

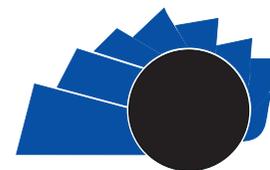


UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## Visión Electrónica

### Más que un estado sólido

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele>



Visión Electrónica

VISIÓN INVESTIGADORA

# Instrumentación para captura y transmisión de señales de vibración

## *Instrumentation for capture and transmission of vibration signals*

Juan Camilo Mejía Hernández<sup>1</sup>, Julian David Echeverry Correa<sup>2</sup>,  
Andrés Mauricio Alvarez Mesa<sup>3</sup>, Alvaro Angel Orozco Gutierrez<sup>4</sup>

### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

#### Historia del artículo:

Enviado: 29/09/2017

Recibido: 16/11/2018

Aceptado: 06/12/2018

#### Palabras clave:

Inalámbricos

Mantenimiento

Redes

sensores

Señales

Vibraciones

### Open access



#### Keywords:

Wireless

Maintenance

Networks

Sensors

Signals

Vibrations

### RESUMEN

Las señales de vibración son usadas generalmente para detectar fallos en máquinas rotativas. En la actualidad existen diferentes metodologías para realizar análisis basado en dichas señales. Una metodología usada extensamente es el Mantenimiento Basado en Condición (CBM). CBM es un mantenimiento programado que recomienda acciones basadas en información recolectada. Actualmente, para la adquisición de señales de vibración se usan comúnmente Redes de Sensores Inalámbricos (WSNs por sus siglas en inglés). Los WSNs son redes formadas por una cierta cantidad de nodos, cada nodo está equipado con un sensor para identificar un fenómeno físico como la luz, presión, temperatura, etc. En este artículo, se propone un robusto sistema basado en WSNs para la adquisición, almacenamiento y transmisión de señales de vibración, el cual combina un mecanismo de acondicionamiento, una tarjeta central y un dispositivo para la transmisión inalámbrica. El sistema propuesto cumple todas las funciones anteriores de manera automática y precisa para dos señales de vibración y una señal de velocidad.

### ABSTRACT:

Vibration signals are generally used to detect failures in rotary machines. Currently, there are several methods to perform analyses based on these signals. A widely used methodology is Condition Based Maintenance (CBM). This is a scheduled maintenance that recommends actions based on information collected. Currently, for the acquisition of vibration signals, Wireless Sensor Networks (WSNs) are commonly used. WSNs are networks composed by a large number of sensor nodes where each node is equipped with a sensor to detect physical phenomena such as light, heat, pressure, etc. In this paper, it is proposed a robust system based on WSNs for the acquisition, storage and transmission of vibration signals, which combine a condition mechanism, a central card and a device for wireless transmission. The proposed system performs all the tasks mentioned above automatically and precisely for two vibration signals and one speed signal.

<sup>1</sup> Ingeniero electrónico, Universidad del Quindío, Colombia. Investigador: Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. [j.mejia1@utp.edu.co](mailto:j.mejia1@utp.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7798-2688>

<sup>2</sup> Ingeniero eléctrico, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Doctorado en Ingeniería de Sistemas Electrónicos, Universidad Politécnica De Madrid, España. Profesor Asociado: Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. [jde@utp.edu.co](mailto:jde@utp.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0956-6161>

<sup>3</sup> Ingeniero eléctrico, Universidad Nacional De Colombia sede Manizales, Colombia. Doctorado en Ingeniería Automática, Universidad Nacional De Colombia sede Manizales, Colombia. Profesor Asistente: Universidad Nacional De Colombia sede Manizales, Colombia. [amalvarezme@unal.edu.co](mailto:amalvarezme@unal.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0308-9576>

<sup>4</sup> Ingeniero eléctrico, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Doctorado en Bioingeniería, Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor Asociado: Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. [aaog@utp.edu.co](mailto:aaog@utp.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1167-1446>

