

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS

### DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A VIRTUAL ANALYZER OF MECHANICAL VIBRATIONS

Edgar Estupiñán P.<sup>1</sup> César San Martín<sup>2</sup> Rene Solaligue M.<sup>1</sup>

*Recibido el 31 de agosto de 2005, aceptado el 18 de enero de 2006*

*Received: August 31, 2005 Accepted: January 18, 2006*

#### RESUMEN

El desarrollo de la electrónica y la computación ha propiciado de manera satisfactoria el desarrollo de técnicas de análisis de señales con aplicación al procesamiento de señales vibratorias. El alto costo de instrumentos comerciales para la recolección y análisis de vibraciones, así como su arquitectura cerrada, ha llevado a buscar nuevas alternativas. Los “instrumentos virtuales” o instrumentos basados en sistemas de adquisición de datos constituyen una herramienta poderosa para el desarrollo de instrumentos más económicos y flexibles. En este trabajo se describe el diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones de dos canales, desarrollado en ambiente *LabVIEW*. En éste se han incluido varias técnicas de análisis de señales útiles para el diagnóstico de fallas de máquinas rotatorias y con la posibilidad de ser controlado y/o monitoreado remotamente por medio de una red Internet o Intranet.

Palabras clave: Instrumento virtual, análisis de vibraciones, adquisición de datos, mantenimiento predictivo, monitoreo.

#### ABSTRACT

*The development of electronics devices and computing has satisfactorily contributed to the development of new signal analysis techniques applied to the processing of vibratory signals. The high price of commercial instruments like vibration collectors and analyzers and their closed architecture have made necessary to look for new alternatives. Data acquisition systems are a powerful tool for developing more economic and versatile instruments. In this paper a design and implementation of a virtual vibration analyzer of dual channel is presented, which was developed using LabVIEW. In this analyzer, several signal analysis techniques for diagnosis and analysis of faults of rotative machines have been included as well as the option of its remote control via Internet or Intranet.*

*Keywords: Virtual instrument, vibration analysis, data acquisition, predictive maintenance, monitoring.*

#### INTRODUCCIÓN

Hoy en día la mayoría de las industrias dentro de sus programas de mantenimiento predictivo utilizan el monitoreo y análisis de las vibraciones con el fin de establecer cuál es el estado de salud mecánica de las máquinas y en particular de sus elementos más críticos y de esta manera poder prevenir fallas catastróficas. Existen distintas técnicas de análisis de señales vibratorias, algunas de las cuales se describen brevemente a continuación.

– El *análisis frecuencial* (o espectral) es la técnica más comúnmente empleada para el diagnóstico de fallas. Utilizando esta técnica se pueden identificar fallas típicas tales como desbalanceo de rotores, desalineamiento, soldaduras mecánicas y defectos en rodamientos. La idea fundamental del análisis frecuencial es encontrar la relación existente entre la frecuencia de las componentes discretas presentes en el espectro y la frecuencia de las fuerzas dinámicas que generan las vibraciones [1], [2].

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá. Casilla 6-D, Arica-Chile. eestupin@uta.cl, rsolaligue@yahoo.com

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Frontera. Casilla 54-D, Temuco-Chile. csmarti@ufro.cl

– El *análisis de la forma de onda* o de la vibración en el dominio tiempo consiste en extraer información útil para el diagnóstico del gráfico de la amplitud vibratoria versus el tiempo. Resulta ser de gran utilidad cuando para fallas diferentes los espectros son similares. Una vibración con una sola componente frecuencial de tipo sinusoidal, con amplitud  $x_\phi$ , frecuencia  $\omega$  y fase  $\phi$  se puede expresar como:

$$x(t) = x_\phi \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (1)$$

– El *análisis de fase* es el estudio de la diferencia de tiempo en que suceden dos acontecimientos relacionados entre sí. Su análisis permite, por ejemplo, conocer la forma de deflexión en operación de una estructura.

– El *análisis de órbitas* consiste principalmente en analizar la gráfica de la amplitud de la vibración horizontal  $x(t)$  en función de la vertical  $y(t)$ , para una sola frecuencia a la vez.

