



**ANÁLISIS VIBRACIONAL EN EQUIPOS ROTATIVOS Y
MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

**CAPÍTULO VII
TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE
RODAMIENTOS O COJINETES ANTIFRICCIÓN**

CIRO MARTÍNEZ TRINIDAD

martinez_ciro@yahoo.com

ANÁLISIS VIBRACIONAL EN EQUIPOS ROTATIVOS Y

MANTENIMIENTO PREDICTIVO

TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE RODAMIENTOS O COJINETES ANTIFRICCIÓN

| | |
|--|------|
| Introducción | 7.5 |
| Consideraciones para la medición a alta frecuencia | 7.5 |
| Procesamiento de la señal..... | 7.6 |
| Fallas en rodamientos..... | 7.8 |
| Ejercicios | 7.12 |
| Bibliografía | 7.12 |
| Ejemplo 1; Frecuencias de fallas del rodamiento SKF 6209..... | 7.13 |
| Ejemplo 2; Análisis vibracional en una electrobomba vertical de 200 Hp | 7.14 |
| Introducción | 7.14 |
| 1. Descripción de la unidad..... | 7.14 |
| 2. Cálculo de las frecuencias de los rodamientos | 7.15 |
| 3. Toma de datos de vibración | 7.17 |
| 4. Recomendaciones..... | 7.20 |

TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE RODAMIENTOS O

COJINETES ANTIFRICCIÓN

INTRODUCCIÓN

Los impactos mecánicos repetitivos y transcientes, generan energía que excitan las frecuencias naturales de los elementos que son golpeados, los impactos se producen con la fricción entre dos superficies.

Por ejemplo; en los dientes de dos engranajes cuyos perfiles están deteriorados o entre los elementos de los rodamientos cuando hay deslizamiento, el resultado de estos impactos, son la aparición de picos de energía de muy alta frecuencia que se generan a la frecuencia de los impactos, que son; la frecuencia de engrane o las frecuencias de fallas de los elementos de los rodamientos.

Se utiliza para detectar defectos incipientes en; rodamientos, engranajes, ejes y cojinetes por; rozamiento al fallar la lubricación, cavitación, soldaduras, etc. sin embargo para lograr una evaluación eficiente de una máquina es necesario medir; desplazamiento, velocidad y aceleración de la vibración.

CONSIDERACIONES PARA LA MEDICIÓN A ALTA FRECUENCIA

La señal de muy alta frecuencia es transmitida desde la fuente a través de la estructura de los apoyos hacia la superficie exterior donde el acelerómetro convenientemente instalado capta la señal, para hallar defectos en rodamientos y engranajes debe analizarse en conjunción con las mediciones de temperatura, ruido, desplazamiento, velocidad y aceleración de la vibración.

La medición a alta frecuencia es muy sensible al tipo de sensor, al método de toma y a la dirección de la medición; un ligero deslizamiento del sensor causará variaciones significativas en las mediciones que llevará a falsas conclusiones.

- Cada tipo de acelerómetro tiene sus propias frecuencias resonantes.
- Como las señales son muy pequeñas y de muy alta frecuencia entonces no se deben medir con las sondas, porque éstas son utilizadas para mediciones de baja frecuencia (inferiores a 30,000 CPM) y debido a su longitud atenúan la señal.

- Lo ideal es el montaje del acelerómetro con un espárrago, pero no es práctico para el monitoreo, entonces utilizar el montaje magnético, la superficie debe ser plana y limpia. Para mejorar la transmisión de las señales a alta frecuencia es conveniente echar una capa de grasa.

PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

El procesamiento de señales (Spike Energy™, Shock Pulse, High Frequency Developing, etc.) de muy alta frecuencia usado por cada fabricante de colectores y analizadores, varía ligeramente, pero todos siguen el siguiente procedimiento:

1. Las señales se captan con un acelerómetro.
2. Las señales (formas de onda) que vienen del acelerómetro son procesadas por un circuito especial que posee un filtro de paso de alta frecuencia, para el caso del Spike Energy™, se eliminan todas las señales inferiores a 300,000 CPM, ver figura 7.1.