## 1. Introducción

El mantenimiento preventivo tradicional busca maximizar la operación apropiada del equipo a través de una serie de rutinas de inspección realizadas en ciertos intervalos de tiempo. Una forma de mantenimiento preventivo es el Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) [1], que es un programa de mantenimiento que recomienda acciones de mantenimiento (decisiones) basadas en la información recolectada a través del proceso de monitoreo de condiciones [2]. Para el proceso de recolección de información para realizar CBM, las señales de vibración son generalmente las más utilizadas ya que contienen información relevante sobre el estado del mecanismo [3]. Generalmente, las señales de vibración son adquiridas por acelerómetros piezoeléctricos conectados a un sistema de monitoreo. Sin embargo, la mayoría de los sistemas para la recolección de señales de vibración que actualmente se ofrecen requieren herramientas costosas de cálculo y no son automáticos o inalámbricos. Además, en algunos casos específicos, los sensores con cable son inseguros o imposibles de instalar en la máquina [4-6]. Para solucionar este problema, se han desarrollado múltiples redes inalámbricas de sensores (WSNs por sus siglas en inglés). Actualmente, en aplicaciones industriales, especialmente en el monitoreo de maquinaria rotativa, la tecnología WSN es lo suficientemente madura para ser considerada como la alternativa más apropiada a los sistemas tradicionales por cable debido a restricciones específicas relacionadas con el arte en sí. WSN se basa en múltiples nodos de sensores ubicados en puntos estructuralmente críticos (recolectar aceleración, deformación, desplazamiento o mediciones ambientales) y transferir los datos adquiridos de forma inalámbrica a una estación base [7]. Recientemente, las WSN se han utilizado para casi cualquier tipo de monitoreo, tales como aplicaciones aeroespaciales [8], transporte de gas a través de tuberías [9], variación de temperatura, humedad y deformación [10]. Además, las aplicaciones se han desarrollado en la vigilancia de la vibración de las estructuras civiles [7] [11], pero cabe mencionar que todos los dispositivos antes mencionados no superan las frecuencias de muestreo superiores a 2 kHz [12]. Más específicamente, para monitorizar las señales de vibración de las máquinas giratorias se han desarrollado WSN, basado en Compuertas Programables en Campo (Field Programmable Gate Array FPGA) [6] o Sistemas Microelectromecánicos (Microelectromechanical Systems MEMs) [13], aunque con frecuencias de

muestreo máximo de 20 kHz. Sin embargo lo anterior representa un problema, ya que muchas fallas que se quieren analizar al monitorear máquinas rotativas están presentes en frecuencias de hasta 12 kHz [14]. De acuerdo con el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo para el monitoreo de máquinas rotativas debe ser de al menos 25 kHz. Otro problema radica en el hecho de que las WSN actuales están diseñadas para realizar adquisición y comunicaciones de señal en tiempo real. Sin embargo, esto conduce a problemas de sincronización y por lo tanto un gran número de métodos se han desarrollado para mejorar la sincronización, como la Broadcast Synchronization (RBS) [15], MultiLayer Medium Access Control (ML-MAC) [16-17], Deployed Relay Nodes (RNS), Acceso a Medios-Muchos portadores de sentido Múltiple Acceso-Control de tiempo de acceso múltiple por división (MAC CSMA-TDMA) [18]; cabe señalar que la mayoría de estos métodos implican más procesamiento informático y consumo de energía. Además, estudios recientes [19-20] concluyen que los errores de sincronización en la detección, identificación y localización de daños o fallas conducen a distorsión en los resultados. En este trabajo se propone un sistema embebido remoto para la adquisición, acondicionamiento y transmisión de señales de máquinas rotatorias. Dos señales de vibración y una de velocidad se obtienen de forma síncrona y automática desde una tarjeta central. La adquisición de señales se lleva a cabo automáticamente mediante un simple protocolo de planificación y finalmente se envía a un servidor FTP mediante una conexión inalámbrica. Debe tenerse en cuenta que el sistema de instrumentación propuesto es parte de un prototipo que adquiere y analiza señales de vibración con el fin de identificar roturas fallas de máquina a través de diferentes procesos de caracterización y clasificación. El prototipo completo permite identificar los fallos presentes en una máquina rotativa, sin tener que realizar exhaustivos procedimientos de búsqueda o hacer paradas innecesarias. El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 contiene el diseño del sistema y la descripción de cada parte que se compone. Los resultados para la validación de su funcionamiento se presentan en la sección 3. Finalmente, la sección 4 muestra las conclusiones.