– El *análisis de coherencia* permite relacionar causa-efecto entre dos señales vibratorias, estimando la relación lineal que existe entre dos señales vibratorias. Se define la función de coherencia ordinaria,  $\gamma_{xy}^2(f)$  entre dos señales  $x(t)$  e  $y(t)$  como:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{G_{xy}^2(f)}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)} \quad (2)$$

$$0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1.0$$

donde:

$G_{xx}(f)$  y  $G_{yy}(f)$  : espectro de potencia o autoespectro de señal  $x(t)$  e  $y(t)$  respectivamente.  
 $G_{xy}(f)$  : espectro de potencia cruzado entre  $x(t)$  e  $y(t)$ .

En la expresión anterior, si  $\gamma_{xy}^2(f) = 1.0$ , las señales son perfectamente coherentes y si  $\gamma_{xy}^2(f) = 0$ , las señales son incoherentes, es decir, no existe ninguna relación causa-efecto entre ellas [1].

Otras técnicas utilizadas para el análisis de vibraciones son: promedios sincrónicos en el tiempo, demodulación o análisis de envolvente, análisis de transientes, análisis de partidas o paradas, análisis cepstrum, entre otras [2].

Para la medición y el análisis de vibraciones existe una amplia gama de instrumentos comerciales, la mayoría de ellos incluye solamente técnicas básicas de análisis digital de señales, son de arquitectura cerrada y su precio es generalmente elevado. El desarrollo de la tecnología digital

ha hecho posible desarrollar instrumentos, basados en sistemas de adquisición de datos (*SAD*) a un costo menor y con una alta potencialidad, debido principalmente a que sin necesidad de una gran inversión adicional (en tiempo y dinero) es posible implementar en ellos poderosas técnicas de análisis digital de señales, que, acompañadas de instrumentos básicos de adquisición, se convierten en herramientas complejas y altamente flexibles y con posibilidades insospechadas [3], [4].

En este trabajo, se describe el diseño e implementación de un analizador de vibraciones basado en un *SAD*, con capacidad para monitorear y analizar vibraciones en uno y dos canales simultáneamente. El analizador permite calcular espectros, formas de onda, analizar órbitas, coherencia, así como también almacenar los datos adquiridos para su posterior análisis.

### SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los *SAD* constituyen la interfaz entre el mundo análogo y el digital. Las etapas fundamentales para un instrumento basado en *SAD* se muestran en la figura 1 y ellas son: etapa transductora, de acondicionamiento, de adquisición y etapa de registro y procesamiento de información [5].

Los transductores son los encargados de medir los fenómenos físicos y proveer una señal eléctrica que pueda ser interpretada por un sistema de adquisición, de acuerdo a la relación entrada/salida que tenga el transductor (sensibilidad). Los transductores más comúnmente utilizados para la medición de vibraciones son los acelerómetros piezoeléctricos, además de los velocímetros sísmicos o electrodinámicos y los sensores de desplazamiento sin contacto. Algunos transductores requieren de un acondicionamiento especial, como suministro de voltaje, disminución de impedancia, aislamiento y amplificación.

La etapa de adquisición está básicamente constituida por elementos como conversores A/D (análogo/digital) y conversores D/A. Para la adquisición de señales dinámicas, como las de vibración y ruido, se recomienda utilizar tarjetas de adquisición de datos con alta resolución (mayor de 16 bits), bajo nivel de ruido y con una velocidad de muestreo por canal mayor de 100 kHz [6].

Es en la etapa de procesamiento donde se analizan, las señales vibratorias utilizando técnicas de procesamiento digital de señales. Para ello se puede hacer uso de diferentes lenguajes de programación que permitan implementarlas de manera eficiente y confiable.

Finalmente, está la etapa de registro, en donde se almacena la señal vibratoria y los resultados del procesamiento para su posterior visualización.



Fig. 1 Etapas principales de un SAD.

### EQUIPOS COMERCIALES PARA LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES MECÁNICAS

Comercialmente existe una diversidad de equipos para la recolección y análisis de vibraciones, los cuales pueden variar desde simples medidores de vibración global hasta especializados instrumentos de diagnóstico, que incluyen varias técnicas de análisis. Dentro de estos analizadores, los más comúnmente utilizados en Chile, tanto por empresas mineras como de celulosa (pioneras en la implementación de técnicas predictivas en sus programas de mantenimiento), se encuentran: el CSI-2120 y 2130 de la empresa *Computational System Incorporated*, el CMVA 65 de la empresa *SKF Condition Monitoring*, el DCX-XRT y DCA-31 de la empresa *DLI Engineering*, el Snapshot de la empresa *Bently Nevada* y el Vibrotest 60 de la empresa *Schenck Corporation*. Estos analizadores tienen como factor común su arquitectura cerrada y su alto precio (usualmente entre US\$12.000-US\$40.000). Se diferencian principalmente por el rango dinámico de sus conversores A/D, el número de canales de adquisición (simultáneos o multiplexados), resolución espectral, ancho de banda, velocidad de adquisición de datos, software de manejo de información, técnicas de análisis implementadas y sistema de protección y robustez frente a medios hostiles.

