



III Congreso Cubano de Ingeniería de Mantenimiento
Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2004
CUJAE, Ciudad de la Habana, CUBA



ACERCA DEL DIAGNÓSTICO VIBROELÉCTRICO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN: Experiencias del CEIM – CUJAE

Dr. Evelio Palomino Marín

CEIM - Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento. Calle 114 No. 11901. Edificio 12. Campus CUJAE.
Marianao. Ciudad de la Habana. CUBA.
epalomino@ceim.cujae.edu.cu

Resumen

Existen sobradas razones para afirmar que el análisis de vibraciones constituye una tecnología de probada eficacia para el diagnóstico de maquinarias y estructuras. Sin embargo, en el caso de los motores de inducción, la experiencia ha demostrado que la intensidad de corriente de alimentación en este tipo de máquina, sufre distorsiones significativas en virtud de los problemas de naturaleza tanto mecánica como eléctrica que pueda confrontar el motor. De aquí que sea menester incorporar de manera integrada el análisis de vibraciones y el análisis espectral de intensidad de corriente para llegar a conclusiones sustentables en relación con el estado técnico del motor, a lo cual el autor ha dado en llamarle diagnóstico vibroeléctrico. En el presente trabajo se recogen las generalidades sobre el análisis de vibraciones en motores de inducción así como, los “requisitos” para efectuar el análisis espectral de intensidad de corriente. Finalmente, se presentan dos experiencias del autor relativas al diagnóstico de motores de inducción en las que el análisis espectral de vibraciones y el análisis espectral de intensidad de corriente ofrecen elementos claves para el diagnóstico de este tipo de máquina.



ACERCA DEL DIAGNÓSTICO VIBROELÉCTRICO DE MOTORES DE INDUCCIÓN: Experiencias del CEIM – CUJAE

Dr. Evelio Palomino Marín

CEIM - Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento. Calle 114 No. 11901. Edificio 12. Campus CUJAE.
Marianao. Ciudad de la Habana. CUBA.
epalomino@ceim.cujae.edu.cu

Los motores de inducción, como máquinas rotatorias al fin, son susceptibles de presentar afectaciones y fallos al igual que el resto de los equipos que se encuentran comúnmente en cualquier taller o planta industrial, aunque existan defectos que son privativos de este tipo de máquina eléctrica. A través de la medición correcta y del análisis de vibraciones, es posible identificar defectos tales como: excentricidad del estator, excentricidad del rotor, barras del rotor agrietadas o rotas, corto circuito en el enrollado del estator, deformaciones térmicas y pulsos torsionales.

No sería desacertado afirmar que el análisis de vibraciones se ha desarrollado suficientemente para el diagnóstico de la maquinaria rotatoria en general, sin embargo, en el caso de los motores de inducción, es menester aplicar la técnica de análisis espectral de intensidad de corriente, con el ánimo de complementar y a la vez discriminar la presencia de un defecto, pudiendo incluirse la evaluación de la severidad del defecto, en caso de existir este por supuesto.

La experiencia ha demostrado que problemas puramente mecánicos pueden provocar que el motor aparente tener problemas eléctricos significativos. Por ello resulta de inestimable valor práctico, comenzar la investigación por un análisis de vibraciones suficientemente detallado, que permita determinar si los problemas eléctricos constituyen una consecuencia de los problemas mecánicos o si los primeros se manifiestan como la causa primaria.

Así, será estrictamente necesario eliminar todos los problemas mecánicos (desbalance, desalineamiento, deformaciones en el eje) y luego repetir el análisis de corriente y de vibraciones comprobando si el comportamiento eléctrico se mantiene.

A través del análisis de vibraciones no sólo se pueden detectar problemas mecánicos, sino también problemas eléctricos. En la figura 1 se muestran las partes que componen un motor de inducción de acuerdo a un corte transversal. De igual forma, la figura 2 muestra una vista en tres dimensiones del rotor y las líneas de intensidad de corriente.

