UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**Visión Electrónica**

*Más que un estado sólido*

http: revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/index

VISIÓN ELECTRÓNICA

VISIÓN DE CASO

# Sistema de monitoreo analítico del comportamiento vibratorio en compresor de gas

## *System for analytical monitoring of vibrational behavior in a gas compressor*

***Hugo Segura Benavides*[a], *Carlos Andrés Porras Niño*[b], *Henry Montaña Quintero*[c],**

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

**Historia del artículo:**
Enviado: Diciembre de 2014
Recibido: Enero de 2015
Aceptado: Febrero de 2015

**Palabras clave:**
Análisis vibracional
Maquinaria rotativa
Mantenimiento predictivo

RESUMEN

El objeto del presente artículo consiste en monitorear el comportamiento vibracional del compresor de gas Worthington, desde un punto de vista global de sistema de proceso de la planta de producción de Turgas S.A. ESP, sobre un PC en la sala de control, por motivos de seguridad y comodidad. De tal forma que con esta tecnología se tomen decisiones seguras y oportunas, en tiempo real, tomando en cuenta la relativa peligrosidad del gas natural. Al monitorear el nivel de vibraciones del compresor se busca mejorar la calidad del proceso, el tiempo de producción, facilitar el trabajo y reducir costos. Adicionalmente el proyecto de investigación pretende desarrollar una técnica que permita el seguimiento con análisis vibracional aplicado al mantenimiento predictivo, para adelantarse a eventuales paros de la máquina y así evaluar cuando son necesarios los mantenimientos preventivos programados evitando así accidentes indeseados en el personal operacional, afectaciones al ambiente, además de daños costosos en los equipos eléctricos o mecánicos representados en volumen de producción, tiempo y dinero invertido por la Empresa.

CC BY NC ND

**Keywords:**
Vibrational analysis
Rotating machine
Predictive Maintenance

ABSTRACT

The purpose of this article is to monitor the vibrational behavior of the gas compressor Worthington, with a global view point system process production plant Turgas S.A. ESP, about a PC in the control room, for reasons of comfort and safety. Thus this technology with safe and timely decisions, real time, taking into account the relative dangers of natural gas. By monitoring the vibration level compressor wanted quality improvement process, production weather facilitates work and reduces costs. Additionally, the research project aims to develop a technique that allows the noun, plural follow vibrational analysis applied to predictive maintenance, for machine stoppages and thus evaluate when are necessary

[a]Ingeniero en Control y Esp. en Educación y Gestión Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Técnico Profesional en Electromecánica de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central La Salle. Tecnólogo en Electrónica de la U. San Buenaventura. e-mail: hugosegurabenavides@gmail.com.

[b]Tecnólogo en Electrónica de la U. San Buenaventura. Estudiante de Ingeniería en Control de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. e-mail: nitocompany@hotmail.com.

[c]Director de Programa. Ingeniero Electrónico U.P.T. de Colombia. Esp. en Automatización Industrial. Docente de planta Universidad Distrital Francisco José de Caldas. e-mail: hmontanaq@udistrital.edu.co

*Citar este artículo como: H. Segura, C. A. Porras & H. Montaña, "Sistema de monitoreo analítico del comportamiento vibratorio en compresor de gas". Visión Electrónica, algo más que un estado sólido, vol. 8, No. 2, 123-135, julio-diciembre 2014.*

preventive maintenance scheduled so avoiding unwanted accidents operational personnel, disruption the environment, apart from expensive damage in electrical or mechanical components represented in volume production, time and money invested for Company.

## 1. Introducción

Turgas S.A. ESP, es una Empresa cuya finalidad es procesar, comprimir, almacenar y distribuir a nivel local y nacional gas natural, sus derivados y energía eléctrica, de manera muy eficiente, con respeto por el ser humano y por la naturaleza. Aunque aparentemente el estudio vibracional sobre el compresor industrial parezca un poco aislado del contexto general de la producción de la Empresa, es realmente de vital importancia, pues se puede inferir de inmediato que en el proceso todo está interrelacionado, desde el mismo instante que el gas ingresa a la planta, se comprime, se almacena, se procesa y se entrega a los vehículos de transporte, o a su vez, a la red de distribución o gasoducto.

El papel del compresor es alto en el contexto de la responsabilidad técnica que implica recibir de los ductos de la empresa Ecopetrol la materia prima, a ser entregada a la red matriz de distribución en cantidades volumétricas, temperaturas y presiones muy precisas, para que el proceso no se halle interrumpido por ningún motivo debido a fallas mecánicas no previstas.

El proyecto de análisis de vibraciones sobre el compresor, es aplicable en cuanto a su funcionalidad y finalidad a cualquier tipo de equipo de comportamiento rotativo en la planta, como por ejemplo motores y generadores eléctricos. La máquina compresor consta de sistema de cámara y cuatro pistones cuya función consiste en comprimir el gas natural a ciertos niveles sucesivos para ser distribuido por tubería o también alimentar los motores de combustión interna acoplados a los generadores de energía eléctrica de la planta. [1]

Este proceso ha funcionado con algunas interrupciones, muchas de ellas debido a daños mecánicos del compresor. Por esta razón, adelantándose a fallas presentes y futuras, se trabaja en el mantenimiento predictivo, impulsando el proyecto de implementar el hardware y software apropiado para llegar a un sistema de monitoreo y predicción de fallas eficiente. [2]

Particularmente, el compresor de gas natural Worthington es una máquina diseñada para trabajo pesado, constituida por partes móviles fijadas en una carcasa robusta capaz de contener y amortiguar las oscilaciones de múltiples mecanismos que interactúan simultáneamente. Se encuentra permanentemente expuesto a una gran fuerza externa como lo es el motor eléctrico acoplado que provee la energía para la rotación de sus mecanismos y de variadas fuerzas internas.

Presenta movimientos rotacionales como los que ejecutan el cigüeñal, los ejes de levas y rodamientos en general; movimientos longitudinales como los descritos por pistones y válvulas; movimientos combinados como los de las bielas y casquetes. [3]

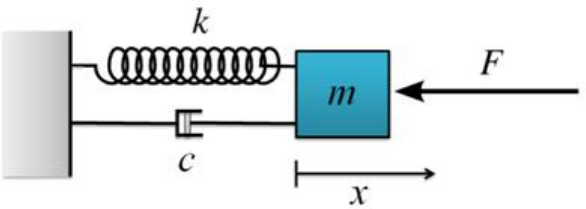
Muchos de estos componentes se han deteriorado paulatinamente hasta dañarse, siendo difícilmente detectados por los operarios en estado temprano, causando desbalanceo y desalineación en las partes susceptibles a deformarse por problemas congénitos propios de su funcionamiento, imposibles de aislar completamente debido a la naturaleza conforme del proceso. Varios problemas han causado, a lo largo de ocho años de operación en la planta de Turgas S.A., continuos, incontables e irreparables daños en los componentes, como cigüeñales, ejes de levas, bielas y pistones.