### INSTRUMENTOS VIRTUALES PARA LA MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Se conocen con el nombre de instrumentos virtuales, aquellos que se obtienen combinando un hardware de operación no exclusiva con un poderoso software, obteniendo como resultado un instrumento de una arquitectura abierta [3], [4], es decir, con posibilidad de ser modificado cuando así se requiera. Por ejemplo, cuando sea necesario incluir una nueva técnica de análisis de señales no contemplada en el instrumento diseñado originalmente, bastará con incluir su algoritmo y adicionar

la nueva función al instrumento. Ahora bien, si lo que se requiere es una mayor velocidad de adquisición de datos o un mayor número de canales, está la posibilidad de cambiar la tarjeta de adquisición por una de mayor especificación o implementar un sistema de acondicionamiento de señales, según sea el caso [6]. Lo anterior constituye la ventaja fundamental de los llamados “instrumentos virtuales” sobre los “instrumentos tradicionales”, siendo esto de gran utilidad especialmente para su uso en laboratorios de docencia e investigación, en donde es preferible contar con equipos de arquitectura abierta y flexible.

Por medio de los SAD, se pueden desarrollar instrumentos analizadores de vibración de más bajo costo que un analizador comercial. Sin embargo, algunas de las limitantes que han restringido el uso de estos instrumentos en las empresas industriales son, por una parte, el desconocimiento certero de su confiabilidad y, por otra, su comportamiento en un medio ambiente industrial, que en muchos casos puede ser agresivo (polvo, humedad, altura, componentes químicos, etc.).

### DESARROLLO DE UN ANALIZADOR VIRTUAL DE VIBRACIONES

En el presente trabajo, se ha desarrollado un analizador virtual de vibraciones para ser utilizado tanto a nivel de laboratorio (docencia e investigación) como en la industria. Esto incluye las tareas de medición, monitoreo y diagnóstico de fallas de máquinas rotatorias. En el analizador se han incluido técnicas de análisis de vibraciones tales como: el análisis espectral, análisis de forma de onda, medición de fase y promediación sincrónica. El analizador tiene la posibilidad de adquirir señales vibratorias por un canal o dos canales simultáneamente, lo cual ha permitido implementar las técnicas de análisis de órbitas y de coherencia. Además, posee un módulo de lectura de datos y un módulo de adquisición de datos y registro de información.

El software utilizado para el desarrollo del analizador es el *LabVIEW* (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). El *LabVIEW* es un lenguaje de programación gráfica, que permite desarrollar aplicaciones de monitoreo, control y registro de datos así como también de realizar cálculos complejos de señales análogas digitalizadas por medio de un SAD [5], [7]. Los módulos (códigos o programas) creados con *LabVIEW* son llamados VIs, que significa instrumentos virtuales. Cada VI, tiene tanto un panel frontal como un diagrama de bloques. El panel frontal corresponde a la interfaz del instrumento con el usuario y el diagrama de

bloques corresponde al conexionado de todos los controles y variables, que tendría cierto parecido al diagrama del esquema eléctrico de un instrumento.

El analizador ha sido desarrollado con una programación del tipo modular por medio de Sub VIs (subprogramas) que ejecutan las principales funciones del analizador de manera independiente. Esto permite poder hacer modificaciones futuras tales como, por ejemplo, adicionar nuevas técnicas de análisis sin necesidad de modificar todo el instrumento y sin necesidad de comprender y/o estudiar todo el código de programación.

El analizador se ha desarrollado con una interfaz gráfica similar a la que tiene un analizador comercial [8], [9], con la diferencia de que se tiene una mayor flexibilidad en la configuración de los parámetros de monitoreo, registro y adquisición.

El instrumento virtual tiene una estructura modular, está constituido por un programa fuente o estructura principal llamada *Master* (ver figura 2), que es la encargada de administrar y conectar a cada uno de los módulos o estructuras secundarias, encargadas del procesamiento (ver figura 3).

