



Análisis vibrodinámico de motores eléctricos

Roberto Manuel Torres-Rodríguez, Carlos Ramón Batista-Rodríguez

Recibido el 8 de octubre de 2009; aceptado el 29 de enero de 2010

Resumen

El artículo aborda el estudio vibrodinámico ejecutado en motores eléctricos de la fábrica de azúcar "Cristino Naranjo" durante la implementación del mantenimiento predictivo. En el mismo se exponen los trabajos realizados en las diferentes etapas de implementación del mantenimiento y el diagnóstico de defectos mediante la utilización del análisis espectral de vibraciones. Se muestran espectros de motor con problemas y en funcionamiento normal.

Palabras claves: Ingeniería de Mantenimiento, Mantenimiento Predictivo, análisis, vibraciones.

Vibrational and dynamic analysis of electric motors

Abstract

This work is concerned with the vibrational and dynamic study of electrical motors located in Cristino Naranjo sugar mill. It is done during the predictive maintenance implementation. At the some time some works are shown during this process as well the failures diagnostic by means of the use of spectrum analysis of vibration. The spectrums shown are related to motors with difficulties or well working.

Key words: Maintenance Engineering, Predictive Maintenance, vibration, análisis.

1. Introducción.

El mantenimiento de equipos e instalaciones industriales ha cobrado una gran importancia en las últimas décadas debido a que las exigencias de calidad en la producción son cada vez mayores y al hecho de que las empresas necesitan ser más competitivas en el ámbito del comercio internacional. Según estudios realizados por el *Massachusetts Institute of Technology*, a comienzos de este siglo la capacidad tecnológica de las empresas para el mantenimiento será un factor clave para el desarrollo industrial. En la industria Petroquímica estadounidense se gastaban en 1936 dos dólares en repuesto y materiales necesario para el mantenimiento por cada dólar empleados en las nóminas del personal correspondiente. En 1946 esta proporción era de 1 a 1 y en 1976 por cada dólar gastado en repuestos y materiales se gastaban dos dólares en concepto de pago a los técnicos de mantenimiento. [3]

En los Estados Unidos de Norteamérica, un 75% de las industrias utilizan diagnóstico técnico por condiciones de estado en sus sistemas industriales y un 68% de los mismos utilizan modelos de mantenimiento predictivo por computador. Así por ejemplo la *General Motor* gasta del orden de 500 millones de dólares anualmente por concepto de mantenimiento, y el ministerio de defensa de los Estados Unidos realiza un gasto anual total de 4200 millones de dólares. En términos de porcentaje promedio, según el tipo de industria, grado de obsolescencia de sus instalaciones, calificación de los recursos humanos y demás factores relevantes, los costos de mantenimiento oscilan entre el 2% y el 10% de la facturación anual, encontrándose la industria eléctrica más o menos en el punto medio. [2]

La forma en que se produce un fallo de una máquina eléctrica depende del tipo de máquina así como en las condiciones en las que trabaja. Sin embargo es posible identificar ciertos mecanismos de falla comunes a todas las máquinas. Cualquier fallo supone una ruta o mecanismo que hace que el defecto inicial se convierta en avería. [1]

Para la aplicación de técnicas avanzadas en el mantenimiento se hace necesario tener un

conocimiento preciso de las máquinas: de sus partes componentes y de su historial de funcionamiento. Esto también incluye el estudio vibrodinámico que permita definir las variables de estado a darle seguimiento y sus valores de frontera (alarma) para condiciones reales de explotación de los motores. La adaptación a las condiciones reales de montaje y explotación de cada máquina va resultando elemento importante para obtener los resultados principales de la aplicación del mantenimiento predictivo en motores eléctricos y otras máquinas. La obtención de firmas espectrales personalizadas facilita considerablemente el seguimiento de las variables de pronóstico.

