

TECNICAS DE DIAGNOSTICO PARA EL ANALISIS DE VIBRACIONES DE RODAMIENTOS

Estupiñan, Edgar - Saavedra, Pedro
Universidad de Concepción

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
(Casilla 160-C, Fono: 204327, Fax: 251142, eestupin@udec.cl)
Concepción – CHILE

RESUMEN

La señal de vibración emitida por un rodamiento puede contener componentes espectrales que están relacionadas con la geometría del rodamiento, el número de elementos rodantes, la velocidad de rotación, la ubicación del defecto y el tipo de carga aplicada; lo cual marca la diferencia con un descanso de tipo hidrodinámico. Es de gran importancia en la industria moderna poder detectar defectos en los rodamientos de las máquinas críticas en una etapa incipiente de falla. En el presente trabajo se muestra como con el uso de algunas de las técnicas modernas de análisis de vibraciones incluidas en analizadores comerciales, es posible detectar defectos en los rodamientos en su etapa incipiente. Las técnicas utilizadas para el análisis fueron la técnica de *Demodulación* o envolvente, el método de *Peakvue* o detección del valor peak y el *Zoom real*. Se comparan los resultados obtenidos con estas técnicas en ensayos de laboratorio para diferentes condiciones de carga y velocidad.

INTRODUCCION

Los rodamientos actúan como una fuente de ruido y vibración debido tanto a la variación de compliancia como a la presencia de defectos en ellos [Tandon 1992]. Los defectos en los rodamientos se pueden clasificar como *distribuidos* y *localizados*.

El hecho de que la distribución de carga varíe sobre los elementos rodantes a medida que éstos giran sobre las pistas de rodadura hace que los rodamientos se comporten por sí mismos en un generador de vibraciones. Este comportamiento puede provenir tanto de rodamientos geoméricamente perfectos como de rodamientos con imperfecciones de manufactura, problemas de instalación, lubricación y condiciones ambientales inadecuadas o de algún otro factor que ayude a producir desgaste o fatiga [Akturk 1998].

Defectos Localizados

Son en general producidos por grietas, hendiduras, rebordes, resaltes, picaduras y descascaramiento. El más común de todos es la picadura de las pistas o de los elementos rodantes, causado cuando una grieta por fatiga originada subsuperficialmente se propaga hacia la superficie hasta que una pieza de metal se desprende superficialmente produciendo un pequeño defecto. La falla por fatiga superficial es acelerada cuando el rodamiento está sobrecargado o sometido a cargas de choque o impacto durante su funcionamiento o instalación y también con el incremento de velocidad.

Defectos Distribuidos

Dentro de éstos se encuentran: las rugosidades superficiales, ondulaciones sobre las pistas, desalineamiento de las pistas y elementos rodantes

desiguales. Pueden ser causados por errores en la manufactura, inadecuada instalación o debido al desgaste. Las vibraciones debidas a defectos de manufactura han resultado ser más bajas en la mayoría de los casos, que las debidas a defectos producidos por desgaste o fatiga.

La variación de las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y las pistas causan un incremento en el nivel de vibración. Puesto que resulta difícil discernir cuando la vibración es causada por defectos localizados o distribuidos, es recomendable analizar tanto la frecuencia como la amplitud de las componentes espectrales relacionadas con la vibración. [Tandon 1999].

EVOLUCION DE LA FALLA POR PICADURA

El primer síntoma que se presenta cuando aparece esta falla, es decir, en su *etapa incipiente*, es una vibración con componentes de alta frecuencia (generalmente mayores a 5 KHz), producto de la generación de ondas de esfuerzo y de otros tipos, las que a la vez excitan frecuencias naturales del soporte y pistas del rodamiento y/o del sensor con el cual se realiza la medición. En esta etapa la temperatura no se incrementa y las grietas no son visibles y con frecuencia ocurren debajo de la superficie de las pistas. En esta etapa aún no es necesario el cambio del rodamiento.