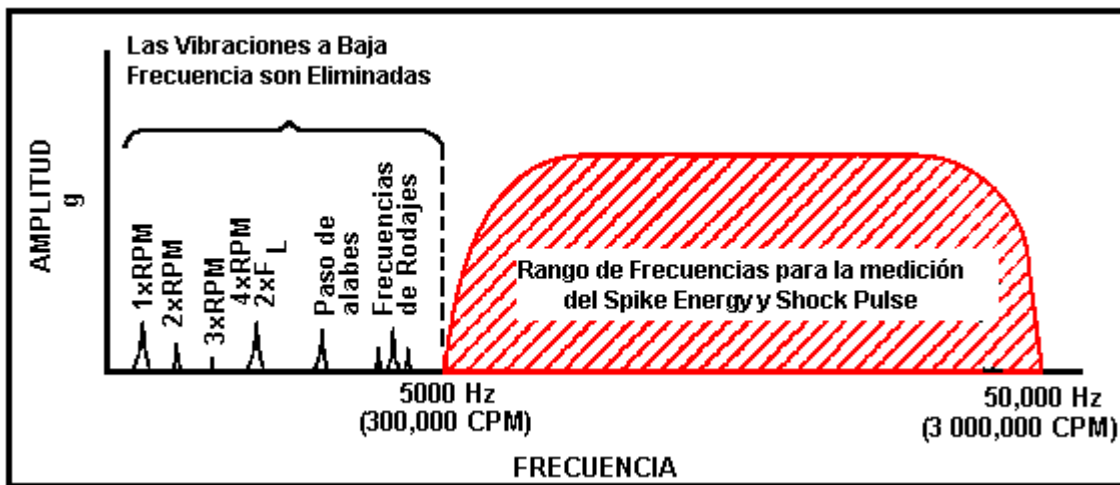


Figura 7.1 Rango de medición de frecuencias con un filtro pasa-alta

- 2.1 El filtro pasa-alta, elimina las vibraciones a baja frecuencia causadas por; desbalance, desalineamiento, ejes deflexionados, problemas eléctricos, resonancia de estructuras, solturas, pulsación, etc.
- 2.2 No se eliminan las señales correspondientes a las frecuencias naturales excitadas por los impactos.

3. Las señales a alta frecuencia, pasan por un rectificador que elimina la parte negativa de las formas de onda.
4. La señal rectificada pasa por un detector de (pico-pico) que detecta y retiene la amplitud pico de la señal, o sea se traza una envolvente a través de todos los picos de la forma de onda del lado positivo. La envolvente da como resultado una nueva forma de onda a baja frecuencia.
5. La forma de onda de baja frecuencia es digitalizada y procesada por un algoritmo de la Transformada rápida de Fourier para obtener un espectro de frecuencias o sea la señal es descompuesta en sus frecuencias componentes, que son las frecuencias de los impactos.
6. La unidad de aceleración de la amplitud es en gravedades g 's.

En engranajes excéntricos o desalineados el juego entre dientes varía, causando desgaste desigual en los dientes generando amplitudes de vibración moduladas (altas y bajas) en un giro del engranaje afectada por la frecuencia de engrane (# de dientes x RPM). Así mismo las amplitudes de vibración en los rodamientos varían cuando los defectos en las pistas o billas trabajan dentro y fuera de la zona de carga, ver figura 7.2.

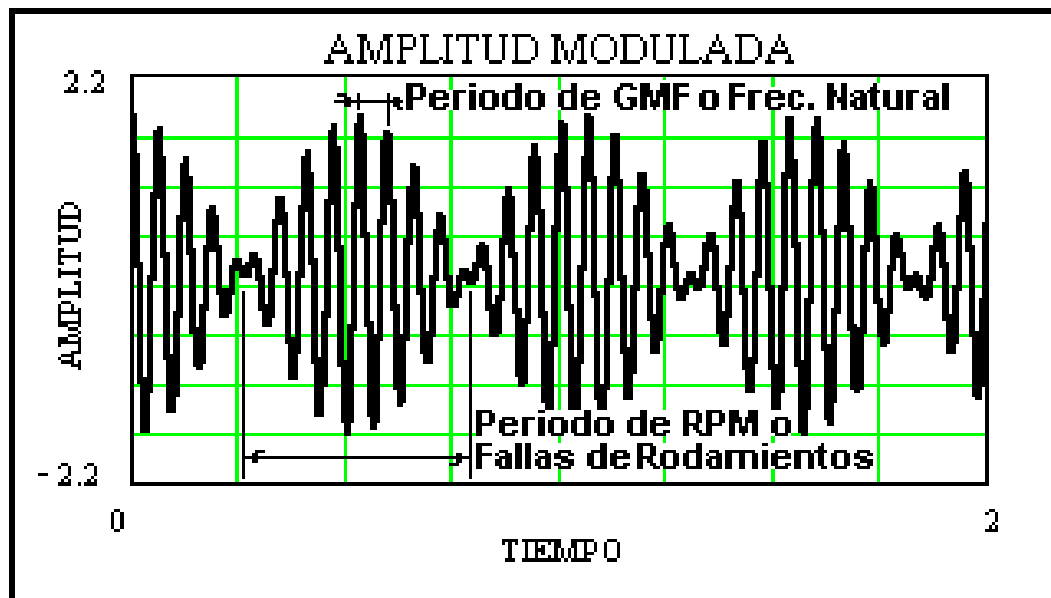


Figura 7.2 Amplitud Modulada

Los errores de; paso de dientes en engranajes, dientes rajados o perfiles deteriorados, varían la velocidad angular del engranaje causando la modulación de la frecuencia (RPM del engranaje) afectada por la frecuencia de engrane. Así mismo en los rodamientos deteriorados se generan deslizamientos que producen impactos a las frecuencias de falla de los rodamientos y que modulan a las frecuencias naturales de sus elementos ver figura 7.3.

