

# **ALCANCES DE LA IMPLEMENTACION DE NUEVAS TECNICAS DE ANALISIS EN LOS PROGRAMAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO – PROACTIVO EN LA INDUSTRIA**

Edgar A. Estupiñan P.

Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Tarapacá  
[estupin@uta.cl](mailto:estupin@uta.cl) Dirección Postal : Casilla 6-D, Arica - CHILE

Pedro N. Saavedra G.

Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Concepción  
Casilla 160-C, Concepción - CHILE

## **Resumen**

Hoy en día es importante considerar en las grandes y medianas industrias la implementación de una estrategia de mantenimiento predictivo-proactivo para aumentar la vida de componentes de las máquinas, aumentando así su disponibilidad y aumentando la productividad de la Planta. En este trabajo se describen brevemente y se muestra a través de un ejemplo de la industria minera, los alcances que se pueden tener con el uso de técnicas modernas de análisis en la búsqueda de detección temprana de fallas en máquinas críticas (“acción predictiva”), así como su utilidad en la búsqueda de las posibles causas que las pueden originar (“acción proactiva”). Se ilustra con el análisis de un caso, la utilidad que tienen los sistemas de adquisición de datos (SAD) y herramientas computacionales modernas en el desarrollo e implementación de nuevas técnicas e instrumentos que permiten el análisis y diagnóstico de máquinas que poseen un alto grado de dificultad.

## **INTRODUCCIÓN**

En la última década, las estrictas normas de calidad certificada que se deben cumplir, así como la intensa presión competitiva entre industrias del mismo rubro para mantenerse en el mercado nacional e internacional, ha estado forzando a los responsables del mantenimiento en las plantas industriales a implementar los cambios que se requieren para pasar de ser un departamento que realiza reparaciones y cambia piezas y/o máquinas completas, a una unidad de alto nivel que contribuye de gran manera en asegurar los niveles de producción. Es por tanto necesario hacer notar que la actividad de “mantener”, si es llevada a cabo de la mejor manera, puede generar un mejor producto lo que significa producción de mejor calidad, en mayor cantidad y con costos más bajos.

Una de las formas en que se pueden clasificar las estrategias de mantenimiento es:

---

Mantenimiento Reactivo., estrategia con la cuál se permite a la máquina funcionar hasta la falla y sólo hasta ese momento se decide realizar la reparación o reemplazo de ella.

Mantenimiento Preventivo., estrategia en la que se programan periódicamente las intervenciones en las máquinas, con el objeto principal de inspeccionar, reparar y/o reemplazar componentes. Las intervenciones se realizan aún cuando la máquina esté operando satisfactoriamente.

Mantenimiento Predictivo., estrategia de mantenimiento que busca por medio de la medición y el análisis de los diversos síntomas que la máquina emite al exterior establecer la condición mecánica de la máquina y su evolución en el tiempo. Una de sus grandes ventajas es que se lleva a cabo mientras la máquina esta en funcionamiento y sólo se programa su detención cuando se detecta un problema y se desea corregir.

Mantenimiento Proactivo., con esta estrategia de mantenimiento se pretende maximizar la vida útil operativa de las máquinas y sus componentes, identificando y corrigiendo las causas que corrientemente originan las fallas. Por ejemplo asegurando que las máquinas funcionan bajo las condiciones de carga y velocidad establecida por su condición de diseño y que además sus componentes (rodamientos, sellos, acoples, etc) son instalados correctamente y que su condición de lubricación es adecuada ya se puede asegurar una vida útil operativa más extendida y con menos paradas intermedias que el promedio de las máquinas del mismo tipo.

## **MANTENIMIENTO PREDICTIVO- PROACTIVO**

Es indudable que el aumento de la vida operativa de la máquina a través de una estrategia de mantenimiento predictiva – proactiva, disminuye los costos de mantenimiento e incrementa la productividad de la Planta. Sin embargo, se ha podido notar a través de experiencias de varias empresas, que no se han logrado los resultados esperados principalmente por falta de personas bien capacitadas en el tema. La ingeniería ha avanzado en todas sus ramas incluyendo los instrumentos y técnicas que se han desarrollado y que de alguna manera sustentan la credibilidad de los programas de mantenimiento predictivo implementados en la industria. Para que estos programas sean efectivos, es necesario poder determinar en cualquier instante la condición mecánica real de las máquinas bajo estudio, lo cuál se logra analizando las diferentes señales que ellas emiten al exterior. Modernos sistemas computacionales modernos se han desarrollado para monitorear continuamente, registrar y procesar información proveniente tanto de los síntomas tanto de vibración como de temperatura, presión, ruido entre otros.