En una *segunda etapa* las grietas empiezan a ser visibles al ojo humano y el rodamiento produce sonido audible y la temperatura en algunos casos se incrementa. En esta etapa aparecen componentes frecuenciales relacionadas con las frecuencias de falla de los rodamientos en la zona de frecuencia baja e intermedia y hay un incremento del ruido

audible. Las frecuencias de falla de los rodamientos son comúnmente designadas por *BPFO*, *BPFI*, *BSF* y *FTF** [Harris 1966], [Tandon 1999], [Reeves 1998]. Estas frecuencias son determinadas en base a la geometría y velocidad de rotación del rodamiento o directamente de diferentes software comerciales.

A medida que la falla avanza, pueden aparecer gran cantidad de bandas laterales alrededor de las frecuencias de falla, relacionadas con la velocidad de rotación o la *FTF* [Reeves 1998], y modulaciones entre las diferentes frecuencias de falla cuando la picadura se ha extendido a pistas y elementos rodantes. En esta etapa se hace necesario comenzar a programar el cambio del rodamiento.

En una *tercera etapa*, cerca a una falla catastrófica, el ruido incrementa significativamente y se puede producir sobrecalentamiento. El rápido desgaste incrementa los huelgos dentro del rodamiento lo que permite movimiento del eje relativo al rodamiento, pudiendo llegar a ser muy peligroso por roces con otros componentes de la máquina. En esta etapa, la vibración en la región de alta frecuencia disminuye, crece la componente a la velocidad de rotación y las vibraciones tienden a ser aleatorias. En este momento, será necesario el cambio inmediato del rodamiento [Jones 1996], [Saavedra 1998].

Aunque ésta es la forma más general que se presenta cuando un rodamiento desarrolla una falla, se debe tener presente que cada rodamiento puede tener modos de falla diferentes y con una rata de progresión distinta que depende en gran medida de las condiciones de carga, velocidad, temperatura, humedad y lubricación a que esté sometido.

TECNICAS DE DIAGNOSTICO

Diferentes métodos han sido utilizados para la detección y diagnóstico de defectos de rodamientos, estos métodos son principalmente:

- *Análisis de vibración, ruido y ondas.*
- *Análisis de temperatura.*
- *Análisis de partículas en el aceite.*

El método de análisis de vibraciones, ruido y ondas ha sido el más ampliamente utilizado haciendo uso de diferentes técnicas como son: el análisis de vibración en tiempo y frecuencia, análisis de ondas de choque, análisis del ruido, análisis de emisión acústica, etc.

* *BPFO* (*Ball pass frequency of the outer race*), es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa.

BPFI (*Ball pass frequency of the inner race*), es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna.

BSF (*Ball spin frequency*), es la frecuencia de giro de los elementos rodantes.

FTF (*Fundamental train frequency*), es la frecuencia de rotación del canastillo o jaula que contiene los elementos rodantes.

Análisis de Vibraciones

Todas las máquinas tienen un nivel de vibración que puede ser considerado normal o inherente a su funcionamiento. Cuando este nivel aumenta y empieza a ser excesivo, es normalmente el síntoma de la presencia de una falla.

Debido a la presencia de defectos localizados, se producen cambios abruptos en los esfuerzos de contacto en las interfaces, lo cual resulta en la generación de pulsos de muy corta duración, que pueden excitar las frecuencias naturales de las pistas y soporte del rodamiento (Figura 1).

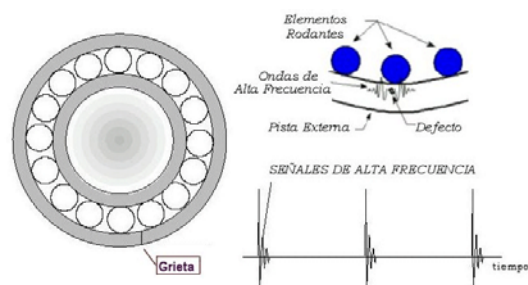


Figura 1 Generación de impactos por la presencia de un defecto.

La presencia de componentes de alta frecuencia, es el síntoma que permite detectar incipientemente la falla. Cuando la falla progresa, la excitación de tipo impulsiva aumenta por un tiempo hasta cuando los filos, esquinas o rebordes de los defectos se alisan producto del desgaste y los niveles de impacto disminuyen e incluso pueden llegar a desaparecer.

