

Diseño de sistema para convertir en imágenes las señales de vibraciones de un cojinete de rodamiento

*Luis E. Vallés D., Neyla Y. Delgado B., Verónica L. Riera G.
Centro de Investigaciones de Materiales, Facultad de Ingeniería.
Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, E-mail: lapredim@uc.edu.ve*

Resumen

Los cojinetes de rodamientos son componentes de alta precisión dentro de cualquier máquina, y solo un pequeño porcentaje alcanzan la vida útil para la cual fueron diseñados, ya que son afectados por muchos factores como: excesiva magnitud de carga (sobrecarga), lubricación inadecuada, uso de lubricante equivocado, contaminación con polvo u otras partículas extrañas, instalación inadecuada de los cojinetes de rodamiento, corrosión de las pistas y de los elementos rodantes, entre otros. Esta cantidad de factores hacen que los cojinetes de rodamientos se conviertan en elementos críticos dentro del equipo en el cual se encuentran instalados; por lo que es importante monitorear, principalmente a través del análisis de vibración, la condición de los cojinetes de rodamientos desde los primeros signos de falla, de manera de conocer su nivel de desgaste para tomar acciones preventivas y evitar daños al equipo que los contiene.

Palabras Claves Vibraciones, desalineación, resonancia, frecuencia de defecto, falla por fatiga.

System design to transform into images the vibrations signals coming from a bearing

Abstract

The bearings are component of high precision inside any machine, and just a little percentage reaches its useful life for which they were designed, because they are affected by many factors like excessive load magnitude, inadequate lubrication, user of lubricant mistaken, contamination with powder or other strange particles, inadequate installation of the bearings, corrosion of the hints and the rolling elements, among others. This number of factors makes the bearings become critical elements inside the machine in which they are installed. Thus, it is important to monitor, specially through the vibration analysis, the condition of the bearings from the first failure signals, in way of knowing their waste level to take preventive actions and to avoid damages to the machine that contains them.

Key Words: Vibrations, disalignment, resonance, defect frequency, fatigue failure.

INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en el área de mantenimiento es la utilización del análisis predictivo. Considerando que las bombas centrifugas son unos de los equipos mayormente utilizados en la industria, es de vital importancia aplicar estas técnicas de mantenimiento a los componentes de las mismas, principalmente a los cojinetes de rodamientos.

Existen diferentes técnicas que permiten hacer este

tipo de análisis predictivo como lo son: el ultrasonido, análisis térmico, análisis de vibraciones, radiometría, entre otras [1], las cuales permiten medir distintas variables asociadas a dichos componentes para determinar las condiciones de su funcionamiento, y así poder predecir aproximadamente el estado en que se encuentran. Entre estas técnicas la más utilizada es el análisis de vibraciones la cual, es una técnica que se basa en la detección de fallas de un sistema a través de los estudios de los niveles de vibración [2].

Estos niveles de vibración son capaces de mostrar fallas prematuras sin la necesidad de recurrir a paradas por averías, y de esta manera optimizar tiempos y procesos. Antes de aplicar el análisis de vibración es necesario elegir en la máquina un punto adecuado para la medida, así como la recopilación de datos necesarios para el análisis de la máquina, como son el tipo de cojinetes, de correas, números de alabes, etc.

Con estas técnicas se han efectuado numerosos experimentos para evaluar el progreso de desgaste en los cojinetes de rodamientos. Dichos experimentos fueron desarrollados con una variedad de cojinetes a diferentes velocidades y condiciones; estos experimentos consisten en hacer fallar estos componentes y seguir cuidadosamente su ruta de falla mediante el monitoreo de vibraciones [3].

En la mayoría de los cojinetes de rodamiento se pudo establecer una rata de falla bastante predecible desde el principio del deterioro hasta la falla catastrófica, pudiéndose así desarrollar un escenario de 4 Estados de fallas por donde pasan la mayor parte de estos componentes.

METODOLOGÍA

Para desarrollar el sistema a diseñar es necesario el diseño y construcción de un banco de pruebas, el cual considera la operación de una bomba centrífuga ETA 32-200 que maneje agua limpia y no trabaje en condiciones normales de funcionamiento, ya que se aplicará una determinada desalineación entre el eje de la bomba, y el eje del motor, un equipo de alineación láser, para acelerar el proceso de desgaste de los cojinetes de rodamientos controlando la carga aplicada sobre el cojinete de rodamiento y por lo tanto poder estimar su vida útil. Esto se hará con el fin de seguir el proceso de falla de estos cojinetes de rodamientos. El método utilizado para desalinear los ejes de los equipos consiste en:

Medición Vertical

Se realiza el montaje del equipo de alineación de láser, este contiene dos sensores, los cuales, tomando como referencia las agujas del reloj, se colocan sobre los ejes del motor y la bomba a las 12h [4], luego se hacen coincidir el láser de uno de los sensores sobre la diana del otro sensor y viceversa, esto con el fin de encontrar la referencia o el cero. (Figura 1)

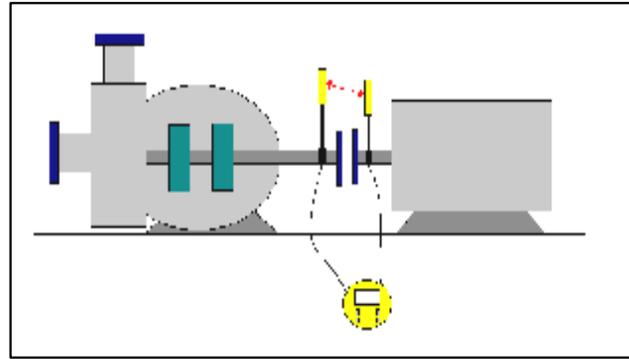


Figura 1. Ubicación de los láser para encontrar la referencia o cero en el plano vertical.