## **TECNICAS DE ANALISIS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO - PROACTIVO**

a. Análisis de Vibraciones Mecánicas . La vibración mecánica es el parámetro más utilizado universalmente para monitorear la condición de la máquina, debido a que a través de ellas se pueden detectar la mayoría de los problemas que ellas presentan. La base del diagnóstico de la condición mecánica de una maquina mediante el análisis de sus vibraciones se basa en que las fallas que en ella se originan, generan fuerzas dinámicas que alteran su comportamiento vibratorio. La vibración medida en diferentes puntos de la maquina se analiza utilizando diferentes indicadores vibratorios buscando el conjunto de ellos que mejor caractericen la falla. Entre los indicadores vibratorios que incluyen los programas de monitoreo continuo se encuentran entre otros: el espectro, la medición de fase de componentes vibratorias, los promedios sincrónicos y modulaciones, como se muestra en la figura 1. En la práctica, se requiere del uso de diferentes indicadores y técnicas de análisis, debido a que problemas diferentes pueden presentar síntomas similares. Para ilustrar la situación, suponga que el sistema de vigilancia de la máquina detecta un cambio en la amplitud de la componente vibratoria a *1xrpm*. Este síntoma puede tener su origen en numerosos problemas: Desbalanceamiento, desalineamiento, solturas mecánicas, eje agrietado, pulsaciones de presión, resonancia, etc. Para poder discernir cuál es el problema específico, es necesario utilizar en forma integrada un conjunto de técnicas de diagnóstico.

