

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

**CAPÍTULO III
VIBRACIONES EN MOTORES DE
INDUCCIÓN**

ANÁLISIS VIBRACIONAL EN EQUIPOS ROTATIVOS Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO

VIBRACIONES EN MOTORES DE INDUCCIÓN

Introducción.....	3.5
Métodos prácticos de análisis preliminar.....	3.6
Fallas electromagnéticas más importantes	3.7
1. Excentricidad del estator	3.7
2. Excentricidad del rotor.....	3.9
3. Barras rotas del rotor	3.10
4. Problemas en la fase eléctrica	3.12
5. Frecuencias importantes en los motores de inducción	3.12
Ejercicios.....	3.13
Bibliografía	3.13
Ejemplo práctico; Análisis vibracional de un motor vertical de 40 hp	3.14
Análisis de las vibraciones	3.14
Recomendaciones.....	3.16

VIBRACIONES EN MOTORES DE INDUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Son máquinas que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, que consta de un rotor y un estator devanado, si se suministra corriente eléctrica se produce un campo magnético rotatorio en el entrehierro.

El campo magnético del estator al girar y pasar por las barras del rotor (en corto circuito con los anillos de los extremos) induce corrientes en las barras que son proporcionales a la velocidad del campo magnético que corta las barras del rotor.

La corriente inducida en la barra crea su propio campo magnético que interactúa con el campo magnético del estator generando una fuerza en las barras del rotor.

La barra diametralmente opuesta genera otra fuerza igual y de sentido contrario, que en conjunto crean un torque (ver figura 3.1) que hace girar al rotor.

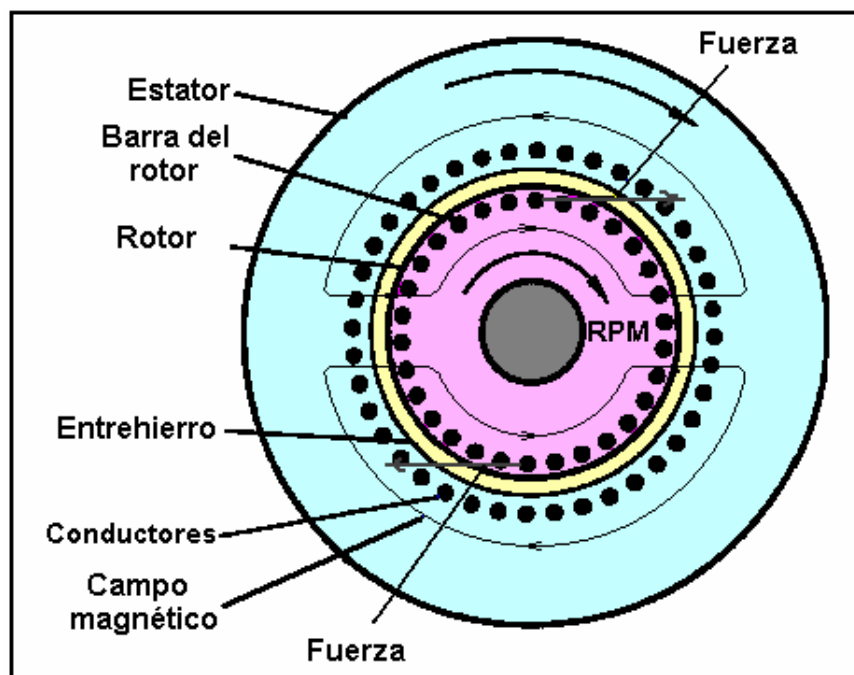


Figura 3.1 Par de Fuerzas en Barras Opuestas del Rotor

Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la corriente e inversamente proporcionales a la resistencia de la barra; o sea, si hay más carga existirá más corriente o sea mayor fuerza y si hay rotura o fisura de uno o más barras del rotor, la resistencia aumentará y la fuerza será mucho menor, no habrá un par sino un desequilibrio de fuerzas que producirá vibraciones.

Para analizar las vibraciones de los motores de inducción, se debe considerar la máquina en dos partes:

- Mecánica: Contiene los problemas mecánicos, tales como; desbalance, deflexión, desalineamiento, malos rodamientos, etc.
- Electromagnética: Contiene los problemas electromagnéticos, tales como; excentricidad, soldadura de estator, cortocircuito de laminas del estator o rotor, rotura de barras del rotor etc.