Esto ha generado paros inesperados y pérdidas económicas en la producción, daños electromecánicos importantes en la máquina, gastos de mantenimiento y reparación no planeados, además de riesgos a la vida de los trabajadores por peligro de atrapamiento mecánico, riesgo eléctrico, explosión y potenciales daños a la naturaleza, [4]

## 2. Generalidades

Una vibración es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud. Se puede considerar como la oscilación de un cuerpo o el movimiento repetitivo de un objeto determinado alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Ver Figura 1. [5]

**Figura 1.** Sistema resorte-amortiguador sujeto a una masa.

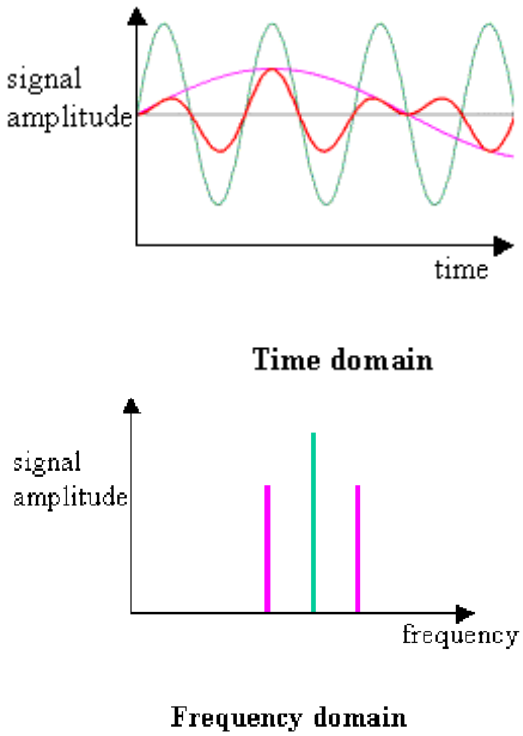



**Fuente:** [5].

El movimiento vibratorio de un cuerpo se puede describir totalmente como una combinación de movimientos individuales de seis tipos. Esos son traslaciones en las

tres direcciones ortogonales $x, y, z$, y rotaciones alrededor de los ejes $x, y, z$. Las máquinas presentan su propia señal de vibración y en ella se encuentra la información de sus elementos constitutivos. Por tanto, una señal de vibración es una señal de energía y al ser capturada de una máquina significa la suma vectorial de la energía vibracional de cada uno de sus componentes. La transformada rápida de Fourier (FFT) será usada como herramienta de transformación de señales del dominio del tiempo a dominio de la frecuencia. Ver figura 2.

**Figura 2.** Representación de las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia.




En el caso de los equipos rotativos, la ventaja que presenta el análisis vibratorio respecto a otras técnicas como tintas penetrantes, radiografía, ultrasonido, etc., es que la evaluación se realiza con el compresor en funcionamiento, evitando la pérdida de producción que genera la detención del equipo. [6]

### 2.1. *Estado del arte*

Existen en la actualidad numerosos sistemas predictivos de análisis de vibraciones, diseñados y fabricados por diversas empresas del sector, cuyo denominador común radica en el alambrado físico del sensor fijado en la planta a los equipos del sistema de análisis, proceso que se va a implementar inalámbricamente y de esta manera superar potenciales fallos presentes en el uso de cableado.

Entre muchas otras empresas nacionales, extranjeras o proyectos dedicados a análisis vibracional, tenemos las siguientes:

- A-MAC, Análisis de Maquinaria, domiciliada en Medellín, Colombia. La División de Servicios de A-MAQ S.A. realiza análisis especiales en maquinaria rotativa y alternante, análisis en estado transitorio, balanceo dinámico especial, control de vibraciones, aumento de velocidad en líneas de producción a través de análisis de vibraciones y montaje de programas de análisis de vibraciones orientados a gestión de confiabilidad para la industria.
- La división de servicios de G&M Ingeniería, que es una empresa española con gran experiencia en el sector de la industria para crear soluciones en el campo de confiabilidad de maquinaria, ingeniería industrial, automatización de procesos y seguridad Industrial.
- Desarrollo de un Trabajo de Grado en Ingeniería en Control en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, utilizando un circuito Propeller.

Hay en el mercado diversas estrategias y técnicas para obtener, evaluar y analizar el espectro de vibraciones procedentes de un sistema rotativo de una máquina. Entre ellas encontramos:

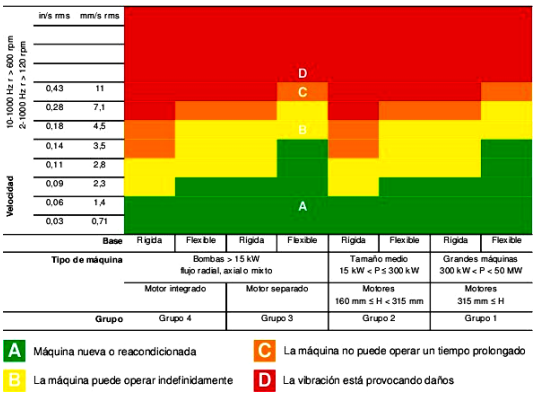
- Análisis de vibraciones espectral,
- Análisis de vibraciones por la forma de onda,
- Análisis por fase de vibraciones,
- Análisis de vibraciones por gráficas de Bode,
- Análisis de vibraciones por los promedios sincrónicos en el tiempo,
- Análisis de vibraciones por órbitas,
- Análisis de vibraciones por demodulaciones,
- Análisis de vibraciones en partidas y paradas de una máquina,
- Análisis de vibraciones por transformada tiempo frecuencia,
- Análisis de vibraciones por curvas de Lissajaus,
- Análisis de vibraciones por medio de la TRF (Transformada Rápida de Fourier).

Esta última técnica fue la seleccionada por los autores para realizar el presente artículo.

### 2.1.1. *La norma ISO 10816 sobre vibraciones*

Esta norma establece las condiciones generales para la evaluación de la vibración, utilizando mediciones sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional, como en pruebas de validación con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo, Ver figura 3, [7].

**Figura 3.** Evaluación estándar para monitoreo de vibraciones.




**Fuente:** Norma ISO 10816.

La evaluación se determina por zonas de colores, de la siguiente forma:

1. **Zona A - color Verde:** Valores de vibración de máquinas recién puestas en funcionamiento o reacondicionadas. Las vibraciones procedentes de la máquina se encuentran justo en el punto de operación.

2. **Zona B – color Amarillo:** La máquina puede continuar funcionando indefinidamente en operación normal con algunas restricciones.