Se mueven los sensores 90° hacia la derecha y luego 90° hacia la izquierda (desde la vista frontal del motor) para conseguir las medidas "este" y "oeste" con las cuales el equipo calcula la desalineación en el plano vertical para ese momento. (Figura 2).

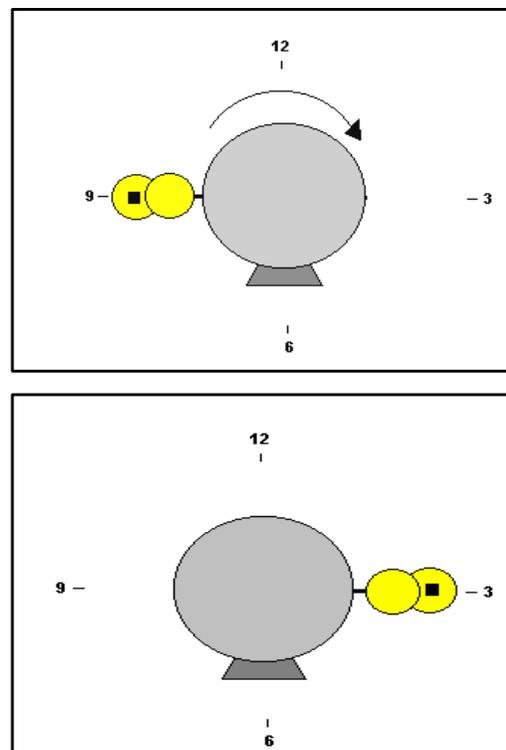


Figura 2. Ubicación de los láser para conseguir las medidas este y oeste.

Se leen los valores para ver si corresponden con los que se desean, y en caso de no corresponder se colocan y quitan láminas calibradas en la base del motor hasta lograr el valor de desalineación deseado.

Medición horizontal

Para esta medición, los sensores sobre los ejes del motor y la bomba, tomando como referencia las agujas del reloj, se colocan a las 9h (observando desde la vista frontal del motor) [6], luego se hacen coincidir el láser de uno de los sensores sobre la diana del otro sensor y viceversa, esto con el fin de encontrar la referencia o el cero. (Figura 3).

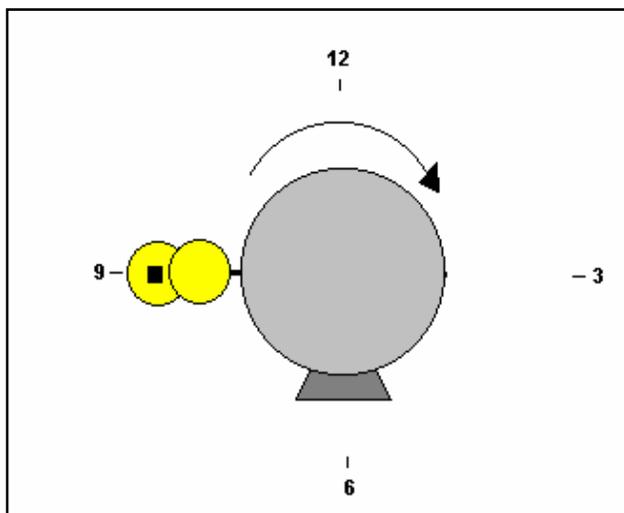


Figura 3. Ubicación de los láser para encontrar la referencia o cero en el plano horizontal.

Se mueven los sensores 180° hacia la derecha (se colocan a las 3 h) para conseguir las medidas de desalineación en el plano horizontal para ese momento. (Figura 4)

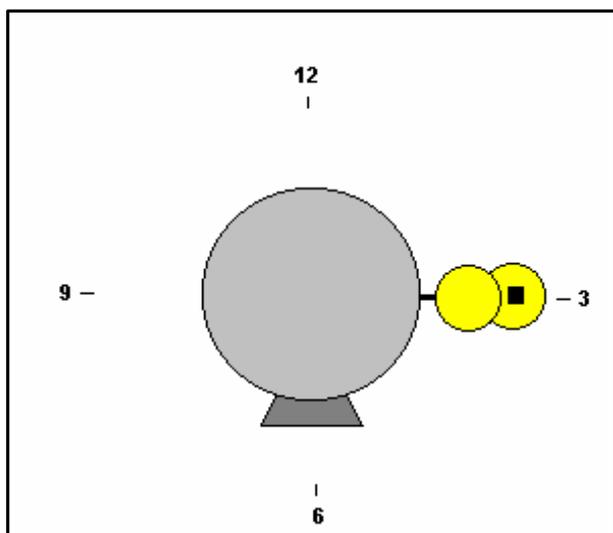


Figura 4. Ubicación de los láser para conseguir la desalineación horizontal.