FALLAS EN RODAMIENTOS

Los rodamientos generan frecuencias de fallas propias de su geometría y velocidad de operación que pueden ser moduladas por las velocidades de giro de las pistas:

1. BPFO: Frecuencia de falla de la pista exterior (ball pass frequency outer race)

$$BPFO = \frac{N}{2} |RPM_o - RPM_i| \left(1 - \frac{B}{P} \cos\Phi\right)$$

2. BPFI: Frecuencia de falla de la pista interior (ball pass frequency inner race)

$$BPFI = \frac{N}{2} |RPM_o - RPM_i| \left(1 + \frac{B}{P} \cos\Phi\right)$$

3. BSF: Frecuencia de falla de la billa (ball spin frequency)

$$BSF = \frac{P}{2B} |RPM_o - RPM_i| \left(1 + \frac{B^2}{P^2} \cos^2\Phi\right)$$

4. FTF: Frecuencia de falla de la canastilla (fundamental train frequency)

$$FTF = \frac{RPM_i}{2} \left(1 - \frac{B}{P} \cos\Phi\right) + \frac{RPM_o}{2} \left(1 + \frac{B}{P} \cos\Phi\right)$$

RPM_i : Velocidad de giro de la pista interior

RPM_o : Velocidad de giro de la pista exterior

N : Número de billas o rodillos

Φ : Ángulo de contacto entre la línea perpendicular al eje y del centro de la billa al punto dónde la billa hace contacto con el arco de la pista.

- P : Diámetro primitivo, en pulgadas.
- B : Diámetro de la billa o del rodillo; valor promedio para los rodamientos cónicos, en pulgadas.

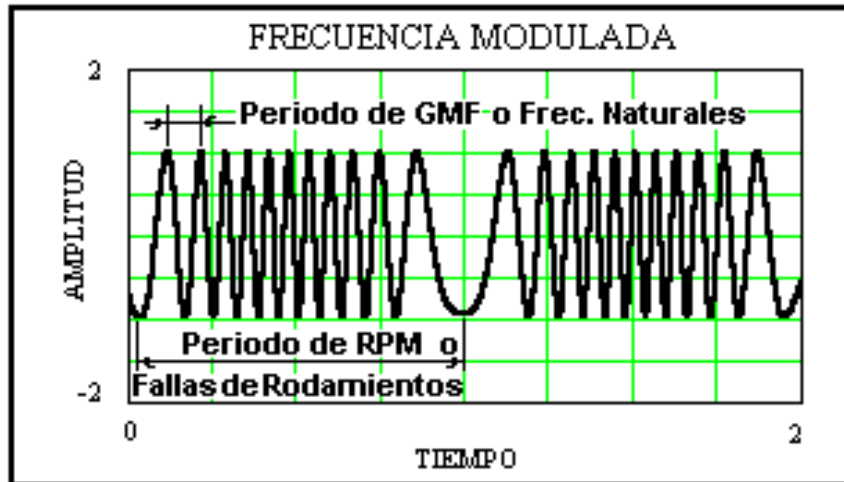


Figura 7.3 Frecuencia Modulada

Para tomar decisiones sobre el estado de un rodamiento, una de las consideraciones más importantes es el cambio brusco que pueda experimentar entre una lectura y otra de cualquiera de los siguientes parámetros; vibración, ruido, señal de muy alta frecuencia (HFD, Spike Energy™ o Shock Pulse) o temperatura. Esto nos advertirá que el rodamiento está pasando de una etapa de deterioro a otra más avanzada.

| Condición del Rodamiento de Billas | Grasa | Baño de Aceite | Aceite Circulante |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Normal: | 33 hasta 33+Tamb°C | 28 hasta 28+Tamb°C | 22 hasta 22+Tamb°C |
| Advertencia | 33+Tamb°C hasta 55+Tamb°C | 28+Tamb°C hasta 50+Tamb°C | 22+Tamb°C hasta 39+Tamb°C |
| Peligro | >55+Tamb°C | >50+Tamb°C | >39+Tamb°C |

Tabla 7.1 Temperaturas Admisibles de Rodamientos Medidos en sus Alojamiento, para Temperaturas Ambientales de 5°C a 38°C

En la tabla 7.1 se muestran las temperaturas admisibles para rodamientos de billas y en la tabla 7.2, se muestran los criterios para decidir el estado de los rodamientos.

Estetoscopio Industrial SPM ELS - 12 que es altamente subjetivo y porque otras fallas como la cavitación, turbulencias aerodinámicas y otros ruidos producidos por la maquina interfieren con el sonido emitido por los rodamientos especialmente cuando la distancia del rodamiento al punto de toma es muy alejada, no se puede hacer comparaciones confiables entre una medida a otra porque no se tiene un valor y porque el ruido en rodamientos se presenta cuando esta en la ultima etapa de deterioro.

