McCrary 2013). No obstante, cuando los costos de los sistemas de fabricación, incluso, para tecnologías de punta, como la fabricación aditiva o la híbrida, están disminuyendo drásticamente, es importante contar con sistemas de monitoreo de bajo costo, que permitan su introducción en pequeñas y medianas empresas (Han *et al.* 2017).

Dichos sistemas de monitoreo y supervisión están cada vez más orientados a la Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT), mediante una interconexión, sobre la Red de Redes, de dispositivos y sistemas (Farhan y Kharel 2019). También se observa una marcada tendencia al uso de componentes de código abierto (*open source*) en los sistemas de monitoreo contemporáneos (Oberloier y Pearse 2018).

Adicionalmente, el uso de ordenadores de placa reducida, de bajo costo, como los Arduino o los Raspberry Pi 2, ha sido ampliamente reportado en la literatura científica como una solución para los sistemas de monitoreo (Di Gennaro *et al.* 2014). También, el uso de teléfonos inteligentes (smartphones) como soporte para las interfaces hombre-máquina es un tema recurrente en los últimos años (Lu *et al.* 2017; Mnati *et al.* 2017).

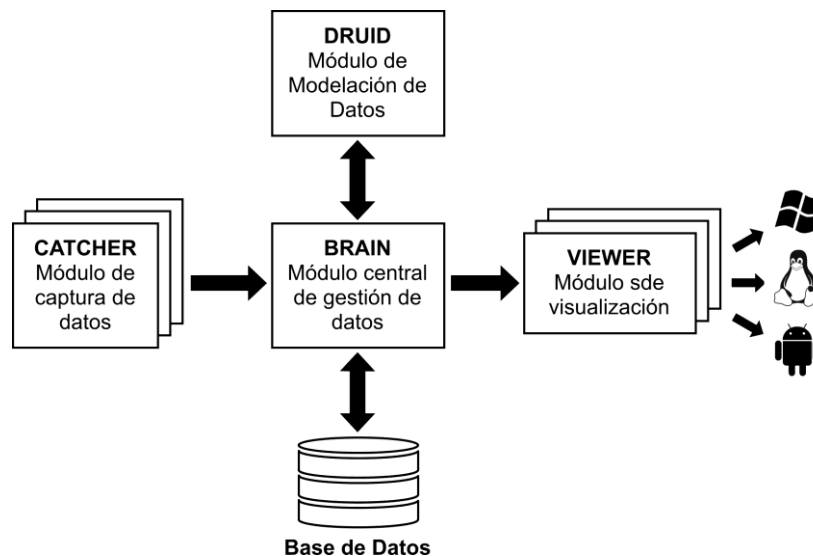
Finalmente, cabe señalar la importancia de los aspectos de seguridad, en el uso de sistemas de monitoreo, no sólo concernientes con la protección ante riesgos físicos y malos usos del sistema, sino que, cada vez, más, involucran la protección frente a los ciberataques de diversas fuentes (Radvanovsky y Brodsky 2013).

El presente trabajo se propone delinear el diseño de una arquitectura flexible, robusta, inteligente y de bajo costo, para el monitoreo de sistemas y procesos mecánicos. El mismo se divide en tres secciones. Luego de esta introducción, se presenta la descripción general de la arquitectura. La tercera sección describe cada uno de los componentes. Finalmente, la última sección presenta las conclusiones y futuras acciones de trabajo en la temática.

## 2. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA ARQUITECTURA

La arquitectura ROFLEXIN/LC (*RObust, FLEXible, INtelligent and Low-Cost*) se enfoca al monitoreo de sistemas y procesos mecánicos. Reúne cuatro características básicas:

- *Robusto*: Está diseñada para trabajar en ambientes industriales agresivos y con una elevada tolerancia a fallos.
- *Flexible*: Puede utilizarse en una variedad de casos y para monitorear diversos parámetros.
- *Inteligente*: Se basa en técnicas de inteligencia artificial para hacer predicciones a partir de los datos monitorizados.
- *De bajo costo*: Utiliza ordenadores de placa reducida y teléfonos móviles para las principales tareas, lo cual se combina con el uso de técnicas de computación en nube para aquellas que, como la modelación, requieren mayor capacidad de cómputo.