3. **Zona C – color Naranja:** Los valores de vibración en naranja, procedentes de la máquina, no se encuentran en condiciones apropiadas para continuar con la operación, la condición de la máquina no es adecuada para una operación continua.

4. **Zona D – color Rojo:** Establece valores de vibración peligrosos. Daños graves pueden estar ocurriendo. Se debe detener, proceder a su inspección y eventual reparación. [8]

### 2.2. *Modelamiento: ecuaciones físicas de movimiento*

Las siguientes consideraciones matemáticas son realizadas implícitamente por el software LabView®, en conjunto con el acelerómetro industrial y los sistemas de transmisión de datos al computador utilizado en el presente proyecto, donde se muestra las aceleraciones vibracionales como consecuencia de pequeños desplazamientos en los mecanismos de la maquinaria, gracias a la rotación uniforme que describe el sistema.

Luego, si se anota la posición o el desplazamiento de un objeto que está sometido a un movimiento armónico sencillo contra el tiempo en una gráfica, la curva resultante será una onda seno o sinodal que se describe en la siguiente ecuación: [9]

$$d = D\,\mathrm{sen}\,(\omega t) \tag{1}$$

La velocidad del movimiento es igual a la proporción del cambio del desplazamiento, o en otras palabras a que tan rápido se cambia su posición. La razón de cambio de una cantidad respecto a otra se puede describir con la derivada:

$$v = \frac{d\,d}{dt} = \omega D\,\cos\,(\omega t) \tag{2}$$

La aceleración del movimiento que aquí se describe está definida como la proporción de cambio de la velocidad, o que tan rápido la velocidad está cambiando en el tiempo:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 d}{dt} = -\omega^2 D\,\mathrm{sen}\,(\omega t) \tag{3}$$

Definida una vibración como una pequeña elongación del material de su punto de reposo:

$$F_x = -k\,x \tag{4}$$

Definimos la fuerza en función de la masa y aceleración:

$$m\,\frac{d^2 x}{dt} = -k\,x \tag{5}$$

Se recuerda que la frecuencia angular del movimiento está dada como:

$$\omega^2 = \frac{k}{m}\frac{rad}{seg} \tag{6}$$

Entonces:

$$\frac{d^2 x}{dt} = a(t) = -\omega^2\,x \tag{7}$$

Solucionando la ecuación diferencial anterior:

$$x(t) = A\,\mathrm{sen}\,(\omega\,t + \phi) \tag{8}$$

La frecuencia de oscilación puede escribirse como:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}\,Hz \tag{9}$$

Que es la frecuencia natural, resorte – masa no amortiguada, así el periodo es:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}\,seg \tag{10}$$

A partir de esta ecuación podemos obtener la velocidad en revoluciones por minuto:

$$\eta = \frac{60}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}\, rpm \tag{11}$$

La velocidad y aceleración de la partícula pueden obtenerse derivando la expresión (8).

Donde la velocidad es:

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \omega A\, \cos\left(\omega\, t + \phi\right) \tag{12}$$

Y la aceleración es:

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = -\omega^2 A \operatorname{sen}\left(\omega\, t + \phi\right) = -\omega^2 x(t) \tag{13}$$

## 3. Materiales y métodos: técnica experta estadística

Los datos obtenidos por el acelerómetro, son procesados en el programa Labview®, donde nos indica la amplitud de la falla que está presentando la máquina, esta amplitud refleja la gravedad del problema vibracional del equipo. Para tal efecto se fundamenta el sistema experto del algoritmo de identificación de anomalías, recurriendo a la estadística, con un método muy eficiente denominado coeficiente de correlación lineal, descrito a continuación.

La desviación del i-ésimo dato es $d_i = x_i - X$. [11]

Si la variable que va a caracterizarse se ha tomado una muestra, la varianza se define como la suma de los cuadrados de las desviaciones, sobre el número de datos menos uno. La varianza se simboliza $\sigma^2$, así:

$$\sigma^2 = \frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \ldots + d_n^2}{n-1} \tag{14}$$

av cll 17 65b -95

La desviación estándar corresponde a la raíz cuadrada de la varianza. Para el caso muestra, se simboliza $\sigma$, y se calcula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \ldots + d_n^2}{n-1}} \tag{15}$$

El coeficiente de correlación lineal es el cociente entre la covarianza y el producto de las desviaciones típicas de ambas variables. El coeficiente de correlación lineal se expresa mediante la letra $r$:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\, \sigma_y} \tag{16}$$

Algunas de sus propiedades son:

1. El coeficiente de correlación no varía al hacerlo la escala de medición. Es decir, si expresamos la altura en metros o en centímetros el coeficiente de correlación no varía.
2. Si la covarianza es positiva, la correlación es directa. Si la covarianza es negativa, la correlación es inversa. Si la covarianza es nula, no existe correlación.
3. El coeficiente de correlación lineal es un número real comprendido entre $-1$ y 1. $-1 \leq r \leq 1$.
4. Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a $-1$ la correlación es fuerte e inversa, y será tanto más fuerte cuanto más se aproxime $r$ a $-1$.
5. Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a 1 la correlación es fuerte y directa, y será tanto más fuerte cuanto más se aproxime $r$ a 1.
6. Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a 0, la correlación es débil.
7. Si $r = 1$ ó $-1$, los puntos de la nube están sobre la recta creciente o decreciente. Entre ambas variables hay dependencia funcional.

Para el desarrollo de la investigación, se proponen los siguientes pasos metodológicos:

1. Estudio de necesidades: Se hace un estudio de las falencias actuales de la máquina en relación al sistema industrial al que pertenece, plantear soluciones y estudiar su efectividad.
2. Variables a sensar: Vibraciones a base de micro desplazamientos, velocidad y aceleración. .
3. Elección de sensores y accionamientos: Acelerómetros de precisión, sistemas de transmisión de información.
4. Algoritmos de análisis vibracional: Diseño algorítmico de la forma en que se va a analizar y monitorear el sistema.
5. Simulación de los algoritmos: Se realizan simulaciones de los circuitos electrónicos, de la programación del sistema y del funcionamiento de la telemetría.
6. Elección de la tecnología: Estudio de la tecnología más apropiada y factible.
7. Diseño de Hardware y Software: Se acondicionará la máquina como sostén del proyecto, además se elabora el programa de adquisición de datos y el sistema SCADA.
8. Implementación: Se somete la máquina a los trabajos requeridos de adecuación del prototipo con el software y hardware según estudio preliminar.

9. Pruebas: Mediante pruebas, ensayos de laboratorio y puesta en marcha del prototipo, se evalúa la eficiencia y rendimiento del sistema, luego se hacen los ajustes necesarios.

10. Producto final: Luego de verificar que el prototipo funciona correctamente, se realizan los ajustes finales sobre la máquina funcionando como tal y se confirma su funcionalidad.