Para realizar el análisis y diagnóstico de fallas utilizando la medición de la vibración, se han desarrollado diferentes técnicas e instrumentos, dependiendo del rango de frecuencias dentro del cual se desea hacer el análisis. Unas están enfocadas a la *zona de las altas frecuencias* y otras a la *zona de frecuencias bajas e intermedias*.

De las técnicas que analizan la zona de alta frecuencia para la detección incipiente de fallas, están las que se basan en la excitación de la frecuencia natural del sensor utilizado, es decir sobre una banda de frecuencia prefijada y normalmente entregan un valor global que se relaciona con la severidad del defecto. Dentro de estas técnicas, están los pulsos de choque (*SPM*), la detección de emisiones acústicas (*AE*), energía espectral emitida (*SEE*), técnica de detección de alta frecuencia (*HFD*) y el ultrasonido.

Otras técnicas que analizan vibraciones a frecuencias no tan altas (1–5 khz) y que están relacionadas con la excitación de las frecuencias naturales del soporte y las pistas del rodamiento son las técnicas de *Demodulación* o envolvente, la técnica del *Peakvue* y el análisis con *Zoom real* sobre las zonas resonantes. Técnicas en las que se centra el presente estudio.

Estas técnicas son consideradas como las herramientas más efectivas para diagnosticar

tempranamente la presencia de defectos en los rodamientos. Buscan principalmente detectar zonas resonantes excitadas o moduladas por fuerzas de impacto periódicas, cuya frecuencia de repetición es un indicador del lugar donde se encuentra el defecto y la amplitud de la señal de los impactos puede ser utilizada en algunos casos como un indicador de la severidad y progresión de la falla.

Dichas técnicas deben superar dos dificultades principalmente. La primera, es que las señales impulsivas de alta frecuencia son de una amplitud generalmente baja, comparadas con la mayoría de componentes de baja frecuencia que componen la vibración global. Y la segunda es que una banda amplia de frecuencia que abarque las frecuencias naturales del rodamiento, puede enmascarar la frecuencia e intensidad de los impactos debido al ruido y a la falta de buena resolución.

Para facilitar el diagnóstico se deben aislar entonces las vibraciones de alta frecuencia de las otras vibraciones, empleando un filtro pasa alto o pasa banda alrededor de la frecuencia natural que es excitada. De esta forma es posible extraer la frecuencia y la amplitud de los impactos de la vibración global. Para poder lograr esto se debe sacar provecho de las propiedades de estas vibraciones. Dos de estas propiedades que dan origen a las técnicas de *Demodulación* y *Peakvue* son la *envolvente de los impactos* y la *detección de los peaks máximos* (Figura 2).

ANÁLISIS CON ZOOM

El análisis con *Zoom real*, permite por medio de filtros digitales, adquirir la señal con un ancho de banda estrecho sobre la frecuencia resonante, la cual debe haber sido previamente identificada. Se obtiene de esta manera un espectro con una buena resolución, permitiendo identificar más fácilmente las frecuencias moduladoras que causan la excitación de la frecuencia. En la figura 8, se ilustra el resultado obtenido de un análisis con *Zoom real* alrededor de la frecuencia resonante de 60 kcpm. La mayoría de analizadores poseen la utilidad de zoom que consiste en una expansión del eje de frecuencias y no en un zoom real.

DEMODULACIÓN

Esta técnica consiste básicamente en aplicar sobre la señal temporal un filtro pasa alto o pasa banda con el fin de aislar zonas resonantes de alta frecuencia, luego rectificar la señal modulada, eliminar la componente continua y finalmente con un detector de envolvente (figura 2) y un filtro pasa bajo extraer la señal moduladora, tal y como se ilustra en la figura 3.