Se leen los valores para ver si corresponden con los que se desean, y en caso de no corresponder se rueda la base del motor hasta lograr el valor de desalineación deseado. Para esto se deben aflojar los tornillos tanto de la pata trasera como los de la delantera de la bomba.

Además de esto se comprobarán los datos de desalineación obtenidos con el equipo de alineación láser haciendo uso de relojes comparadores, con el fin de tener un método alternativo que sustituya el anterior en caso de requerir próximas desalineaciones. El método que se emplea para aplicar la desalineación con estos relojes, es semejante al utilizado con el equipo de alineación láser.

También se debe señalar que las especificaciones del banco de prueba que se darán a continuación cumplen, tanto con los requerimientos de este proyecto de investigación como con los de otros proyectos que se realizan simultáneamente a este. Dicho banco consta principalmente de dos bombas centrifugas de las cuales una trabajará con agua limpia, y la otra con una mezcla de agua y arena para fines de los otros proyectos de investigación, pero como se ha explicado, para efecto de este proyecto solo se utilizará la que maneje agua limpia.

Además de recolectar la data de vibración proveniente de los cojinetes de rodamientos para los fines de este proyecto, se debe medir la presión en la descarga de la bomba, y el caudal para conocer las condiciones a las que trabaja la bomba. Igualmente se debe medir la temperatura en los cojinetes de rodamientos y la potencia para notar los cambios que ocurren a medida que el desgaste progresa [5].

Para medir la potencia es necesario medir corriente, voltaje y factor de potencia, y así poder aplicar la ecuación:

$$P = |A| \cdot |A| \cdot \text{Cos}Q$$

Selección de la bomba a estudiar

El hecho de utilizar una bomba centrifuga para los estudios que se requieren hacer se debe principalmente a que este tipo de bomba es ampliamente utilizada a nivel de industria e incluso a nivel residencial. Por otro lado, con la ayuda del Departamento de Ingeniería de una empresa fabricante de estos equipos (KSB Venezolana) se realizó un estudio de un

gran número de bombas centrifugas y se llegó a la conclusión que el equipo más idóneo para el estudio que se quiere realizar eran las bombas marcas KSB, modelo ETA 32-200, ya que dichos equipos están diseñados para manejar fluidos y son usados por un gran número de empresa en diversos procesos, además de tener un rango de utilidad bastante alto por las características que poseen.

Diseño del circuito Cerrado Succión-Descarga

El ensayo se realizará en un circuito cerrado de succión y descarga. El tramo de elevación de succión estará compuesto de una válvula check y una toma de presión donde se colocará un vacuómetro que muestre la presión en la succión de la bomba [7]. En el tramo de descarga se encontrará: una toma de presión para conectarla a un manómetro y medir la presión de descarga de la bomba, un intercambiador de calor para disipar la energía entregada al fluido en forma de calor por la bomba y efectos del roce y finalmente una válvula para controlar el caudal que va a manejar dicha bomba [8].

RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

Respecto a los Datos Obtenidos Durante el Funcionamiento del Banco de Pruebas

Es importante durante el desarrollo del proceso de inspección, controlar algunas variables, para así afirmar que el desgaste de los cojinetes de rodamientos es debido a la desalineación, para esto se tomaron datos los cuales al ser analizados, se observa que el patrón de comportamiento de todas las variables medidas se mantuvo estable, en rangos aceptables; la potencia se mantuvo entre 9.35hp y 12.5hp, la temperatura entre 37 °C y 49 °C y la velocidad de giro entre 3495 RPM Y 3515 RPM. Los cambios que se notan son debido a las condiciones ambientales, como por ejemplo el incremento de la temperatura en horas del mediodía. Además el progreso de desgaste de los cojinetes de rodamientos también provoca un incremento de temperatura.

Un aumento en la potencia consumida por el motor implica una caída en la velocidad de operación, esto es debido a que estas mediciones fueron realizadas con el uso de una carcasa más desgastada a la utilizada en las mediciones anteriores que aunado a la factura del anillo de desgaste del impulsor (debido a defec-

tos de fabricación) reflejan un incremento en las pérdidas energéticas (aumento del flujo por recirculación).

Respecto al Progreso del Desgaste

Antes de iniciar el proceso de desalineación con el equipo de alineación láser para acelerar el desgaste en los cojinetes de rodamientos, se efectuó una firma de vibraciones para verificar que estos componentes se encontraban en buenas condiciones, y así establecer un patrón de funcionamiento para las próximas mediciones. En la Figura 5 se observa que el cojinete de rodamientos esta en buen estado para el inicio del ensayo, ya que no se presenta frecuencia de defecto en el espectro de vibraciones [9], por lo tanto el programa indica que el cojinete se encuentra en el nivel 1 y estado de falla 1, por donde aun no se detectan defectos en los componentes de dicho cojinete.