**Figura 1. Diseño conceptual de la arquitectura de ROFLEXIN/LC**

ROFLEXIN/LC consta de cuatro módulos básicos (Fig. 1). El primero es el centro de gestión de datos (ROFLEXIN/LC Brain), el cual escribe y lee de la base de datos, toma los datos de los módulos de captura, solicita las tareas de modelación y recibe los resultados y, finalmente, envía los datos que deben ser visualizados a los módulos correspondientes. Como sistema de base de datos, se emplea MySQL, que combina su eficiencia y capacidad de almacenamiento con el carácter de software libre y de código abierto.

El módulo de captura de datos (ROFLEXIN/LC Catcher), se encarga de tomar los datos de los sensores, preprocesarlos y enviarlos al módulo central. Pueden existir hasta 16 módulos de este tipo en el sistema.

El módulo de modelación (ROFLEXIN/LC Druid), tiene una doble funcionalidad. Por un lado, ajusta los modelos que relacionen parámetros medidos, a partir del uso de técnicas de inteligencia artificial (computación blanda). En segundo lugar, una vez ajustados los modelos, toma valores de las variables de entrada y, mediante la evaluación de dichos modelos, ofrece las correspondientes predicciones.

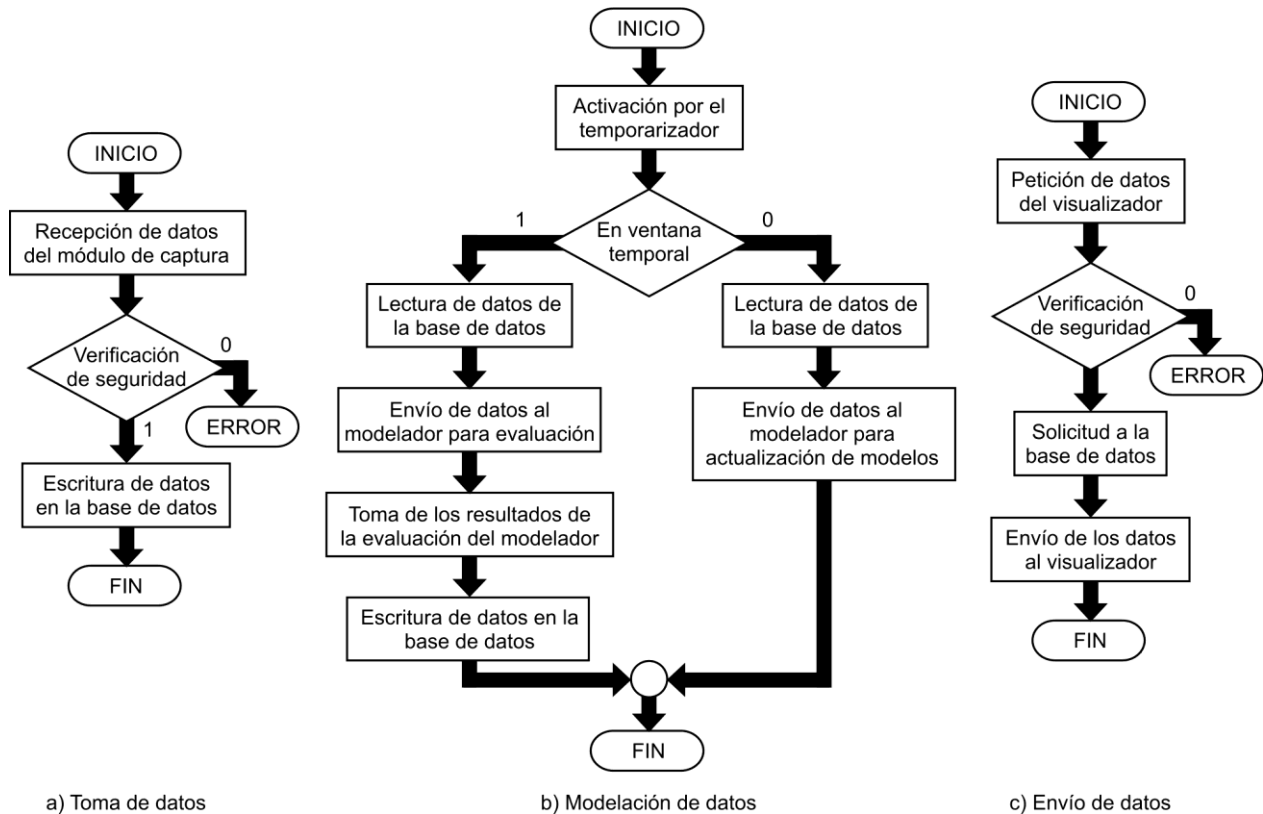
Finalmente, los módulos de visualización (ROFLEXIN/LC Viewer), constituyen la interfaz hombre-máquina que permiten la observación e interpretación de los datos monitoreados (directa o indirectamente). Se dispondrán de módulos para la visualización tanto en ordenadores personales (con sistema operativo MS Windows o Linux) como en teléfonos móviles (con sistema operativo Android).