Si los motores eléctricos de inducción presentan problemas electromagnéticos entonces, presentan un ruido característico por pulsación, que es el resultado de la suma y la diferencia de dos vibraciones cuyas frecuencias son similares, generalmente son $2RPM$ (por desalineamiento) y $2F_L$ (por excentricidad), para el caso de motores de inducción de dos polos.

MÉTODOS PRÁCTICOS DE ANÁLISIS PRELIMINAR

Los métodos de análisis prácticos para determinar la severidad de los problemas electromagnéticos de un motor eléctrico de inducción son:

- b. Si la vibración oscila (de un límite superior a un límite inferior), entonces hay problemas electromagnéticos.
- c. Medir la vibración total con un vibrómetro análogo (por tener una respuesta inmediata) y cortar la energía eléctrica cuando la vibración se encuentra en el límite superior. Si la disminución de vibración en el primer instante desde el límite superior, es debido a problemas electromagnéticos, el resto será por problemas mecánicos.
- d. No es recomendable probar el motor solo o desacoplado, porque la fuerza magnética es proporcional al cuadrado de la corriente que consume, el motor al funcionar en vacío la corriente de consumo es mínima y como la vibración es una función de la fuerza; entonces las vibraciones serán bajas a no ser que la falla sea muy severa.

FALLAS ELECTROMAGNETICAS MÁS IMPORTANTES

1. EXCENRICIDAD DEL ESTATOR

Si la medición del entrehierro es físicamente posible entonces la diferencia no debe ser mayor que el 5%. El procedimiento correcto de medición es; marcar un punto en el estator y un punto cercano a este en el rotor, medir el entrehierro en la posición donde las marcas están alineadas, luego medir en el lugar de la marca del estator cada 45° de giro del rotor hasta llegar a la posición inicial; luego medir en el lugar de la marca del rotor cada 45° de giro del rotor hasta llegar a la posición inicial.

Si el rotor esta centrado magnéticamente en el estator, entonces hay dos fuerzas de atracción ($F = KI^2/G^2$, K: constante, I: amperaje del estator y G: gap o entrehierro) iguales y opuestas que se eliminan. Si hay excentricidad, las fuerzas no serán iguales y existirá una fuerza resultante que causará vibración.

En la figura 3.2, se explica en detalle lo que ocurre en un giro del campo magnético (N_s : velocidad sincrónica) cuando hay excentricidad en el estator de un motor de inducción de dos polos, para un mejor entendimiento consideraremos, un eje que pasa por el entrehierro más estrecho y el más amplio y otro eje perpendicular a ésta.

Posición 1 en 0°; Las fuerzas están balanceadas porque el entrehierro es igual en ambos polos entonces las fuerzas de atracción del campo magnético del estator al rotor son iguales y opuestas.

Posición 2 en 90°; Las fuerzas están desbalanceadas porque el entrehierro es diferente en ambos polos, la fuerza de atracción del campo magnético del estator al rotor es mayor en el lado del entrehierro mas estrecho.

Posición 3 a 180°; Las fuerzas están balanceadas, similar a 0°.

Posición 4 a 270°; Las fuerzas están desbalanceadas, similar a 90°.

Por lo tanto; por cada giro del campo magnético se producen dos fuerzas y como el campo magnético gira a 3600 CPM (en este caso $N_s=F_L$), entonces existirán problemas de excentricidad cuando hay vibraciones a la frecuencia de $2F_L$ (7200 CPM).

Estas vibraciones a la frecuencia de $2F_L$ generalmente no están acompañadas por vibraciones de bandas vecinas (*sidebands*) a múltiplos de la frecuencia de paso de polos F_p (#polos x deslizamiento), porque se originan en el estator y no dependen de las RPM del rotor ni de la frecuencia del deslizamiento.

