

# Diseño de un sistema para análisis de las vibraciones mecánicas como método de mantenimiento predictivo en máquinas rotativas

Bojórquez D. Gilberto, Rivera M. José, Chacón M. Mario, Carillo R. Mariano

**Resumen**— En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema para monitoreo y detección de fallas en motores de rotación, por medio del análisis de las secuencias sonoras que éstos generan, utilizando algoritmos como la FFT. Los algoritmos se implementaron en una librería de acceso dinámico (DLL), y bajo la interfaz gráfica de un software desarrollado en el lenguaje de programación de propósito general *Delphi*. En los resultados que aquí se presentan demuestran el desarrollo de un sistema económico para el análisis de vibraciones, por los sensores que utiliza y las bases necesarias para el desarrollo a futuro de otros sistemas.

**Palabras clave**—Detección de fallas en motores de rotación, DLL, FFT, vibraciones.

## I. INTRODUCCIÓN

El empleo del análisis de las vibraciones mecánicas como método de mantenimiento predictivo en máquinas rotativas es una técnica que lleva siendo empleada con éxito desde hace muchos años en la industria.

Se han desarrollado una gran variedad de aplicación para este propósito, que consisten en sensores de vibraciones (acelerómetros) los cuales son colocados en varios puntos de la o las máquinas que se deseen monitorear, estos sensores o transductores se encargan de transformar las vibraciones en señales eléctricas. Luego, estas señales eléctricas, a través de la tarjeta de adquisición de datos son ingresadas a una computadora donde se realizan diferentes tipos de procesamientos para obtener toda la información que se requiere para el análisis y monitoreo de las vibraciones de las máquinas [1].

Sin embargo los sensores que se usan en este tipo de sistemas son muy costosos y poco prácticos, éstos podrían ser sustituidos por sensores como micrófonos para detectar las ondas sonoras y con base en esto determinar los niveles de vibración.

### A. Las vibraciones

El estudio de las vibraciones mecánicas es una rama de la mecánica, y por lo tanto de la ciencia que estudia los movimientos oscilatorios de los cuerpos, sistemas y de las fuerzas asociadas. El interés de las vibraciones mecánicas llega al mantenimiento industrial de la mano del mantenimiento preventivo, con el interés de alerta que significa un elemento

vibrante en una máquina, y la necesaria prevención de las fallas que traen las vibraciones a medio plazo [2].

El interés principal para el mantenimiento deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración, y la corrección del problema que ellas representan [5].

Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral, etc [2]

Algunas de las razones más habituales por las que una máquina o elemento de la misma pueden llegar a vibrar podrían ser las siguientes:

- vibración debida a la falta de alineamiento (maquinaria rotativa)
- vibración debida a la excentricidad (maquinaria rotativa).
- vibración debida a la falla de rodamientos y cojinetes.
- vibración debida a problemas de engranajes y correas de transmisión (holguras, falta de lubricación, roces, etc). [3]

Para el análisis de este tipo de vibraciones es esencial el modelado matemático, que se define de la siguiente manera.

La ecuación general de las vibraciones es:

$$m\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + b\frac{\partial y}{\partial t} + ky = p(t) \quad (1)$$

Donde “y” es la magnitud que sufre variaciones periódicas temporales,  $P(t)$  la variable de reforzamiento o fenómeno incidente de la vibración;  $a$ ,  $b$ ,  $y$   $k$  son las constantes características del sistema.

Utilizando transformada de Laplace, tenemos que:

$$as^2 y(s) + bsy(s) + ky(s) = p(s) \quad (2)$$

$$(as^2 + bs + k)y(s) = p(s)$$

Manuscrito recibido el 16 de Agosto de 2006.