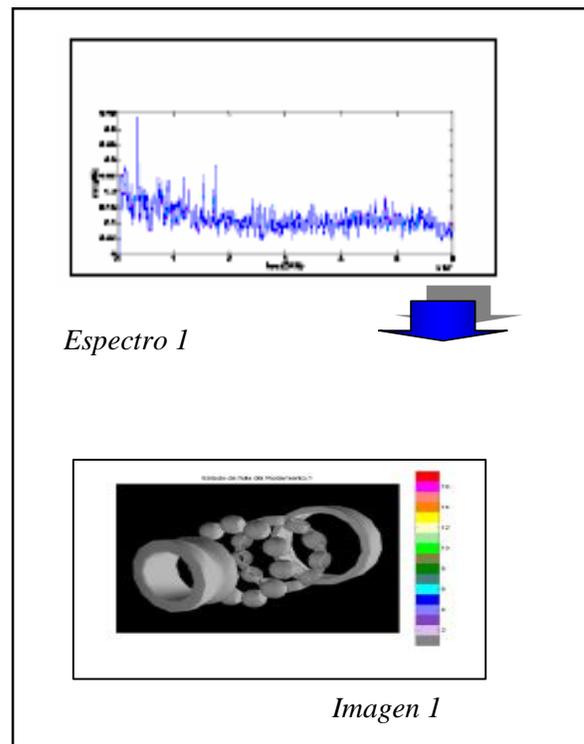


Figura 5. Firma de Vibraciones para verificar que los componentes se encontraban en buenas condiciones.

Para empezar el ensayo, se utilizó un equipo de alineación láser con el cual se logró un grado de desalineación entre el eje de la bomba y el eje del motor, de 0.51mm de paralelismo y 0.15 de angularidad en el plano horizontal y de 1.2mm de paralelismo y 0.28mm de angularidad en el plano vertical.

En la Figura 6 se nota como después de 4 horas de funcionamiento con este grado de desalineación, el cojinete de rodamientos avanza hacia el estado de falla 2, ya que la pista externa se encuentra en el nivel 2, debido a que aparece por primera vez en el espectro de vibraciones la frecuencia fundamental de efecto de la pista externa.

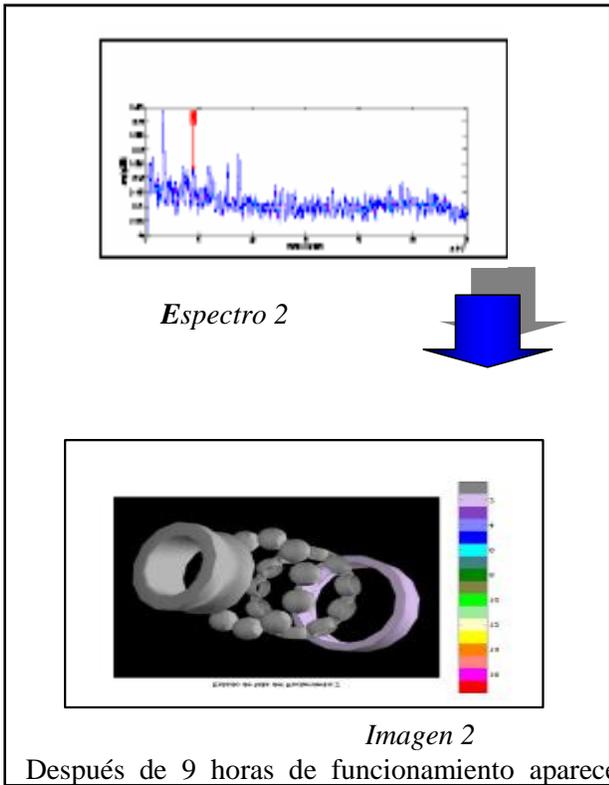


Figura 6. Resultados a las 4h de funcionamiento con un grado de desalineación de 0.51 mm de paralelismo y 0.15 de angularidad en 1 plano horizontal y de 1.2 mm de paralelismo y 0.28 mm de angularidad en el plano vertical.

también la frecuencia fundamental de defecto de la jaula, como se ve en la Imagen 3, Espectro 3 de la Figura 7, lo que indica que el cojinete de rodamientos se encuentra aun en el estado de falla 2.

En la Figura 8 se nota que después de 12 horas de funcionamiento todos los componentes del cojinete de rodamientos (jaula, bolas, pista externa, pista interna) muestran el inicio de un defecto, ya que en el espectro de vibraciones se nota la presencia de las frecuencias fundamentales de defecto de cada uno de los componentes; sin embargo aunque aparecen más frecuencia de defecto, el cojinete de rodamientos se encuentra todavía en el estado de falla 2.