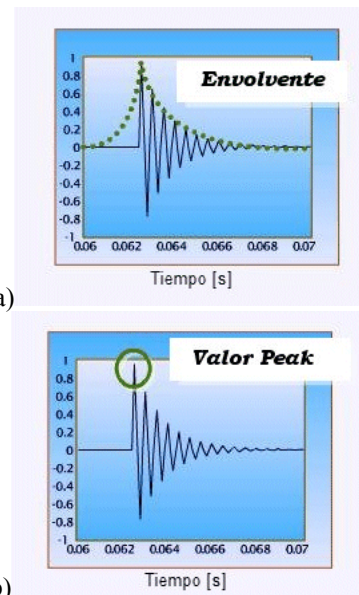


Figura 2. Análisis de las vibraciones de impacto. a) Envolvente. b) Detección del valor peak

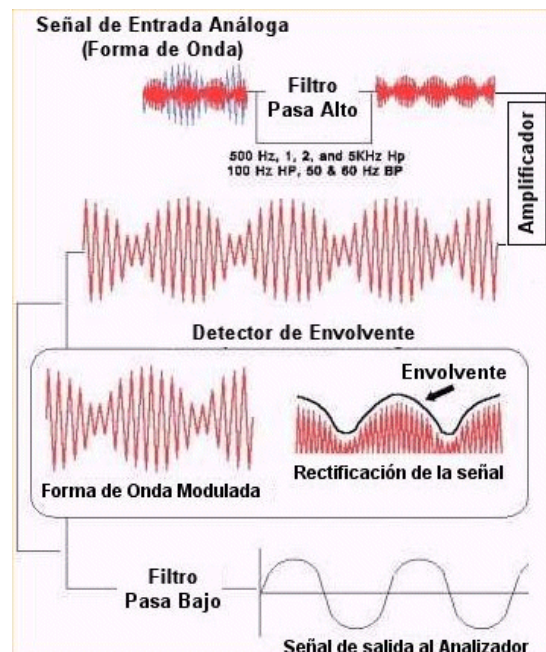


Figura 3. Proceso de Demodulación

El análisis frecuencial de la señal demodulada entrega como resultado la frecuencia de repetición de los impactos.

PEAKVUE

Es una técnica que capta el valor peak de los impactos que se producen (figura 2b) y luego por medio de un análisis espectral se obtiene la frecuencia de repetición de los impactos. Detecta la presencia de las ondas de esfuerzo debidas principalmente al contacto metal-metal durante una etapa temprana de falla. Al igual que la demodulación, aísla las zonas resonantes por medio de filtros digitales pasa alto o pasa banda, pero se diferencia del proceso de demodulación en que en la etapa final no emplea el detector de envolvente, sino que utilizando una frecuencia de muestreo alta (100 khz) capta el valor peak para cada intervalo Δt del

tiempo de muestreo normal (figura 4), [Canada 1998].

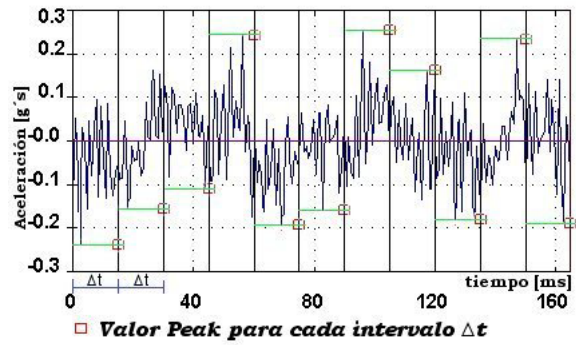


Figura 4. Valor peak para cada intervalo de tiempo.

ENSAYOS Y RESULTADOS

En este trabajo, se realizaron ensayos con rodamientos en buen estado y con rodamientos con defectos localizados sobre la pista externa, con diferentes grados de severidad y para diversas condiciones de carga y velocidad. Se utilizaron las técnicas de análisis espectral normal, *Demodulación*, *Peakvue* y *Zoom real*. Para realizar las pruebas, se utilizó un banco de ensayo como el ilustrado en la figura 5, cuyas características se indican en la tabla 1. Para el análisis de las vibraciones se utilizó un analizador CSI 2120-2, acelerómetros de alta y baja frecuencia (0.1 y 0.5 V/g) y una grabadora digital de señales análogas.