Rivera M. José es profesor investigador en la división de estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua. (e-mail: jrivera@itchihuahua.edu.mx)

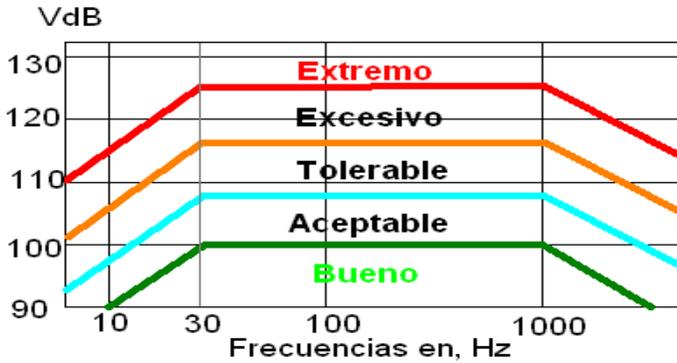


Fig. 1 Gráfica del grado de vibración en máquinas.

$$\frac{y(s)}{P(s)} = G(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{a}s + \frac{k}{a}} \quad (3)$$

Observamos que la ecuación 3 nos define la función de transferencia general de nuestro sistema de vibración, lo cual facilita el modelado y elaboración de simulaciones [4]. El estado de una máquina se determina mejor por una serie de mediciones de vibración hecho en un largo tiempo. Normas absolutas se pueden usar como guía si no hay datos históricos [2].

En la figura 1 se muestra la relación de las normas absolutas que se pueden aplicar a un gran número de máquinas rotativas con una confianza razonable.

## II. DESARROLLO

Debido a que las vibraciones mecánicas generan señales sonoras de la misma frecuencia [5], se usará un sistema de captura de audio para analizar las componentes de frecuencia que se encuentran en las ondas sonoras, y de esta forma determinar las vibraciones mecánicas.

El sistema está formado por un software, el cual se encarga de fungir como manejador de la tarjeta de sonido de una PC, para poder capturar en forma digital la señal de audio proveniente del micrófono, tal como se muestra en la figura 2.

El software implementa un algoritmo de análisis, que básicamente se encarga de comparar una señal adquirida con una señal patrón que se encuentra en una base de datos de la computadora y de esta forma poder determinar disturbios que se hayan generado en las máquinas.

El sensor que se utiliza para capturar las ondas sonoras es un micrófono piezoeléctrico estéreo, con una frecuencia de 50Hz ~ 22KHz y una sensibilidad de  $-58 \pm 3$ dB. El cual se encarga de transformar las señales de audio en señales eléctricas, las cuales posteriormente serán capturadas por la tarjeta de sonido.

La tarjeta de adquisición de datos que se usó es la Realtek AC'97 Audio, que es una tarjeta convencional de audio, que nos permite muestrear señales de hasta 22,050 Hz, suficiente para el propósito de este proyecto.

### B. Acondicionamiento de la señal

Sin embargo cuando se obtiene la señal de audio, contiene información que no es importante para el análisis, así que, se usa

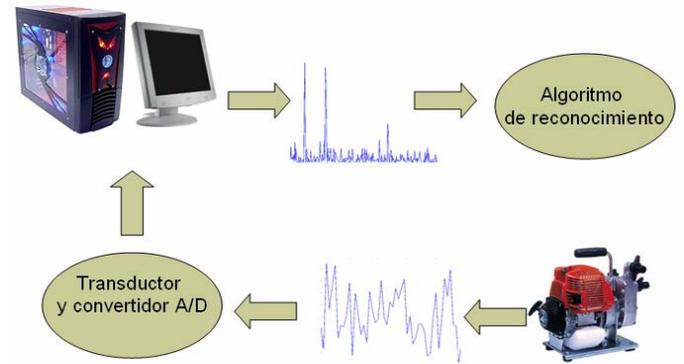


Fig. 2 Descripción del sistema de adquisición de datos.

un sistema acondicionador de señal para generar una secuencia que contenga solamente aquella información que requerimos para nuestro algoritmo.

Debido a que las vibraciones que se pueden presentar en máquinas rotativas, no superan los 4kHz [6], se usa un filtro digital para eliminar frecuencias superiores a este valor. Para este propósito se diseñó un filtro Butterworth IIR, el diseño del filtro se llevó a cabo mediante la función “butter” de Matlab. El filtro es de orden 10, este valor se obtuvo de varias pruebas realizadas, cuando el orden disminuía, se presentaba una atenuación de la señal en la salida del filtro, y al aumentar el orden del filtro, su salida no mostraba cambios significativos, pero si aumentaba el tiempo de computo del algoritmo.