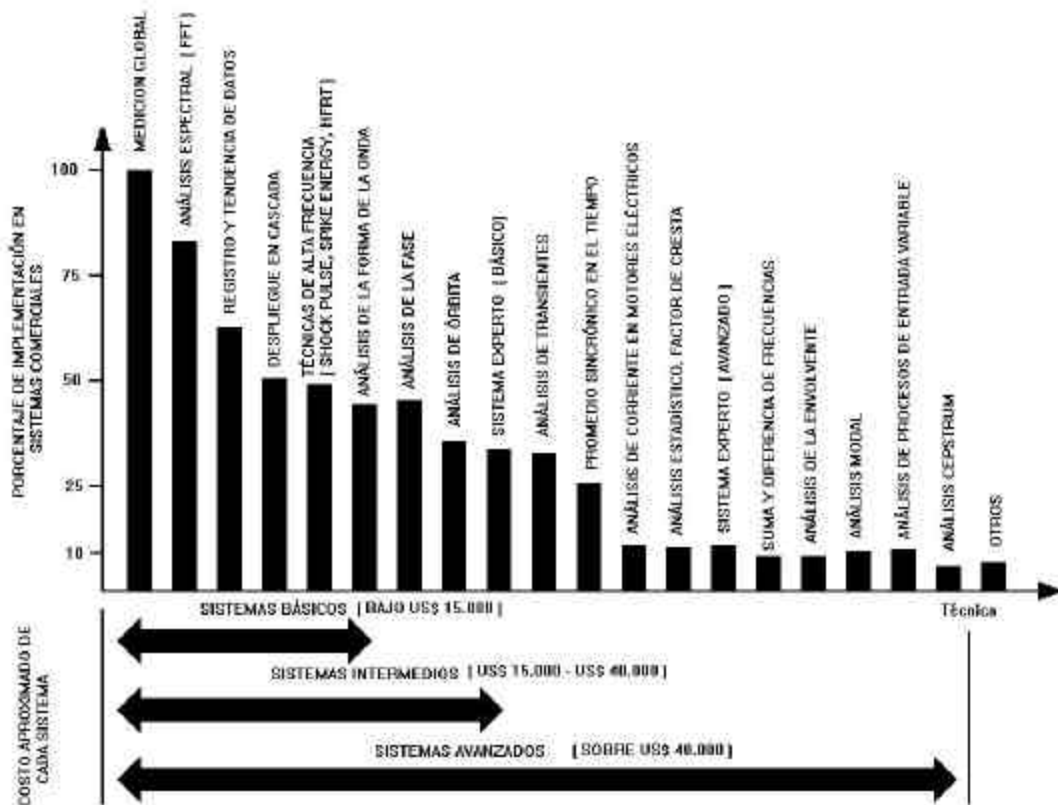


Figura 1. Técnicas vibratorias utilizadas

b. Medición y análisis de ondas de alta frecuencia. Las técnicas de medición de señales de alta frecuencia, son complementarias al análisis de vibraciones y pretenden detectar algunos tipos de fallas que se producen en los equipos y que no son posibles de diagnosticar con los métodos tradicionales de análisis de vibraciones de las frecuencias bajas. De las técnicas ampliamente utilizadas, se pueden nombrar las siguientes: Destellos de energía, conocido como *Spikes* de energía, Análisis de las ondas de choque (*SPM*), Análisis de las emisiones acústicas, ultrasonido, Energía espectral emitida (*SEE*) y Análisis de vibraciones de alta frecuencia (*HDF*). Los rangos de frecuencia para cada técnica se indican en la figura 2.

Los problemas que se pueden detectar son variados, y van desde la detección incipiente de fallas en las pistas de los rodamientos, hasta la detección de fugas en trampas de vapor o de aire comprimido en estanques a presión. Es importante tener en cuenta que las técnicas de análisis de las señales de alta frecuencia tienen un mismo objetivo, esto es, detectar el origen de la emisión de alta frecuencia a partir del procesamiento de la señal global. La metodología existente para analizar las ondas de alta frecuencia, consiste básicamente en filtrar aquellas señales de baja frecuencia y analizar las de

frecuencia alta. Este proceso depende de la técnica utilizada y de los medios tecnológicos que se disponga.

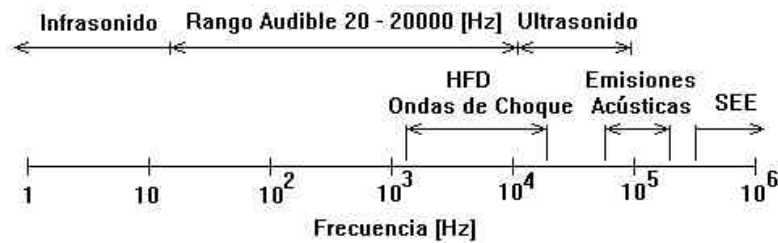


Figura 2. Rango de frecuencias empleadas para las técnicas existentes.

c. Análisis de la Corriente Eléctrica. Se considera el análisis de corriente como una herramienta de apoyo al análisis vibratorio, en la evaluación de la condición de motores de inducción. El análisis de corriente consiste en medir la corriente, mediante un amperímetro de tenazas alrededor de cada una de las fases del motor. La corriente medida se introduce entonces al analizador de vibraciones para el análisis de su espectro. Se debe tener presente, que existen problemas mecánicos como el desbalanceamiento, desalineamiento o flexión del eje, que hacen que el entrehierro varíe entre el rotor y estator, produciendo fuerzas y vibraciones electromagnéticas, siendo en verdad, un problema de origen mecánico. Por este motivo, cuando se analice un motor eléctrico con un análisis de corriente, primero se debe conocer los orígenes de los problemas mecánicos.

d. Análisis de Aceites. El análisis de aceite consiste en una serie de pruebas de laboratorio que se usan para evaluar la condición de los lubricantes usados o los residuos presentes. Al estudiar los resultados del análisis de residuos, se puede elaborar un diagnóstico sobre la condición de desgaste del equipo y sus componentes. Lo anterior, permite a los encargados del mantenimiento planificar las detenciones y reparaciones con tiempo de anticipación, reduciendo los costos y tiempos de detención involucrados. Los objetivos por lo que se realiza un análisis de lubricantes son los siguientes:

- Control de la degradación del lubricante.
- Monitorear daño mecánico de componentes. (desgaste).
- Control de contaminantes por sólidos, fluidos o gases.
- Verificar que se está usando el lubricante adecuado.