Una guía muy utilizada es la Cartilla de Severidad de IRD Spike Energy™ para rodamientos de bolas y tomados en cajas de rodamientos con acelerómetro IRD Modelo 970 con accesorio magnético, notar que las unidades son en gSE, esto significa que se mide aceleración en g's pero no de la manera convencional sino en la forma especial como procesa la señal de Spike Energy™.

| OBSERVACIONES | BUENO | REGULAR | ALARMA | MALO |
|---|------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1. Incremento del Ruido | No hay | Ligero | Audible | Elevado |
| 2. Incremento de Temperatura | No hay | + 5°C | + 10°C | + 15°C |
| 3. Vibraciones a la frecuencia de falla de los rodamientos: | | | | |
| 3.1 Desplazamiento | No hay | No hay | No hay | Vibraciones aleatorias |
| 3.2 Velocidad | No hay | Amplitudes muy bajas | Sí, con bandas vecinas | Vibraciones aleatorias |
| 3.3 Aceleración | No hay | Amplitudes muy bajas | Sí, con bandas vecinas | Vibraciones aleatorias |
| 4. Vibraciones a la frecuencia natural de los rodamientos | No hay | Sí, con bandas vecinas | Sí, con bandas vecinas | Vibraciones aleatorias |
| 5. Vibraciones a alta frecuencia: | | | | |
| 5.1 Emisión Acústica (dB) | 10 – 19 | 20 – 29 | 30 – 39 | Más de 40 |
| 5.2 HFD (g's) | 0.3 - 0.74 | 0.75 – 1.49 | 1.5 – 2.99 | Más de 3 |
| 5.3 Spike Energy™ (g SE) | 0.2 - 0.39 | 0.4 – 0.79 | 0.8 – 1.49 | Más de 1.5 |

Tabla 7.2 Criterio para decidir el estado de los rodamientos

Las frecuencias de los rodamientos son calculadas y actualmente hay softwares con base de datos de las frecuencias de falla para cada uno de sus elementos, el IQ2000 tiene datos de varios fabricantes de rodamientos tales como SKF, NDH, etc. en la tabla 7.3, se encuentran las frecuencias de falla para el rodamiento SKF 6209 y se puede apreciar que se da especial énfasis a las bandas vecinas (sidebands) de las frecuencias de falla de las pistas exterior e interior del rodamiento que se encuentran moduladas por las RPM del eje.

La soltura en rodamientos por inapropiado ajuste entre el eje y la pista interior o entre la pista exterior y su alojamiento causan armónicas debido a la no-linealidad de respuesta de las partes sueltas con las partes dinámicas de la maquina, también puede existir soltura del impulsor en su eje. El ángulo de fase es inestable o puede variar ampliamente de una medida a otra debido a que el rotor cambia de posición de un arranque a otro, la vibración por soltura es direccional y se puede notar el cambio de niveles variando la posición del sensor 30 grados en el sentido radial alrededor del alojamiento de los rodamientos; también a menudo se producen subarmónicas y múltiplos exactos a $1/2 \times \text{RPM}$ o $1/3 \times \text{RPM}$.

EJERCICIOS

1. Calcular las frecuencias de falla de un rodamiento de las siguientes características; 9 billas, 0.5 pulgadas de diámetro de billa, 2.6 pulgadas de diámetro primitivo del rodamiento, 35° de ángulo de contacto, la pista interior gira a 1785 RPM y la pista exterior a 600 RPM.
2. Describa el procesamiento de la señal para obtener el espectro de frecuencias modulada HFD o Spike Energy.

BIBLIOGRAFÍA

1. Charles Berggren, "Diagnosing Fault in Rolling Element Bearings – Part 1. Assesing Bearing Condition", Vibrations Vol No. 1 March 1988
2. Tylor, James I.; "Determination of Antifriction Bearing Condition by Spectral Analysis"; Sixth Series of Technology Interchange on Machinery Vibration Monitoring and Analysis; The Vibration Institute.
3. Ming Xu; "Spike Energy and its applications" Shock and Vibrations Digest, Vol 27, No. 3.
4. Smiley, R. G. And Wetzel, R.L.; Entek Scientific Corporation; Cincinnati, OH; "Set Alarm Levels Without Guess Work"; Proceedings 12th Annual Meeting – The Vibration Institute; May, 1988.