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{0.05 + 0.56z^{-1} + 2.5z^{-2} + 6.7z^{-3}}{1 + 4.4z^{-1} + 9.9z^{-2} + 13.8z^{-3}} \dots$$

$$= \frac{11.8z^{-4} + 14.2z^{-5} + 11.8z^{-6} + 6.7z^{-7}}{13.2z^{-4} + 9.0z^{-5} + 4.4z^{-6} + 1.51z^{-7}} \dots$$

$$\dots \frac{2.5z^{-8} + 0.5z^{-9} + 0.05z^{-10}}{0.35z^{-8} + 0.04z^{-9} + 0.0031z^{-10}} \quad (4)$$

En la ecuación 4, se muestra la función matemática que define al filtro pasa bajas, usado para eliminar aquellas componentes de frecuencia superiores a los 4kHz, y en la figura 3 se muestra su comportamiento en la frecuencia.

El filtro podría haber sido implementado directamente en el programa de aplicación, mediante el lenguaje de programación de alto nivel como lo es Delphi, donde fue desarrollada la interfase grafica, sin embargo se optó por ser implementado mediante una dll escrita en Matlab, esto para propósito didáctico, y así ejemplificar el uso de funciones de Matlab en lenguajes convencionales, y lograr con ello disminuir el tiempo de desarrollo del software.

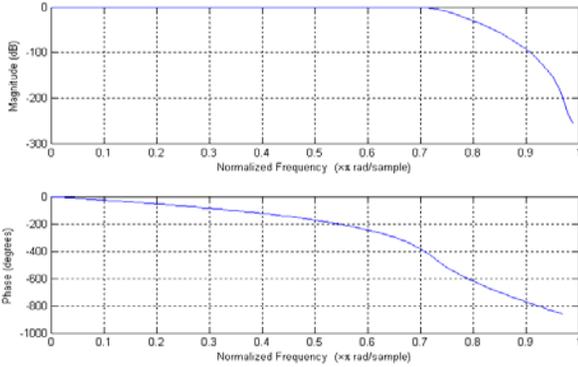


Fig. 3 Análisis en la frecuencia del filtro para acondicionador de señal.

La función “datos”, que a continuación se lista, adquiere la señal que ha sido muestreada con una frecuencia de 11025 Hz y con un tiempo de adquisición de 1s, posteriormente esa secuencia es procesada por el filtro pasa bajas de 4kHz.

Función de adquisición y filtrado de datos

```
function y = datos
    AI = analoginput('winsound');
    chan = addchannel(AI,1);
    duration = 1; %x second acquisition
    set(AI,'SampleRate',11025)
    ActualRate = get(AI,'SampleRate');
    set(AI,'SamplesPerTrigger',duration*ActualRate)
    set(AI,'TriggerType','Manual')
    blocksize = get(AI,'SamplesPerTrigger');
    Fs = ActualRate;
    start(AI)
    trigger(AI)
    data = getdata(AI);
    delete(AI)
    clear AI
    fc = 4000
    fs = 11025
    Wn = (fc/(fs/2));
    [B,A]=butter(10,Wn)
    y = filter(B,A,data)
```

Como vemos en la figura 3 tenemos una frecuencia angular normalizada de corte de  $W_n=0.72\pi$  lo cual corresponde a  $f_c=4000\text{Hz}$ , esto por la relación de la ecuación 5.