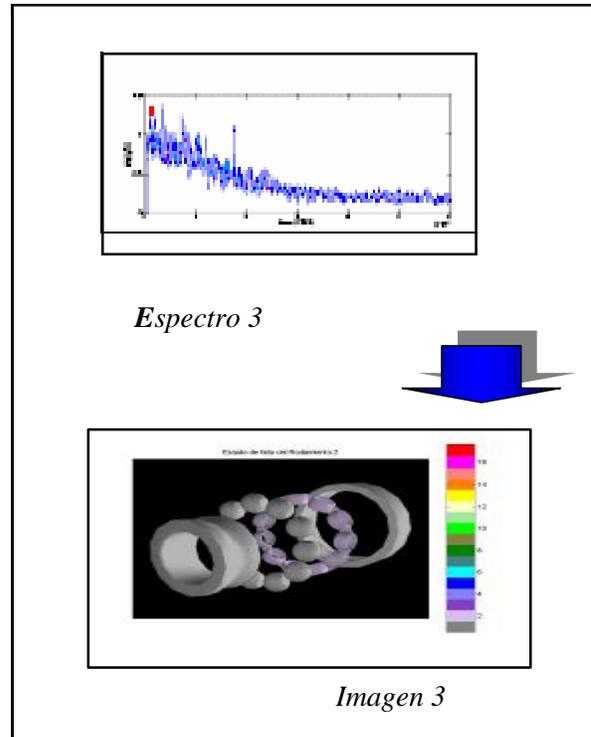


Figura 7. Resultados a las 9h de funcionamiento aparece la frecuencia fundamental de defecto de la jaula.

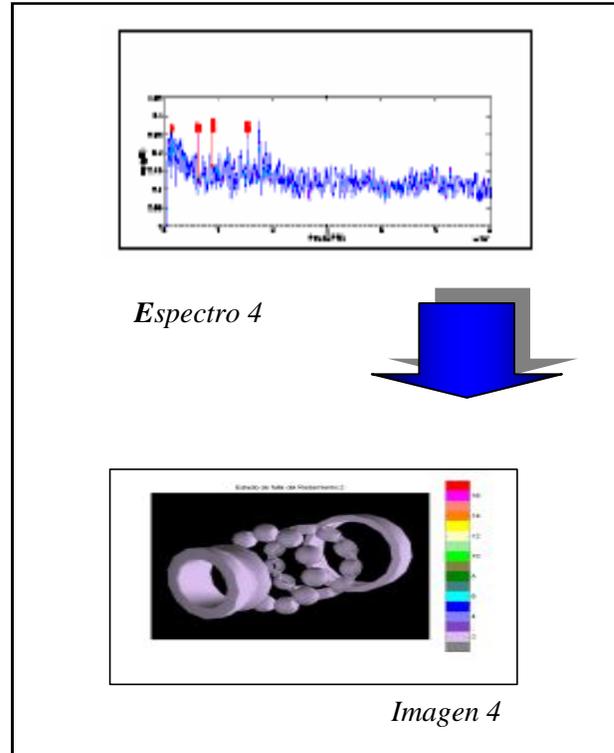


Figura 8. Resultados a las 12h de funcionamiento donde todos los componentes del cojinete de rodamientos muestran el inicio de un defecto.

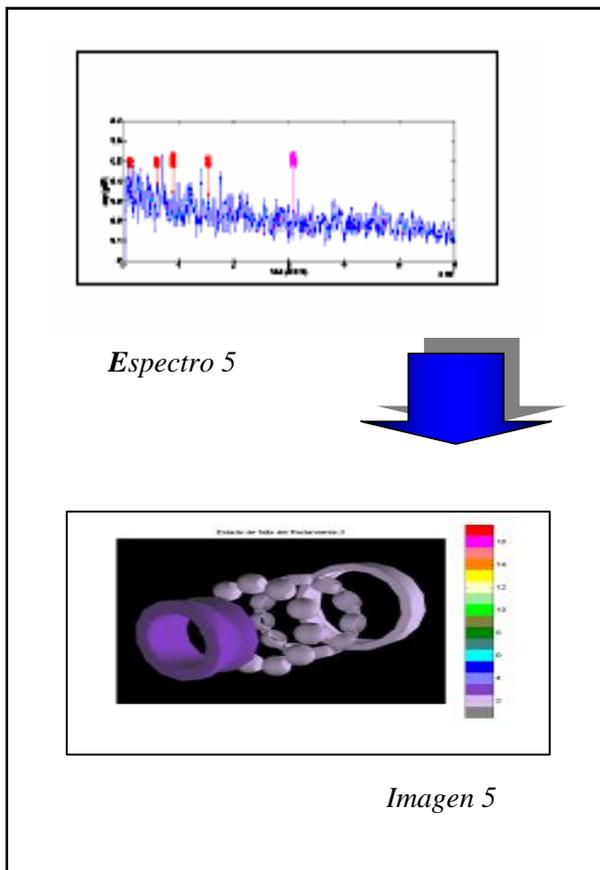


Figura 9. Resultados a las 26h de funcionamiento donde se muestra un ligero progreso en el desgaste de la pista interna.

En la Figura 9 se muestran que después de 26 horas de servicio un ligero progreso en el desgaste de la pista interna, ya que comienza a aparecer armónicas de esta frecuencia, por lo que la pista interna avanzó hacia el nivel 3; y a pesar de que los otros componentes se mantienen en el nivel 2 el cojinete de rodamiento a iniciado el estado de falla 3.