En los motores eléctricos, la información obtenida del seguimiento del estado de funcionamiento proporciona datos de gran utilidad sobre su estado de operación que permiten predecir cantidad de fallas: rotura y agrietamiento de barras y anillos en cortocircuito del rotor, excentricidades, estática y dinámica, desequilibrios y desalineaciones mecánicas, fallas en los cojinetes, pérdida de alguna fase, cortocircuitos entre espiras, imperfecciones en el circuito magnético y otras. De este modo se evitan algunas averías que pudieran ser peligrosas para el personal o críticas para el sistema de producción. [2]

Tradicionalmente las máquinas eléctricas se consideraban elementos con bajo índice de averías, sobre todo si se trataba de motores Jaula de ardilla. Sin embargo la tendencia actual de diseñar máquinas de bajo costo hace que los materiales utilizados trabajen más cerca de sus límites de resistencia mecánica y electromagnética. Por este motivo y en especial cuando el motor trabaja en ambientes hostiles, la posibilidad de deterioro progresivo se ha incrementado. [2]

Teniendo en cuenta que con frecuencia los motores eléctricos se encuentran en puntos vitales de una gran complejidad, y que los criterios industriales actuales tienden hacia una producción de elevada calidad y sin interrupciones, se hace cada vez más necesario el

control de su funcionamiento para determinar los indicios de una posible avería. [2]

En la industria azucarera cubana el elemento motor de los accionamientos lo constituyen los motores eléctricos, muchos de los cuales son fundamentales en el proceso de obtención del azúcar como por ejemplo ventiladores de tiro forzado y de tiro inducido de las calderas, molinos, cuchillas, centrífugas.

Los motores eléctricos del área de molinos son máquinas de gran potencia y tamaño considerable por lo que su estado vibracional no solo influye en su propio estado de funcionamiento sino que también lo hace en su entorno (incluido el hombre). Lograr una correcta aplicación de las técnicas de mantenimiento predictivo tiene incidencia directa en los indicadores principales de eficiencia de la gestión de mantenimiento, así como en los indicadores ergonómicos y medioambientales, manteniéndose un control de las vibraciones y el ruido en niveles permisibles.

2. Metodología.

Implementación del sistema de Mantenimiento Predictivo (MP).

El MP no se le aplica a todas las máquinas, es decir, sus funciones en el proceso productivo (fundamentales) y altos costos de inversión y reparación, definen fundamentalmente la factibilidad de que su aplicación sea económica y efectiva.

¿Cuándo, dónde, qué y con qué medir las variables de estado definidas para el control?, son preguntas que necesitan de respuestas acertadas para la toma de decisión en cada momento.

Monitorización de las vibraciones

De las técnicas de mantenimiento predictivo para determinar el estado técnico de las máquinas, las más efectivas para las máquinas rotatorias es la monitorización de vibraciones. Muchos defectos pueden ser detectados con estas técnicas. También se tiene en cuenta el consumo de energía del motor, el estado de carga y la temperatura de los rodamientos, así como las horas de trabajo de los mismos.

Los Motores de los Molinos son equipos que por lo general aunque sus esfuerzos son elevados los

mismos trabajan a bajos niveles de vibración (generalmente no superan los 2 mm/s), por esta razón se deben tener en cuenta en las mediciones que superen estos valores aunque están dentro de la norma.

La monitorización de las variables de estado se realiza de forma discreta (off line). La decisión del método a utilizar se determinó por las características de los motores y la instrumentación disponible para la realización del control de parámetros. La monitorización en continua (on line) solo se justifica en determinados casos.

Para la colección de datos se utilizó el VIBROTEST 60 colector analizador FFT de vibraciones, de la firma alemana *SCHENCK*. Las bandas de frecuencia trabajadas están entre 5 Hz - 500 Hz y con un número de líneas de 800 teniendo en cuenta que los rangos de frecuencias donde deben poder aparecer las frecuencias fundamentales de fallas de los motores.