## 2. Sistema de adquisición

Usualmente, CBM se realiza a través del procesamiento de señales de vibración, obtenidos por acelerómetros posicionados magnéticamente

sobre el sistema analizados. Sin embargo, los acelerómetros usados para este propósito requieren complejos dispositivos para suplirlos en potencia y acondicionarlos. Debido a lo anterior, los sistemas disponibles comercialmente para realizar la adquisición y procesamiento de señales de vibración provenientes de sensores necesitan avanzadas y sofisticadas herramientas computacionales.

Para resolver el anterior problema, se diseñó un sistema para la Adquisición, Almacenamiento y Transmisión de Señales de Vibración (ASTV por sus siglas en inglés). ASTV está dividido en cinco diferentes módulos; módulo adquisición y acondicionamiento, módulo de control, módulo de almacenamiento, módulo de transmisión y módulo de poder. El diagrama de bloques del ASTV se puede visualizar en la Figura 1.

Específicamente, los sensores son acondicionados mediante tarjetas diseñadas para suplir la potencia y transformar la señal de vibración en una señal alterna. Dicha señal de salida es modificada en amplitud y se le añade un nivel offset por un circuito de acondicionamiento, con el propósito de ser apta para adquirirse por la tarjeta central. La tarjeta central realiza adquisiciones y las almacena en forma de ficheros hasta que son enviadas a un servidor FTP a través de una red inalámbrica. Por último, las señales pueden ser analizadas y procesadas

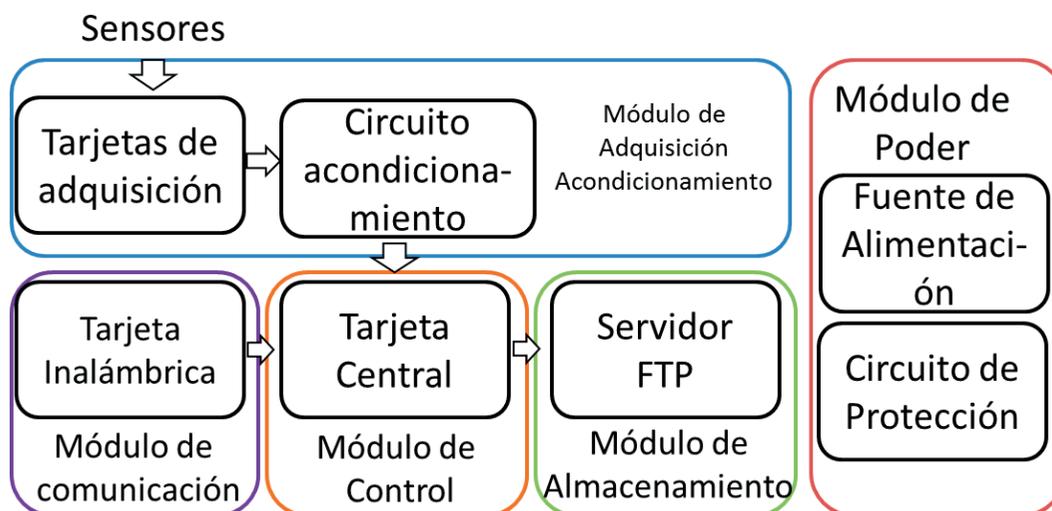
sin restricciones, puesto que son almacenadas sin ningún tipo de encriptación.

### 2.1. Módulo de adquisición y acondicionamiento

Comúnmente, los acelerómetros piezoeléctricos que se utilizan como sensores de vibración para CBM son mono axiales y la señal de vibración analógica se suministra de 4 a 20 mA. Estos acelerómetros necesitan circuitos de acondicionamiento para energizar y extraer la señal capturada. Es por ello que se utilizan primero tarjetas de adquisición para alimentar los sensores y entregan a su salida una señal en voltaje alterna de 12 voltios de amplitud, equivalente a la suministrada por el sensor. Por lo tanto, se implementa un circuito de adaptación que modifica la amplitud de la señal y añade un desplazamiento de nivel. Ahora, la señal de velocidad representa las revoluciones por minuto de la maquinaria en una señal con 12 voltios de amplitud y variante frecuencia.