Todos los módulos se comunican sobre protocolo TCP/IP, pudiendo hacerlo sobre diversos medios físicos, tales como una Ethernet, una WiFi o, incluso, una combinación de ambas.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÓDULOS

#### Módulo central: ROFLEXIN/LC Brain

El módulo ROFLEXIN/LC Brain es el componente principal de la arquitectura propuesta. El mismo, controla e interactúa con la base de datos y con el resto de los módulos del sistema. El mismo se diseña para ser ejecutado sobre sistema operativo MS Windows o Linux. Gestiona tres procesos fundamentales (Fig. 2), encaminados a la toma, la modelación y el envío de los datos.



**Figura 2. Diagrama de bloques de los procesos gestionados por ROFLEXIN/LC Brain**

El proceso de toma de datos comienza con el envío, por cualquiera de los módulos de captura, de los datos correspondientes a sus sensores. A continuación, se realiza un chequeo de seguridad, para verificar que el módulo de captura tenga los privilegios adecuados. Si este chequeo no se verifica, el proceso de detiene con un mensaje de error. En caso contrario, se escriben los datos enviados, a la base de datos.

El proceso de modelación de datos se ejecuta, cada cierto tiempo (que se establece en dependencia de las características propias del sistema). Se comienza por verificar si los modelos existentes mantienen su validez (cada modelo tiene un período en el cual se considera válido). Si es así, se envían los datos a evaluar (es decir, las variables de entrada del modelo) al módulo de modelado y, consecuentemente, se reciben de éste los resultados de la evaluación (es decir, las variables de salida del modelo). Finalmente, se actualizan, en la base de datos, los valores evaluados.

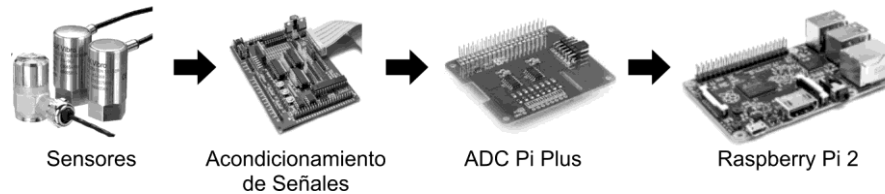
Si el modelo en cuestión ha perdido su validez, entonces se toman los datos necesarios para reajustarlos, de la base de datos, y se envían al módulo de modelado para que éste actualice los correspondientes modelos.

El proceso de envío de los datos comienza con la petición de uno de los módulos de visualización. La misma, se somete a un proceso de validación de seguridad, similar al del proceso de toma de datos. Una vez pasado este chequeo, se toman los datos de la base de datos y se envían al visualizador que hizo la petición.

### Módulo de captura de datos: ROFLEXIN/LC Catcher

El módulo de captura de datos, denominado ROFLEXIN/LC Catcher, tiene como función tomar las señales de los sensores y enviarlas al módulo central. Desde el punto de vista de hardware (Fig. 3), el

mismo está integrado por una tarjeta de acondicionamiento de señales, que convierte las señales de entrada, ya sean de voltaje o de corriente, en señales de voltaje en el rango requerido por la ADC Pi Plus. Adicionalmente, realiza un control de la señal de entrada para evitar valores peligrosos para la integridad física de los circuitos del sistema.