EJEMPLO 1:

FRECUENCIAS DE FALLAS DEL RODAMIENTO SKF 6209

DATOS FÍSICOS

Número de billas : 9
 Diámetro de la billa : 0.5 pulg.
 Diámetro primitivo del giro de billas : 2.559 pulg.
 Angulo de contacto : 0°

| ARMÓNICA | EJE RPM | FTF | BSF | BPFO | BPFI |
|----------|---------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 1780 | 716 | 4381 | 6445 | 9575 |
| 2 | 3560 | 1432 | 8762 | 12890 | 19150 |
| 3 | 5340 | 2148 | 13143 | 19335 | 28725 |

Bandas vecinas a 1780 RPM, usuales alrededor de las frecuencias de falla de la pista exterior y de la pista interior del rodamiento.

| ARMÓNICA | BPFO +/- SIDEBANDS | | |
|----------|--------------------|--|-------|
| 1 | 6445 | | |
| | 4665 | | 8225 |
| | 2885 | | 10005 |
| 2 | 12890 | | |
| | 11110 | | 14670 |
| | 9330 | | 16450 |
| 3 | 19335 | | |
| | 17555 | | 21115 |
| | 15775 | | 22895 |

| BPFI +/- SIDEBANDS | | |
|--------------------|--|-------|
| 9575 | | |
| 7795 | | 11355 |
| 6015 | | 13135 |
| 19150 | | |
| 17370 | | 20930 |
| 15590 | | 22710 |
| 28725 | | |
| 26945 | | 30505 |
| 25165 | | 32285 |

Frecuencias en CPM

Tabla 7.3 Frecuencias de Fallas del Rodamiento Radial de Billas SKF 6209

EJEMPLO 2:

ANALISIS VIBRACIONAL EN UNA ELECTROBOMBA VERTICAL DE 200 Hp

INTRODUCCIÓN

La unidad 5G7 es una de las tres electrobombas de refuerzo que dan la presión inicial a otras bombas de mayor tamaño y capacidad, que bombean petróleo a un caudal promedio de 55,000 BPD. En los dos últimos meses se han incrementado la vibración y temperatura del rodamiento de empuje del motor eléctrico.

1. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD

Motor Eléctrico:

Fabricante : General Electric

Modelo : 5K6317XJ35A

S/N : ALJ122017, Pot: 200 Hp

RPM : 1780, V: 2300, Amp: 46,5

Frame : 6317P24, Aisl: Tipo K, F.S.: 1.15

Rodamiento. L.L. 7226BG, L.A. 6219

Bomba:

Fabricante : Ingersoll Rand

Modelo : V10LFM10C

Etapas : 3, Cap.: 2500 GPM

RPM : 1780, Alt.: 184 pies

Potencia : 200 Hp

2. CÁLCULO DE LAS FRECUENCIAS DE LOS RODAMIENTOS

2.1 Frecuencias de falla del rodamiento de empuje de contacto angular SKF 7226BG del lado libre del motor eléctrico, ver tabla 7.4.

Datos Físicos

Numero de billas : 16
 Diámetro de la billa : 1.2500 pulg.
 Diámetro primitivo del giro de billas : 7.086 pulg.
 Angulo de contacto : 35.0°

| ARMÓNICAS | EJE RPM | FTF | BSF | BPFO | BPFI |
|-----------|------------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 1781 | 762 | 4943 | 12189 | 16307 |
| 2 | 3562 | 1524 | 9885 | 24378 | 32614 |
| 3 | 5343 | 2285 | 14828 | 36567 | 48921 |
| 4 | 7124 | 3047 | 19771 | 48757 | 65227 |

Bandas vecinas a 1781 RPM, usuales alrededor de las frecuencias de falla de la pista exterior y de la pista interior del rodamiento.

| ARMÓNICAS | BPFO +/- SIDEBANDS | | | BPFI +/- SIDEBANDS | | |
|-----------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|--------|
| | | 12189 | | | 16307 | |
| 1 | 10408 | | 13970 | 14526 | | 18088 |
| | 8627 | | 15751 | 12745 | | 19869 |
| 2 | | 24378 | | | 32614 | |
| | 32614 | | 26159 | 30833 | | 34395 |
| | 20816 | | 27940 | 29052 | | 36176 |
| 3 | | 36567 | | | 48921 | |
| | 34786 | | 38348 | 47140 | | 50702 |
| | 33005 | | 40129 | 45359 | | 52483 |
| 4 | | 48757 | | | 65227 | |
| | 46976 | | 50538 | 63446 | | 67008. |
| | 45195 | | 52319 | 61665 | | 68789 |

Frecuencias en CPM

Tabla 7.4 Frecuencias de Fallas del Rodamiento de Empuje de Contacto Angular SKF 7226BG

2.2 Frecuencias de falla del rodamiento radial SKF 6219 del lado acoplado del motor eléctrico, ver tabla 7.5.

Datos Físicos

Numero de billas : 10
 Diámetro de la billa : 0.9370 pulg.
 Diámetro primitivo del giro de billas : 5.216 pulg.
 Angulo de contacto : 0°

| ARMÓNICAS | RPM | FTF | BSF | BPFO | BPFI |
|-----------|------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 1781 | 731 | 4797 | 7305 | 10505 |
| 2 | 3562 | 1461 | 9594 | 14611 | 21009 |
| 3 | 5343 | 2192 | 14392 | 21916 | 31514 |
| 4 | 7124 | 2922 | 19189 | 29221 | 42019 |