El programa *Master* permite seleccionar si la tarea es de lectura o adquisición, como se puede observar en su panel frontal (ver figura 4). Para la aplicación de adquirir datos, se debe especificar el número del dispositivo de adquisición (según configuración del dispositivo de adquisición en el PC), así como también el número asignado a los canales de entrada, en los cuales se conectan los sensores de vibración. También se debe seleccionar la señal de trigger (señal de disparo o referencia) a utilizar, la resolución espectral y la frecuencia máxima de análisis. En el caso de la aplicación de lectura de datos, no se requiere definir los parámetros anteriores, ya que se recuperan los datos (formas de onda, espectros, etc.), con los parámetros de adquisición con que fueron obtenidos.

Después de definir si la tarea es de lectura o de adquisición de datos, se selecciona el módulo o estructura secundaria que se encargará del procesamiento de la señal. A cada módulo le corresponde una interfaz gráfica diferente. La figura 5 muestra, por ejemplo, la interfaz gráfica del módulo *Un Canal*.

Los módulos incluidos en el analizador tanto para la adquisición de datos como para la lectura de datos son:

–*Un Canal*: Aplicación útil para adquirir y procesar la señal vibratoria proveniente de un solo sensor, con o sin trigger.

–*Dos Canales*: Aplicación útil para adquirir y procesar simultáneamente dos señales vibratorias, con o sin trigger.  
–*Órbita*: Esta aplicación permite mediante el panel frontal visualizar órbitas vibratorias, adquiriendo simultáneamente la señal de vibración vertical y horizontal.

–*Coherencia*: Mediante esta aplicación, es posible determinar la coherencia entre dos señales vibratorias.

Para comprobar el buen funcionamiento del analizador y corregir posibles desviaciones o errores en el código de programación, se realizaron pruebas de laboratorio tanto con señales simuladas como experimentales. Para las mediciones se utilizó la tarjeta de adquisición de datos *NIPXI-4472*, la cual se caracteriza por su alta resolución (24 bits), alta velocidad de muestreo (máxima de 102.4kS/s) y con capacidad de adquisición de hasta 8 canales simultáneamente [10]. Cada canal de la tarjeta posee, además, el acondicionamiento requerido para la conexión de sensores *ICP* o de tipo piezoeléctrico. Como sensor se utilizó un acelerómetro piezoeléctrico, SKF, de sensibilidad 100 mV/g. A continuación se describen dos de las experiencias prácticas llevadas a cabo, con el fin de ilustrar la aplicabilidad del analizador virtual.

#### **Análisis de vibraciones en un motor eléctrico**

En este primer caso, se utilizó el analizador virtual para analizar y diagnosticar la falla en un motor eléctrico AC de dos pares de polos, con frecuencia de alimentación de 50Hz. En la figura 5, se muestran la forma de onda y el espectro de la señal vibratoria adquirida, utilizando el módulo de análisis de *Un Canal*. Al analizar el espectro, se observan claramente dos componentes frecuenciales, una componente a la velocidad de rotación del motor (24,78Hz), de magnitud 16,5mm/s, causada por un desbalanceamiento del rotor y la otra a dos veces la frecuencia de la línea eléctrica (100Hz), de magnitud 4mm/s, producida probablemente por una excentricidad estática. Después de un análisis y verificación del montaje del motor, se demostró que la excentricidad estática fue producida, porque la carcasa del motor estaba deformada debido a que su base no estaba con las tolerancias de planitud requeridas.

#### **Análisis de vibraciones en un ventilador industrial**

En este segundo caso, se analizó un ventilador centrífugo de un horno de secado perteneciente a una empresa minera. El ventilador es accionado por medio de una transmisión por correas, con un motor eléctrico AC de 40hp y dos pares de polos. En la figura 6 se muestran los puntos donde se realizaron las mediciones de vibración y en la figura 7 se muestra el espectro obtenido en la dirección vertical del lado ventilador utilizando el módulo

de lectura *Un Canal* del analizador. En el espectro se observa claramente la componente espectral a la frecuencia de giro del motor, con una magnitud de  $21\text{mm/s}$ , lo que según la norma ISO-10816-3 [11], corresponde a

una severidad vibratoria *inaceptable*. En este caso se recomendó a la empresa realizar un balanceamiento dinámico al rotor, con el fin de reducir los niveles de vibración existentes.