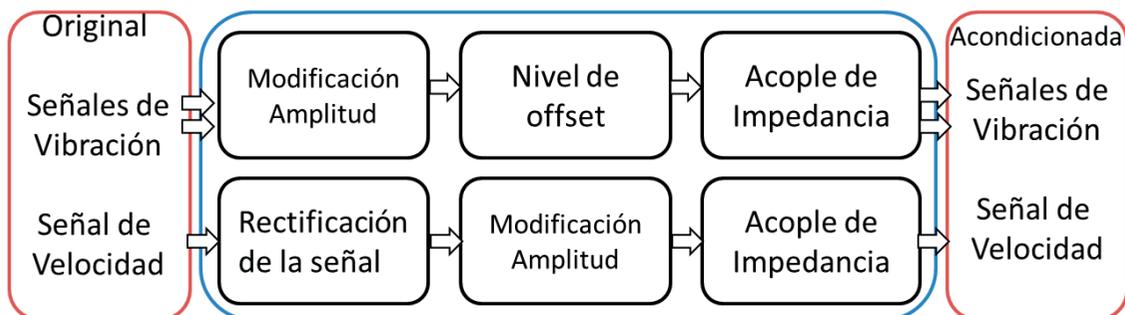
El circuito de condición registra la señal y modifica su amplitud, lo que da una señal cuadrada de 0 a 1,8 voltios con la misma frecuencia que el original. Todos los procesos anteriores se realizan con el fin de que las señales sean apropiadas para ser capturadas por el ADC de la tarjeta central. El diagrama de bloques del circuito de condición se muestra en la Figura 2.

**Figura 1.** Diagrama de bloques del sistema de adquisición, almacenamiento y transmisión de señales de vibración



Fuente: elaboración propia.

**Figura 2.** Diagrama de bloques del circuito de acondicionamiento



Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Módulo de Control

El módulo de control está montado sobre una tarjeta central, la cual trabaja con un sistema operativo Debian. La tarjeta central tiene un procesador de 1GHz, la cual es responsable de la adquisición y almacenamiento de las señales de vibración. El procesador tiene siete canales de conversión análoga a digital (ADC), cada uno posee 12 bits de resolución y 200KHz de frecuencia de muestreo. Adicionalmente, la tarjeta central tiene un puerto USB de propósito general, el cual se utiliza en este caso para acondicionar el dispositivo que realiza la comunicación inalámbrica. Por último, el módulo de control tiene un reloj en tiempo real (RTC), conectado por I2C, cuyo objetivo es mantener la hora y fecha actualizada con la real. La Figura 3 muestra la tarjeta central con todos sus dispositivos.

**Figura 3.** Módulo de control



Fuente: elaboración propia.

El módulo de control está configurado para adquirir diferentes señales dos de vibración y uno de velocidad, lo cual es un novedoso aporte, ya que dispositivos similares en el estado de los son sólo permiten la captura de una señal [13] [6]. Este proceso se realiza de forma automática o programable, ya que el tiempo de adquisición de la señal y las características del mismo se pueden escribir en un archivo de configuración. Debe tenerse en cuenta que el proceso de adquisición es completamente automático y no requiere la intervención de un usuario externo. Es por eso que se adquiere la señal de velocidad, ya que será inútil capturar las señales de vibración procedentes de una máquina giratoria que no está en funcionamiento. Por lo tanto, el proceso de adquisición comienza cuando tanto el tiempo del RTC como el tiempo de ranura programado son iguales y la señal de velocidad excede un umbral establecido. A continuación, el módulo de control guarda en un archivo toda la información relevante de la adquisición (fecha, duración y frecuencia de muestreo) seguidas por las señales.

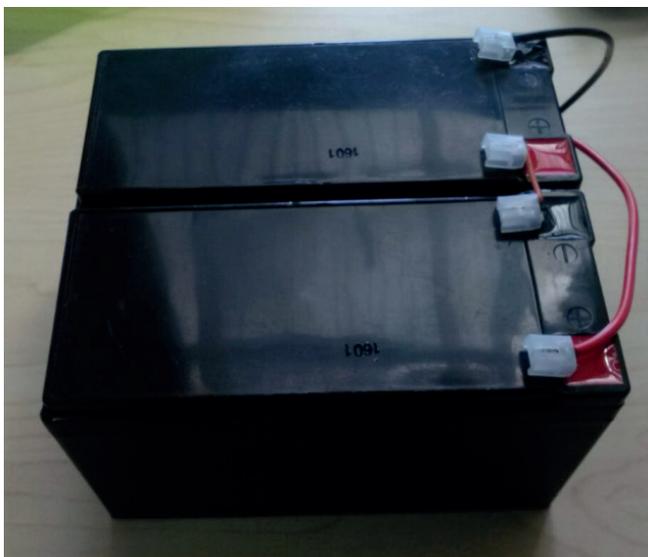
La programación de la tarjeta central se realizó en código fuente abierta. El sistema carga el archivo de configuración con adquisición diaria y empieza a comparar el tiempo real hasta que coincide. La adquisición se realiza con una frecuencia de muestreo de 40KHz, que según el estado del arte [14] es apropiada para la detección de fallos de señales de vibración. Después de realizar la adquisición diaria, el sistema establece la comunicación con el servidor FTP. Posteriormente, los archivos se transfieren al servidor y se realiza un chequeo cruzado de la información para asegurarse de que los archivos se han registrado bien en el servidor. Finalmente, todos