La parte operativa y las etapas seguidas para analizar una vibración, que constituye la cadena de medición son:

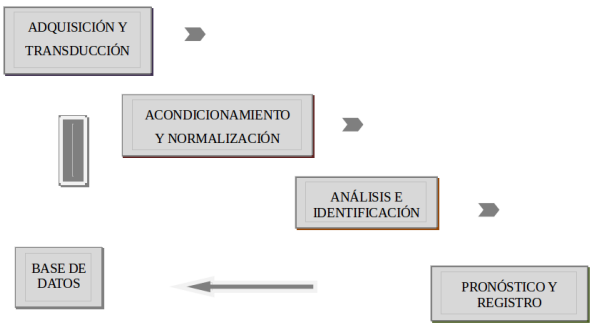
1. Detección o adquisición de los datos o señales vibracionales procedentes del acelerómetro fijado físicamente en el chasís del compresor (Etapa de adquisición y transducción).

2. El análisis lo realiza el software LabView del computador, recibiendo la señal del acelerómetro en el tiempo, realizar la TRF (Transformada Rápida de Fourier) y verla reflejada en la frecuencia (Etapa de acondicionamiento y normalización).

3. Posteriormente en el proceso de identificación se comparan la señal leída con la base de datos y se procede a clasificarla en una tipología de severidad o potencial fallo de la máquina compresor (Etapa de análisis e identificación).

4. Se efectúan varias lecturas de autocorrección para corroborar la tipología con la señal y poder publicar una nota de advertencia, en el monitor, con el posible daño mecánico (Etapa de pronóstico y registro). [12] Ver figura 4.

**Figura 4.** Sistema de proceso y análisis de la información vibracional.




**Fuente:** elaboración propia.

### 3.1. *El Compresor Worthington en la planta de Turgas S.A.*

El compresor de gas natural marca WORTHINGTON de cuatro etapas, supera los $US\$250.000.^{oo}$, el cual es accionado por un motor eléctrico de 900 HP a 1200 revoluciones por minuto acoplado directamente al eje del compresor, el cual recibe gas en su entrada a 15 psi cuya primera etapa lo comprime a 250 psi, posteriormente la segunda etapa lo comprime a 460 psi, de ahí la tercera etapa lo sigue comprimiendo a 720 psi y, la cuarta etapa termina comprimiendo el gas a 1450 psi, alimentando los ductos de direccionamiento hacia su distribución en gasoductos. Ver Figura 5.

**Figura 5.** Compresor Worthigton en planta.

**Fuente:** Turgas S.A.

Para sensar los datos vibracionales suministrados por el compresor, se recomienda:

1. La máquina debe estar en condiciones de operación normal.

2. Las velocidades de motores a inducción dependen de la carga, eso quiere decir que las condiciones de carga deben ser las mismas tanto como sea posible.

3. El nivel de vibración agregado por fuentes extrañas como máquinas cercanas, también deberá ser lo mismo cada vez que se recopilen datos. No se debe recopilar datos con las máquinas cercanas apagadas, si los espectros anteriores fueron censados mientras que éstas estaban funcionando.

4. La temperatura de la máquina afectará la alineación y los juegos en operación debido a la expansión térmica. Una máquina fría tendrá una firma de vibración diferente de una máquina caliente y esas pueden a veces ser totalmente diferentes.

5. Es importante la inspección visual de una máquina en operación mientras que se está probando la vibración, ya que se pueden descubrir indicaciones importantes acerca del estado de la máquina. Se debe anotar las RPM y la presión de descarga. [13]

6. Los puntos siguientes deben ser verificados: ¿Hay algunos ruidos inusitados?; ¿Algunos rodamientos se sienten más calientes de lo normal?; ¿Se puede sentir un nivel de vibración excesivo?; ¿Hay algo anormal en la operación de la máquina?; ¿Hay algunas fugas de vapor o de fluidos aparentes?; ¿Los valores que muestran los indicadores están en regla? [14]

### 3.2. *Módulo de adquisición de datos*

El módulo de adquisición de datos se compone básicamente de un sensor, un cable blindado y un módulo de acondicionamiento de señal. El sensor es un transductor acelerométrico mono axial marca CTC, referencia AC140-1D, CE. Con una sensibilidad de 100mV por gravedad más o menos 15%, con un rango dinámico de $\pm 50$ gravedades pico a pico, alimentado de 18 a 30 V, corriente constante de excitación de 2 a 10 mA. El cable blindado es marca CTC, serie CB103-E-003-F, fabricado en USA, que permite un aislamiento contra el ruido electrónico, gracias a su apantallamiento especial. Ver Figura 6. [15]

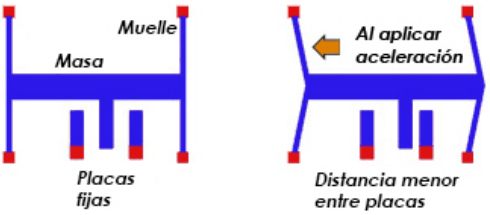
**Figura 6.** Módulo de adquisición de datos con acelerómetro.

**Fuente:** CTC y NI.

Los acelerómetros capacitivos basan su funcionamiento en la variación de la capacidad entre dos ó más conductores entre los que se encuentra un dieléctrico, en respuesta a la variación de la aceleración. Los sensores de circuito integrado en un chip de silicio se emplean para la medida de la aceleración. Su integración en silicio permite reducir los problemas derivados de la temperatura, humedad, capacidades parásitas, terminales, alta impedancia de entrada. Cuando se observa el sensor micromecanizado parece una "H" .

Los delgados y largos brazos de la "H" están fijos al substrato. Los otros elementos están libres para moverse, lo forman una serie de filamentos finos, con una masa central, cada uno actúa como una placa de un condensador variable, de placas paralelo. La aceleración o desaceleración en el eje del sensor, ejerce una fuerza a la masa central. Al moverse libremente, la masa desplaza las minúsculas placas del condensador, provocando un cambio de capacidad. Este cambio de capacidad es detectado y procesado para obtener un voltaje de salida. Ver Figuras 7 y 8.

**Figura 7.** Esquema de funcionamiento del acelerómetro.




**Fuente:** CTC.

**Figura 8.** Acelerómetro mono axial y cable apantallado.

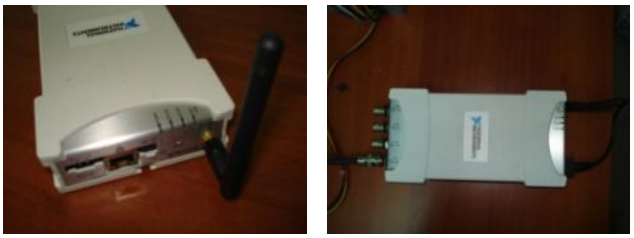
**Fuente:** CTC.