**Figura 3. Estructura de hardware del módulo ROFLEXIN/LC Catcher**

La conversión analógico-digital se realiza mediante una tarjeta ADC Pi Plus, con 8 canales que admiten señales en el rango (0 ... 5) V, con 17 bits cada uno de ellos. Finalmente, las señales son captados por un ordenador de placa reducida Raspberry Pi 2. En la misma, se ejecuta el software que toma estos datos y los envía al módulo central, para su almacenamiento.

#### **Módulo de modelado: ROFLEXIN/LC Druid**

El módulo de modelado se emplea para ajustar y evaluar modelos que permitan el monitoreo indirecto de determinadas variables. La modelación se realiza con modelos preestablecidos o con modelos ajustados a partir de datos empíricos.

En el primer caso, los modelos se establecen mediante una ecuación o conjunto de ecuaciones matemáticas. En el segundo caso, se ajustan utilizando tres variantes posibles de modelos: regresión lineal múltiple, perceptrón multicapa (red neuronal) o sistema de inferencia borroso. En cualquiera de ellas, el resultado es guardado en la base de datos de modelos del sistema, en forma de código para ser evaluado.

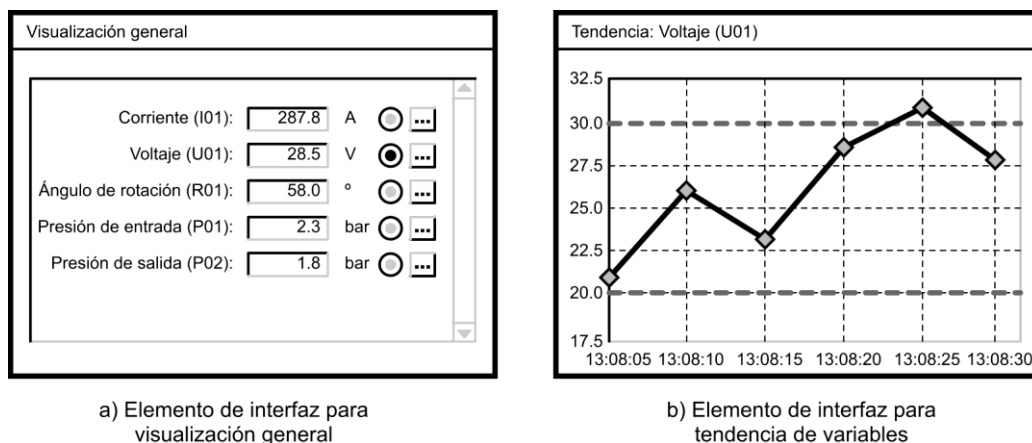
El módulo cuenta con facilidades para la evaluación de la confiabilidad de los modelos ajustados. Las tareas de ajuste y evaluación de los modelos son ejecutadas en hilos diferentes, con el propósito de afectar el rendimiento del sistema de monitoreo.

#### **Módulo de visualización: ROFLEXIN/LC Viewer**

El módulo de visualización, ROFLEXIN/LC Viewer, tiene como propósito servir de interfaz hombre-máquina, es decir, mostrar, de forma amigable al usuario, la información que se está monitoreando, ya sea directa o indirectamente.

ROFLEXIN/LC Viewer se implementa en tres versiones: (i) para ordenadores personales con sistema operativo MS Windows, (ii) para ordenadores personales con sistema operativo Linux, y (iii) para dispositivos móviles con sistema operativo Android.

El visualizador cuenta con dos elementos de interfaz fundamentales. El primero (Fig. 4a) es una visualización numérica general, que incluye varias variables monitoreadas. La misma incluye, para cada variable, el nombre y el código, el valor instantáneo, la unidad de medida, una alarma que se activa si el valor está fuera de ciertos límites preestablecidos y un botón para acceder a la visualización de tendencia.



**Figura 4. Representación esquemática de la interfaz del módulo de visualización**

La segunda forma de visualización (Fig. 4b) es la de tendencia, en la cual se muestra el comportamiento de la variable monitoreada, dentro de cierta ventana temporal. Puede incluir, también, límites de control para la variable.