Entre los análisis que se realizan al aceite se encuentran:

- Análisis espectrométrico del aceite (SOAP Analysis: Spectrometric Oil Analysis Procedure).
- Análisis de los residuos en el aceite: ferrografía directa, ferrografía analítica, análisis de astillas (chips).
- Análisis de la contaminación en los aceites hidráulicos, evaluando mediante diversos procedimientos, la viscosidad, el grado de oxidación y el contenido de cenizas.

e. Termografía. La termografía infrarroja es una técnica no destructiva y sin contacto, por medio de la cual, se hace visible la radiación termal o energía infrarroja que un cuerpo emite o refleja. Esto permite visualizar las distribuciones superficiales de temperatura. Las aplicaciones son muy amplias para el control de temperatura y detección de fallas, se utiliza en equipos eléctricos fundamentalmente, pero también en equipos mecánicos, control de procesos, refrigeración, aislaciones de sistemas de fluidos, edificios y estructuras, etc. Las fallas típicas que hacen aumentar la temperatura son la fricción, exceso o falta de lubricante, chispas eléctricas, etc.

e. Otras técnicas. Debido a que existen máquinas con características de diseño y funcionamiento muy diferentes, se ha hecho necesario investigar en nuevas técnicas de análisis que permitan su diagnóstico confiable. Entre las máquinas rotatorias que no son susceptibles de diagnosticar confiablemente con las técnicas de análisis “tradicionales”, están las máquinas de velocidad y carga variable, las máquinas de baja velocidad (menos de 600rpm) y las máquinas de muy alta velocidad. Por ejemplo para las máquinas de velocidad variable se ha incluido en algunos equipos comerciales una función llamada “*Análisis de Orders*” o “*Order Tracking*”, para el análisis espectral, sin embargo, se ha visto que tienen limitación cuando la velocidad varía rápidamente. Otro ejemplo son las máquinas de baja velocidad las cuales comúnmente generan vibraciones de niveles muy bajos que no son posibles de analizar debido al nivel de ruido inherente en la cadena de medición y por tanto es necesario desarrollar tanto, instrumentos y sensores con menor ruido inherente como también técnicas de procesamiento para el tratamiento de ruido de las señales periódicas.

## **ANÁLISIS DE UN CASO REAL**

### **Transmisión de una Pala Mecánica.**

En el siguiente ejemplo se muestra el análisis de la condición mecánica de la transmisión de la pluma de una pala electromecánica de la minería, como la que se muestra en la figura 3, realizado por medio del análisis de sus vibraciones. En las palas electromecánicas, las transmisiones empuje-recoge (*crowd*) y la transmisión de la pluma (*hoist*) tienen ciclos de trabajos repetitivos de corto tiempo durante los cuales las vibraciones varían grandemente debido a los cambios de carga y velocidad.

La figura 4, muestra un registro de la aceleración vibratoria medida en el descanso primario pluma durante un ciclo de trabajo. Esta vibración se puede analizar en el espectro (utilizando la Transformada Rápida de Fourier,  $FFT^1$ ) y/o en el tiempo dependiendo de las capacidades del equipo de adquisición de datos y análisis empleado.

---

<sup>1</sup>  $FFT$  : Fast Fourier Transformation

Analizar una señal como la mostrada en la figura 4, es bastante dificultoso, debido a que es una señal muy variable tanto en amplitud como en tiempo y frecuencia. Para poder analizar de una mejor forma este tipo de señales se han implementado para el análisis las llamadas *transformadas tiempo-frecuencia (TTF)*, cuyos algoritmos pueden ser programados en un PC y obtener resultados como los mostrados en la figura 5. Este tipo de señales pueden ser más fácilmente interpretadas por aquellas personas que se especializan en el análisis de las vibraciones para identificar la presencia de posibles fallas en este tipo de maquinaria. De esta gráfica se puede extraer más fácilmente la información relacionada con el tiempo en que se produce la mayor vibración durante un ciclo de la pala y la frecuencia a la cual está se produce, para luego estudiar cuales serán las acciones correctivas más convenientes.