Finalmente el módulo acondicionador de señal NI 9234 de National Instruments seleccionable por software (0 o 2 mA), máxima velocidad de muestreo de $51.2\,kS/s$ por canal; acoplado en AC (0.5 Hz), resolución de 24 bits; rango dinámico de 102 dB; filtros anti-aliasing, 4 entradas analógicas muestreadas simultáneamente y rango de entrada $\pm 5\,V$.

### 3.3. *Módulo de transmisión de la información*

El módulo de la transmisión de la señal captada por el acelerómetro y acondicionada por el módulo NI 9234, es el adaptador de un solo módulo Wi-Fi de la serie C, NI WLS 9163. Que consta de interfaces de Comunicación IEEE 802.11$b/g$ (Wi-Fi) inalámbrica y Ethernet. Con seguridad avanzada de codificación AES de datos de 128 bits y soporte IEEE 802.11i (WPA2), dos líneas PFI digitales para disparo y exportar o importar relojes de muestreo, incluye servicios de medidas NI-DAQmx y LabVIEWSignalExpress LE. Ver Figura 9. [16]

**Figura 9.** Módulo de transmisión inalámbrica Wi-Fi.



**Fuente:** NI.

La comunicación entre el módulo y el computador se realiza por el sistema Wi-Fi. De esta manera se soluciona el problema de cableado, evitando errores por daños físicos en los cables. El único limitante es la distancia entre el transmisor y el computador que corresponde a 100 metros lineales sin obstáculos físicos, o a 30 metros para óptimas condiciones con obstáculos. La adquisición de datos por Wi-Fi es una aplicación de tecnologías inalámbricas para labores de medición donde no se desea la presencia de cables de interconexión. [17]

El módulo National Instruments Wi-Fi de adquisición de datos (DAQ) combina IEEE 802.11 inalámbrica o Ethernet, con conectividad directa del sensor al módulo y la flexibilidad del software NI-DAQmx para el monitoreo remoto de señales eléctricas, físicas, mecánicas y acústicas. NI Wi-Fi DAQ pueden transmitir los datos en cada canal de hasta $250\,kS/seg$.

### *3.4. Módulo PC tipo SCADA*

SCADA viene de las siglas de "Supervisory Control and Data Adquisition". Se trata de una aplicación software diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción de tal forma que proporciona comunicación con los dispositivos de campo (controladores, autómatas programables, etc.) y controla el proceso de forma automática. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como de otros supervisores: control de calidad, supervisión y mantenimiento. Usualmente existe un ordenador que efectúa tareas de supervisión y gestión de alarmas, así como el tratamiento de datos y control de procesos. La comunicación es por buses o redes LAN, se ejecuta en tiempo real y dan al operador la supervisión y control de procesos. [18]

Entre los más importantes productos SCADA presentes en la industria encontramos:

1. Proveedor: **Wonderware**. Producto: **FactorySuite**. www.wonderware.com Consiste en un conjunto de aplicaciones de software industrial orientado hacia las aplicaciones de control y MMI. Provee una perspectiva integrada de todos los recursos de control e información de la planta. De esta manera, los ingenieros y operadores pueden visualizar e interactuar con los procesos mediante representaciones gráficas de los mismos.

2. Proveedor: **TA - Engineering Products**. Producto: **Aimax**. www.ta-eng.com/home.htm Muy robusto y poderoso en la categoría de MMI, opera en la plataforma de Microsoft Windows, almacena integra datos de múltiples fuentes gracias a la disponibilidad de interfases para una amplia gama de PLCs, controladores y dispositivos de entrada/salida. Provee diversas funciones, tales como adquisición de datos, alarmas, gráficos, archivos, etc.

3. Proveedor: **Rockwell Automation**. Producto: **RS View32**. www.software.rockwell.com Este software MMI para monitorear y controlar máquinas automatizadas y procesos está diseñado para operar en el ambiente MS Windows 2000 en español. Es compatible con contenedores OLE para Active X, lo que facilita la inclusión de controles de este tipo suministrado por terceros. Incluye VBA, Visual Basic para aplicaciones como parte integrante den sus funciones, de modo que posibilita maneras ilimitadas de personalizar los proyectos.

4. Proveedor: **Nematron**. Producto: **HMI-SCADA Paragon**. www.nematron.com Es un software poderoso y flexible que permite construir aplicaciones para una completa visualización del operador, MMI, supervisión de control y adquisición de datos SCADA. Tiene funciones para reparación de errores que se encuentran integradas en los módulos de control, HMI y SCADA, todas ellas comparten una sola base de datos, facilitando así la programación y localización de errores.

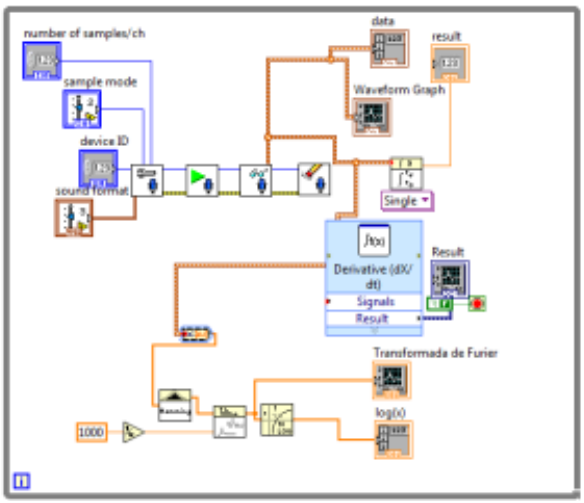
5. Proveedor: **USDATA**. Producto: **Factory Link 7**. www.usdata.com Esta solución SCADA para recolectar información crítica de los procesos de la planta fue diseñado específicamente para MS Windows 2000 bajo la plataforma multicapa de DNA. Utiliza la tecnología estándar de objetos para la importación de datos externos, con lo que se reduce el costo de propiedad de los sistemas.

6. Proveedor: **National Instruments**. Producto: **LabView**. www.ni.com Ofrece un ambiente de desarrollo gráfico con una metodología muy fácil de dominar por ingenieros y científicos. Con esta herramienta se pueden crear fácilmente interfases de usuarios para la instrumentación virtual sin necesidad de elaborar código de programación. Para es-

pecificar las funciones sólo se requiere construir diagramas de bloques. Se tiene acceso a una paleta de controles de la cual se pueden escoger desplegados numéricos, medidores, termómetros, tanques, gráficas, etc., e incluirlas en cualquiera de los proyectos de control que se estén diseñando. Se basa en un modelo de programación de flujo de datos denominado G, que libera a los programadores de la rigidez de las arquitecturas basadas en texto. Es también el único sistema de programación gráfica que tiene un compilador que genera código optimizado, cuya velocidad de ejecución es comparable al lenguaje C.