Bandas vecinas a 1781 RPM, usuales alrededor de las frecuencias de falla de la pista exterior y de la pista interior del rodamiento.

| ARMÓNICAS | BPFO +/- SIDEBANDS | | | BPFI +/- SIDEBANDS | | |
|-----------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
| | | 7305 | | | 10505 | |
| 1 | 5524 | | 9086 | 8724 | | 12286 |
| | 3743 | | 10867 | 6943 | | 14067 |
| 2 | | 24378 | | | 32614 | |
| | 32614 | | 26159 | 30833 | | 34395 |
| | 20816 | | 27940 | 29052 | | 36176 |
| 3 | | 21916 | | | 31514 | |
| | 20135 | | 23697 | 29733 | | 33295 |
| | 18354 | | 25478 | 27952 | | 35076 |
| 4 | | 29221 | | | 42019 | |
| | 27440 | | 31002 | 40238 | | 43800 |
| | 25659 | | 32783 | 38457 | | 45581 |

Frecuencias en CPM

Tabla 7.5 Frecuencias de Fallas del rodamiento radial de billas SKF 6219

3. TOMA DE DATOS DE VIBRACIÓN

- 3.1 Toma del espectro de frecuencias en el rodamiento de empuje en la dirección radial al eje del motor y perpendicular a la línea de descarga, esta toma tiene como objetivo discriminar las fallas eléctricas de las mecánicas.

El espectro tiene las siguientes características;

Frecuencia máxima: 12000 CPM

de líneas: 3200

En la figura 7.5, observamos vibraciones a 1 RPM (1782.2 RPM) producto del ligero desbalance del rotor del motor eléctrico, pero la magnitud de la vibración es menor que 1 mm/seg RMS y la amplitud total es de 2.21 mm/seg RMS (máximo tolerable: 6 mm/seg RMS).

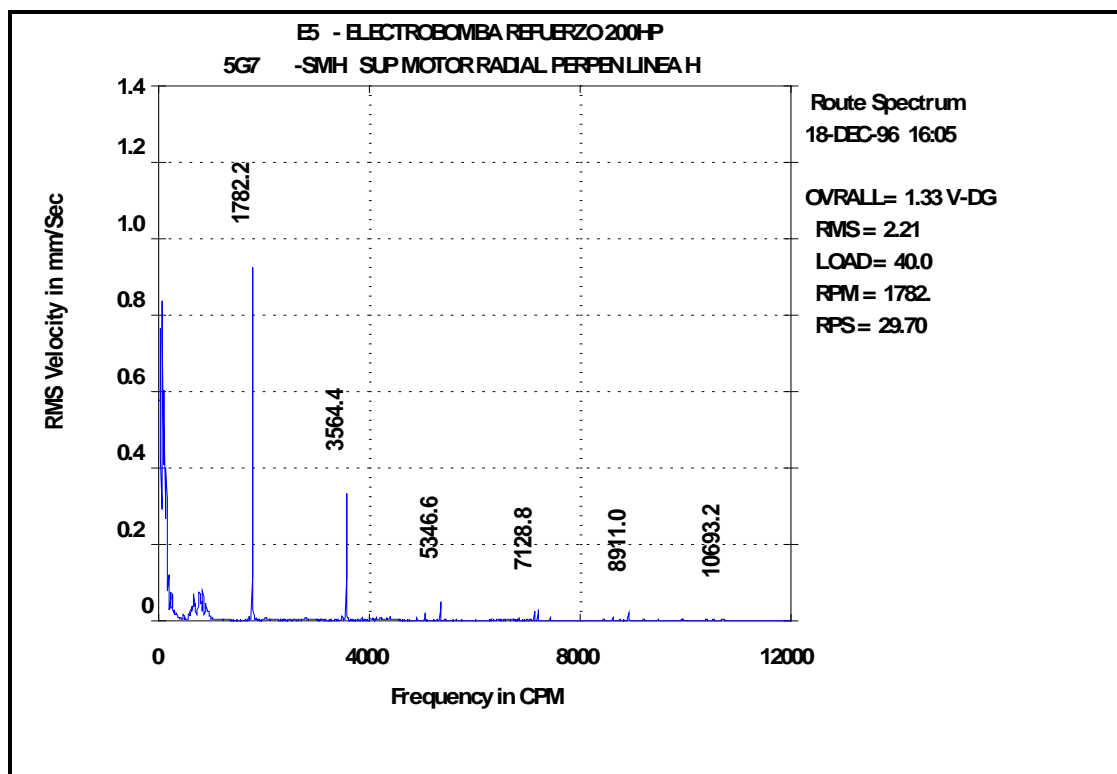


Figura 7.5 Observar, la Vibración a 1 RPM (1782.2 RPM) por Ligero Desbalance del Rotor

- 3.2 Toma del espectro de frecuencias en el rodamiento de empuje en la dirección paralela al eje del motor, esta toma tiene como objetivo visualizar las fallas de los elementos del rodamiento de empuje SKF 7226BG en el sentido de la carga.