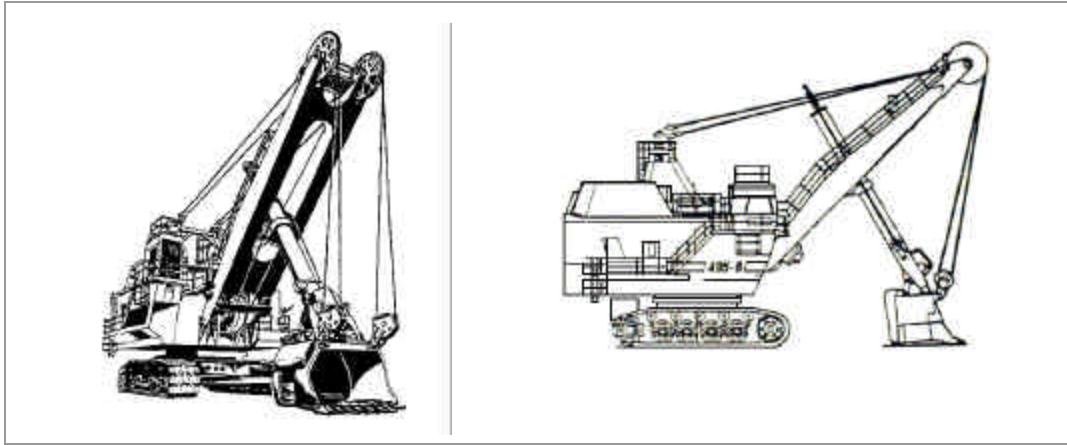


Figura 3. Pala mecánica empleada en la industria minera

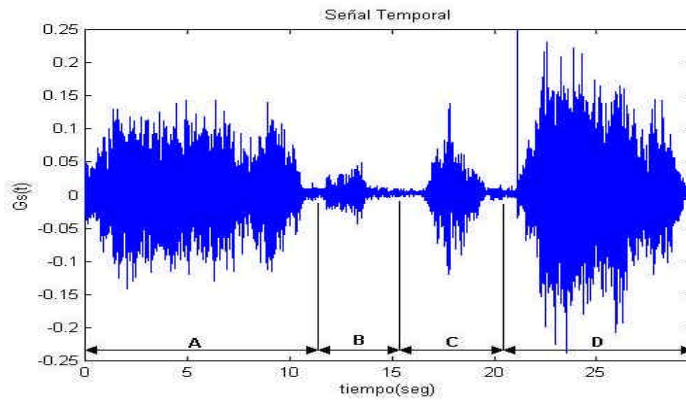


Figura 4. Registro de vibraciones en un ciclo de trabajo de la pala

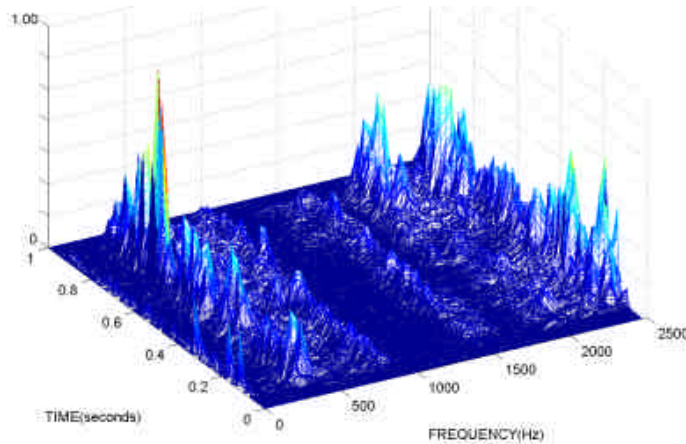


Figura 5. Transformada Tiempo-Frecuencia ZAM

## UTILIDAD DE LA INSTRUMENTACION VIRTUAL EN EL DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE NUEVAS HERRAMIENTAS PREDICTIVAS.

Los sistemas de adquisición de datos (*SAD*), han permitido desarrollar instrumentos más versátiles adaptados a las necesidades de los usuarios. Se pueden desarrollar desde sistemas sencillos para adquisición de datos para una sola máquina, hasta todo un completo sistema de monitoreo de una planta industrial. Las componentes fundamentales de un *SAD* son: 1). Computador Personal, 2). Transductores, 3). Acondicionador de señales, 4). Hardware de Adquisición y 5). Software.