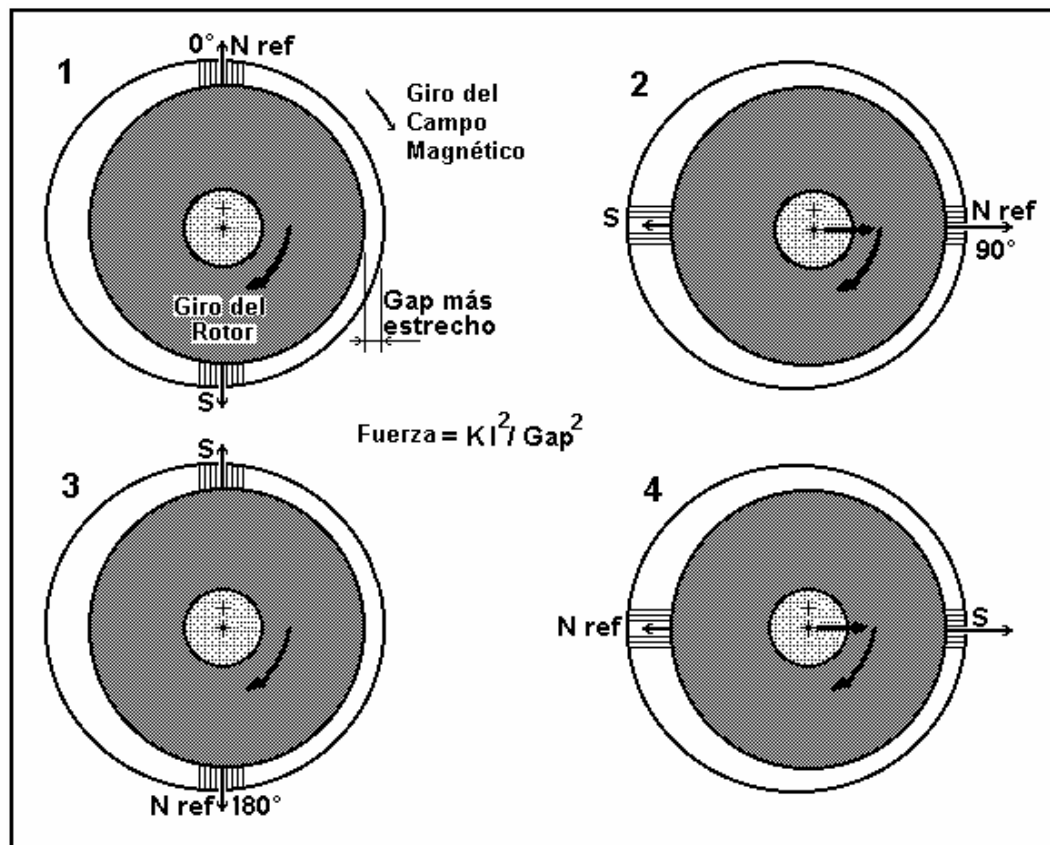


Figura 3.2 Dos Fuerzas de Atracción del Campo Magnético del Estator Excéntrico al Rotor, por Cada Giro del Campo

El valor máximo tolerable de vibración filtrada a $2F_L$ es; para motores nuevos o reparados 1.27 mm/seg, para motores en servicio 2.54 mm/seg y para motores de máquinas herramientas 0.64 mm/seg, esto es aplicable en motores de inducción de 50 y 100 Hp.

Otra causa de excentricidad del estator, es cuando falla el aislamiento de las láminas del estator y se producen corto circuitos que causan calentamiento localizado del estator distorsionando y reduciendo el entrehierro.

2. EXCENRICIDAD DEL ROTOR

En la figura 3.3, se observa un rotor excéntrico que gira en el centro geométrico del estator, o sea el rotor al no coincidir su centro geométrico con su centro de giro, el rotor trabaja como una leva y causa entrehierros diferentes entre el rotor y estator. La mayor fuerza de atracción del campo magnético del estator al rotor será en el entrehierro mas estrecho.