$$F_c = \frac{W_n f_s}{2} \tag{5}$$

*B. Diseño del algoritmo del sistema*

Cuando la señal es obtenida después de ser filtrada, hay una etapa de procesamiento, la cual se encarga de descomponer la secuencia de datos  $x_a(n)$  en una secuencia de frecuencias  $x_a(k)$ , una vez que la señal puede ser analizada en el dominio de la frecuencia, se toman 2 muestras en diferentes tiempos y se determina que componentes de frecuencia no están contenidas en ambas muestras, de esa forma se eliminan los ruidos esporádicos, cuando existen ruidos constantes que provienen de otros motores en el mismo rango de frecuencias de las señales que nos interesan, se descartan por su bajo nivel en dB, ya que señales de potencia menor o igual a 100dB no son críticas, esto por la relación de la figura 1. En la figura 4, se muestra el

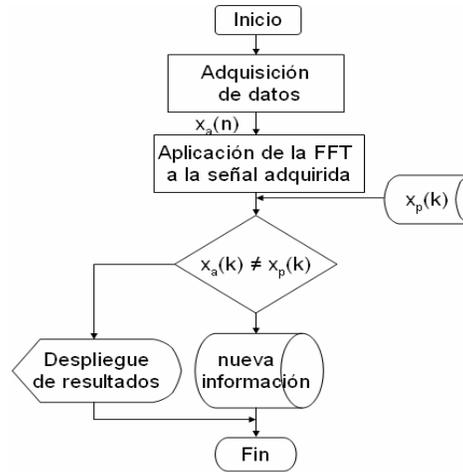


Fig. 4 Diagrama de Flujo del algoritmo del sistema.

diagrama de flujo del algoritmo.  $x_p(k)$  representa una señal patrón almacenada en una base de datos, la cual está en función de índices  $k$ , ya que se encuentra en el dominio de la frecuencia, esta secuencia es comparada con la señal  $x_a(k)$ , que representa la información adquirida en tiempo real.

Si existen componentes de frecuencia en  $x_a(k)$  que no se encuentren presentes en  $x_p(k)$ , podemos determinar que el sistema que está generando a  $x_a(n)$  está presentando anomalías que podrían ser fallas mecánicas, en este caso se generaría información útil para poder predecir en análisis futuros de que tipo de falla se trata y como podría ser solucionada, de esta forma los datos procesados en este sistema pueden ser aplicados para predecir el mantenimiento de las máquinas. La secuencia  $x_a(k)$ , es obtenida después de la implementación del algoritmo de la FFT, este algoritmo fue implementado en una función para Matlab. El listado de la función FFT se muestra a continuación. Las funciones DATOS y FFT se encapsularon en una librería de acceso dinámico (DLL), para ser exportados al lenguaje de programación Delphi, ya que en este lenguaje se desarrolló la interfaz gráfica del usuario.

Función en Matlab para la implementación del algoritmo de la FFT

```
function y=FFT(data)
    xfft = abs(fft(data));
    index = find(xfft == 0);
    xfft(index) = 1e-17;
    mag = 20*log10(xfft);
    blocksize = 4000*2
    mag = mag(1:floor(blocksize/2));
    f = (0:length(mag)-1);
    f = f(:);
    y = mag
```

En Delphi se desarrolló el algoritmo del sistema auxiliándonos de las funciones DATOS y FFT, el cual consiste en comparar una secuencia de datos de un patrón  $x_p(z)$  que define el comportamiento normal de la máquina de rotación que se está analizando con la secuencia que se está adquiriendo  $x_a(z)$ .

En la figura 5 se muestra la ventana de *comtool* donde se generó la DLL.

La DLL se constituye de una Clase (DSP), que contiene dos objetos (DATOS y FFT), esto se muestra en la Figura 6.

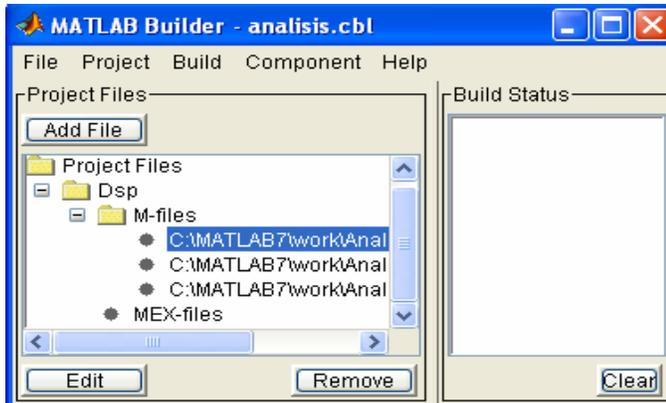


Fig. 5 Ventana de comtool de Matlab para generación de DLL a partir de funciones.