Un diagrama general de un *SAD*, se presenta en la figura 6. En la práctica, la mejor manera como se logra representar un *SAD* es mediante un conjunto de hardware y software. Comercialmente existen diferentes proveedores de tarjetas que ofrecen un software por medio del cual es posible administrar todo el proceso de adquisición y con algunos de ellos se puede incluso por medio de una programación adicional realizar procesamiento y análisis digital de las señales obtenidas.

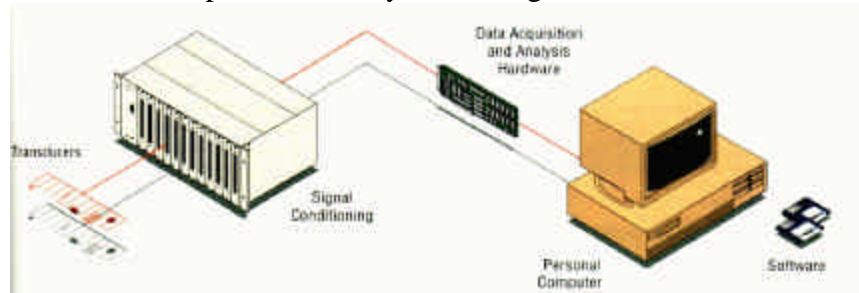


Figura 6. Esquema de un sistema de adquisición de datos.



A continuación se presenta una aplicación desarrollada mediante instrumentación virtual y que permite realizar análisis de vibraciones en máquinas de velocidad variable. Esta aplicación consiste en un instrumento virtual<sup>2</sup>, que permite a través del análisis de *Orders*<sup>3</sup> analizar vibraciones transientes. Este instrumento basado en un *SAD*, está conformado por una tarjeta de adquisición de señales dinámicas, un conector externo y un software de análisis. Para el procesamiento de los datos de vibración como de velocidad instantánea de una pala mecánica, se desarrolló un programa para la recolección, administración y posterior análisis de la información. Procesando los datos con la técnica de remuestreo sobre la señal adquirida y aplicando la *FFT* se puede obtener el espectro de frecuencias de la vibración en función de la velocidad.

En la figura 7, se muestran los datos adquiridos, de la aceleración vibratoria y de la velocidad de la transmisión de levante de una pala mecánica durante un ciclo completo de trabajo. Se puede observar la naturaleza transiente de la vibración y los grandes cambios en la velocidad de rotación de la unidad. El monitoreo de estas señales, permite determinar si se producen cambios en la condición mecánica de los engranajes y poder así programar una mantención con anticipación

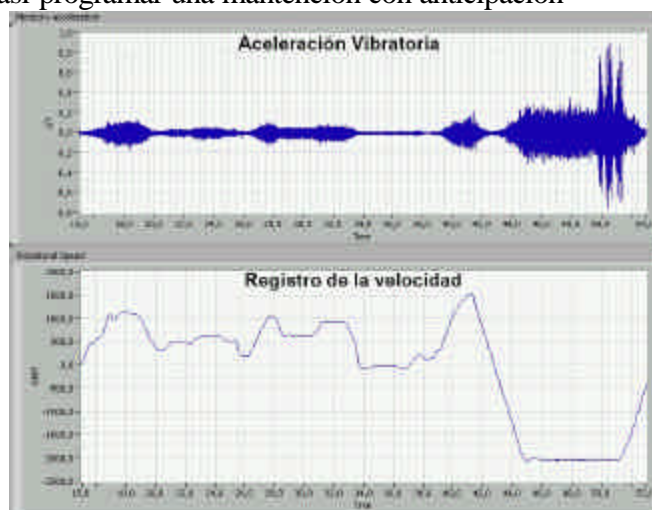


Figura 7. Datos de la Vibración y Velocidad de una pala Mecánica, obtenidos con un analizador virtual.

Existen hoy en día muy pocos equipos comerciales que permiten realizar análisis de vibraciones de máquinas de velocidad variable y los existentes tienen sus limitaciones. Estos equipos no son por ejemplo, los más adecuados para analizar vibraciones cuando la velocidad varía ampliamente y rápidamente como sucede en el caso de las palas electromecánicas de la minería. El otro inconveniente que

<sup>2</sup> Instrumento Desarrollado en el Laboratorio de Vibraciones de la Universidad de Concepción

<sup>3</sup> *Orders* : Múltiplos de la velocidad de rotación de la máquina.

presentan es el alto costo asociado a ellos. Un sistema de adquisición como el que se ha implementado resulta ser bastante conveniente para el análisis de vibraciones de máquinas de velocidad variable, tanto del punto de vista de su funcionalidad y versatilidad, como del punto de vista económico.