los eventos relevantes se registran en un fichero de información y se envían al servidor FTP con los ficheros de adquisición.

### 2.3. Módulo de poder

ASTV es alimentado mediante una batería de litio recargable de 24 voltios (9Ah) y puede ser recargada a través de un circuito conectado directamente a la red eléctrica (110VAC). La señal de la batería pasa por un circuito de alimentación y protección construido para suplir las necesidades de los diferentes dispositivos que componen el sistema. El circuito tiene una salida de 5VDC para la tarjeta central, dos de 24VDC para las tarjetas de adquisición y por último una salida de 24VDC para el circuito de acondicionamiento. Cabe resaltar que, para cada salida se escogió específicamente un fusible con el fin de proteger el dispositivo que alimenta. La batería de litio para alimentar el ASTV se puede visualizar en la Figura 4.

**Figura 4.** Batería para suplir el ASTV



Fuente: elaboración propia.

A lo largo de todo el proceso realizado, se realizaron mediciones de consumo de energía. Los resultados están organizados en la Tabla 1, donde se puede concluir que casi toda la energía es consumida por la tarjeta central. Sin embargo, ASTV puede mantener todos sus sistemas en funcionamiento durante más de 18 horas seguidas.

## 3. Resultados experimentales

Se han desarrollado múltiples experimentos con el objetivo de verificar la efectividad y precisión del ASTV. Para llevar a cabo dicha verificación el estado del arte [13] propone dos diferentes pruebas. La primera consiste en la adquisición de una señal sinusoidal a diferentes amplitudes y frecuencias, con el objetivo de comparar la establecida en el generador y la adquirida por el sistema. Luego, la segunda prueba consiste en la adquisición síncrona y simultánea de diferentes señales de vibración, mediante el ASTV y la tarjeta comercial NI9234 proveniente de la National Instruments, con el objetivo de comprobar las diferencias entre el ASTV y una tarjeta comercial.

### 3.1. Prueba amplitud y frecuencia

Los WSNs se han convertido en una herramienta muy útil para la CBM. Pero la mala sincronización de estos dispositivos puede alterar en gran medida el resultado de la supervisión. Es por ello que una buena sincronización en el momento de la adquisición es crítica y debe mantenerse en tiempos diferentes. Para evaluar la adquisición síncrona del ASTV, las señales sinusoidales se capturan con frecuencias que varían de 500 a 15000 Hz y con amplitudes de 0,5 a 1,8 V. Las ondas sinusoidales proceden de un generador de señal con refracción 4017A y la Figura 5 muestra la adquisición, adecuación y almacenamiento de señales sinusoidales. A continuación, utilizando el MatLab, se realiza una comparación en términos de amplitud y frecuencia entre las señales generadas y almacenadas. La Tabla 2 muestra los resultados de las comparaciones de las señales.

**Tabla 1.** Consumo de poder del ASTV

Modo de operación	Corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo de vida (h)
Todo operando	0.485	24	18.55
Solo Módulo de Control	0.382	5	23.56

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2.** Resultados de la prueba de amplitud y frecuencia

Establecida	Frecuencia (Hz)		Establecida	Amplitud (V)	
	Medida	Error relativo (%)		Medida	Error relativo (%)
500.000	500.048	0.009	0.500	0.501	0.107
1000.000	1005.548	0.554	1.000	0.996	0.371
2000.000	2017.211	0.860	1.000	1.004	0.312
3000.000	3004.019	0.133	1.500	1.497	0.156
5000.000	5019.531	0.390	1.500	1.509	0.469
10000.000	10008.544	0.085	1.800	1.792	0.796
15000.000	15029.296	0.195	1.800	1.794	0.629

Fuente: elaboración propia.

