

## **Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatóricas**

*Fernando Villada Duque\**, *Diego Parra*, *Guillermo Ocampo*

Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica —GIMEL—, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

(Recibido el 23 de junio de 2006. Aceptado el 29 de octubre de 2006)

### **Resumen**

En este trabajo se estudia el comportamiento de motores de inducción ante fallos progresivos en su aislamiento estatórico. Los motores objeto de este estudio son sometidos a fallos controlados, con incrementos graduales en el nivel de cortocircuito entre espiras del estator y mediante la medición de la señal de vibración mecánica, la señal de corriente eléctrica por fase del estator y la señal del flujo axial de dispersión, se procede a tabular e identificar las componentes armónicas que presentaron las mayores variaciones en su amplitud.

----- *Palabras clave:* diagnóstico de fallas, análisis espectral de corriente, flujo axial de dispersión, análisis de vibraciones, motores de inducción.

## **Study of the behavior of induction motors under stator faults**

### **Abstract**

Results of a study of the behavior of induction motors under stator faults are presented in this paper. Laboratory controlled short-circuits are induced between stator turns of induction motors. Mechanical vibrations, axial leakage flux and stator current are sensed in these motors; signals are then identified and compared to find the main harmonic components showing larger amplitude variations.

----- *Key words:* Current spectrum, vibration spectrum, Axial leakage flux spectrum, diagnosis techniques, induction motors.

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: +57+4+210 55 58, fax: +57+4+211 05 07, correo electrónico: fvillada@udea.edu.co (F. Villada).

## Introducción

Las máquinas eléctricas de inducción son piezas fundamentales en todo proceso productivo y por lo tanto requieren de un excelente mantenimiento y unas condiciones aceptables de operación para poder cumplir efectivamente con los objetivos globales de una planta.

El mantenimiento predictivo es una filosofía que ha sido ampliamente difundida en el sector productivo y en especial en equipos en movimiento como las máquinas eléctricas [1]. Para estas últimas, se han desarrollado variadas técnicas de diagnóstico [2-3], pero las más aplicadas son las que involucran análisis de vibraciones [1, 4], análisis espectral de corriente [5], análisis del flujo axial de dispersión [6] y las más recientes que combinan modelos de simulación del comportamiento de las fallas [7] y la aplicación de redes neuronales artificiales para identificar las fallas entre espiras del estator [8].

Exceptuando el análisis de vibraciones, no se ha generalizado la aplicación de estas técnicas de diagnóstico en motores de inducción a nivel industrial, encontrándose muchas de ellas en fase experimental; sin embargo, es de sumo interés profundizar en su estudio ya que teóricamente aventajan a los métodos convencionales en la facilidad de aplicación y en su sensibilidad para la detección de averías.

En este trabajo se implementa un banco de ensayos para motores de inducción con el fin de caracterizar sus fallas estatísticas y poder establecer la relación existente entre dichas fallas, el nivel de vibración, las variaciones en el espectro de corrientes y el flujo axial de dispersión. A partir de estos resultados, se establece la viabilidad de aplicación de estas técnicas de mantenimiento predictivo a nivel industrial.

### Métodos tradicionales de diagnóstico y mantenimiento de máquinas eléctricas rotativas

La mayoría de las fallas a las cuales se ven sometidas las máquinas eléctricas están relacionadas

con los daños en el aislamiento del estator que llegan a convertirse en cortocircuitos entre espiras y que por lo tanto traen como consecuencia la pérdida de vida útil del motor.

Para determinar el estado del aislamiento se emplean diferentes técnicas de diagnóstico en las que no todos sus objetivos coinciden, ya que ninguna puede determinar por sí sola el estado de los devanados por lo que se hace necesario llevar a cabo el conjunto de pruebas para la evaluación del estado integral del aislamiento. Cabe resaltar que estas pruebas se realizan con la máquina fuera de servicio y en algunas de ellas se puede superar la tensión nominal lo que puede llevar al fallo de aislamientos con cierto grado de deterioro. Entre este tipo de pruebas están:

- Ensayos con tensión continua, tales como, índice de polarización, resistencia de aislamiento y ensayos de sobretensión.
- Ensayos de ondas de choque
- Ensayos de tangente delta
- Ensayos de descargas parciales

También existe otro tipo de métodos de diagnóstico, que si bien no son invasivos ya se consideran como tradicionales, estos métodos son:

### *Análisis espectral de vibraciones*

En una máquina rotativa, teóricamente perfecta, no debería existir ninguna vibración ya que todas las fuerzas presentes en la máquina estarían compensadas. Sin embargo, todas las máquinas rotativas están sometidas a ciertos niveles de vibración, ya que debido a sus imperfecciones constructivas, aparecen desequilibrios y desalineaciones residuales, desgastes, fricciones y, en definitiva, todo tipo de fuerzas no compensadas [1]. Por otro lado, la existencia de averías en algún componente del sistema provoca la aparición de fuerzas, que pueden ser de origen eléctrico, mecánico, o debidas al proceso físico en el que está implicada la máquina. Todas ellas incrementan el nivel global de vibración o modifican las frecuencias de vibración ya existentes.