Hay que tener en cuenta que no sólo es posible con un *SAD*, desarrollar nuevas técnicas de análisis sino también adaptar técnicas ya existentes y que vienen implementadas sólo en equipos comerciales y generalmente a un elevado costo. Además de que estos instrumentos desarrollados pueden ser acondicionados acorde con los requerimientos particulares de cada usuario y/o empresa. Como ejemplo de ello se muestra en la figura 8, uno de los paneles frontales de un instrumento que permite balancear dinámicamente rotores por medio de la medición de las vibraciones.

## **Conclusiones**

Es importante considerar que la productividad de una industria aumentará en la medida que las fallas en las máquinas disminuyan de una forma sustentable en el tiempo. Para lograr lo anterior, resulta indispensable contar con la estrategia de mantenimiento más apropiada y con personal capacitado tanto en el uso de las técnicas de análisis y diagnóstico de fallas implementadas como también con conocimiento suficiente sobre las características de diseño y funcionamiento de las máquinas. En el presente trabajo se mencionaron varias de las técnicas de análisis utilizadas hoy en día, entre las que se destaca el análisis de vibraciones mecánicas, ilustrando con un ejemplo su alcance así como la necesidad de usar diferentes indicadores con el fin de llegar a un diagnóstico acertado. Diagnosticado y solucionado los problemas, la vida de las máquinas y su producción aumentará y por tanto, los costos de mantenimiento disminuirán. Finalmente se resalta la importancia que tiene los instrumentos basados en *SAD*, permitiendo no sólo a empresas grandes sino también a empresas medianas y a laboratorios de universidades desarrollar sus propios instrumentos a un costo más bajo que los equipos comerciales.

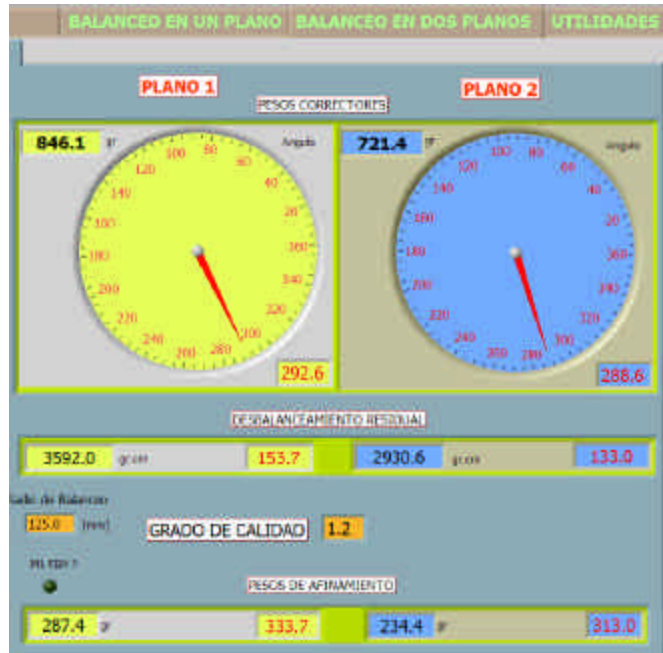


Figura 8. Instrumento para balanceamiento dinámico de rotores<sup>4</sup>

## Referencias

1. Harris, C. M. *Shock and vibration handbook*. McGraw Hill, N.Y., (1988).
2. J. Figueroa, E. Estupiñan y P. Saavedra. *Adquisición y Análisis de vibraciones en Máquinas de Velocidad Variable*. Marzo del 2002. Revista Instrumentation – NI.
3. P. Saavedra, F. Araya. *Condition monitoring of variable-speed and load machinery using time-frequency distributions*. INSIGHT Vol. 43, N°8, August 2001, pp. 526-530.
4. P. Saavedra, E. Estupiñan. Impacto del Mantenimiento Proactivo en la Productividad. 1er Congreso Peruano de Mantenimiento, Mayo del 2001.

<sup>4</sup> Instrumento desarrollado en el Laboratorio de Vibraciones de la Universidad de Tarapacá