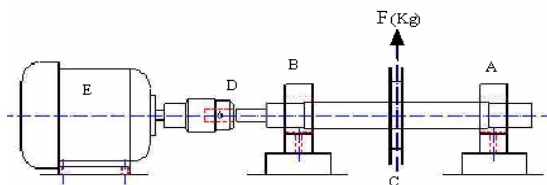


Figura 5. Banco de ensayo

Tabla 1. Características del banco de pruebas.

No	Designación	Designación
A	Descanso Libre	Rod. Rígido de Bolas
B	Descanso Motriz	SKF Ref. 6306-2z.
C	Polea	Ref. 6207-2z
D	Acople	Elástico
E	Motor 1400 rpm	De inducción trifásico (1.5hp) Con variador de frecuencia.

Se compararon las vibraciones medidas sobre el descanso del lado libre en dirección vertical, tanto para rodamientos sin falla, como con falla. Se realizó el ensayo para las condiciones de velocidad de 1000 rpm y 60 rpm y aplicando una carga de 200 Kg sobre la polea. Para los ensayos con rodamientos defectuosos, se utilizaron cinco rodamientos, cada uno de ellos con un defecto sobre la pista externa. El defecto fue realizado intencionalmente para simular una falla en etapa incipiente.

En la figura 6, se muestran los espectros en unidades de aceleración obtenidos para un rodamiento sin falla y otro con falla para la velocidad de giro de 1000 rpm. Es claro que en el espectro del

rodamiento con falla se identifica una zona con una alta energía de vibración alrededor de la frecuencia de 60 kcpm, la cual corresponde a una frecuencia natural. Realizando un *Zoom real* en torno a esta frecuencia, se distinguen en el espectro bandas laterales con una separación entre ellas a la frecuencia de *BPFO**, identificando como causa de la excitación de la frecuencia natural un defecto en la pista externa (figura 7).

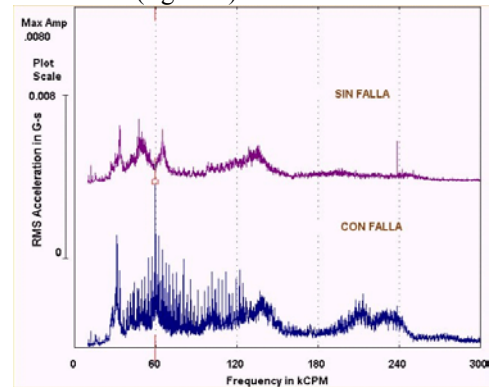


Figura 6. Espectro en aceleración (Velocidad = 1000 rpm)

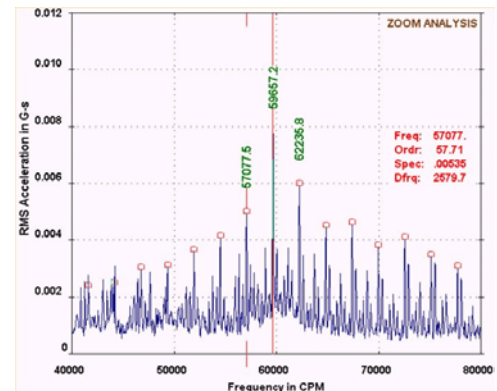


Figura 7. Análisis con Zoom (observar bandas laterales).

Observando la forma de onda en aceleración, se puede identificar la periodicidad de los impactos producidos por el paso de los elementos rodantes sobre el defecto, tal y como se ilustra en la figura 8, para la velocidad de giro de 1000 rpm.

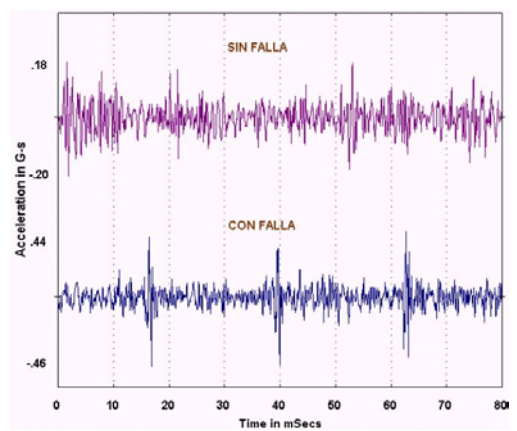


Figura 8. Identificación de impactos en la señal temporal.