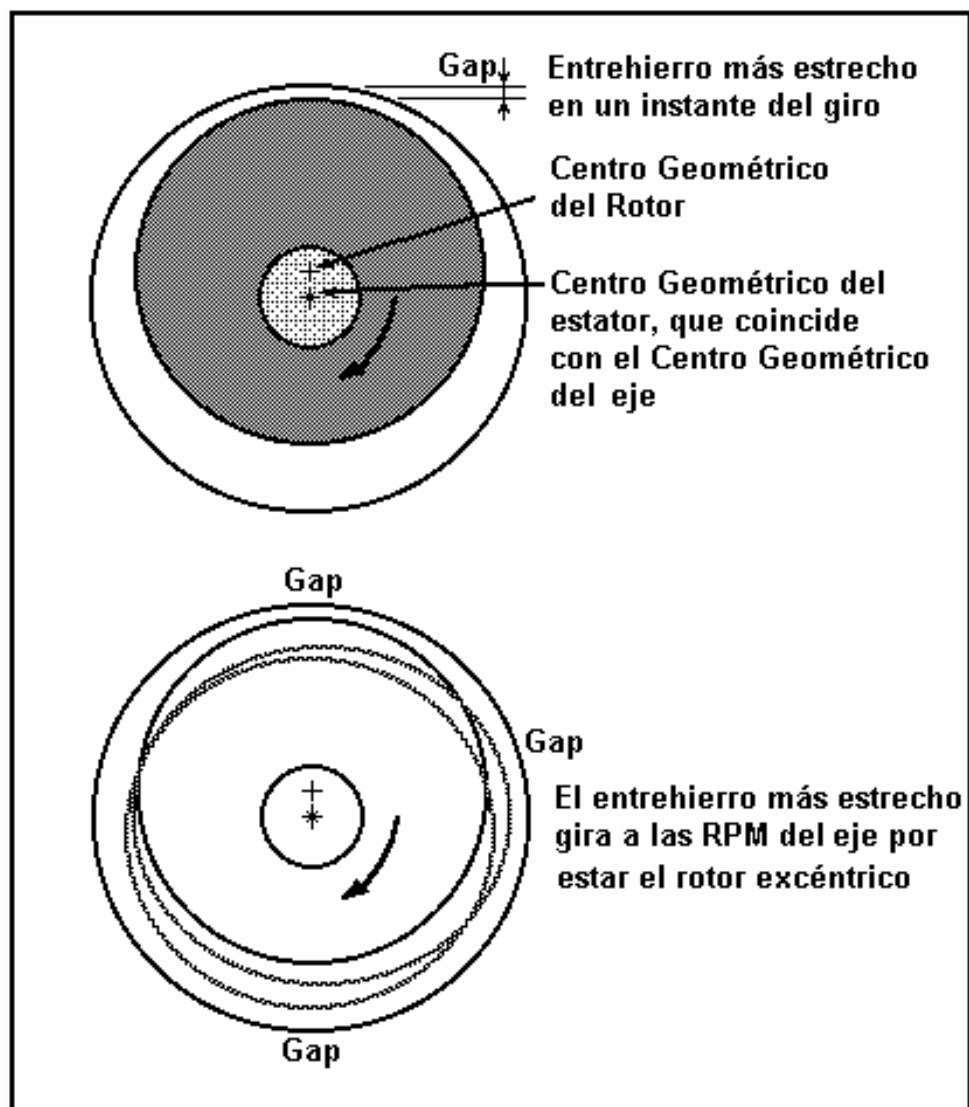


Figura 3.3 Excentricidad del Rotor

Debido a la excentricidad se generan vibraciones a la frecuencia de $2F_L$ y como el entrehierro más estrecho gira a 1RPM el cual depende de la velocidad sincrónica N_s , entonces en el espectro de frecuencias la vibración a $2F_L$ generalmente está acompañada por vibraciones de bandas vecinas (*sidebands*) a múltiplos de la frecuencia de paso de polos F_p (#polos x deslizamiento).

El valor máximo tolerable de vibración filtrada a $2F_L$ es; para motores nuevos o reparados 1.27 mm/seg, para motores en servicio 2.54 mm/seg y para motores de máquinas herramientas 0.64 mm/seg, esto es aplicable en motores de inducción de 50 y 100 Hp.

Si la amplitud de la vibración filtrada a 7200 CPM supera a 1.27 mm/seg, se debe controlar la tendencia en el tiempo; Si hay incremento de las vibraciones, significan deterioro del motor y es más peligroso cuando se incrementan la cantidad de bandas vecinas *sidebands* a la frecuencia de paso de polos F_p . Si la tendencia es constante entonces no hay daños significativos en el motor aún si estas llegan a tener niveles de 4.5 mm/seg, pero la vida esperada del motor puede ser disminuida.

La excentricidad del rotor puede ser causado por falla del aislamiento en las láminas del rotor, se producen corto circuitos que causan calentamiento localizado del rotor distorsionándolo y reduciendo el entrehierro, esta falla térmica es fácilmente identificado, porque los niveles de vibración se incrementan con la temperatura inmediatamente después del arranque del motor.

3. BARRAS ROTAS DEL ROTOR

Los síntomas de barras rotas son similares a la excentricidad del rotor porque ambas están modulados por bandas vecinas (*sidebands*) a la frecuencia de paso de polos ($F_p = \#p.s$).