De los motores monitoreados se presentan en este trabajo solo dos representativos de los espectros obtenidos. En los trabajos previos de implementación se realizaron las tareas siguientes:

- Identificación de las máquinas y componentes a monitorizar.
- Recopilación de información. Historial de averías de la máquina, planos, etc.
- Selección, preparación e identificación de puntos de medición de las variables de estado.
- Ajuste de parámetros para el colector de datos.
- Determinación de frecuencias características para cada máquina.
- Determinación de niveles permisibles de vibraciones según la norma.
- Confección de rutas de medición.
- Adquisición de datos.
- Procesamiento de datos. Análisis de los resultados.

Con la realización de estas tareas técnicas fue posible realizar un diagnóstico del estado vibrodinámico de los motores monitoreados. Es importante recordar que para el diagnóstico es necesario tener pleno dominio de los aspectos siguientes:

- Parámetros estructurales y funcionales actualizados.
- Incidencias y evolución histórica del estado técnico.
- Causas de las vibraciones.
- Técnicas para procesar la información vibratoria disponible.
- Procedimientos lógicos de análisis de la información.

Por tanto se requiere de personal calificado con estos fines para la toma de decisiones oportunas. Para la aplicación de técnicas avanzadas en el mantenimiento es necesario no solo tener un conocimiento preciso de las máquinas si no también realizar un estudio vibrodinámico preliminar, que permita definir para las variables de estado a darle seguimiento sus valores de frontera (alarma) para condiciones reales de explotación de los motores. La adaptación a las condiciones reales de montaje y explotación de cada máquina va resultando elemento importante para obtener los resultados principales de la aplicación del mantenimiento predictivo mediante la obtención de patrones del estado vibrodinámico inicial lo que facilita considerablemente el seguimiento de las variables

de pronóstico. Esto es la caracterización vibrodinámica de los motores, que además permite la detección de fallas y su corrección.

La actualización continua de los parámetros estructurales y funcionales de las máquinas, las incidencias que sufren las mismas, la realización de las mediciones de forma periódica, en correspondencia con los cambios cuantitativos de los valores de las magnitudes controladas respecto a los valores normativos o de referencias conocidos o establecidos y su evolución de la condición técnica, son elementos esenciales para controlar el estado vibrodinámico de las máquinas.

Caracterización de los motores

Motor 1. Elemento motor del primer reductor del molino1

Datos de chapa.

Motor Trifásico, Rotor bobinado. 630 kW, 73.1 A, 888 r/min, Polos: 8, 6.3 kV, 60 Hz, Alimentación del Estator 6300 V / 71.6 A, Rotor 802 V / 49.7 A.

Tipo: YRKK 560 8, Serie: No X9 / 442, régimen continuo, Conexión YY. País: Brasil.

Puesta en marcha: 1998.

Tabla No. 1 Partes fundamentales de los rodamientos

| | | |
|---|-----------------------|-------------------------|
| Designación del rodamiento | NU 228 (delantero) | 6230 (trasero) |
| Diámetro exterior [dm] (mm) | 195 | 210 |
| Diámetro del elemento rodante [Dm] (mm) | 26 | 31.75 |
| Número de bolas [Z] | 17 | 11 |
| Angulo de contacto (grados) | 0.00 | 0.00 |
| Velocidad del anillo interior (r/min) | 888 | 888 |
| Código tipo rodamiento | 5 | 1 |
| Tipo de rodamiento | Patín cilíndrico | Bolas de surco profundo |
| Diámetro de pista exterior [D] (mm) | 250 | 270 |
| Diámetro de pista interior [d] (mm) | 140 | 150 |
| Número de filas | 1 | 1 |

Operaciones de mantenimiento en el periodo de reparaciones.