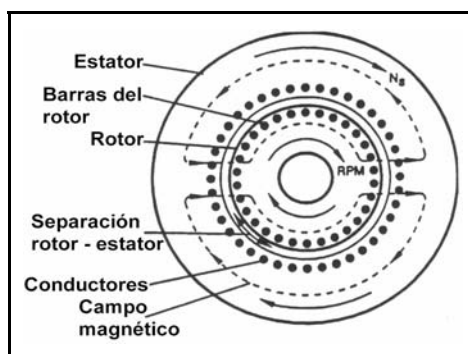


Figura 1. Partes de un motor de inducción.



III Congreso Cubano de Ingeniería de Mantenimiento

Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2004
CUJAE, Ciudad de la Habana, CUBA

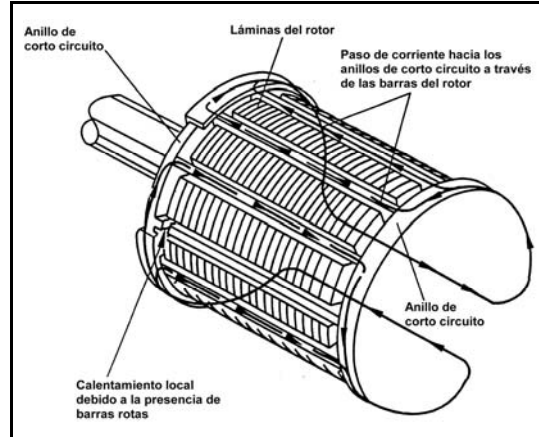


Figura 2. Vista en tres dimensiones del rotor y las líneas de intensidad de corriente.

Manifestación de defectos en motores de inducción. Frecuencias.

A continuación se hará un breve resumen de las frecuencias de diagnóstico de mayor importancia y por ende de mayor utilidad para el diagnóstico de los motores de inducción:

Velocidad sincrónica

$$N_s = \frac{120 \cdot f_l}{P} \quad (1)$$

Siendo:

N_s : Velocidad sincrónica expresada en r.p.m.

f_l : Frecuencia de línea expresada en Hz.

P : Número de polos del motor.

Frecuencia de deslizamiento

$$F_s = N_s - RPM \quad (2)$$

Siendo:

F_s : Frecuencia de deslizamiento expresada en c.p.m.

RPM : Velocidad asincrónica expresada en r.p.m.

N_s : Velocidad sincrónica expresada en r.p.m.

Frecuencia de paso de polos

$$F_p = F_s \cdot P \quad (3)$$

Siendo:

F_p : Frecuencia de paso de polos expresada en c.p.m.



Frecuencia de paso de barras del rotor

$$RBPF = B \cdot RPM \quad (4)$$

Siendo:

$RBPF$: Frecuencia de paso de las barras del rotor, expresada en c.p.m.

B : Número de barras del rotor

Generalidades sobre el diagnóstico de motores de inducción

Desde hace mucho tiempo y debido al empleo de ciertos métodos de análisis cualitativos y cuantitativos, ha sido posible emplear las tecnologías de monitoreo y predicción en motores de inducción. A continuación se mencionan las técnicas empleadas de manera tradicional en el diagnóstico y evaluación de estado de los motores eléctricos:

- Prueba de resistencia a tierra.
- Prueba eléctrica impulsiva.
- Prueba de sobre tensión.
- Análisis del balance de corriente.

A las técnicas anteriores se han sumado los últimos avances en este campo, incorporando los métodos de diagnóstico siguientes:

- Monitoreo de la descarga parcial.
- Análisis del circuito del motor.
- Análisis espectral de intensidad de corriente.
- Análisis dinámico de potencia y/o tensión eléctrica.
- Análisis de flujo.
- Análisis de la temperatura normalizada.

Sin querer ir mucho más allá de lo que en realidad se pretende lograr con este artículo, más adelante se hará referencia a la técnica de análisis espectral de intensidad de corriente. Este método es conocido en el ambiente industrial de muchas maneras, pero en cualquier caso se sustenta en el registro dinámico de la intensidad de corriente en el motor eléctrico.