En la tabla 3.1, podemos ver las Frecuencias de Paso de Polos (F_p) para diversos tipos de motores de inducción que trabajan con una $F_L = 60$ Hz.

Una barra rota es una barra muerta en el rotor, causa desbalance eléctrico y genera vibraciones a 1RPM y sus armónicas, como este problema no interactúa con la frecuencia de la línea, no se producen vibraciones a F_L ni en sus armónicas.

Frecuencias en CPM				
Velocidad Sincrónica (N _s)	Velocidad real RPM	Frecuencia de deslizamiento S	Numero de polos #p	Frecuencia paso de polos F _p = #p.s
3600	3580	20	2	40
1800	1770	30	4	120
1200	1175	25	6	150
900	880	20	8	160
720	705	15	10	150
600	580	20	12	240

Tabla 3.1 Frecuencia de Paso de Polos para Diferentes Motores de Inducción (F_L = 3600 CPM)

Los cortocircuitos de las láminas y la rotura de barras, desarrollan puntos calientes que distorsionan el rotor causando desbalance electromagnético el cual genera calor y este calor, causa distorsión térmica esta interacción llega a ser catastrófica cuando hay contacto entre el estator y el rotor.

Además, se confirma que una o más barras del rotor están rotas cuando hay vibraciones a la Frecuencia de Paso de las Barras (FPBR)= #barras del rotor x RPM y armónicas acompañadas por *sidebands* a 7200CPM; Se han hallado rotores que tenían cinco barras rotas y que generaban vibraciones elevadas a 2(FPBR).

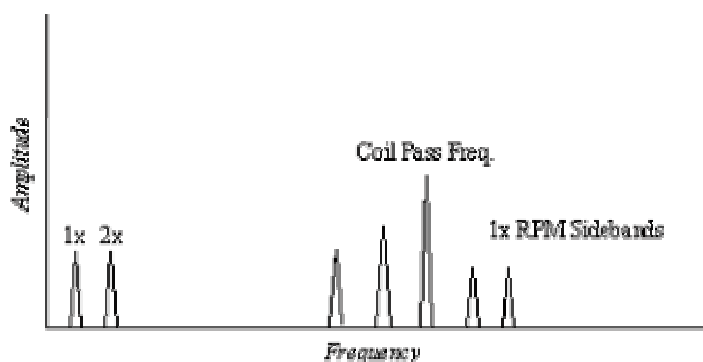
Cuando un motor genera amplitudes de vibración a la frecuencia de FPBR y armónicas iguales o superiores de 3.75 mm/seg, será necesario controlar la tendencia de las vibraciones antes de desmontar la unidad.

4. PROBLEMAS EN LA FASE ELECTRICA

Los problemas de fase son debidos a; soldadura, rotura de las conexiones, falsos contactos por corrosión o desgaste en las superficies de contacto de una o más fases de corriente y pueden causar vibraciones elevadas que exceden los 25.4 mm/seg a la frecuencia de $2F_L$ y se encuentra rodeada con *sidebands* a $1/3F_L$ esto es por el contacto esporádico de un conector defectuoso.

5. MOTORES SINCRONOS

Espectro Típico



La soldadura del embobinado (devanado) del estator en los motores síncronos generan alta vibración a la frecuencia de paso de la bobina (FPB) el cual es igual al numero de bobinas del estator por RPM ($\# \text{ bobinas Estator} = \# \text{ Polos} \times \# \text{ bobinas/Polo}$). La frecuencia de paso de bobina estara rodeada por bandas vecinas a $1xRPM$.

6. FRECUENCIAS IMPORTANTES EN LOS MOTORES DE INDUCCION

- Velocidad del rotor: RPM.
- Frecuencia de la línea $F_L = 3600 \text{ CPM}$.
- La velocidad del campo magnético del estator o velocidad síncrona.
 $N_s (\text{CPM}) = 7200/\#p$ $\#p = \text{Número de polos}$.
- Deslizamiento $S = N_s - \text{RPM}$.

- Frecuencia de paso de polos $F_P = \#p \times S$.
- Frecuencia de las Barras del Rotor; $FPBR = \#Barras \times RPM$ y sus *sidebands* a múltiplos de $2F_L$.
- Frecuencia de los Slots del Estator; $F_S = \#Slots \times RPM$ y sus *sidebands* a múltiplos de $2F_L$.