1. Desarme y lavado para extraerle las grasas residuales.
2. Limpieza con aire a presión para desalojar otras partículas.
3. Limpieza con agua a presión.
4. Suministro de calor para el secado.
5. Medición de la resistencia del aislamiento en diferentes momentos del proceso anterior hasta alcanzar el valor de resistencia: 60 MΩ. Para ello se utiliza una resistencia eléctrica como emisor de calor.
6. Barnizado de los enrollados (devanados)
7. Reparación de las escobillas y porta escobillas.
8. Valoración del estado técnico de los rodamientos.
9. Pintado de superficies exteriores.

Categoría del motor: Fundamental

Estados vibrodinámicos, niveles globales

Debido a que la velocidad de giro es de 888 r/mín y está comprendido en el rango de (600 – 12000) r

Algunas frecuencias características

Frecuencia fundamental y sus subarmónicos y armónicos (Hz)

| ff / 5 | ff / 4 | ff / 3 | ff / 2 | ff | 2 ff | 3 ff | 4 ff | 5 ff |
|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|-------|
| 2.96 | 3.7 | 4.93 | 7.4 | 14.8 | 29.6 | 44.4 | 59.2 | 74.18 |

Frecuencia de deterioro de los rodamientos (Hz)

Tabla No. 3 Frecuencia de deterioro de los cojinetes.

| Designación del rodamiento | NU 228 (Delantero) | 6230 (Trasero) |
|--|--------------------|----------------|
| Frecuencia de daño pista interior | 142.57 | 93.71 |
| Frecuencia de daño pista exterior | 109.03 | 69.09 |
| Frecuencia de daño elemento rodante | 109.03 | 95.65 |
| Velocidad de rotación pista interior | 14.80 | 14.80 |
| Velocidad rotacional de la jaula | 6.41 | 6.28 |
| Velocidad de rotación del elemento rodante | 54.51 | 47.83 |

/mín. se aplica la Norma ISO 10816 sobre severidad de vibraciones, la cual la clasifica en clase III por ser su potencia mayor de 300 kW y su cimentación rígida, en la tabla No. 2, se muestran los niveles de vibración según norma.

Tabla No. 2 Niveles de vibración ISO 10816, clase III

| | |
|---------------|--------------------|
| Normal | (0.28 – 2.80) mm/s |
| Admisible | (2.80 – 7.10) mm/s |
| Límite | (7.10 – 18) mm/s |
| No permisible | (> 18) mm/s |

Dado que los resultados obtenidos no rebasan los 2 mm/s se encuentra en los límites normales. Estos motores se caracterizan por bajos niveles de vibraciones

Las bandas de frecuencia trabajadas están entre 5 Hz - 500 Hz y con un número de líneas de 800. Los rangos de frecuencias donde se dan las fallas fundamentales del motor, se encuentran dentro de estos límites.

Cálculo del paso de los Alabes (FA) del sistema de enfriamiento en el rotor.

| Lado de los anillos | Lado del <i>Coupling</i> |
|--------------------------------|-------------------------------|
| FA = Número de Alabes * r/min. | FA = Número de Alabes * r/min |
| FA = 30 * 888 | FA = 32 * 888 |
| FA = 26640 r/min | FA = 28416 r / min |
| FA = 444 Hz | FA = 473,6 Hz |

Cálculo de la frecuencia de origen eléctrico

Excentricidad Estática

La frecuencia más característica es dos veces el valor de la frecuencia de línea.

$$2 f \text{ línea} = 120 \text{ Hz}$$

Excentricidad Dinámica

Las frecuencias más características son bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental.

| | |
|--|--------------------------|
| $ED = 1 \text{ RPM} \pm S * f \text{ línea}$ | $S = [(ns - nr)/ns]*100$ |
| $ED = 14.8+0.0133*60 = 15.598 \text{ Hz}$ | $S = [(900-888)/900*100$ |
| $ED = 14.8-0.0133*60 = 14.002 \text{ Hz}$ | $S = 1.33 \%$ |

Frecuencia de paso de polos (fpp)

Es el número de polos del estator multiplicado por la frecuencia fundamental de rotación del motor en Hz.

$$f_{pp} = N^{\circ} P * ff$$

$$f_{pp} = 8 * 14.8 \text{ Hz}$$

$$f_{pp} = 118.4 \text{ Hz}$$

Los puntos de medición en los motores fueron tomados en los puntos de apoyo (en los rodamientos) y la numeración desde el motor hacia el reductor, por ejemplo:

MM1H1: motor molino 1, dirección horizontal punto 1.