Debido a que los cambios que se notaron no fueron significativos en el progreso de desgaste de los cojines de rodamientos después de transcurrir 41 horas de servicio, se necesitó aumentar el grado de desalineación para acelerar el desgaste de los componentes de los cojinetes y así poder seguir la ruta de falla de este elemento.

Para aumentar el grado de desalineación se hizo uso esta vez de relojes comparadores ya que no se contaba con el equipo de alineación láser, el cual ya se había devuelto para ese momento. Antes de aplicar

la segunda desalineación se verificaron las medidas obtenidas con el equipo de alineación láser obtenido en la primera desalineación con el equipo láser.

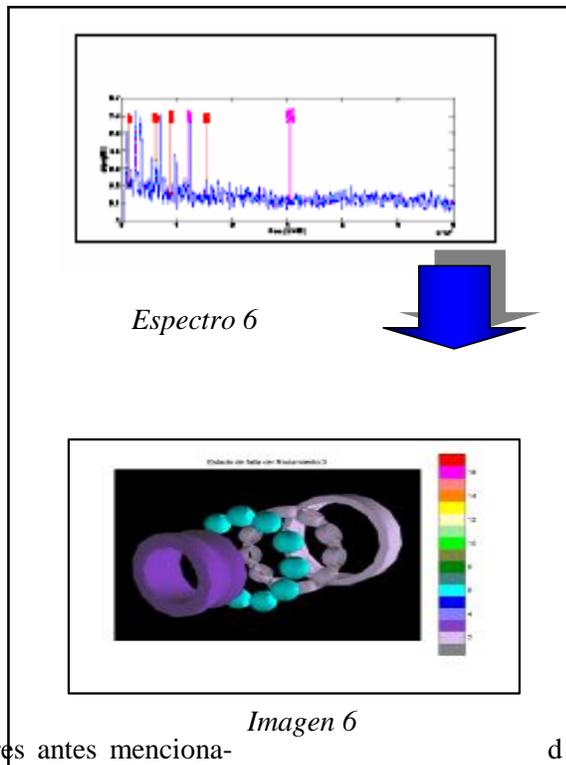
Como se sabe, para conocer el grado de alineación entre los ejes de un equipo rotativo deben medirse los valores tanto en el plano horizontal como en el vertical de paralelismo y angularidad.

En el plano vertical tenía la desalineación máxima permitida ya que en la primera desalineación se habían eliminado las láminas calibradas que tenía el motor. Si el motor se subía colocando más láminas calibradas, se iba a contra restar la carga natural que la bomba ejerce sobre los cojinetes de rodamientos (generada por el peso del impulsor, ejes y demás componentes), lo que no ayudaba al proceso de desgaste de los cojinetes de rodamientos. Es importante acotar que aunque no se modificó el valor del plano vertical, este varío debido a la irregularidad o un desnivel de la base del motor alcanzado un valor de 1.04mm.

Los valores de angularidad obtenidos en este proceso de desalineación son los siguientes: plano vertical 0.25mm y plano horizontal 0.20mm, como se observa estos valores son muy parecidos a los obtenidos en la primera desalineación, esto se logró ya que el procedimiento utilizado consistió en realizar un movimiento uniforme de la base del motor, para asegurar esto se colocó un reloj en la pata trasera del motor y otro en el acople, así se pudo supervisar que los desplazamientos de los extremos del motor fuesen iguales, obteniendo un valor de 2.08mm de desalineación de paralelismo en el plano horizontal (aproximadamente 4 veces el valor de paralelismo horizontal de desalineación anterior).

Con esta nueva desalineación se notó progreso en el desgaste de los cojinetes de rodamientos una vez cumplida 46 horas de funcionamiento desde el inicio del ensayo. En la Figura 10 se puede ver que el desgaste de las bolas a incrementado debido a la presencia de 5 armónicas de esta frecuencia en el espectro de vibración; lo que indica es que estos elementos se encuentran en el nivel 6 y el cojinete de rodamientos esta pasando por el estado de falla 3.

En vista de que transcurridas 5 horas de funcionamiento luego de aplicar la segunda desalineación, se notó solo un ligero cambio en las bolas, lo que representa un progreso notable en el desgaste de los cojinetes. Se decidió aumentar el grado de desalineación, aplicando las mismas técnicas de los relojes compara-



dores antes menciona- da ,

Figura 10. Resultados a las 46h de funcionamiento se puede ver que el desgaste de las bolas a incrementado debido a la presencia de 5 armónicas.

donde se obtuvo una desalineación de 2.93mm de paralelismo en el plano horizontal (aproximadamente 1.4 veces de la desalineación anterior y 5.75 veces de la desalineación inicial) y 2.29mm en el plano vertical. Los valores de angularidad fueron 0.25mm en el plano horizontal y 0.31mm en el plano vertical.