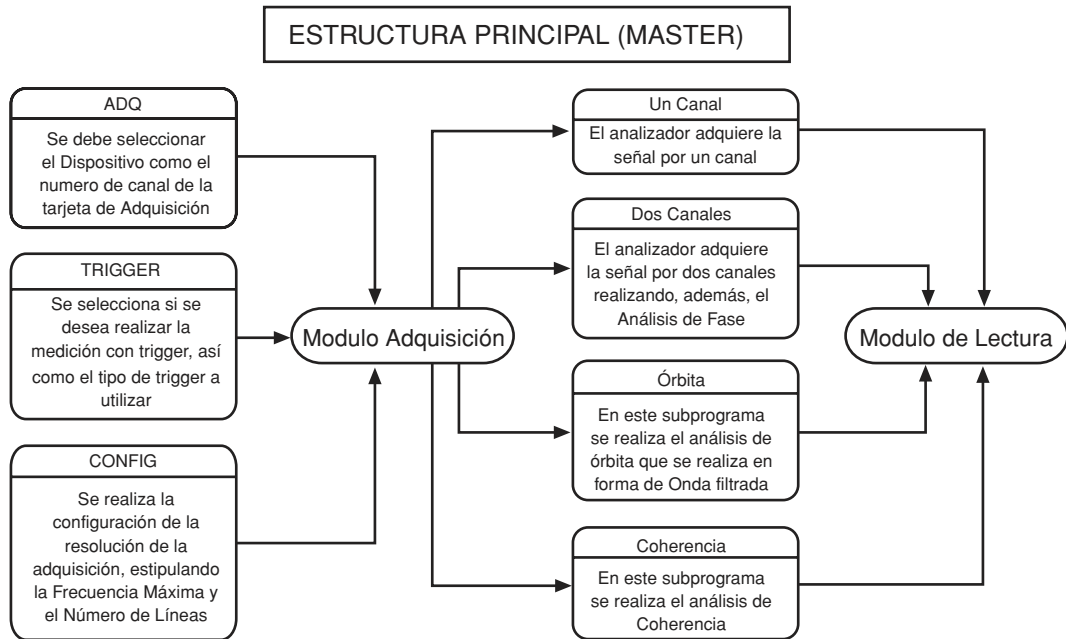


Fig. 2 Estructura Principal (Master).

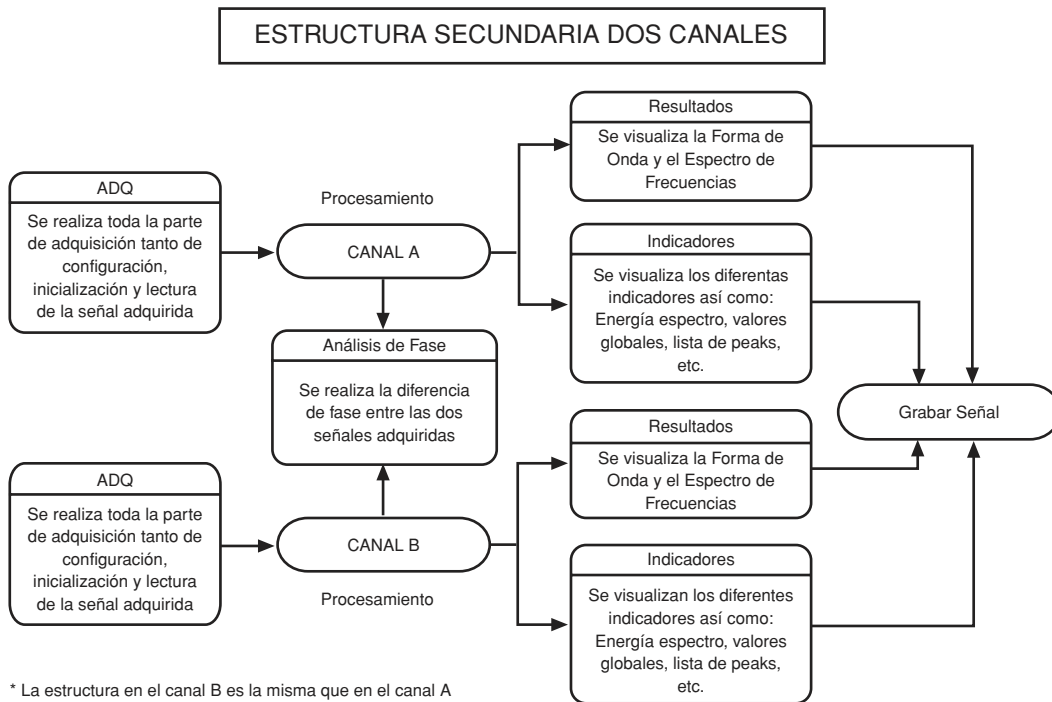


Fig. 3 Estructura Secundaria módulo *Dos canales*.