Análisis de vibraciones en motores de inducción

Antes de acoplar un motor nuevo o recién reparado a la máquina conducida, es necesario ponerlo en funcionamiento y registrar las vibraciones en diferentes puntos, preferiblemente cercanos a los rodamientos y en tres direcciones ortogonales. De esta forma se podrán identificar aquellos defectos que son inherentes al propio motor, tal es el caso del desbalance, las deformaciones en el eje del rotor, el desalineamiento entre los cojinetes del propio motor y las posibles solturas de los cojinetes en el *housing*, así como los defectos en los propios cojinetes. Tenga presente que una vez que el motor esté acoplado a la máquina conducida será sumamente difícil y trabajoso detectar estos defectos en el motor ya que pueden confundirse con los problemas electromecánicos discutidos anteriormente.

Es importante destacar que en caso de sospechar la presencia de problemas eléctricos en el motor, será necesario evaluar la condición de éste operando bajo carga, ya que la mayoría de los motores con problemas eléctricos no exhiben niveles de vibraciones notables cuando estos se registran operando en vacío.

Excentricidad del Estator

Tal defecto se refiere a la distribución estacionaria y no uniforme del espaciado entre el rotor y el estator, lo cual provoca altas amplitudes a la segunda armónica de la frecuencia de línea.



III Congreso Cubano de Ingeniería de Mantenimiento

Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2004
CUJAE, Ciudad de la Habana, CUBA



La explicación se puede encontrar en la figura 3, donde se ilustran esquemas que ayudan a comprender esta problemática. Observe cómo, durante una rotación del campo magnético en el estator a 3600 rpm en un motor de dos polos, se producen dos atracciones del rotor en la dirección horizontal, debido a que la separación rotor – estator no es uniforme en la dirección horizontal por ejemplo. De esta forma estas fuerzas nos equilibradas tendrán lugar a 7200 rpm (120Hz), cosa que sucederá siempre con independencia del número de polos.

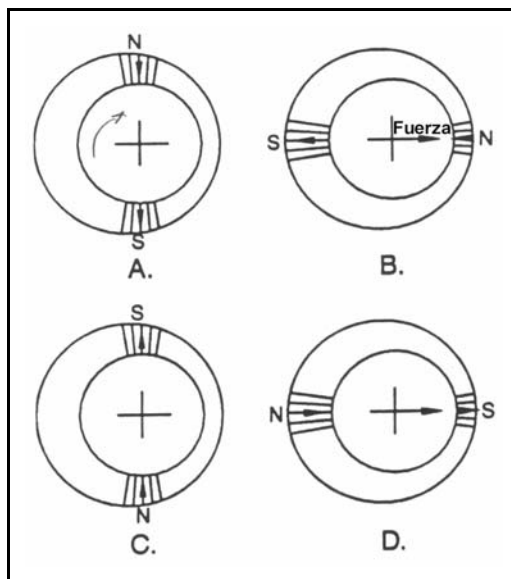


Figura 3. Influencia de la excentricidad del estator en un motor de dos polos.

En la figura 4 se puede observar un espectro medido en el plano radial del cojinete lado coupling de un motor de inducción. Observe la presencia de una componente muy bien definida a una frecuencia de 120 Hz .

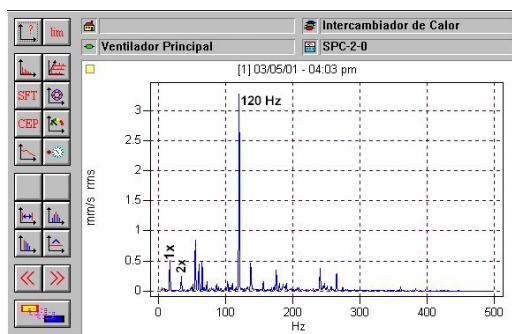


Figura 4. Distribución no uniforme del espaciado rotor-estator.

Estas vibraciones son altamente direccionales, orientadas de acuerdo con la posición de la zona más estrecha rotor - estator, debido a que la mayor fuerza magnética se genera precisamente en aquella zona donde rotor y estator están más cerca. Vale la pena señalar que el promedio de estas separaciones en diferentes puntos no debe diferir en más de un 5%. Dicho defecto puede tener su origen no sólo en las deficiencias que pueda haber tenido el enrollado del motor durante alguna reparación. Este defecto se pudiera deber también a distorsiones que pueda haber sufrido la estructura interna del motor debido a



III Congreso Cubano de Ingeniería de Mantenimiento

Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2004
CUJAE, Ciudad de la Habana, CUBA



golpes por caída, a la presencia de la llamada “pata coja” o al centrado deficiente de los cojinetes del rotor.