Como se observa en la figura 1 los armónicos segundo y tercero están excitados, el tercer armónico aún más excitado lo que es síntoma evidente de desalineación paralela, también está manifiesta la excentricidad estática (asimetría del entrehierro) reflejada en la frecuencia de 120 Hz. En este caso da origen a pulsaciones con amplitudes relativamente bajas, pero no debe olvidarse que estamos en presencia de motores con niveles de vibraciones bajas, por lo que estos valores pueden ser significativos.

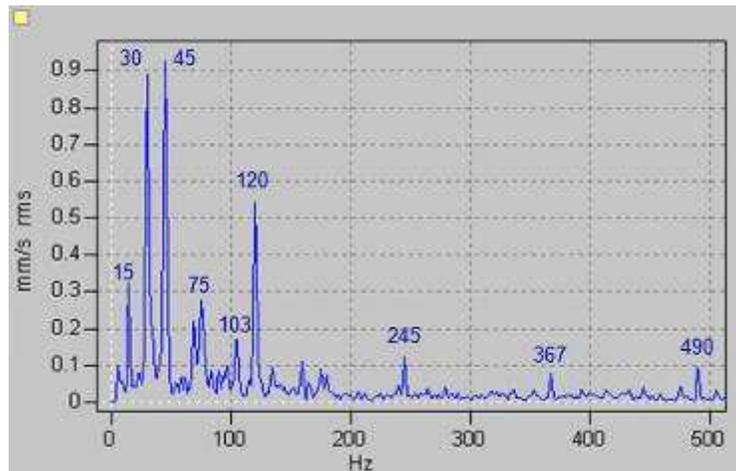


Figura 1. Espectro de vibración del motor 1 punto MM1H1

En el espectro de la figura 2, correspondiente al punto 2, se puede ver como la excentricidad estática persiste y no se transmite en igual medida la desalineación paralela manifiesta en el punto 1, donde el árbol, además del rodamiento, es apoyado por las escobillas que conectan el circuito del rotor con el exterior (con el banco de resistencias)

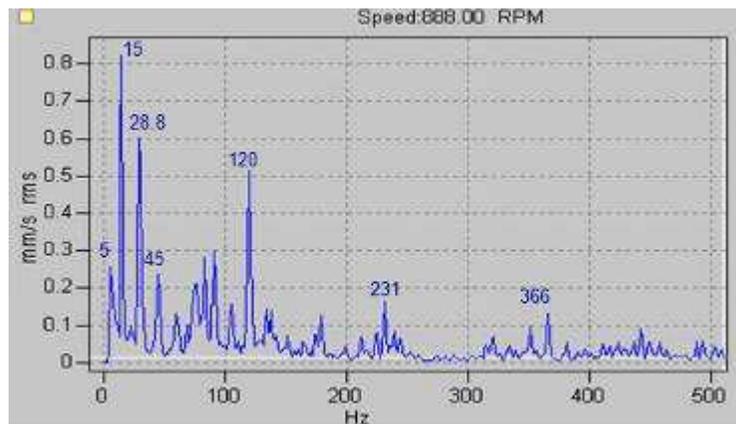


Figura 2. Espectro de vibración del motor 2 punto MM1H2

Motor 2. Elemento motor del primer reductor del molino 4

Datos de chapa.

Motor Trifásico Rotor bobinado 500 KW, 58 A 900 r/min. Polos: 8, Ciclo: 60Hz, 6.3 KV, Alimentación del Estator 6300 V, 58 A, Alimentación del Rotor 825 V, 380 A, 70 C°, Tipo: AK 313 – 52 -8T4, Serie: N° 422168 Régimen continuo Conexión Y País: URSS

Puesta en marcha: 1998.