#### 4. CONCLUSIONES

Como resultado del trabajo se ha arribado a las siguientes conclusiones:

1. Se ha diseñado una arquitectura para monitoreo de sistemas y procesos mecánicos, basada en componentes de bajo costo y en el uso de software de código abierto. La arquitectura fue diseñada para satisfacer los requisitos de robustez y flexibilidad, que requiere su aplicación práctica.
2. La arquitectura incluye cuatro módulos, incluyendo un módulo central de control y almacenamiento de datos, y otros tres, destinados a la captura, el modelado, y la visualización de dichos datos.
3. Como continuación lógica del presente trabajo, se impone el diseño detallado y la implementación de cada uno de los módulos antes descritos, así como la validación del sistema, con caso de estudio reales.

#### 5. CONFLICTO DE INTERESES

El presente trabajo ha sido llevado a cabo gracias al financiamiento del proyecto “ROFLEXIN/LC: Sistema robusto, flexible e inteligente, de bajo costo, para monitoreo de sistemas y procesos mecánicos”, asociado al Programa de Automatización de Procesos Tecnológicos. Los autores declaran no tener constancia de ningún conflicto de intereses relacionado con el trabajo.

#### 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Di Gennaro, S. F.; Matese, A.; Mancin, M.; Primicerio, J. y Palliotti, A. (2014). An open-source and low-cost monitoring system for precision enology. *Sensors*, 14, 23388-23397, doi: 10.3390/s141223388.
- Farhan, L. y Kharel, R. (2019). Internet of things: Vision, future directions and opportunities. En: Mukhopadhyay, S. C.; Jayasundera, K. P. y Postolache, O. A. (eds.). *Modern sensing technologies*. Cham (Suiza), Springer Nature, ISBN: 978-3-319-99539-7.

- Han, J.; Jeong, J.; Lee, I. y Kim, S. (2017). Low-cost monitoring of photovoltaic systems at panel level in residential homes based on power line communication. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 63 (4) 435-441, doi: 10.1109/TCE.2017.015074.
- Lu, H.; Zhan, L.; Liu, Y. y Gao, W. (2017). A Microgrid Monitoring System Over -Mobile Platforms. *IEEE Transactions on Smart Grid* 8 (2) 749-758, doi: 10.1109/TSG.2015.2510974.
- McCrary, S. G. (2013). *Designing SCADA application software: A practical approach*. Elsevier, Londres (UK), ISBN: 978-0-12-417000-1.
- Mnati, M. J.; Van den Bossche, A. y Chisab, R. F. (2017). A smart voltage and current monitoring system for three phase inverters using an android smartphone application. *Sensors*, 17, 872, doi: 10.3390/s17040872.
- Oberloier, S. y Pearse, J. M. (2018). Open source low-cost power monitoring system. *HardwareX*, 4, e00044, doi: 10.1016/j.ohx.2018.e00044.
- Radvanovsky, R. y Brodsky, J. (eds.) (2013). *Handbook of SCADA/Control systems security*, CRC Press, Boca Raton, FL (USA), ISBN: 978-1-4665-0227-7.
- Villalonga, A. (2017). *Sistema de monitoreo de bajo costo para procesos y sistemas mecánicos* (Tesis de Maestría en Ingeniería Asistida por Computadora no publicada), Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba.

## **SOBRE LOS AUTORES**

**Ramón Quiza**, Director del Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), de la Universidad de Matanzas. Doctor en Ciencias Técnicas y Profesor Titular. Miembro Titular de la Academia de Ciencias de Cuba, miembro de la Sociedad Cubana de Matemática y Computación, de la Unión de Informáticos de Cuba y del Capítulo Matancero de la Sociedad Económica de Amigos del País.

**Luis Andrés Valido Fajardo**, especialista del Departamento de Tecnología Educativa de la Universidad de Matanzas. Ingeniero en Ciencias Informáticas. Miembro de la Unión de Informáticos de Cuba,

**Yarens Joaquín Cruz Hernández**, profesor e investigador del Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), de la Universidad de Matanzas. Ingeniero Automático y Máster en Ingeniería Asistida por Computadora. Miembro de la Sociedad Cubana de Matemática y Computación y de la Unión de Informáticos de Cuba.