En el caso de motores nuevos o recién reparados, cuya potencia esté comprendida entre los 35 kW y los 750 kW por ejemplo, resulta preocupante la presencia de la segunda frecuencia de línea con una amplitud de 1,3 mm/s. Sin embargo, para este mismo tipo de motor ya en servicio, 2,5 mm/s puede tomarse como límite de amplitud a la segunda armónica de línea. Desde luego, si el motor en cuestión acciona husillos de precisión, como lo es el caso de máquinas herramienta, entonces la amplitud de la ya mencionada componente de frecuencia no deberá exceder los 0,6 mm/s.

Excentricidad del rotor

Excentricidad en el rotor equivale a afirmar que el rotor no es concéntrico con su propio eje de rotación, observe la figura 4. Esto hace que también tenga lugar una distribución no uniforme del espaciado entre el rotor y el estator, pero en este caso, esta no uniformidad no es estacionaria sino que se traslada conjuntamente con la rotación del rotor. Tal defecto puede tener su origen en un corto circuito en las láminas del estator, lo que produce calentamiento local que deforma al rotor, sacándolo de su línea de rotación. De igual forma que en el caso del estator, se puede apreciar vibraciones altas a la segunda armónica de la frecuencia de línea, pero acompañada por bandas laterales espaciadas a la frecuencia de paso de los polos del motor, toda vez que la segunda armónica de línea resulta modulada por la frecuencia de paso de polos.

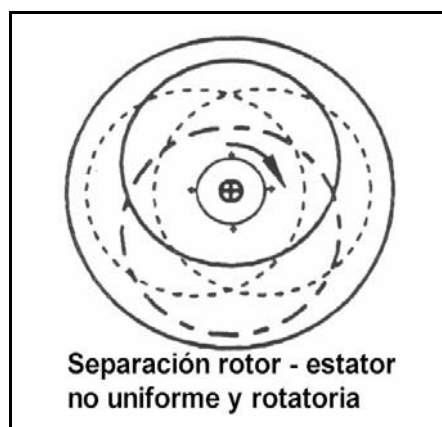


Figura 4. Variación de la posición de la no uniformidad en la separación rotor - estator.

Es importante destacar que un motor de inducción con su rotor excéntrico, incrementará sus niveles de vibraciones con el transcurso del tiempo de operación, debido a los incrementos en la temperatura de éste. En la tabla 1 se observan los niveles totales de vibraciones expresados en mm/s rms registrados durante 30 minutos a intervalos de 10 minutos desde el arranque del motor.

Tabla 1 Relación tiempo – vibraciones.

Tiempo [min.]	Vibraciones [mm/s]
Arranque	2.5
10	3.5
20	4.6
30	6.35



III Congreso Cubano de Ingeniería de Mantenimiento

Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2004
CUJAE, Ciudad de la Habana, CUBA



Barras del rotor agrietadas o rotas.

La presencia de roturas en las barras del rotor hace que la frecuencia de rotación del motor sea modulada por una frecuencia igual al producto de la frecuencia de deslizamiento por el número de polos. Como consecuencia de este fallo mecánico, se produce un desbalance eléctrico en el motor, que da como resultado la generación de niveles de vibraciones suficientemente altos a la primera y segunda armónicas de la velocidad de rotación. Asimismo, la presencia de barras rotas o agrietadas e incluso la presencia de uniones con alta resistencia al paso de la corriente, pueden producir bandas laterales separadas a la frecuencia de paso de polos alrededor de las armónicas de la frecuencia de rotación, incluyendo 2x, 3x, 4x y hasta 5x, todo lo cual es síntoma de problemas en mas de una barra, ya que se tiene mas de un pulso por vuelta del rotor.