Después de aplicar esta desalineación se notó un ligero incremento en el defecto de las bolas al transcurrir 53 horas de funcionamiento desde el inicio del ensayo (Figura 11). Este incremento se debe a la aparición de más armónicas de esta frecuencia (7 armónicas en el espectro de vibración), lo que indica que este componente se encuentra en el nivel el cojinete de rodamiento aun esta pasando por el estado de falla 3.

En la Figura 12 se observa como se ha incrementado el desgaste en las pistas de los cojinetes de rodamiento en el estado de falla, esto se debe a la presencia de 5 armónicas de la frecuencia de defecto de de defecto de cada una de las pistas.

A pesar de que en la Figura 13 al cumplir 78 horas

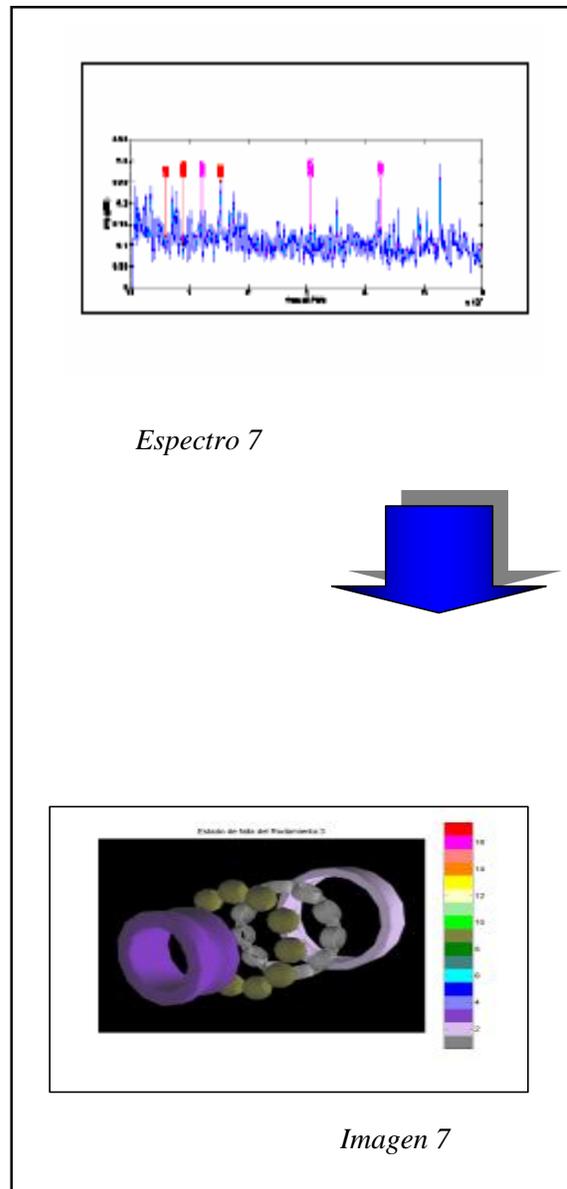


Figura 11. Resultados a las 53h de funcionamiento se nota un ligero incremento en el defecto de las de bolas.

funcionamiento se nota que aparecen armónicas de la frecuencia de defecto de la jaula y más armónicas de la frecuencia de defecto de la pista externa el cojinete de rodamiento se encuentra aun en el estado de falla 3, ya que el progreso de desgaste es lento.

En estos resultados se nota que los defectos que aparecen en una medición muchas veces no aparecen en la próxima debido a la cantidad de ruido absorbido por el sensor en el momento de hacer la medición; esta cantidad de ruido es capaz de ocultar defectos que

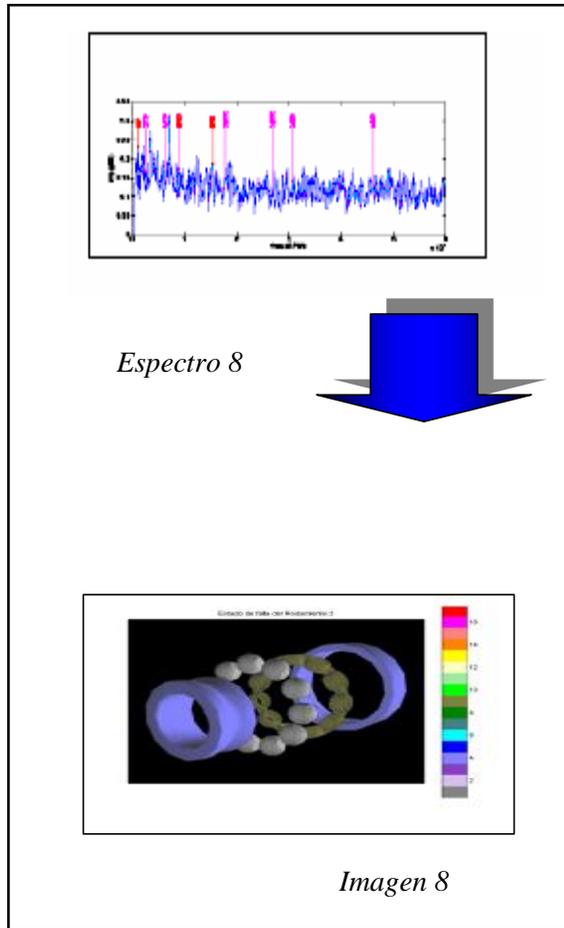


Figura 12. Resultados a las 56h de funcionamiento se observa como se ha incrementado el desgaste en las pistas de los cojinetes de rodamiento.