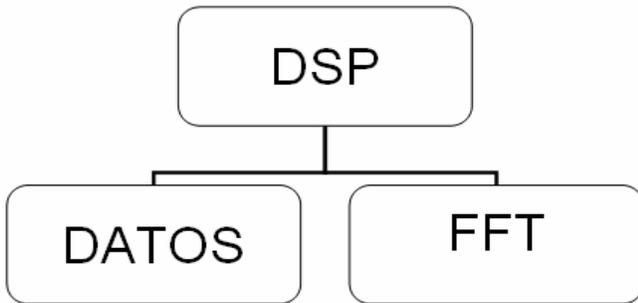


Fig. 6 Composición de la DLL.

C. Diseño de la interfaz gráfica.

La secuencia  $x_p(z)$  se obtiene a partir de una muestra que puede ser obtenida desde la ventana de la Figura 7, En esta ventana podemos configurar el tiempo de adquisición de la señal, por defecto está configurada para 1s. Sin embargo, si aumentamos el tiempo de adquisición, la señal se convierte en el promedio del número de secuencias proporcional al tiempo en segundos de adquisición, con ello también podemos disminuir errores de ruido.

También nos permite cargar la secuencia adquirida  $x_p(z)$  como referencia para la comparación con la señal a muestrear  $x_a(z)$ . Dándonos la posibilidad de almacenar esta secuencia para comparaciones futuras y así determinar en nivel de cambio de la señal de la máquina con respecto al tiempo y poder predecir posibles fallas antes de que éstas se presenten. En la Figura 8 se muestra la IDE del software, donde podemos ver la comparación de las señales  $x_p(z)$  y  $x_a(z)$ .

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizaron dos pruebas para análisis y obtención de resultados. Los cuales se muestran a continuación.

La primera prueba consistió en probar el comportamiento del sistema para diferentes componentes de frecuencia. Al sistema se le alimentó con una señal de audio, con componentes de

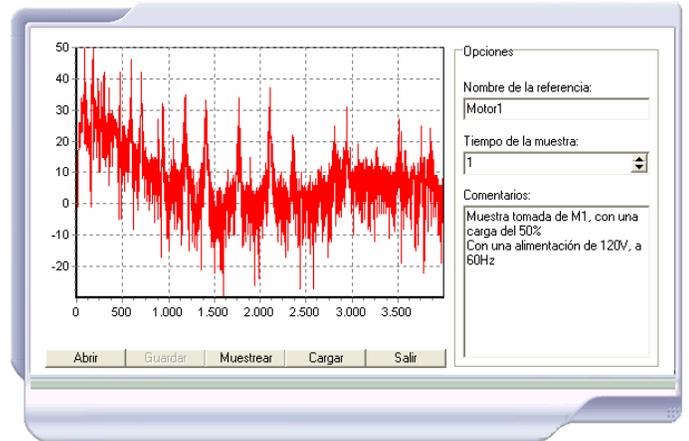


Fig. 7 Ventana de adquisición de la  $x_p(z)$ .

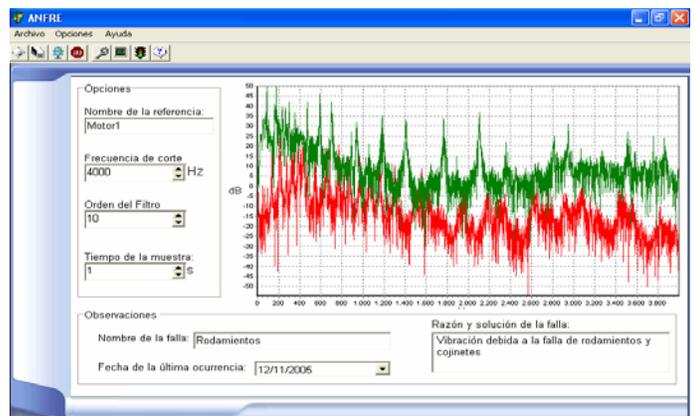


Fig. 8 IDE del Software.