Sin embargo, la clave para identificar barras sueltas o abiertas la constituye la presencia de componentes a frecuencia más alta, tal es el caso de las componentes a la frecuencia de paso de barras.

Corto circuito en el enrollado del estator

El enrollado del estator, comúnmente denominado *polos* o *campos*, puede presentar espiras en corte, lo cual origina que se aprecie una disminución en la velocidad de rotación y se incremente la frecuencia de deslizamiento.

Deformaciones térmicas

Debido a la concentración de altas temperaturas, el rotor también es susceptible de sufrir deformaciones, cuyo origen radica en el aislamiento deficiente de varias láminas contiguas en zonas del propio rotor, lo que pudiera provocar el roce eventual entre este y el estator. Este problema trae consigo un efecto de "retroalimentación" ya que a pesar de que al inicio las deformaciones en el rotor son muy pequeñas, éstas logran la generación de fuerzas electromagnéticas desbalanceadas, lo cual al mismo tiempo genera mayor incremento en la temperatura, haciendo más severas las deformaciones de rotor. Este problema se puede identificar a través de los incrementos sistemáticos en los niveles de vibraciones a la frecuencia de rotación, los cuales crecen con el incremento de la temperatura.

Como seguramente se habrá advertido, existe la posibilidad de confundir este problema con un desbalance, por lo que es menester señalar que en estos casos el problema persistirá aún cuando se balancee el sistema.

Pulsos torsionales

En los motores eléctricos siempre están presentes en mayor o menor medida los pulsos torsionales debido a que el campo magnético rotatorio energiza a los polos del estator. Normalmente esta vibración es suficientemente baja por lo que no representa una amenaza. Sin embargo, pueden excitar frecuencias de resonancias cercanas al duplo de la frecuencia de línea o producir vibraciones importantes en máquinas donde se exijan niveles de vibraciones suficientemente bajos, como por ejemplo en máquinas herramienta de alta precisión.

Análisis espectral de intensidad de corriente

Los modernos analizadores de vibraciones, por lo general permiten la entrada de señales eléctricas en modo compatible con las entradas de un osciloscopio convencional. De esta forma y empleando como transductor un transformador de corriente, conocido comúnmente como *hook-on* o pinza amperimétrica, éste se deberá conectar a la entrada del analizador y tratar la señal como si estuviese siendo proporcionada por un transductor de vibraciones, pudiéndose obtener el correspondiente espectro de intensidad de corriente eléctrica vía *FFT*. En la figura 5 se observa de manera esquemática la instalación afín para el registro antes señalado. Así mismo, la figura 6 muestra un espectro de Intensidad de Corriente, en el que se aprecian claramente las bandas laterales.



III Congreso Cubano de Ingeniería de Mantenimiento
Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2004
CUJAE, Ciudad de la Habana, CUBA

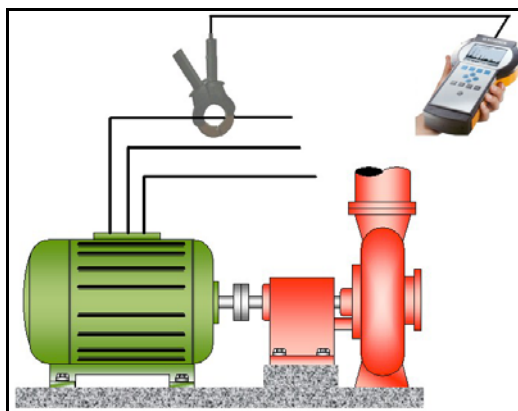


Figura 5. Instalación típica para la medición y análisis dinámico de corriente.

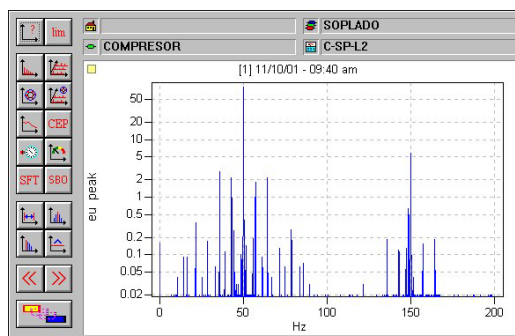


Figura 6. Espectro de intensidad de corriente eléctrica.