EJERCICIOS

1. La prueba de motor solo o desacoplado, sirve para evaluar problemas incipientes.
2. ¿Que diferencias hay entre los espectros de vibración por excentricidad del rotor de un motor de inducción de 2 polos con otro de 4 polos?.
3. ¿Que diferencias hay entre los espectros de vibración por excentricidad del estator de un motor de inducción de 2 polos con otro de 4 polos?.
4. ¿Cuál es el espectro esperado por rotura de barras del rotor, de un motor eléctrico que tiene 27 barras y 8 polos?.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ciro Martínez T. "Mantenimiento y Reparación de Motores Eléctricos", Vibro Technology SRL, Lima – Perú.
2. J.P. Den Hartog, "Mecánica de las Vibraciones" MTI, Massachusetts.
3. Maxwell J. Howard; "Induction Motor Magnetic Vibration"; Proceedings Machinery Vibration Monitoring and Analysis Meeting -Vibration Institute; Abril, 1983.
4. Campbell, W. R.; Arab American Oil Co."; Dhaharan, Saudi Arabia; "Diagnosing Alternating Current Electric Motor Problems"; Vibration Magazine; Vol:1, No. 3; December, 1985.
5. Ciro Martínez T. "Criterios de Análisis en Electrobombas" Vibro Technology SRL, Lima – Perú.

EJEMPLO PRÁCTICO

ANÁLISIS VIBRACIONAL DE UN MOTOR VERTICAL DE 40 Hp

Una electrobomba de pozo profundo utilizado para inyectar petróleo, presentó un incremento de sus niveles vibracionales.

ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES

1. El motor eléctrico de 40 Hp, tiene dos polos y durante las pruebas la energía eléctrica tenía una F_L : 3595.65 CPM y el rotor del motor una velocidad de 3539.4 RPM; o sea que la frecuencia de deslizamiento era de $S = 56.25$ CPM.
2. En los espectros de frecuencias de F_{MAX} : 12000 CPM, tomados en el sentido radial en los cojinetes superior e inferior del motor eléctrico, presentan tres armónicas principales a las RPM del rotor (ver figuras 3.4 y 3.5) rodeados por bandas vecinas que son armónicas de las frecuencias de polos ($F_P = \# \text{polos} \times S = 2 \times 56.25 = 112.50$ CPM).

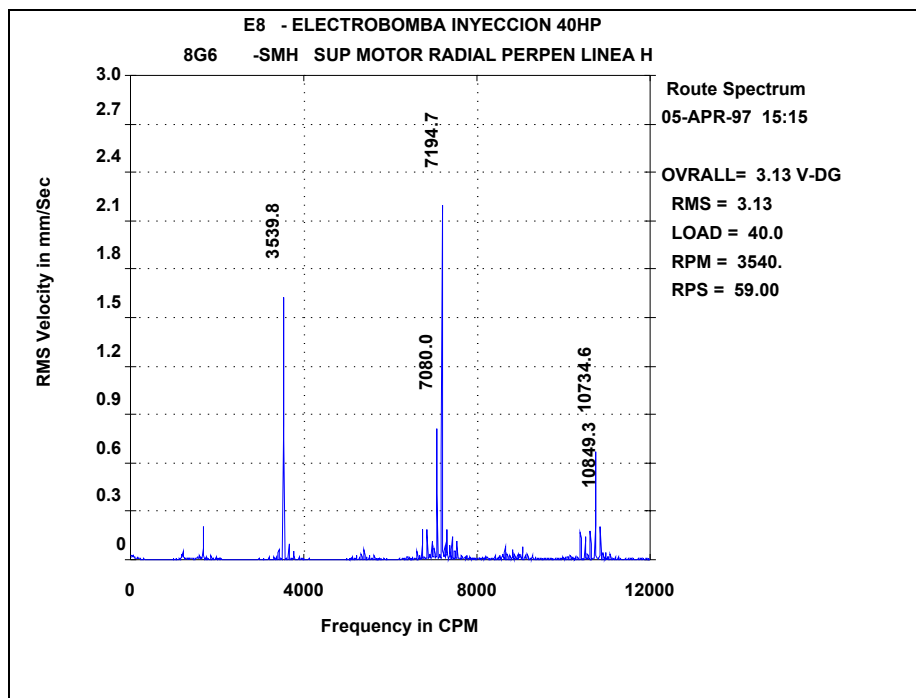


Figura 3.4 Se Observa Bandas Vecinas que Acompañan a la 1ra, 2da. y 3ra. Armónica de las RPM