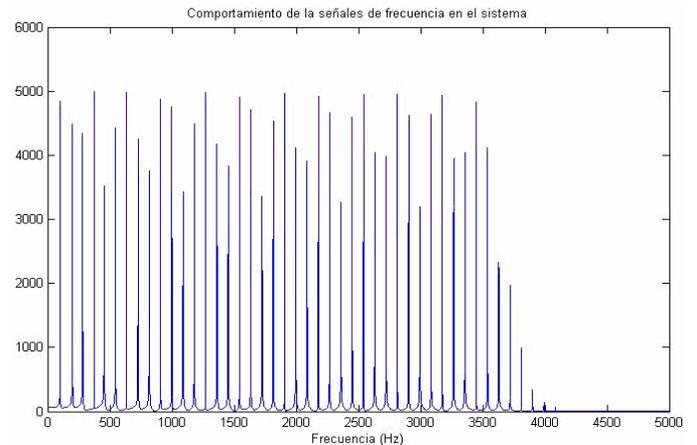


Fig. 9 Comportamiento del sistema ante una señal de audio de componentes de frecuencia entre 100Hz y 5000Hz.

frecuencia desde 100Hz hasta 5000Hz, con intervalos de 100Hz. Como podemos ver en la figura 9, el sistema presenta una atenuación de componentes de frecuencias para señales superiores a los 4 kHz, como lo establece el filtro pasa-bajas que describe la ecuación 4.

Una segunda prueba realizada al sistema fue para el algoritmo que se implementó en este software, se hizo la captura de cuatro señales de una misma fuente, en este caso un motor de

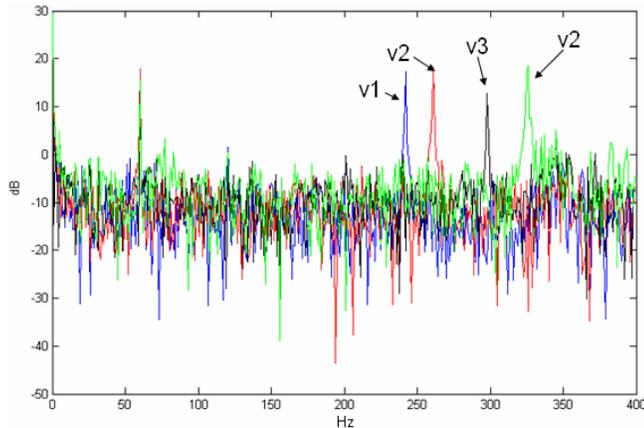


Fig. 10 Empalme de las 4 muestras.

AC pero con diferentes velocidades de rotación, y nos dio como resultado cuatro secuencia de datos donde su variación más significativa estaba en el bloque que comprende los 0 Hz hasta los 400 Hz.

En la figura 10, se muestran las 4 secuencias empalmadas, las velocidades se denotan por v1, v2, v3, v4, podemos ver que para cada velocidad del motor existe una componente de frecuencia diferente, esto en proporción a la frecuencia de vibración mecánica del motor.

#### IV. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, podemos asegurar que el sistema de adquisición de datos mediante percepción de ondas sonoras resulta un muy buen método, y el algoritmo utilizado nos presenta una buena alternativa para determinación de frecuencias y presenta una muy buena alternativa para este tipo de análisis y un bajo costo en cuanto a los sensores, los algoritmos utilizados en este sistema, pueden ser el punto de partida para el desarrollo de un segundo software escrito para sistemas operativos tales como Palm SO y Windows Mobile [6], para de esta forma crear un sistema portátil haciendo mas versátil y práctico el proceso de prevención de fallas de motores de rotación.