* Para el rodamiento SKF 6306-2z, $BPFO=2.51 \times RPM$.
RPM : velocidad de rotación del rodamiento.

En las figuras 9 y 10, se ilustran los resultados obtenidos de los análisis de *Demodulación* y *Peakvue* de la vibración de un rodamiento sin falla y otro con una raya en la pista externa, con una velocidad de giro de 1000 rpm y 200 kg de carga. En el rodamiento con falla se identifican claramente las componentes a *BPFO* y sus armónicos, confirmando la presencia de un defecto en la pista externa.

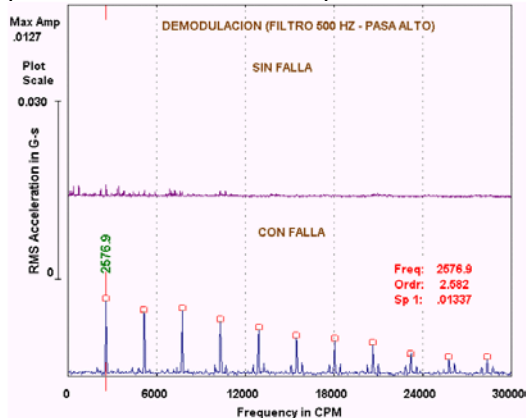


Figura 9. Demodulación (velocidad = 1000 rpm)

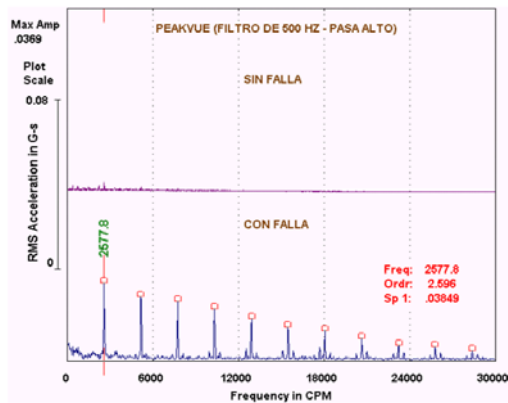


Figura 10. PeakVue (velocidad = 1000 rpm)

Aplicando estas técnicas para el caso en que el rodamiento gira a baja velocidad (60 rpm), se observa en el espectro de aceleración la excitación de la zona resonante por el rodamiento con falla (figura 11). Empleando las técnicas de *Demodulación* y *Peakvue* (figuras 12 y 13), se identifica la presencia de la falla aunque no tan claramente como para velocidades más altas.

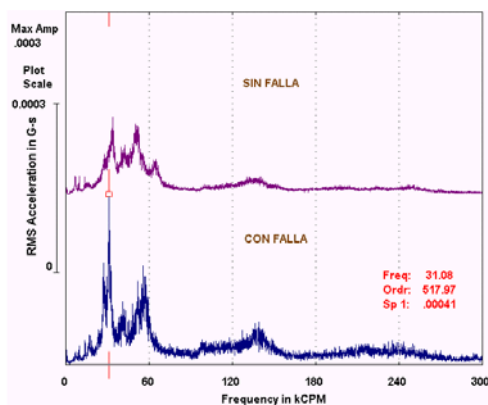


Figura 11. Espectro en aceleración (Velocidad = 60 rpm)

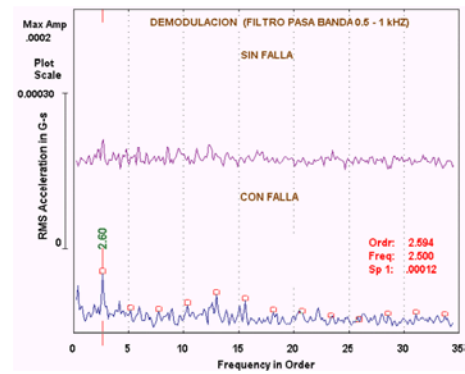


Figura 12. Demodulación. (Velocidad = 60 rpm)