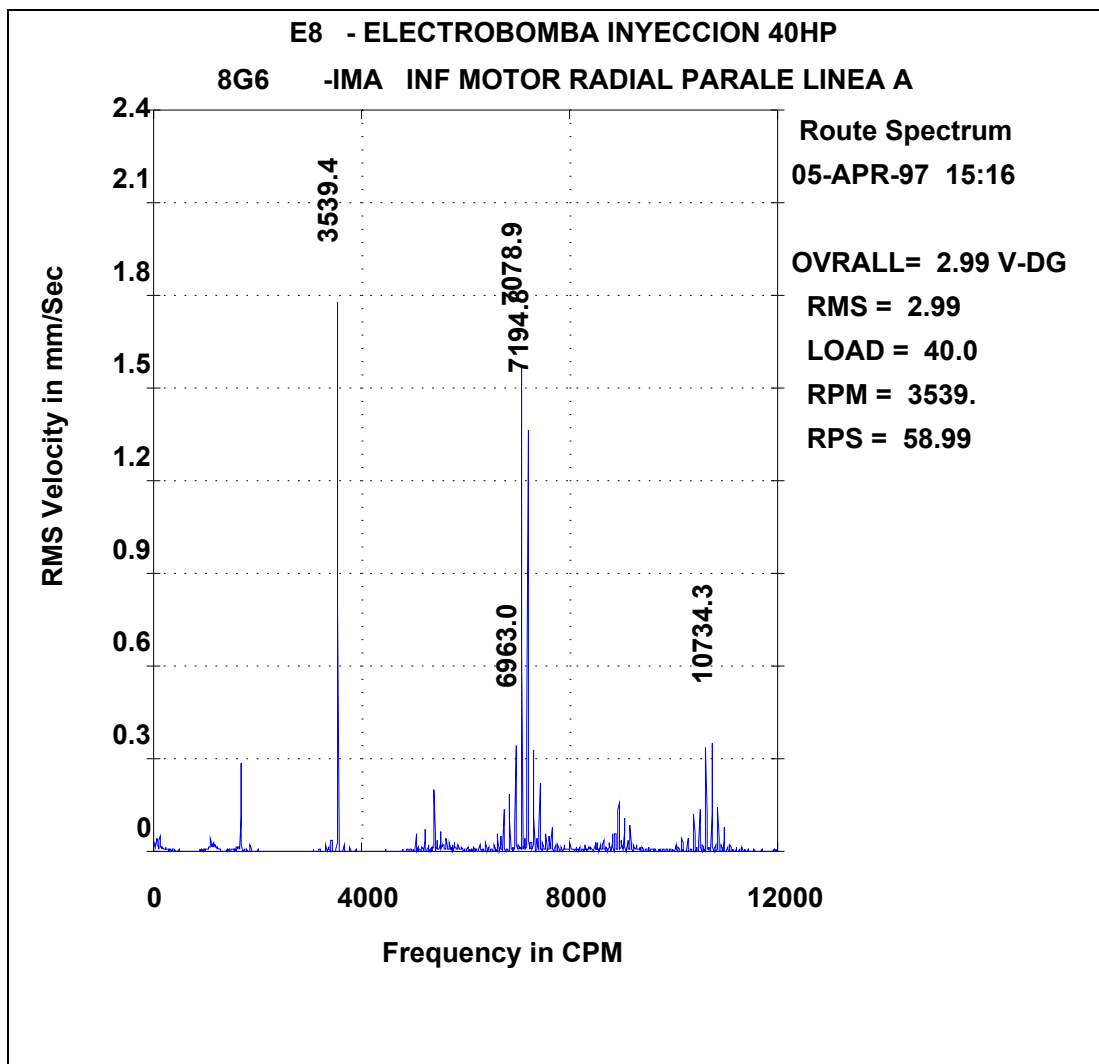


Figura 3.5 Se Observa Bandas Vecinas que Acompañan
a la 1ra, 2da y 3ra Armónica de las RPM

3. El espectro de frecuencias amplificado de 5400 a 9000 CPM de la toma radial del cojinete inferior (ver figura 3.6) se observa bandas vecinas de 2RPM ($2 \times 3539.4 = 7078.8$ CPM) a la frecuencia de paso de polos 112.50 CPM, que nos indicarían que el rotor tiene barras rotas o fisuradas y la vibración filtrada dominante a $2F_L$ ($2 \times 3595.65 = 7191.3$) nos indicarían excentricidad.