Estas bandas laterales indican la presencia y su influencia sobre la amplitud de la corriente, de ciertos defectos en el motor así como, las características mecánicas dominantes tanto en el propio motor como en la máquina conducida. A continuación se relacionan los defectos que con regularidad resultan identificados empleando la técnica de *análisis espectral de intensidad de corriente*.

- Grietas o fracturas en las barras del rotor.
- Uniones de alta resistencia en las barras del rotor o en los conductores de éste en el caso de rotores bobinados.
- Anillos agrietados o fracturados en rotores de jaula de ardilla.
- Irregularidades en el flujo de corriente debido a porosidades en el material del rotor.
- Excentricidad estática y dinámica – estator.
- Defectos mecánicos asociados a elementos rotatorios.

En los últimos 10 años, la tecnología de análisis de corriente en motores eléctricos se ha desarrollado de tal forma que hoy se emplea como una herramienta muy poderosa como complemento al análisis de vibraciones durante el diagnóstico vibroeléctrico de los motores de inducción.

El análisis de corriente en motores de inducción entraña varios beneficios:

- a) Si se tiene en cuenta que el análisis de corriente se puede ejecutar en el panel de control del motor, entonces el mismo tiene lugar con el motor en operación pero sin riesgo.



III Congreso Cubano de Ingeniería de Mantenimiento

Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2004
CUJAE, Ciudad de la Habana, CUBA



- b) Este tipo de análisis permite identificar problemas que la inspección visual no podría encontrar, tal es el caso por ejemplo, de uniones de alta resistencia al paso de corriente eléctrica.
- c) Si se tiene en cuenta que con el análisis de corriente se pueden detectar problemas tales como: barras del rotor rotas o agrietadas, que lamentablemente reducen la eficiencia del motor e incrementan los niveles de vibraciones, entonces se pueden tomar medidas antes de que se llegue a una situación catastrófica, lo cual además se traduce en el ahorro de energía debido a la no operación de motores que pueden confrontar tales problemas incluso durante años de explotación.

Prueba de desbalance de corriente.

Inicialmente, el analista debe comparar las amplitudes de la corriente a la frecuencia de línea registrada en cada una de las tres fases. En general, la corriente en cada fase no debe diferir de las otras en más de un 3%. De no cumplirse esto, es posible que se tenga alguno o algunos de los problemas siguientes:

- Enrollado incorrecto en el estator.
- Corto circuito en el enrollado del estator.
- Láminas en corte en el estator.
- Uniones de alta resistencia en el estator.

Evaluación del motor en virtud de la frecuencia de línea.

Asumiendo una frecuencia de línea de 60Hz se deberá configurar el registro espectral para una frecuencia máxima de 100Hz y una resolución de no menos de 1600 líneas.

Hasta ahora, existe cierto desacuerdo entre muchos especialistas a la hora de establecer una condición normal de acuerdo al espectro de corriente. No obstante todos coinciden en que es necesario comparar las amplitudes a la frecuencia de línea con la amplitud del pico inmediato a la izquierda de la frecuencia de línea y correspondiente con la frecuencia de paso de polos, en caso de ser esta la frecuencia moduladora.

Sin embargo, la no uniformidad de criterios tiene lugar a la hora de establecer qué es una diferencia significativa entre estas amplitudes. De acuerdo con investigaciones realizadas por el autor y atendiendo a la experiencia de otros autores muy reconocidos en el campo del diagnóstico, se pueden establecer tres categorías para evaluar el estado del motor de acuerdo a los resultados del análisis de corriente. Observe la tabla 2.

Tabla 2: Estado de los motores en función de la relación de amplitudes.

ESTADO	RELACIÓN DE AMPLITUDES F. DE LÍNEA / F. DE BANDAS LATERALES
BIEN	> 60 dB
NORMAL	55 – 60
LÍMITE	45 - 54
ANORMAL	40 - 44

Es menester insistir en que los registros de corriente deben tener lugar a un nivel de carga como mínimo de un 80%. Además de ello la experiencia ha demostrado que la técnica de análisis de corriente y las recomendaciones de la tabla 2 sólo resultan efectivas para motores cuyas potencias sean superiores a 30 kW. En caso de potencias más bajas, los límites establecidos en la tabla 2 tendrán que ser mucho más rigurosos.