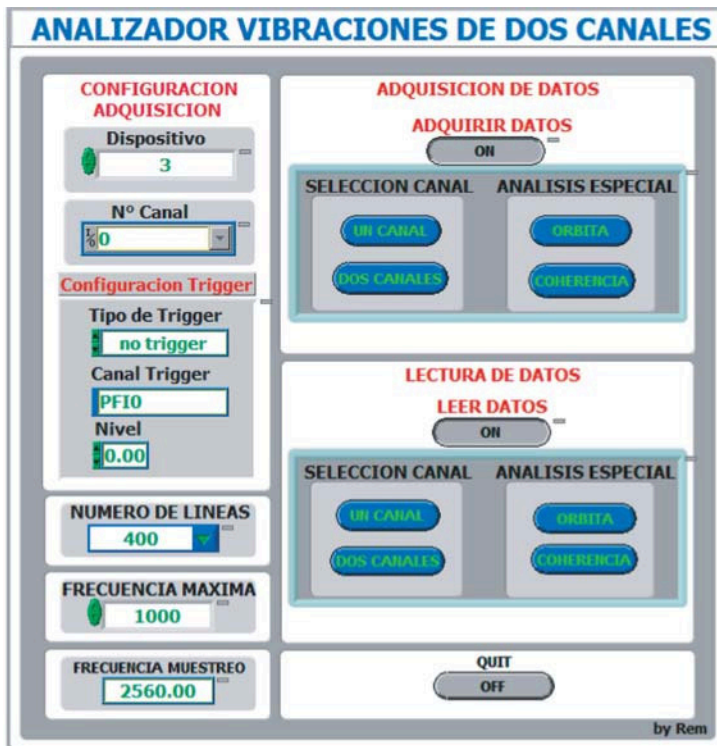


Fig. 4 Panel frontal del programa *Master* del analizador de vibraciones.