Cabe señalar que este proyecto que se presentó en este artículo es meramente de carácter didáctico, ya que muestra una de las muchas aplicaciones que podrían desarrollarse con una computadora, y la teoría de análisis de señales como filtros digitales y la transformada discreta de Fourier, a su vez este sistema podría ser usado para determinar posibles fallas en motores como un análisis previo, sin embargo no definitivo, ya que en este sistema aun faltarían varias etapas de desarrollo como su calibración, caracterización y validación.

#### RECONOCIMIENTOS

Agradezco al CONACYT por el apoyo recibido a través de la beca otorgada para mis estudios.

#### REFERENCIAS

- [1] Sistema de Evaluación y Diagnóstico de Máquinas Rotativas mediante Análisis de Vibraciones *National Instruments* <http://www.ni.com>.

- [2] Diagnóstico de Vibraciones en Máquinas Rotativas. <http://www.dliengineering.com/section.asp?nID=22>
- [3] Diferentes Tipos de Vibraciones Mecánicas <http://www.monografias.com>
- [4] Modelos matemáticos de vibraciones <http://www.oscarbarajas.com/vibration.htm>
- [5] Glenn D. White, Introducción a la vibración en máquinas. Predict-DLI 1997
- [6] Jason Tranter, Information and power in your hands: data collectors meet mobile computers -, Application note Predict-DLI, 1998
- [7] Thurston Brooks & Brett Gidge Next generation vibration sensors show their dexterity - (Wilcoxon Research), Machine Plant and Systems monitor, Mayo 1998.



**Delgado B. Gilberto** recibió el título de ingeniero Electrónico en Sistemas Digitales en el año 2004 por el Instituto Tecnológico de los Mochis (ITLM), Actualmente cursa la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el ITCH. Es miembro activo de la IEEE y de las sociedades de Instrumentation and Measurement, Communications, Power Engineering, Signal Processing y Computational Intelligence Society, actual integrante de la rama estudiantil IEEE chihuahua. Áreas de interés: Instrumentación y control, comunicaciones, sistemas digitales, procesamiento digital de señales, redes neuronales, lógica difusa y sistemas distribuidos.



**Mejía R. José** en 1987 obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica con especialidad en instrumentación en el Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán Jal. Obtuvo el grado Maestro en Ciencias en 1983 en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Chihuahua. De 1985 a 1995 laboró en la empresa Cable Productos de Chihuahua y desde 1995 a la fecha es profesor investigador en la división de estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua. Ha publicado internacionalmente varios artículos científicos y técnicos. Sus áreas de investigación son: Instrumentación y control, Metrología, Estudios de confiabilidad, procesamiento digital de señales, y desarrollo de aplicaciones con lógica difusa y redes neuronales.



**Chacón M. Mario Ignacio**, Recibió el título de Ingeniero en Electrónica en 1982 del ITCh en 1985 recibió el grado de Maestro en ciencias en Ingeniería Electrónica del ITCh. En 1998 Obtuvo el grado de Ph. D. en ingeniería Eléctrica en la Universidad Estatal de Nuevo México U.S.A. Es profesor investigador en la división de estudios de Posgrado e Investigación del ITCh. El Dr. Chacón ha publicado internacionalmente varios artículos científicos y técnicos. Es miembro *Senior* de la IEEE y miembro de la sociedad de reconocimiento de patrones. Sus áreas de investigación son: Visión por computadora, procesamiento digital de señales, reconocimiento de patrones, sistemas digitales, y aplicaciones con lógica difusa y redes neuronales.



**Carrillo R. Mariano** recibió el grado de Ingeniero Electromecánico en la especialidad de instrumentación por el Instituto Tecnológico de Delicias en el año 2003. Actualmente cursa el cuarto semestre de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Chihuahua, y su área de investigación es Instrumentación y Control. Es miembro activo de la IEEE y de las sociedades de Instrumentation and Measurement, Communications, Power Engineering, Signal Processing y Computational Intelligence Society, actual integrante de la rama estudiantil chihuahua. Sus áreas de interés son sensores inteligentes y redes neuronales.