Las principales causas de vibración en una máquina eléctrica son:

- La respuesta del núcleo del estator a la fuerza atractiva desarrollada entre el rotor y estator.
- La reacción de los devanados terminales del estator a las fuerzas electromagnéticas sobre los conductores.
- El comportamiento dinámico del rotor.
- La respuesta de los rodamientos del eje a la vibración transmitida desde el rotor.

El análisis de vibraciones es, probablemente, el primer método aplicado y el más extendido de todos los utilizados en el mantenimiento predictivo. Aunque la práctica demuestra que su validez es muy limitada para la detección de fallos de origen eléctrico, la mayor parte de las anomalías mecánicas de las máquinas rotativas pueden ser diagnosticadas si se efectúa un correcto análisis de su espectro de vibración.

Actualmente, se están realizando algunos intentos por definir las frecuencias características de vibración asociadas a algunos defectos de origen eléctrico. La teoría predice que los cambios en la corriente debido al deterioro eléctrico de los devanados en las máquinas rotativas, alterarán las fuerzas magnéticas internas, las cuales causarán una modificación en las características vibratorias de la máquina [1].

Para hallar las relaciones matemáticas existentes entre la corriente eléctrica que fluye a través de los devanados y las vibraciones mecánicas de la máquina se utiliza la teoría de la onda de permeancia [4].

### **Análisis espectral de corriente**

El análisis espectral de corriente constituye un complemento para el diagnóstico mediante vibraciones ya que esta última tiene limitaciones al detectar problemas eléctricos en estado incipiente tales como excentricidades en el entrehierro, cortocircuitos entre espiras en el devanado del estator y barras rotas en los rotores de los motores

de inducción causadas por esfuerzos mecánicos, magnéticos o térmicos. Para la detección y monitoreo de cortocircuitos entre espiras en el devanado estatórico de los motores de inducción, empleando el análisis espectral de corrientes, se parte de una aproximación de la onda rotativa, la cual explica los armónicos de fuerza magnetomotriz producidos por las ranuras del rotor, del estator y por la saturación de los materiales que componen dicha máquina [5].

Otro aspecto importante, es que el cortocircuito entre espiras tiene el efecto de disminuir la fuerza magnetomotriz en la vecindad de la falla, ya que el devanado de fase tiene menos vueltas y porque la fuerza magnetomotriz generada por la corriente de cortocircuito es opuesta a la fuerza magnetomotriz generada por la corriente del devanado de fase.

Los armónicos que varían y que se originan de las corrientes que circulan a través del estator y del rotor, pueden ser hallados respectivamente mediante las ecuaciones (1) y (2) [5].

$$f_{sc} = (j_{rt} \cdot R \cdot \frac{1-s}{p}) \pm 2 \cdot j_{sa} \pm i_{st} \cdot f_1 \quad (1)$$

$$f_{rc} = ((j_{rt} \cdot R \pm k) \cdot \frac{1-s}{p}) \pm 2 \cdot j_{sa} \pm i_{rt} \cdot S \cdot f_1 \quad (2)$$

Donde:

- $f_1$  frecuencia de alimentación;
- $i, j, k$  entero
- $P$  número de polos
- $R$  número de ranuras del rotor
- $S$  número de ranuras del estator.
- $S$  deslizamiento.

### **Nuevos métodos de diagnóstico en motores eléctricos de inducción**

Las espiras y todas las bobinas del estator que forman un polo en una máquina de inducción

son conectadas generalmente en serie. Si un cortocircuito entre espiras ocurre en una de las bobinas, aparece un nuevo camino para el flujo de corriente, paralelo al primero. La aparición de este segundo camino causa una reducción en la impedancia de la bobina, debido a que dos espiras que antes estaban conectadas en serie ahora aparecen conectadas en paralelo.

La principal consecuencia de esto es el incremento de la corriente total que fluye a través de esta sección del devanado. Como esta corriente adicional circula por todo el resto del devanado, ocasiona un incremento de la temperatura de los conductores y por ende un deterioro progresivo en el aislamiento de la máquina [5].