El espectro tiene las siguientes características;

Frecuencia máxima: 20.5xRPM

Precisión: 400 líneas

En la figura 7.6, se observa cinco (5) armónicas importantes de falla de la pista exterior (BPFO) del rodamiento SKF 7226BG.

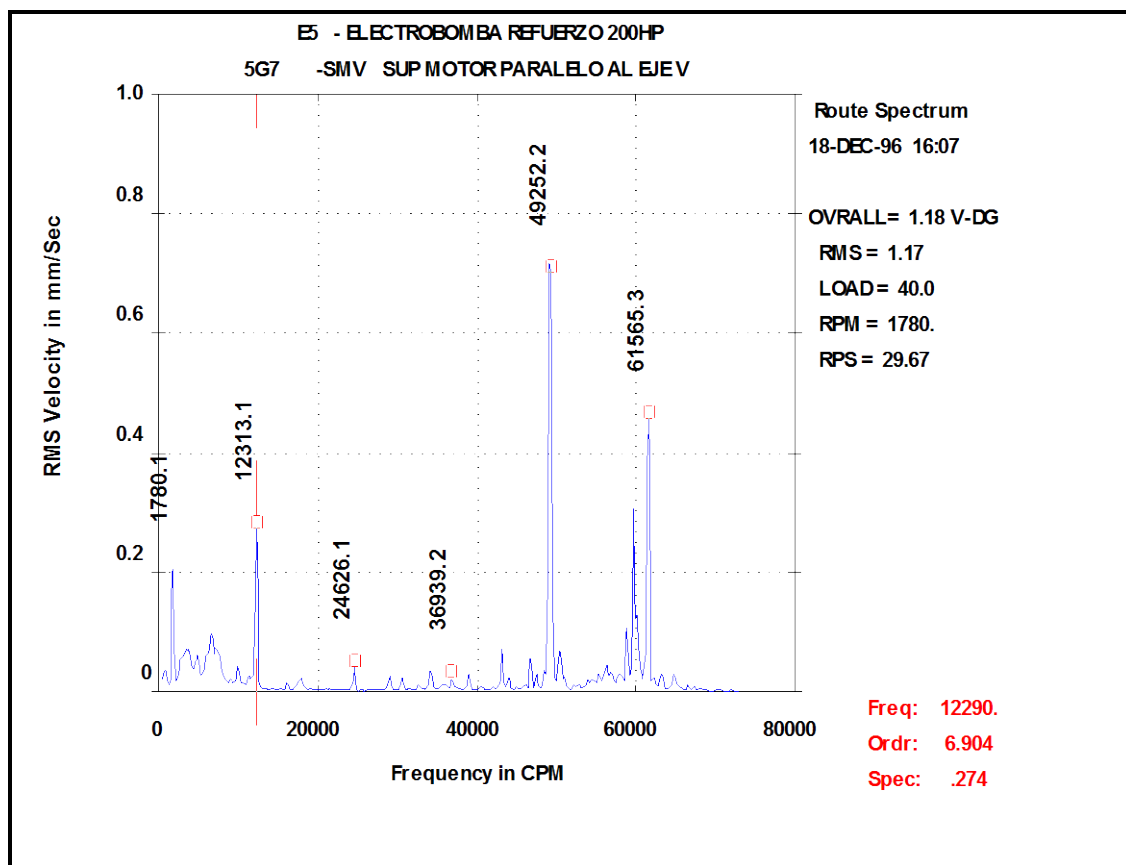


Figura 7.6 Cinco (5) Armónicas de Falla (BPFO) del Rodamiento SKF 7226BG

3.3 Toma del espectro de frecuencias en el rodamiento de empuje en la dirección radial al eje del motor y perpendicular a la línea de descarga (sentido de menor rigidez de la electrobomba), esta toma tiene como objetivo visualizar las fallas de los elementos del rodamiento de empuje SKF 7226BG.

El espectro tiene las siguientes características;

Frecuencia máxima: 72xRPM

de líneas: 800

En la figura 7.7, se observa la 5ta. armónica de la frecuencia de falla de la pista exterior (BPFO) del rodamiento SKF 7226BG.