**Figura 5.** Adquisición de señales sinusoidales a través del ASTV

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Prueba de monitoreo de vibraciones mecánicas

ASTV está diseñado para realizar automáticamente la adquisición, almacenamiento y transmisión de señales de vibración, con el fin de realizar el análisis de las señales y efectuar un correcto CBM. Para realizar una correcta prueba del ASTV, se realizaron adquisiciones provenientes de una unidad

motora en operación. La Figura 6 muestra la prueba realizada, la cual comienza con la localización de dos acelerómetros PCB (RN102A) sobre el motor. La señal del primer acelerómetro es adquirida por el ASTV y sincronamente la señal del segundo acelerómetro es adquirida por el módulo de la National Instruments (NI) NI9234. Las adquisiciones se obtuvieron con el motor trabajando a 2000 revoluciones por minuto y tienen una duración de 5 segundos.

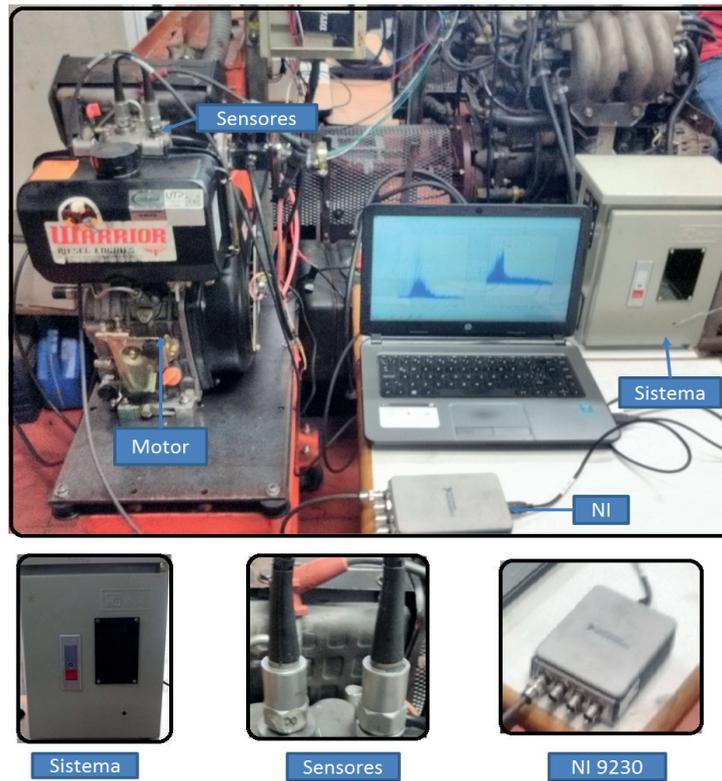
En la Tabla 3, se muestran los resultados de los análisis de las diferentes señales de vibración. El resultado refleja la precisión del sistema ASTV cuando se compara con la tarjeta comercial NI9234. Ambas señales son consistentes, pero con pequeñas diferencias de amplitud y frecuencia. Las diferencias se pueden explicar por la resolución de la tarjeta NI9234 (24bits), la cual es mayor que la del módulo de control (12bits). Otra explicación se radica en la incertidumbre del marco experimental, puesto que los sensores son localizados exactamente en la misma posición y la vibración puede ser adquirida con pequeñas diferencias. Sin embargo, los resultados muestran claramente que el ASTV puede ser usado para la adquisición de señales de vibración provenientes de unidades motoras. En la Figura 6 se puede ver como se realizó la prueba y en la Figura 7 muestra una señal vibración en tiempo y frecuencia.

**Tabla 3.** Comparación de los resultados entre el ASTV y la National Instruments NI

Prueba	ASTV	NI	Error Relativo (%)
	Frecuencia Central (Hz)	Frecuencia Central (Hz)	
1	247.121	247.365	0.098
2	431.963	427.936	0.941
3	724.521	724.725	0.028
4	977.736	1143.936	0.843
5	1146.236	1143.936	0.227
6	1658.325	1660.366	0.122