RECOMENDACIONES

1. Inspeccionar el estado de las barras del rotor.
2. Verificar la excentricidad del rotor y del estator, la desviación máxima de las medidas del entrehierro debe ser 5%.

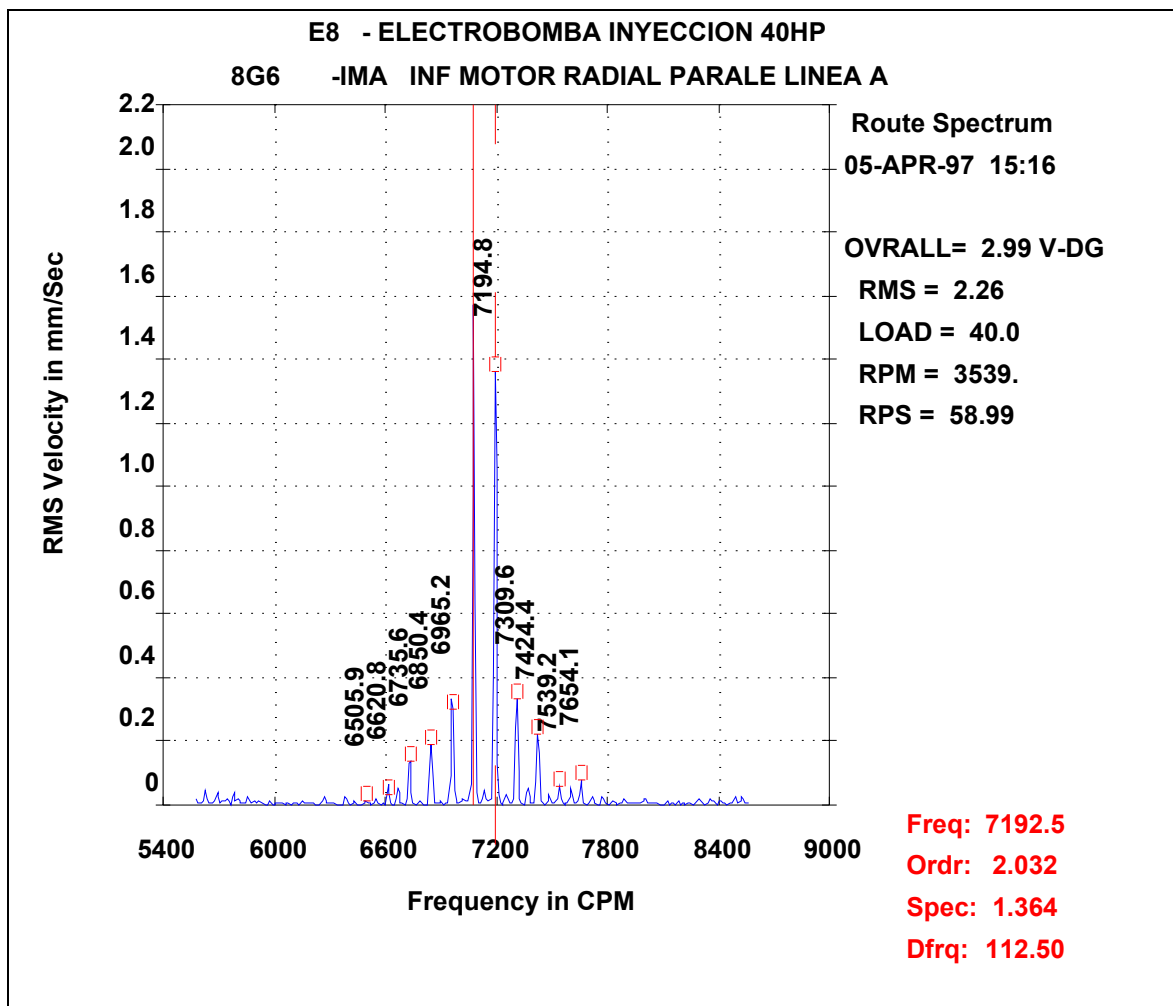


Figura 3.6 Se Observa Bandas Vecinas de Múltiplos de F_P Alrededor de 2RPM y la Vibración Filtrada Dominante es a $2F_L$