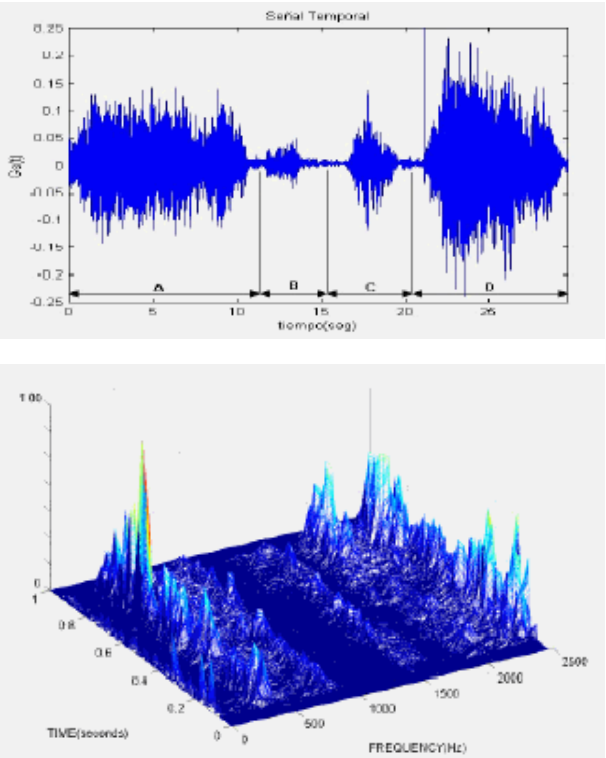
Para facilitar aún más la operación de este producto se encuentra con la inclusión de una herramienta asistente capaz de detectar automáticamente cualquier instrumento conectado a la computadora, instalando los drives apropiados y facilitando la comunicación con el instrumento. Fue creado para construir instrumentación virtual (osciloscopios, generadores de función, voltímetros, etc.), gracias a la amplia disponibilidad de tarjetas de adquisición de datos y a la facilidad de construir aplicaciones en un ambiente gráfico, las últimas versiones se han utilizado ampliamente para desarrollar aplicaciones en el control de procesos. Este último programa fue el escogido para el desarrollo del proyecto. Ver Figuras 10 y 11.

**Figura 10.** Ejemplo del programa en LabView para el proceso.




**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 11.** Transformación de las señales del tiempo a la frecuencia por la TRF en LabView.




**Fuente:** elaboración propia.

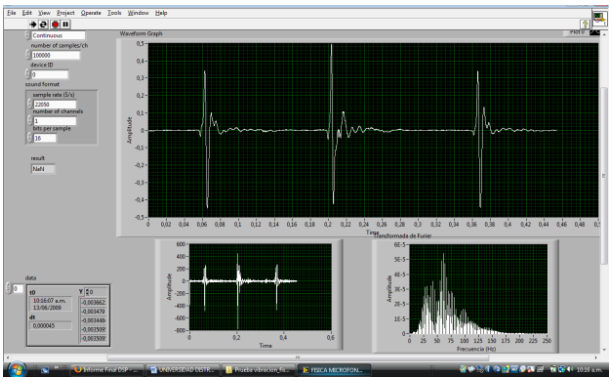
### 3.5. *Pruebas dinámicas realizadas en laboratorio*

Bajo un ambiente controlado de laboratorio, se realizaron diversas pruebas no destructivas sobre una mesa de pruebas con un motor de corriente directa de 30 V, que desarrolla 1.800 rpm. Ver Figura 12 y figuras Gráficas 13-17, Obteniéndose:

**Figura 12.** Disposición de los elementos en la mesa de pruebas.

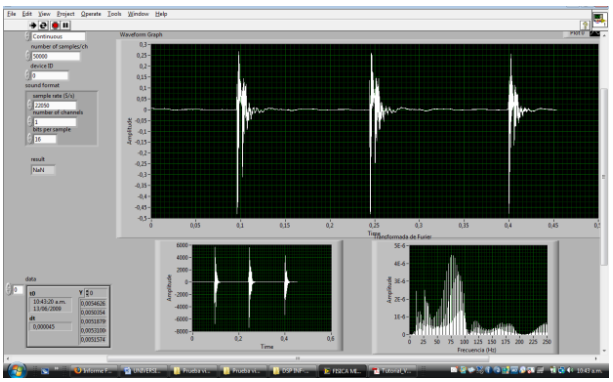
**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 13.** Frecuencia vibracional natural del motro.



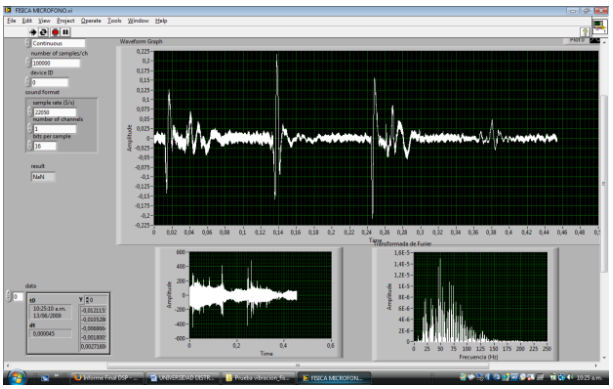
**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 14.** Patología vibracional de carga desbalanceada.



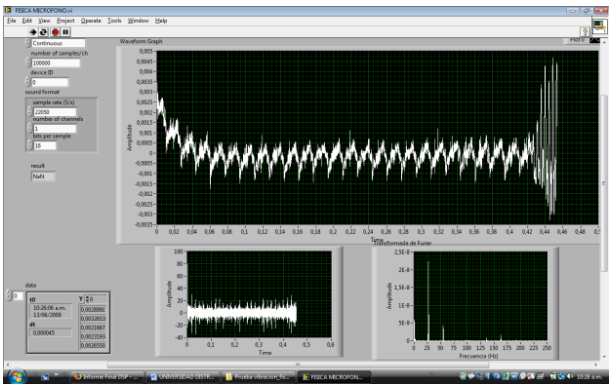
**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 15.** Patología vibracional de desbalanceo del eje.



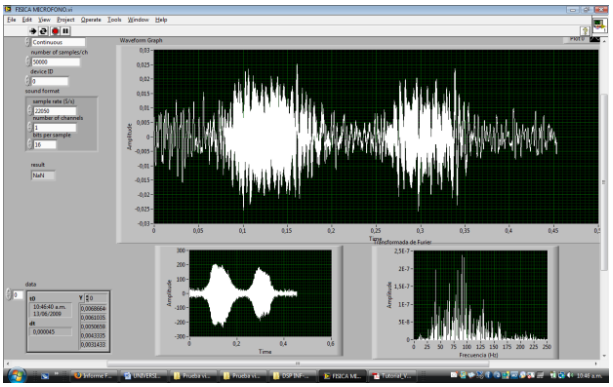
**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 16.** Patología vibracional de soltura estructural.