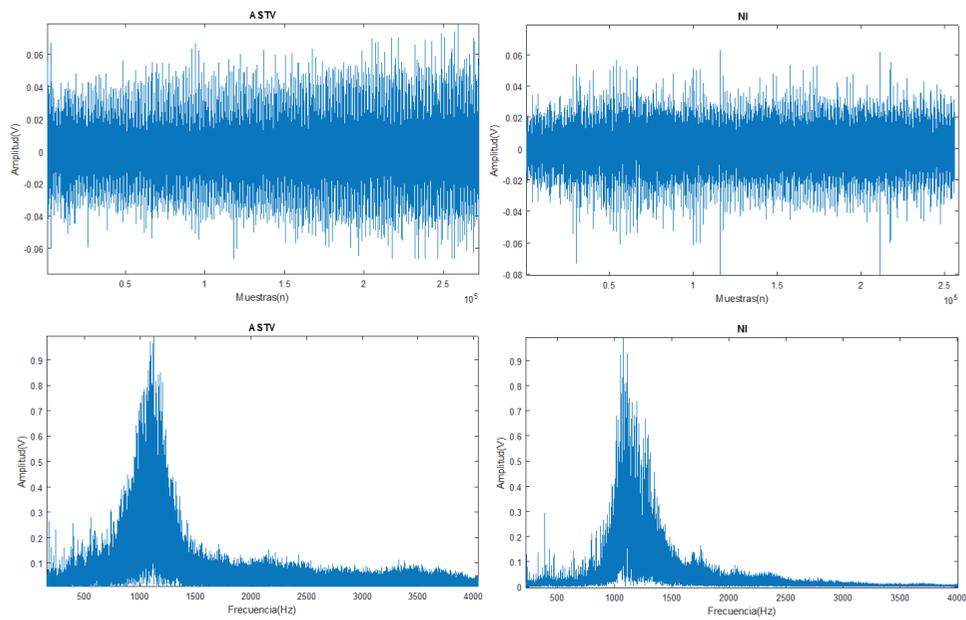
Fuente: elaboración propia.

**Figura 6.** Adquisición de señales de vibración a través del ASTV y NI



Fuente: elaboración propia.

**Figura 7.** Señales de vibración a través del ASTV y NI. Tiempo(Arriba) – Frecuencia(Abajo)



Fuente: elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se describe el diseño e implementación de un nuevo sistema remoto electrónico incorporado para la adquisición, acondicionamiento y transmisión de señales de vibración. Este dispositivo cumple con todos los requisitos de frecuencia de muestreo y precisión en la adquisición de señales de vibración de unidades de motor para realizar el mantenimiento preventivo basado en WSN. La principal contribución de esta investigación es la adquisición de dos señales de vibración y una de velocidad, que junto con una configuración le hace un sistema totalmente automático. En la propuesta ASTV, el módulo de control está configurado para adquirir señales de vibración en tiempos establecidos y enviarlos a un servidor FTP, todo automáticamente durante casi 24 horas. ASTV tiene una alta frecuencia de muestreo de 40 kHz por canal y con un error relativo máximo de 1% en frecuencia y de 1,5% en amplitud. ASTV fue validada por diferentes pruebas de adquisición de señales de vibración, los resultados muestran que el sistema propuesto es efectivo para el monitoreo de máquinas vibratorias. Como trabajo futuro se propone mejorar el prototipo, en sus dimensiones, específicamente en el módulo de potencia. Luego, se propone explorar las capacidades del módulo de control proporcionando un diagnóstico preliminar de las señales adquiridas. Finalmente, se espera poder probar el prototipo en diferentes motores de trabajos para conocer sus limitaciones y así mejorarlas.

#### 5. Reconocimientos

Los autores agradecen al Master en Ingeniería Eléctrica y Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira por su apoyo a lo largo de la investigación. Además, queremos agradecer a COLCIENCIAS por apoyar el proyecto titulado: “Diseño y desarrollo de un sistema prototipo en línea para el diagnóstico de motores de combustión interna diesel en servicio con base en vibraciones mecánicas. Aplicación a los sistemas de transporte público masivo” con el código 1110 -669-46074, a través del cual se desarrolló la investigación descrita en este artículo.