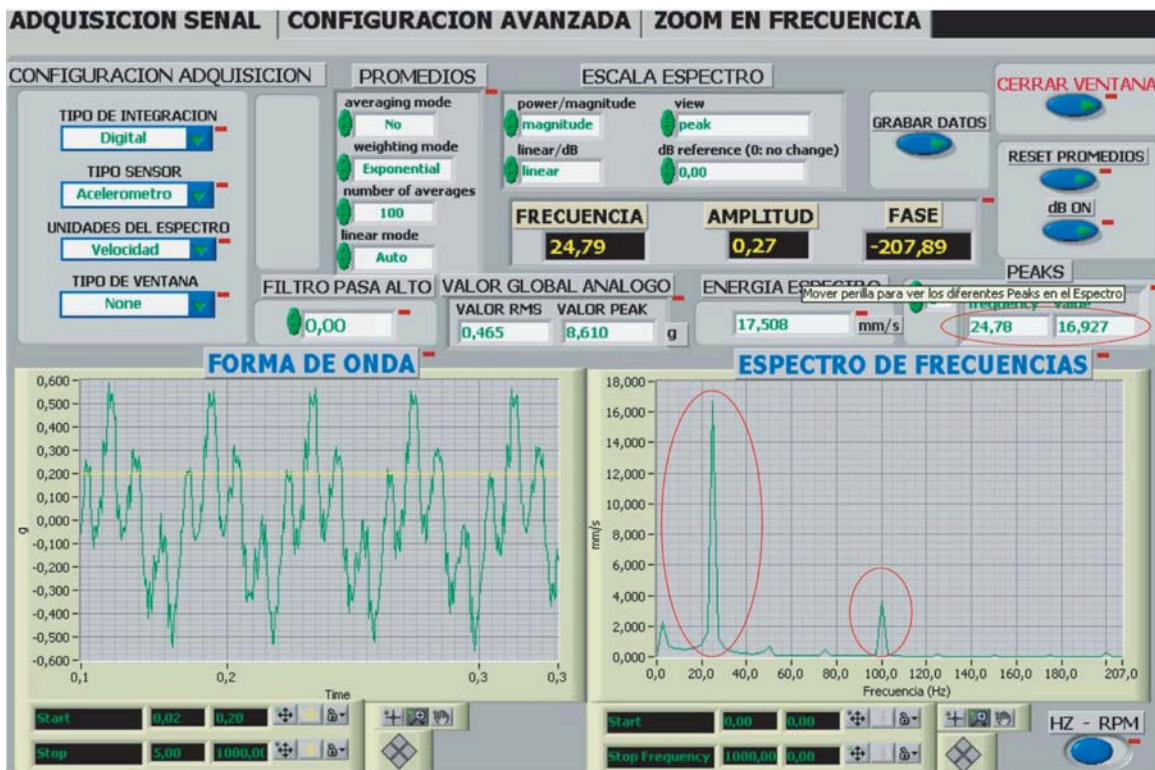


Fig. 5 Panel frontal módulo *Un Canal*. Espectro y forma de onda vibratoria de un motor eléctrico.

## TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN

El analizador de vibraciones permite ser operado (monitoreo de datos), o controlado (control de funciones), en tiempo real, tanto directa como remotamente. Esto se verificó utilizando distintos protocolos de comunicación, disponibles tanto en el entorno Windows como en el *LabVIEW*.

En el analizador virtual se han implementado las funciones necesarias, para que pueda ser monitoreado y/o controlado, utilizando las aplicaciones del *LabVIEW*

de *panel remoto* y del protocolo de conexión *datasocket*. También se puede utilizar el programa *Netmeeting* de *Windows*. La conexión remota mediante protocolo *datasocket* demostró ser la que presenta la mayor ventaja, puesto que permite no sólo monitorear la adquisición de datos, sino también controlar el instrumento, pudiendo hacer modificaciones en los parámetros de adquisición, iniciar la adquisición o detener la adquisición. El *datasocket* permite restringir el control solamente a ciertas funciones del instrumento, siendo esto de gran utilidad para los usuarios que sólo requieran del monitoreo de datos y del control de unas pocas variables.



Fig. 6 Ventilador horno de secado.

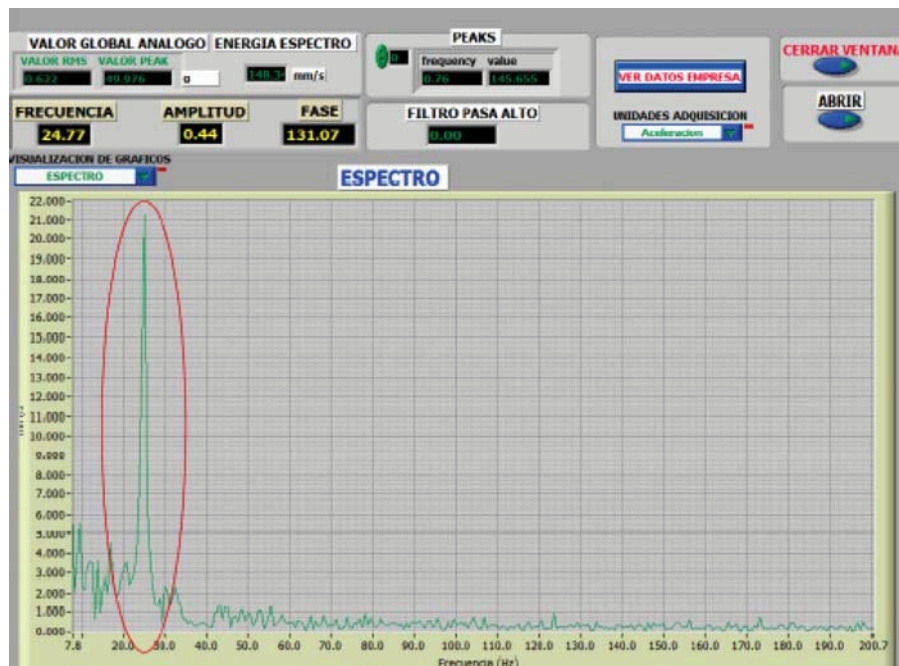


Fig. 7 Espectro vibratorio del ventilador (módulo lectura *Un Canal*).