**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 17.** Patología vibracional de resonancias y pulsaciones.



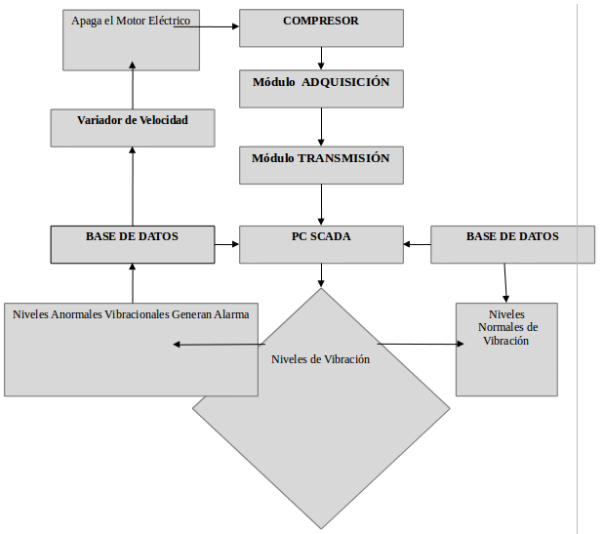
**Fuente:** elaboración propia.

## 4. Resultados

A manera de resultados se puede afirmar que:

1. Si los valores en amplitud superan los estándares preestablecidos de normal funcionamiento, se activa automáticamente una señal de alarma para ser verificada por el operario. Si la señal anormal persiste insistentemente por un tiempo determinado, se activa el apagado automático del motor eléctrico, desenergizando el variador de velocidad y con ello al compresor. Ver figura 18.

**Figura 18.** Flujo de datos vibracionales a través del sistema.




**Fuente:** elaboración propia.

2. El sistema arroja el resultado en un mensaje para el operario, donde especifica la posible falla que puede estar presentando la máquina y, si los valores predeterminados como normales rebasan la amplitud esperada, dispara una señal de alarma, que envía un pulso de emergencia al variador de velocidad del motor eléctrico.

3. El motor eléctrico gobierna la rotación del cigüeñal del compresor Worthington, deteniendo la alimentación eléctrica para éste y de esta manera frenar los mecanismos del compresor, evitando de esta manera un posible daño grave en sus componentes. Después de una verificación por parte del supervisor de la máquina, se estudia el problema más detenidamente y se decide ponerla en marcha o intervenirla en reparación.

4. La pantalla de diagnóstico graba varias veces las lecturas provenientes de la máquina. Primero en función del tiempo, para luego el programa lo transforme en función de la frecuencia. Dependiendo de la patología provocada a voluntad por el programador, se asigna un diagnóstico estándar como "Desbalanceo" o "Desalineación" .

5. Se puede observar el porcentaje de relación de similitud hallado por el sistema experto, donde se puede ajustar la cota por encima del 80 o 90%, dependiendo el grado de exigencia que se esté buscando con la aplicación del sistema vibracional.

6. Adicionalmente a ello se puede examinar el nivel de severidad del fallo de acuerdo a la norma ISO 10816, indicando si se encuentra en la zona A, B, C o D de acuerdo a la amplitud. Un mensaje alerta el estado actual de la máquina de acuerdo a la comparación de la base de datos. La pantalla de porcentaje de correlación nos permite visualizar el mismo, además de otros datos como hora y fecha, sintomatología y serie de la máquina. Los valores de severidad se pueden encontrar en las cuatro zonas expuestas anteriormente así:

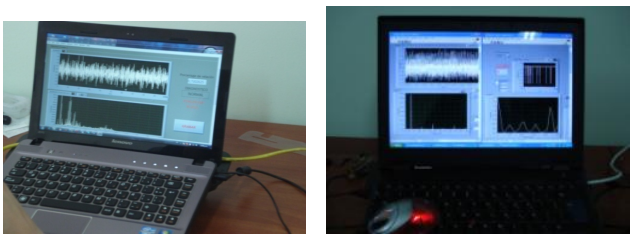
   Verde A: La máquina se encuentra en estado normal o satisfactorio.
   Amarilla B: La máquina está entrando en un estado de deterioro progresivo.
   Naranja C: La máquina se encuentra trabajando bajo valores anormales de operación.
   Roja D: Se debe detener la máquina inmediatamente para ser analizada y reparada.

7. El monitoreo puede ser observado en la sala de control incluyendo las señales de alarma para de esta manera determinar las acciones a seguir con base en la información recolectada tanto de porcentaje de correlación para determinar el desbalanceo o la desalineación, como el nivel de rigor de severidad del daño.

8. Gracias a que el sistema es inalámbrico, los operarios desde la sala de control no se exponen físicamente a ningún tipo de un riesgo, pues no se debe olvidar la interacción continua del compresor a niveles altos de presión del gas natural explosivo por naturaleza y de temperaturas elevadas propias del sistema de producción.

9. Con este pronóstico de fallas se puede visualizar, anticipar y planificar detenidamente el estado progresivo de desgaste de la máquina rotativa, pronosticando los problemas con antelación de tiempo suficiente como para planear las acciones correctivas y así poder proyectar adecuada y acertadamente las acciones de mantenimiento y prevenir la mayoría de fallos mecánicos que puedan presentarse en máquinas rotativas. Ver Figura 19.

**Figura 19.** Señales de vibración visualizadas en el PC.



**Fuente:** elaboración propia.

La técnicas predictivas en sí mismas son inútiles. Sólo tienen efectividad si se aplican las normas, conclusiones y acciones que proponen los ingenieros o técnicos que las realizan.