Partes fundamentales de los rodamientos

| | | |
|---|---------------------------|-------------------------|
| Designación del rodamiento | NU 326 (delantero) | 6326 (trasero) |
| Diámetro exterior [dm] (mm) | 205 | 205 |
| Diámetro del elemento rodante [Dm] (mm) | 38 | 44.45 |
| Número de bolas [Z] | 13 | 8 |
| Angulo de contacto (grados) | 0.00 | 0.00 |
| Velocidad del anillo interior (r/min) | 900 | 900 |
| Código tipo rodamiento | 5 | 1 |
| Tipo de rodamiento | <i>Cylindrical roller</i> | <i>Deep groove ball</i> |
| Diámetro de pista exterior [D] (mm) | 280 | 280 |
| Diámetro de pista interior [d] (mm) | 130 | 130 |
| Número de filas | 1 | 1 |

Categorización del motor: fundamental

Estado vibrodinámico

Este motor también clasifica en la categoría III de la norma de vibraciones. Se encuentra dentro de los límites normales de vibraciones.

Algunas frecuencias características

Frecuencia fundamental y sus subarmónicos y armónicos (Hz)

| | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|----|------|------|------|------|
| ff / 5 | ff / 4 | ff / 3 | ff / 2 | ff | 2 ff | 3 ff | 4 ff | 5 ff |
| 3 | 3.75 | 5 | 7.5 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 |

Frecuencia de deterioro de los rodamientos (Hz)

| | | |
|--|--------------------|----------------|
| Designación del rodamiento | NU 326 (Delantero) | 6326 (Trasero) |
| Frecuencia de daño pista interior | 115.57 | 73.01 |
| Frecuencia de daño pista exterior | 79.43 | 46.99 |
| Frecuencia de daño elemento rodante | 78.14 | 65.13 |
| Velocidad de rotación pista interior | 15 | 15 |
| Velocidad rotacional de la jaula | 6.11 | 5.87 |
| Velocidad de rotación del elemento rodante | 39.07 | 32.96 |

Cálculo de paso de Alabes (FA) del sistema de enfriamiento en el rotor.

Lado de los anillos

FA = Número de Alabes * r/min

FA = 30 * 900

FA = 27000 r/min

FA = 450 Hz

Lado del *Coupling*

FA = Número de Alabes * r/min

FA = 32 * 900

FA = 28800 r/min

FA = 480 Hz

Cálculo de la frecuencia de origen eléctrico.

Excentricidad Estática

La frecuencia más característica es dos veces el valor de la frecuencia de línea.

$$2 f \text{ línea} = 120 \text{ Hz}$$

Excentricidad Dinámica

Las frecuencias más características son bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental.

| | |
|--|-----------------------------|
| $ED = 1 \text{ RPM} \pm S * f \text{ línea}$ | $S = [(ns - nr)/ns]*100$ |
| $ED = 15 + 0.0133*60 = 15.798 \text{ Hz}$ | $S = [(900 - 888)/900]*100$ |
| $ED = 15 - 0.0133*60 = 14.202 \text{ Hz}$ | $S = 1.33 \%$ |

Frecuencia de paso de polos (fpp)

$$f_{pp} = N^{\circ} P * ff$$

$$f_{pp} = 8 * 15 \text{ Hz}$$

$$f_{pp} = 120 \text{ Hz}$$

En la figura 3 se evidencia para este punto problemas de desalineación causado por defectos en los porta escobillas, los niveles de vibración de alrededor de 4 mm/s, están dentro de los límites admisibles según la norma.