III Congreso Cubano de Ingeniería de Mantenimiento

Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2004
CUJAE, Ciudad de la Habana, CUBA



Experiencias del CEIM

La División de Ingeniería de Vibraciones, Ruido y Diagnóstico, del Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento, integrada por especialistas con más de 20 años de experiencia en este campo, ha ejecutado diferentes proyectos de asistencia técnica tanto para la industria nacional como en el exterior del País. La experiencia que se comparte a continuación, ha sido extraída de un Proyecto de Diagnóstico dirigido por el autor, en el que se diagnosticó el estado de 155 máquinas en una Planta Cementera Cubana. La máquina en cuestión, cuyo esquema se muestra en la figura 7, desempeña la función de exhaustor principal en uno de los hornos de esta Cementera.

La inspección incluyó la obtención de los registros espectrales de vibraciones en las orientaciones *Radial Vertical*, *Radial Horizontal* y *Axial*, tanto en los cojinetes del motor como en los del ventilador respectivamente. Como resultado del análisis se diagnosticó –entre otras cosas– corrimiento del centro magnético del motor. Observe la componente a segunda armónica de la frecuencia de línea en el espectro de la figura 8, que fuera registrado en la orientación *radial vertical* del cojinete motor lado libre.

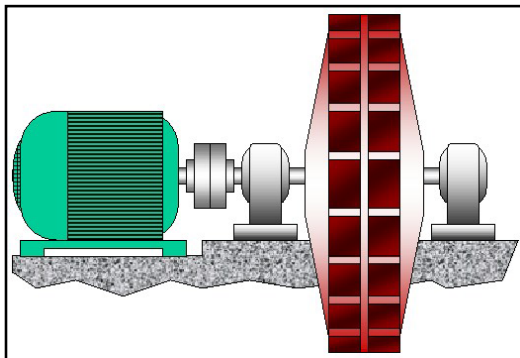


Figura 7. Exhaustor del horno.

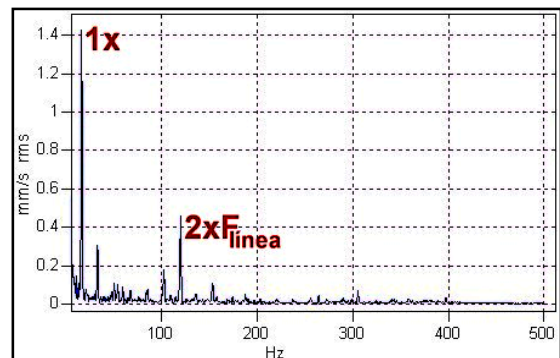


Figura 8. Espectro de vibraciones en *mm/s rms*.

Posteriormente y como parte del plan de ejecución de las acciones correctivas, la Gerencia de Mantenimiento de Planta ordenó la sustitución de este motor por otro exactamente igual. Con el nuevo motor había desaparecido la componente a 120 Hz. Lamentablemente y por razones que van más allá del presente artículo, el motor recién instalado se averió y hubo que acudir al motor que había sido previamente reemplazado, con la esperada reaparición de la segunda armónica de línea. El personal de Planta aseguraba que ese motor nunca había sido intervenido, pero como siempre sucede, alguien apuntó que al motor de interés, de tipo rotor bobinado, hubo que bloquearle un devanado.

De manera que, geométricamente no había ningún problema en el motor ni se identificó ninguna pata coja que pudiera provocar distorsión en el cuerpo de este, pero en efecto, sí había corrimiento en el centro magnético del motor por asimetría en el campo.

La segunda experiencia se refiere a una asistencia técnica ofrecida por el autor fuera de Cuba en una notable Industria de Bebidas, en la que el compresor de soplado, encargado de enviar el aire comprimido para soplar –valga la redundancia– las botellas plásticas, estaba confrontando problemas de cierta cronicidad con el cojinete de rodamiento de la polea conducida. Observe en la figura 9A) el esquema del accionamiento del compresor.