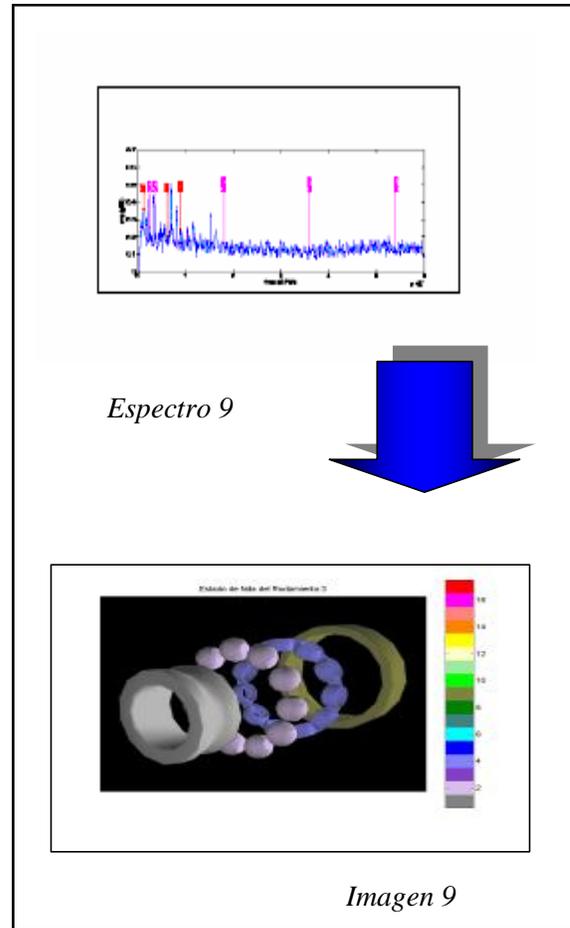


Figura 13. Resultados a las 78h de funcionamiento se nota que aparecen armónicas de la frecuencia de defecto de la jaula.

están presentes. Por esta razón el programa muestra en algunas mediciones la presencia de defecto en uno de los componentes de los cojinetes de rodamientos, ubicándolo en un determinado nivel; y en otras oportunidades lo presenta en un nivel inferior, lo que no indica que el defecto ha mejorado sino que la cantidad de ruido no ha permitido detectarlo.

Para los resultados obtenidos por el software diseñado, se desmontaron, los cojinetes de rodamientos de la bomba, luego se desarmó el cojinete # 4 (segundo cojinete de la bomba) en donde se observaron ciertas marcas en algunos de sus componentes como se observa en la Figura 14. El cojinete de rodamiento # 3 (principal objeto de estudio de este proyecto por su cercanía al acople) no se desarmó ya que este proceso implica dañar la jaula y por consiguiente alterar los resultados. Ambos cojinetes presentaron ruidos, lo que refleja que estos se habían desgastado.



Figura 14. Pista Interna de rodamiento N° 4 donde se observan marcas.

CONCLUSIONES

El sistema diseñado permite transformar en imágenes las señales de vibraciones provenientes de los cojinetes de rodamientos rígidos de bolas de una bomba centrífuga durante su funcionamiento para mostrarlas a través de interfaces con el usuario. Asimismo el banco de pruebas diseñadas permite recolectar la data de vibraciones, notándose el progreso de desgaste en los cojinetes de rodamientos. Con la firma de vibraciones se logró establecer un patrón de funcionamiento de los cojinetes de rodamiento, ya que con esta se pudo comprobar el buen estado en el que se encontraban estos componentes antes de iniciar el ensayo. Por último, cabe destacar que la confiabilidad del software aumenta al ingresar un valor cercano a la velocidad de giro real a la que opera la máquina.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SKF Condition Monitoring Inc.(1994): PRISM. Predictive Information System for Maintenance Management. Manual del Usuario. San Diego.
- [2] SKF Condition Monitoring Inc.(1994):The Microlog Data Collector CMVA 10, 30 y 40. Manual del Usuario. San Diego.
- [3] Norton Robert L. (1992): Design of Machinery. McGraw-Hill Inc.
- [4] Inman Daniel J. (1996): Engineering Vibration. Prentice-Hall, Inc.
- [5] C.H. Edwards Jr. y Penney David E. (1996): Differential Equations and Boundary value problems, computing and modelling. Prentice-Hall, Inc.
- [6] Kelly S. Graham. (1996): Mechanical Vibrations. McGraw-Hill Companies, Inc.
- [7] Viejo Zubicaray Manuel. (1977): Teoría, diseño y aplicaciones. Editorial Limusa.
- [8] Hall Allen S, Holowenko Alfred R, Laughlin Herman G. (1961): Machine Design. McGraw-Hill Companies, Inc.
- [9] Berry James E. (1993). Signature 1. IRD Mechanalysis, Inc.