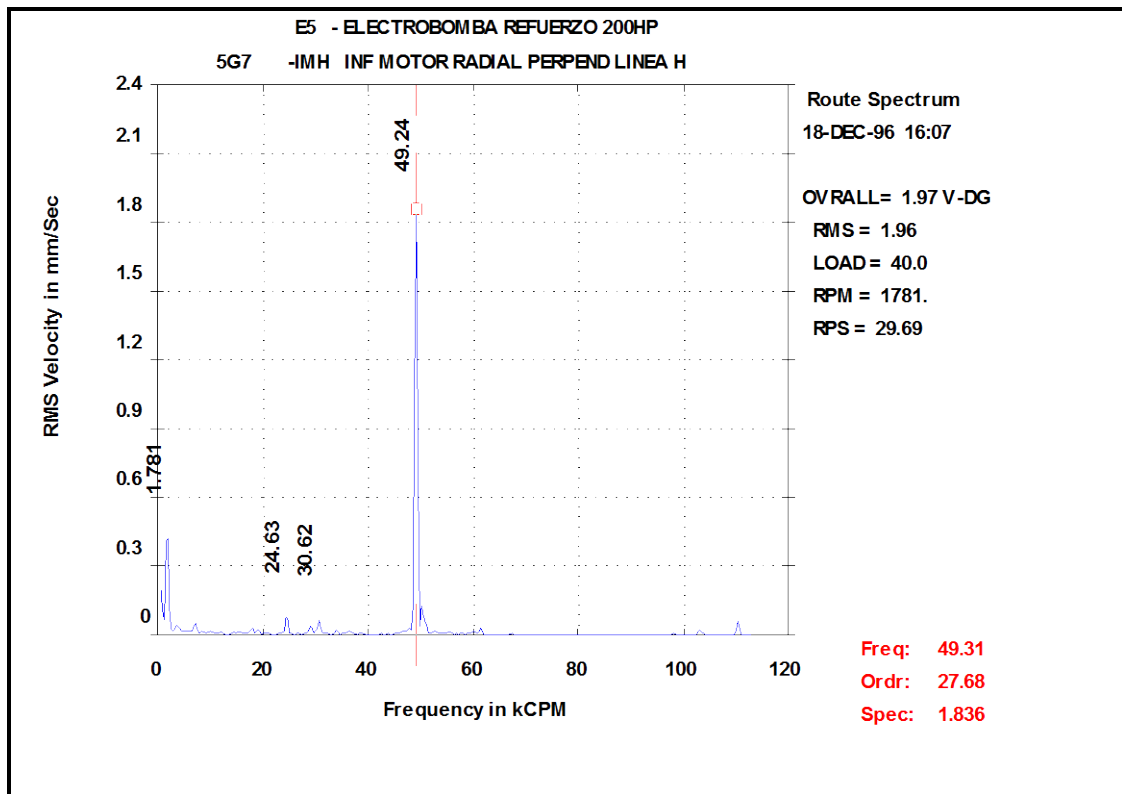


Figura 7.7 La 5ta. Armónica de Falla (BPFO) del Rodamiento SKF 7226BG

3.4 Toma del espectro de frecuencias en el rodamiento radial en la dirección paralela al eje del motor, esta toma tiene como objetivo visualizar las fallas de los elementos del rodamiento radial SKF 6219.

El espectro tiene las siguientes características;

Frecuencia máxima: $20.5 \times \text{RPM}$

de líneas: 400

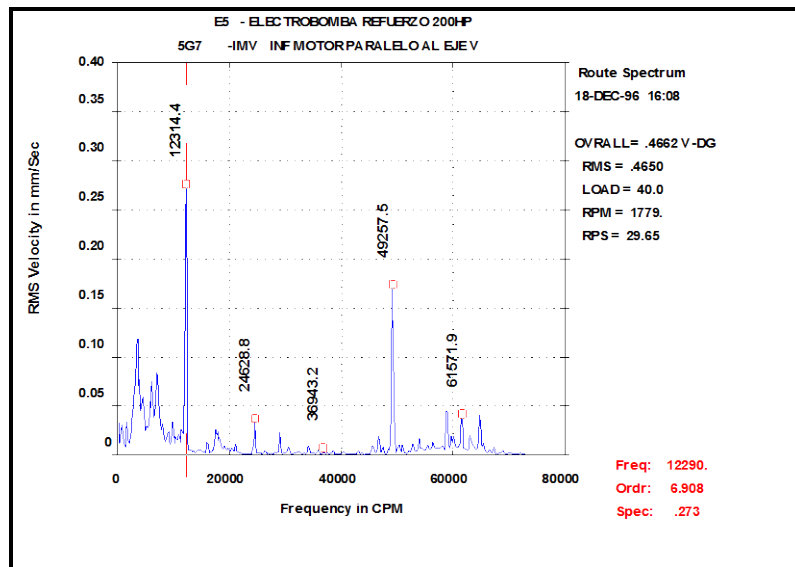


Figura 7.8 Cinco (5) Armónicas de Falla (BPFO) del Rodamiento SKF 7226BG

En la figura 7.8, se observa la transmisión de las cinco (5) armónicas importantes de falla de la pista exterior (BPFO) del rodamiento SKF 7226BG y no se observan fallas del rodamiento SKF6219.

4. RECOMENDACIONES

- Cambiar el rodamiento de empuje SKF 7226BG por presentar falla en la pista exterior.
- El rodamiento SKF6219, se encuentra en buenas condiciones mecánicas.