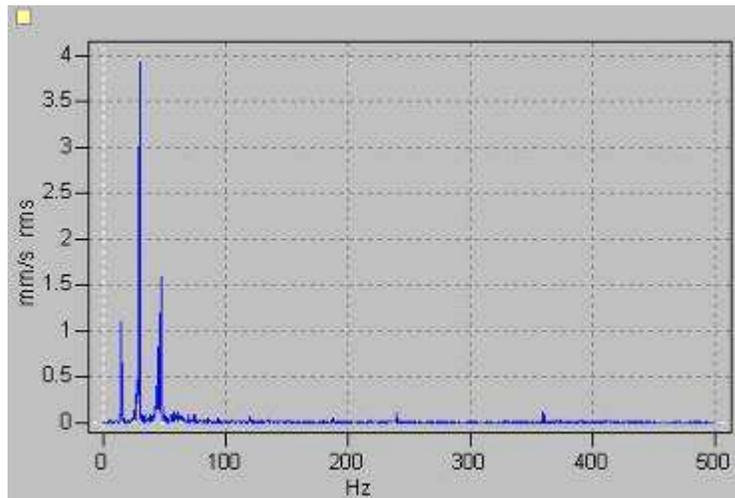


Figura 3. Espectro de vibración del punto1horizontal del motor 2 (motor4 molino4)

En la figura 4 se observa un espectro de vibraciones característico de la no-existencia de fallas.

En los dos motores analizados no se presentaron las demás direcciones medidas en los puntos por no representar otras posibles fallas

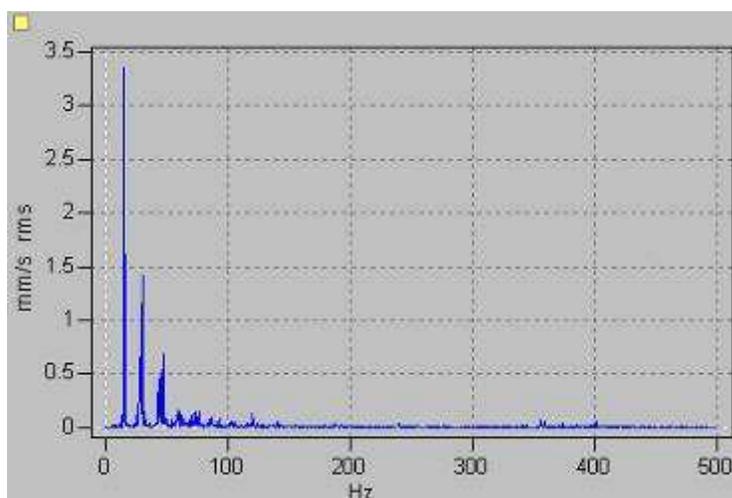


Figura 4. Espectro de vibración del punto 2 horizontal del motor 2 (motor4 molino4)

3. Conclusiones.

El estudio realizado permitió detectar algunos defectos de los motores y obtener las bandas de frecuencias y otras informaciones necesarias para la implementación del Mantenimiento Predictivo mediante el análisis de las vibraciones.

La detección de estas fallas dió la posibilidad de corregirlas en el momento oportuno, evitando averías de mayor grado en rodamientos y otros componentes.

Este trabajo constituye la tarea inicial en la aplicación del Mantenimiento Predictivo en estos motores.

4. Referencias.

1. **ROBLES, F.** *Personalización de firmas espectrales en la industria Hidroeléctrica*. Tesis presentada para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias, Barcelona. 1998
2. **FERNÁNDEZ CABANAS, M.** *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo, 1998.
3. **JURIC KOMORSKI, Z.** *Proyecto integral de implantación de mantenimiento predictivo*. Madrid: Mantenología S.A, 1994.

Roberto Manuel Torres-Rodríguez, Carlos Ramón Batista-Rodríguez

Centro de Diagnóstico e Ingeniería del Mantenimiento. Universidad de Holguín.

Ave. XX Aniversario. Piedra Blanca. Holguín. CP 80100. Cuba

Email: rtorres@facing.uho.edu.cu