## DESAFÍOS Y POTENCIALIDADES DEL ANALIZADOR VIRTUAL

La transmisión de información y el monitoreo vía inalámbrica es un requerimiento actual en industrias como la minería, en donde existe la necesidad de realizar un monitoreo y análisis continuo de máquinas localizadas en lugares inhóspitos y de equipos en constante movimiento (camiones, cargadores, etc.). Por lo tanto, una de las potencialidades del analizador virtual de vibraciones es que a futuro pueda ser implementado el monitoreo remoto mediante una red inalámbrica.

Otra aplicación o modificación posterior que se puede implementar en el analizador es la configuración de avisos de alarmas, por ejemplo, para equipos específicos que se monitoreen continuamente. También se puede programar que dichos avisos sean enviados a los especialistas encargados por medio de un correo electrónico, mediante mensaje a celular o aviso en una página Web.

Se pueden implementar en el instrumento virtual aplicaciones específicas para el monitoreo y análisis de vibraciones de rodamientos, sistemas de engranajes, bombas, compresores, etc., así como también incluir otras técnicas de análisis de señales como, por ejemplo: el *análisis cepstrum*, el *análisis de envolvente* o *demodulación*, *análisis tiempo-frecuencia*, entre otras.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un instrumento virtual correspondiente a un analizador de vibraciones con múltiples funciones. Es una herramienta que demuestra ser de una gran versatilidad por poseer una arquitectura abierta, con posibilidades de modificación y mejoras futuras. Al analizador se le pueden adicionar o eliminar funciones, contiene módulos de adquisición y lectura de datos, se pueden implementar nuevas técnicas de análisis y monitorear y/o controlar remotamente.

En el analizador se han implementado las técnicas de análisis necesarias para poder realizar un análisis y diagnóstico de fallas, mediante el análisis de vibraciones, lo cual no descarta que pueda ser complementado con técnicas de análisis más poderosas.

Una de las herramientas más poderosas del analizador virtual es su conectividad vía remota, la cual brinda la posibilidad de realizar monitoreo y detección de fallas sin necesidad que el analista experto se encuentre en terreno realizando el análisis de vibraciones en la máquina.

El analizador virtual que se ha desarrollado es una demostración de que es posible idear, implementar, construir y suplir instrumentos comerciales, tecnológicamente avanzados, con una tecnología basada en la instrumentación virtual, con igual o mayor potencial y a un costo menor.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación y Postgrado, Proyecto DIPOG 8741-04 y al Departamento de Mecánica de la Universidad de Tarapacá, que han hecho posible la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] S. Goldman. "Vibration Spectrum Analysis". Industrial Press Inc. 2<sup>nd</sup> edition. New York, USA, pp. 83-85, 113-122. 1999.
- [2] J. Mitchell. "Machinery Analysis and Monitoring". Pennwell Books. 2<sup>nd</sup> edition. Oklahoma, USA, pp. 134-160. 1993.
- [3] G. D'Ans, P. Ripak, P. Cerckel, D. Degreève, M. Katz, P. Fontana, A. Xheneumont y F. Vanseven. "Some Applications of Virtual Instrumentation in NDT". pp. 1-8. June 2001. Fecha de Consulta: Noviembre 2004.  
<http://www.ulb.ac.be/polytech/laborulb/athens/papere.pdf>
- [4] S. Booksh. "Virtual Instrumentation". Proceedings of National Technical Training Symposium and 26<sup>th</sup> Annual Meeting. Pittsburgh, Pennsylvania, USA, pp. 53-64. June 2002.
- [5] National Instruments Corporation. "LabVIEW Measurement Manual". Austin, TX, USA. July 2000 Edition.
- [6] T. Butcher. "10 Questions to ask when selecting your sound and vibration measurement system". January 2006. Fecha de Consulta: Octubre 2004.  
[http://www.ni.com/academic/instructor/meche\\_dynamics\\_vibration.htm](http://www.ni.com/academic/instructor/meche_dynamics_vibration.htm)
- [7] National Instruments Corporation. "Sound and Vibration Toolset User Manual". Austin, TX, USA. May 2002.



- [8] Computational System Incorporated; “Manual de Analizador CSI-2120”. USA. 1998. Specifications”. 2005. Fecha de Consulta: Octubre 2004. <http://www.ni.com/pdf/manuals/373861a.pdf>
- [9] SKF Condition Monitoring. “Manual de Analizador Microlog CMVA60”. USA. 1999.
- [10] National Instruments Corporation. “NI-447X
- [11] ISO. “Mechanical Vibration-Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts-ISO 10816-3”. ISO. Switzerland. 1998.