Con respecto al impacto esperado: el impacto social se puede manifestar si la fuente de vibración llega a causar problemas a las personas de la comunidad, o si en el proceso la maquinaria es causante de transmisión de vibración al piso repercutiendo en problemas a unidades habitacionales a su alrededor, por ejemplo, daños en estructuras y ruido causando inconformidad entre grupos de vecinos. El análisis de vibraciones contribuye a mejorar este aspecto del funcionamiento del equipo y de la salud de la planta. El Impacto económico: Uno de los objetos más importantes del proyecto es evitar pérdidas operacionales a la Empresa y que ello se refleje en el cobro al consumidor final, considerando el costo bastante bajo de la inversión en los dispositivos para análisis vibracional. El impacto económico es de preocupar a la industria ya que un problema de vibración no atendido puede repercutir en el daño de maquinaria e incluso, en daños físicos a personas causando pérdidas económicas por detención del proceso, mantenimiento correctivo, reparación en pérdidas e indemnización. El Impacto tecnológico: El presente proyecto puede materializar la idea de diseño, ensamble, adecuación y telemetría, de uno de los primeros proyectos concebido, diseñado y ejecutado propiamente en Colombia, con recursos limitados, pretendiendo equiparar los alcances tecnológicos realizados por diferentes corporaciones en otros países. Lo cual lo hace referente en la industria nacional. El Impacto al ambiente: En el funcionamiento de la máquina compresor de gas el único desecho que se va a generar será el residuo de la combustión de una parte del gas natural que alimenta el motor-generador que es muy limpio en relación a otros combustibles fósiles, por lo cual el ambiente no se verá afectado significativamente. El gas natural es una energía limpia que nos ofrece la naturaleza. Permite una combustión con alta eficiencia y ausencia de residuos, no es tóxico, es incoloro e inodoro. La combustión del gas natural no produce emisiones de $SO_2$, ya que está prácticamente exento de azufre, y produce menores emisiones de $NO_2$ que el petróleo, por unidad de energía obtenida y procesada. Finalmente, el Impacto físico y psicológico: El impacto físico y psicológico a las personas puede manifestarse de diferentes maneras, por ejemplo, cuando una fuente de vibración genera ruido a diferentes frecuencias y niveles sonoros en rangos no deseables, que puede alterar el comportamiento humano, puede causar daños irreversibles al oído incluyendo sordera. En este sentido se pretende que el proyecto permita a los operarios tomar las mediciones de comportamiento vibracional a distancia de la máquina, evitando recibir de primera mano las ondas sonoras físicas y las vibraciones potencialmente nocivas que puedan afectar su salud física y mental.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

El análisis de vibraciones ayuda a diagnosticar problemas en el compresor antes de que ocurra algún fallo catastrófico, adicionalmente nos ofrece:

1. Monitoreo continuo en tiempo real.
2. Tendencia de datos histórica.
3. Análisis de datos o señales accidentales o transitorias.
4. Alarma en parámetros inusuales de vibración.
5. Reducción en inventario por partes de repuesto y/o rectificaciones mecánicas debido a un mejor conocimiento sobre el estado de la maquina.
6. Reducción en las órdenes de trabajo de emergencia y tiempo extra de los trabajadores.
7. Reparaciones más eficientes, porque el equipo recién reparado puede ser bien y cuidadosamente inspeccionado para asegurar la calidad de la reparación.
8. Incremento en la capacidad de trabajo, debido a menos novedades por fallas en el equipo ocasionadas por excesiva vibración.
9. Mejores condiciones de seguridad, debido a que las maquinas no deben estar condicionadas a trabajar hasta que fallen.
10. Dado que los diversos fallos son progresivos, se debe estar atentos a los cambios que presenta la dinámica del equipo, analizarlos y tomar acción. Evitando que potenciales daños en los mecanismos de la máquina, sea conviertan en inmanejables e irreversibles.

Todo esto puede lograrse a través de un plan racional de medición y análisis de vibraciones. Es importante considerar que la productividad de una industria aumentará en la medida que las fallas en las máquinas disminuyan en el tiempo. Diagnosticando, evaluando y planteando soluciones a los problemas mecánicos de los equipos se deriva en la extensión de vida útil de las máquinas, aumento de la producción, así los costos de mantenimiento disminuirán sustancialmente. Aplicando la experiencia de análisis que aplique el operario o supervisor en distintos equipos rotativos, con la selección y combinación correcta de las herramientas expuestas, se obtiene un alto desempeño de trabajo, máxima flexibilidad en las variables, además de buena confiabilidad y eficiencia en los procesos industriales. [20] Queda el panorama accesible para

complementar y profundizar en el perfeccionamiento del proyecto para detectar daños aún más profundos y complejos en maquinaria y avanzar en la aplicabilidad del mantenimiento predictivo tendiendo éste a una filosofía de mantenimiento más integral como lo es el mantenimiento proactivo que involucra una acción más interactiva entre el hombre y la máquina, en aras de un sostenimiento, rendimiento y productividad más eficiente en la industria dada la fiabilidad de las máquinas y los sistemas que proveen respaldo y diagnóstico en tiempo real con un designio y visión vanguardista de progreso de la economía de un país, hacia niveles elevados de conciencia y productividad de bienes y servicios, en beneficio de toda la humanidad.

## Referencias

[1] Mora Villate, A. "Tecnología del Control de Procesos Industriales" , D.C., Facultad de Ingeniería, Publicaciónes Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, (1994). pp 21-26

[2] White, G. "Introducción al Análisis de Vibraciones" , USA, Azima DLI, (2010), pp 22-29.

[3] Beer F. P. Russell Johnston Jr. E. (1996). "Mecánica Vectorial para Ingenieros" Dinámica, México, D.F., Editorial Mc Graw Hill, 1996, pp 983-986.

[4] Manual de Evaluación de Impactos Ambientales en Colombia Ministerio de Ambiente, Bogotá, D.C, (2005). pp 23-27.

[5] Serway, R. A. "Física" Tomo I, México, D.F., Editorial Mc Graw Hill, (1996). pp 361-382.

[6] Bukowitz, D. O. "Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotativas" , Buenos Aires, Editorial Mc Graw Hill, (2001). pp 55-63.

[7] White, G. "Implementing a Machine Condition Monitoring Program" , USA, (2009). pp 43-55.

[8] Santamaría, R. H. "Tecnología Avanzada de Mantenimiento. Aspectos clave programa de monitoreo de vibraciones y la norma ISO 10816" , Madrid, Editorial Prentice Hall, (2005).pp 75-86.

[9] Sears, F.W., Zemansky M. W. "Física Universitaria" , Madrid, Editorial Aguilar, (1999). pp 504-519.

[10] Simmons, G. F. "Ecuaciones Diferenciales" , Madrid, Editorial Mc Graw Hill, (1998). pp 398-436.

[11] Romero, J.J. "Estadística y Probabilidad" , Bogotá, D.C., Editorial Santillana S.A., (2008). pp 30-41.

[12] Saavedra, P. N. "Medición y Análisis de Vibraciones: Técnica de Inspección, Equipos, Aplicaciones y Normativas" , Universidad de Concepción, Chile, (2008). pp 77-85.

[13] Bloch H., Geitner, F. "Machinery Failure Analysis Troubleshooting" , USA, (2004). pp 131-154.

[14] Guerra, Carrola y Villalobos. "Fundamentos de las Vibraciones Mecánicas" , UANL, (2005). pp 45-68.

[15] CTC, AC140-1D. Acelerómetro Mono Axial, Manual Inter-Technology INC. USA. (2010).

[16] NI 9234. "Operating Manual Instructions and Specifications" , NI USA. (2009).

[17] Couch, L. "Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analógicos" , México, Editorial Prentice Hall, (2008). pp 637- 656.

[18] Baley, D. W. "Practical SCADA Manual for Industry" , Australia, Ed. Elsevier. (2003).

[19] Fonseca, A., Fino, R. "Red de Datos para Instrumentación, Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico" . Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., (2003). pp 127-133, 169-186.

[20] Paresh, G. "Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance" , (2003). pp 134- 146.