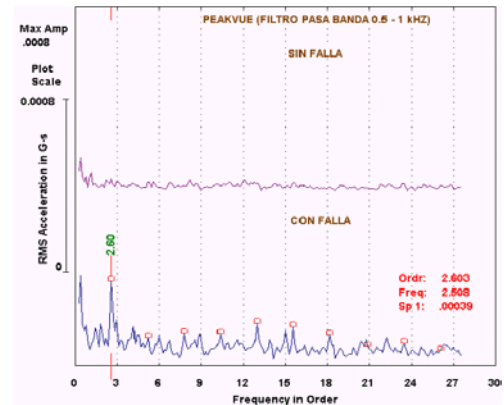


Figura 13. PeakVue. (Velocidad = 60 rpm)

DISCUSION

De los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, se puede concluir que:

- Independiente de la velocidad de rotación, se produce una excitación sobre la zona de las altas frecuencias para el caso del rodamiento con falla. Sin embargo, a baja velocidad la excitación que se produce es de menor intensidad y se excitan las frecuencias naturales más bajas.
- Con el uso del Zoom y el análisis de la señal en el tiempo, es posible identificar los impactos que se producen periódicamente. Para baja velocidad no se obtuvieron buenos resultados con estas técnicas, pues la amplitud de los impactos producidos son muy bajas, además de estar mezcladas con las componentes de baja frecuencia.
- Las técnicas de *Demodulación* y *Peakvue*, entregaron resultados similares. Sin embargo, las amplitudes obtenidas utilizando *Peakvue* fueron mayores que con la *Demodulación*. Resulta ser más ventajoso el empleo de estas técnicas para aplicaciones de baja velocidad, en donde por medio de los otros métodos no se obtuvieron buenos resultados.

Se debe tener presente que este trabajo fue desarrollado en condiciones controladas de ruido y vibración. En la industria se pueden encontrar aún más dificultades especialmente para las bajas velocidades al tener en cuenta las diferentes fuentes de ruido, las vibraciones provenientes de otras

máquinas y la variación de velocidad y carga durante las mediciones. Por tanto se debe complementar el análisis con otras herramientas de análisis que están hoy en día disponibles en la mayoría de analizadores de vibración comerciales, como por ejemplo los promedios sincrónicos en el tiempo y los filtros seguidores de velocidad (Tracking filter).

CONCLUSIONES

Es posible detectar en los rodamientos, la presencia de defectos cuando se encuentran en etapa incipiente, haciendo uso del análisis de vibraciones y de las técnicas de demodulación y/o peakvue, las cuales enfocan su análisis sobre la zona de las altas frecuencias.

En el análisis de vibraciones de rodamientos que giran a baja velocidad, las técnicas de demodulación y peakvue resultan ser más útiles en la detección incipiente de fallas, que el análisis espectral normal.

REFERENCIAS

- AKTÜRK N., GOHAR R. (1998). **Vibrations associated with ball bearings.** *ImechE, Conference Transactions, Multi-Body Dynamics. December 10-11 No.13, 43-64.*
- CANADA R., PIETY K., ROBINSON J.C. (1998). **New Methodology for bearing fault defect: peakvue analysis.** *Application Paper, Computational System Incorporated. (CSI).*
- HARRIS T. (1966). **Rolling bearing analysis.** *New York : John Wiley and Sons.*
- JONES R. M. (1996). **Enveloping for bearing analysis.** *Sound and Vibration. February, 10-15.*
- REEVES T. (1998). **Failure modes of rolling element bearings.** *Technical Report, Computational System Incorporated. (CSI).*
- SAAVEDRA P. (1998). **Análisis de vibraciones de máquinas rotatorias (Nivel III).** Cap 4. 10-17. *Universidad de Concepción.*
- TANDON N., CHOUDHURY. (1999). **A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings.** *Tribology International. Vol.32, 469 -480.*
- TANDON N., NAKRA B. C. (1992). **Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings – a review.** *The Shock and Vibration Digest. Vol. 24 (3), 3-11.*