#### Referencias

- [1] L. Yang, X. Ma y Y. Zhao, “A condition-based maintenance model for a three- state system subject to degradation and environmental shocks,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 105, pp. 210–222, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.012>
- [2] R. Ahmad y S. Kamaruddin, “An overview of time-based and condition- based maintenance in industrial application,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 63, n° 1, pp. 135–149, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002>
- [3] G. Plaza y N. L’opez, “Surface roughness monitoring by singular spectrum analysis of vibration signals,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 84, pp. 516–530, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.06.039>
- [4] J. C. Chan y W. T. Peter, “A novel, fast, reliable data transmission algorithm for wireless machine health monitoring,” *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 58, n° 2, pp. 295–304, 2009, <https://doi.org/10.1109/TR.2009.2020479>
- [5] R. Singh and A. Verma, “Energy efficient cross layer based adaptive threshold routing protocol for wsn,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 72, pp. 166–173, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2016.12.001>
- [6] B. Bengherbia, M. Zmirli, A. Toubaly y A. Guessoum, “Fpga-based wireless sensor nodes for vibration monitoring system and fault diagnosis,” *Measurement*, vol. 101, pp. 81–92, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.01.022>
- [7] S.-C. Bae, W.-S. Jang, S. Woo et al., “Prediction of wsn placement for bridge health monitoring based on material characteristics,” *Automation in Construction*, vol. 35, pp. 18–27, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.02.002>
- [8] B. Varghese, N. E. John, S. Sreelal y K. Gopal, “Design and development of an rf energy harvesting wireless sensor node (eh-wsn) for aerospace applications,” *Procedia Computer Science*, vol. 93, pp. 230–237, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.205>
- [9] P. Junie, O. Dinu, C. Eremia, D. Stefanoiu, C. Petrescu y I. Savulescu, “A wsn based monitoring system for oil and gas transportation through pipelines,” *IFAC Proceedings*, vol. 45, n° 6, pp. 1796–1801, 2012, <https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00150>

- [10] T. Ezzedine y A. Zrelli, "Efficient measurement of temperature, humidity and strain variation by modeling reflection bragg grating spectrum in wsn," *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 135, pp. 454–462, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.01.061>
- [11] E. Sazonov, V. Krishnamurthy y R. Schilling, "Wireless intelligent sensor and actuator network-a scalable platform for time-synchronous applications of structural health monitoring," *Structural Health Monitoring*, vol. 9, n° 5, pp. 465–476, 2010, <https://doi.org/10.1177/1475921710370003>
- [12] A. Araujo, J. García, J. Blesa, F. Tirado, E. Romero, A. Samartín, y
- O. Nieto, "Wireless measurement system for structural health monitoring with high time-synchronization accuracy," *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 61, n° 3, pp. 801–810, 2012, <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2170889>
- [13] Q. Huang, B. Tang y L. Deng, "Development of high synchronous acquisition accuracy wireless sensor network for machine vibration monitoring," *Measurement*, vol. 66, pp. 35–44, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.021>
- [14] Z. Wei, Y. Wang, S. He y J. Bao, "A novel intelligent method for bearing fault diagnosis based on affinity propagation clustering and adaptive feature selection," *Knowledge-Based Systems*, vol. 116, pp. 1–12, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.10.022>
- [15] J. Elson, L. Girod y D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 36, pp. 147–163, 2002, <https://doi.org/10.1145/844128.844143>
- [16] M. Khurana, R. Thalore, V. Raina y M. K. Jha, "Improved time synchronization in ml-mac for wsn using relay nodes," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 69, n° 11, pp. 1622–1626, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2015.07.011>
- [17] X. Xiao, B. Tang, and L. Deng, "High accuracy synchronous acquisition algorithm of multi-hop sensor networks for machine vibration monitoring," *Measurement*, vol. 102, pp. 10–19, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.01.036>
- [18] Q. Zhang, Y. Liu, H. Guo y Q. Zhang, "The design of hybrid mac protocol for industry monitoring system based on wsn," *Procedia Engineering*, vol. 23, pp. 290–295, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2504>
- [19] A. Abdaoui, T. M. El Fouly y M. H. Ahmed, "Impact of time synchronization error on the mode-shape identification and damage detection/localization in wsns for structural health monitoring," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 83, pp. 181–189, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.01.004>
- [20] D. Torres, J. Hernández y A. Marino, "Estimación de la curva de presión en la cámara de combustión de mci monocilíndricos a partir del análisis de vibraciones," in Congreso Iberoamericano de Motores Térmicos y Lubricación, Buenos Aires, Argentina, nov 2016. <https://doi.org/10.18502/keg.v3i1.1477>