El análisis de vibraciones no reportó ninguna anomalía, sin embargo, el análisis espectral de intensidad de corriente ejecutado sobre el motor reportó el espectro mostrado en la figura 9B). En él se evidencian las bandas laterales acompañando a la frecuencia de línea –en este caso 50 Hz– y observe que la separación entre las bandas laterales tiene lugar a 7.188 Hz, valor este que es consistente con la frecuencia de rotación de la polea conducida, a saber, 7.2 Hz. El origen de tal modulación se identificó en



III Congreso Cubano de Ingeniería de Mantenimiento

Del 30 de noviembre al 3 de diciembre de 2004
CUJAE, Ciudad de la Habana, CUBA



una excentricidad de la polea conducida, lo cual provocaba eventos transitorios de incremento de la tensión en las correas, con la consecuente carga dinámica adicional sobre el cojinete de rodamiento.

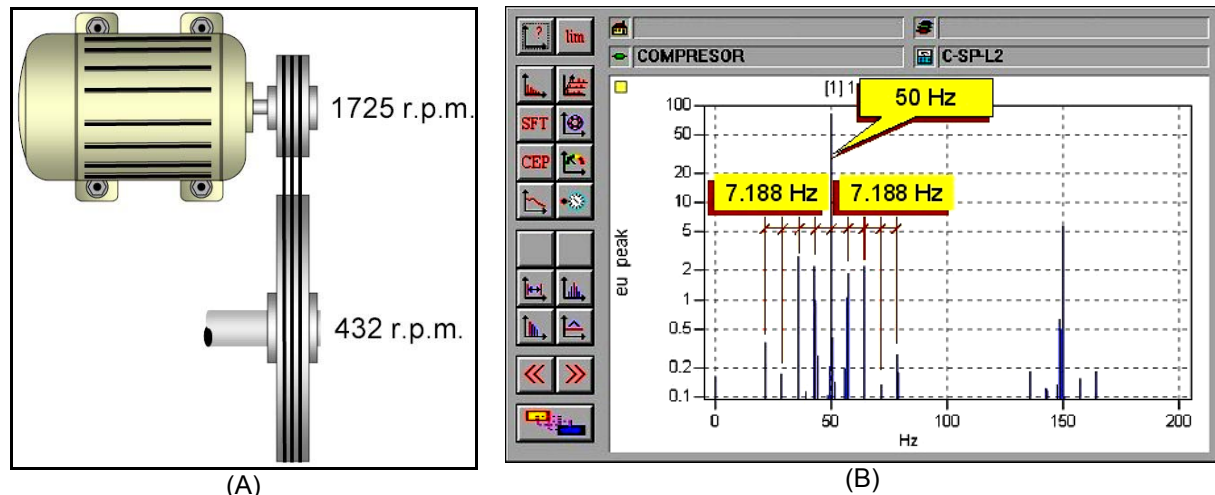


Figura 9. A – Accionamiento del compresor de soplado. B – Espectro de intensidad de corriente.

Consideraciones finales

El diagnóstico vibroeléctrico del motor de inducción presupone el análisis conjunto de registros espectrales de vibraciones y registros espectrales de intensidad de corriente.

La presencia de la segunda armónica de línea en los espectros de vibraciones registrados en motores de inducción está asociada al corrimiento del centro magnético del motor, el cual puede tener su origen en diversas causas.

En los espectros de intensidad de corriente no basta con identificar bandas laterales de la frecuencia de línea, es menester también determinar las causas de tal modulación.

Referencias

1. Berry, J. E. *Detection of multiple cracked rotor bars on induction motors using both vibration and motor current analysis*, Technical Associates of Charlotte Inc., USA 1995.
2. Finley, William R. *et al: An Analytical Approach to Solving Motor Vibration Problems*. Copyright material IEEE. Paper No. PCIC-99-XX. 16 p.
3. Nicholas, J.: *Available electrical technologies for monitoring motors and small generators*. Association of Iron and Steel Engineers. USA. 1998.
4. Palomino M., E.: *Elementos de Medición y Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias*. Latinas Editores. Bolivia. 2003.