El efecto de una falla en el aislamiento es la eliminación de una espira o un grupo de espiras del bobinado del estator. Esta será una pequeña consecuencia que se verá reflejada en la distribución del flujo en el entrehierro. Además en la espira cortocircuitada se inducirá una FEM que ocasionará un flujo de corriente limitado sólo por la impedancia de la espira en corto. La corriente de falla es la fuente de unos pulsos magnetomotriz que posee una distribución de armónicos espaciales que se superponen a la distribución del campo principal.

Por lo que se hace tan importante el estudio y conocimiento de los métodos de diagnóstico existentes para la detección de fallas incipientes en los devanados de las máquinas. Todos estos métodos tienen la ventaja de ser aplicados mientras la máquina se encuentra en operación, es decir, que no se requiere interrumpir su ciclo normal de trabajo para diagnosticar y dar a conocer el verdadero estado en el que se encuentra la máquina en un determinado momento.

Antes de comenzar el seguimiento del estado de una máquina rotativa es conveniente obtener los espectros que se tomarán como referencia para el estudio posterior. Estos espectros servirán como base para determinar el estado inicial de la máquina, y en ellos se deberán identificar las frecuencias características de cada armónico y la causa que las origina. De este modo, las pos-

teriores variaciones que sufran cada una de las componentes de la señal que se esté sensando se podrán asociar a la degradación progresiva de algún elemento específico. Dentro de estos nuevos métodos de diagnóstico tenemos:

### **Análisis espectral del flujo axial**

El flujo axial de dispersión es el flujo magnético considerado como flujo de pérdidas que es inducido por las corrientes circulantes en la máquina. Aparece en la carcasa, los alrededores de la máquina y principalmente a lo largo del eje, razón por la cual recibe su nombre, ya que a través de él se canaliza la mayor cantidad debido a su construcción a base de materiales ferromagnéticos con alta permeabilidad o baja reluctancia con respecto al vacío, tales como el hierro o aleaciones.

El flujo axial de dispersión se presenta en todas las máquinas eléctricas y se produce debido a que las máquinas no pueden ser construidas con una simetría perfecta en los circuitos eléctrico y magnético debido a las tolerancias en la fabricación, anisotropía de los materiales y otros factores que conllevan al desequilibrio entre las corrientes del rotor y el estator. La existencia de las asimetrías da lugar a la aparición de una diferencia neta entre las corrientes que circulan en una determinada zona de las cabezas de bobina y las que circulan por las cabezas de bobina diametralmente opuestas, este desequilibrio es el causante del flujo axial neto. Por esta misma causa el flujo axial de dispersión presenta diversas componentes armónicas de frecuencia no fundamental que incrementan su magnitud a medida que aumenta la asimetría.

Aunque la trayectoria teórica del flujo axial no está perfectamente definida, se hace razonable que la mayor parte de este se establezca a través del eje por sus características físicas como lo afirman algunos autores [1].

La presencia de un cortocircuito entre espiras del estator hace que el devanado resultante se asemeje al de una bobina de paso acortado donde

las componentes armónicas de la fuerza magnetomotriz para este caso se amplifican debido al cambio del paso polar. En otras palabras, el efecto de un cortocircuito entre espiras del bobinado puede incrementar la asimetría y de esta manera modificar el flujo axial. En el caso específico de un cortocircuito entre espiras, ocurre una modificación del circuito eléctrico que ocasiona un cambio subsecuente de la densidad de flujo en el entrehierro de la máquina.

Se puede deducir de estas consideraciones que el efecto general será un cambio en los armónicos temporales observados en el flujo de dispersión. Así una pequeña variación en la densidad del flujo magnético en el entrehierro debido a una falla incipiente, se verá reflejada inmediatamente en el flujo axial de dispersión, lo que lo convierte en un método excepcional para el diagnóstico de este tipo de fallas, lo que no es posible con métodos convencionales.

Los armónicos de interés para el cortocircuito entre espiras del estator están dados por [6]:

$$[k \pm n \cdot (1 - S) / p] \cdot f \quad (3)$$

Donde  $f$  es la frecuencia fundamental de alimentación,  $n$  es un número natural no múltiplo de los polos de la máquina y  $k$  es el orden de los armónicos temporales de la fuente. Una expresión más simple quedará entonces de la forma:

$$k \cdot f \pm n \cdot f_r \quad (4)$$

Donde  $f_r$  es la frecuencia de rotación del rotor.

Cuando el motor se encuentra sano, la amplitud de estos armónicos es despreciable o es muy pequeña con respecto a la amplitud de la frecuencia de alimentación. Cuando la amplitud de alguno de estos armónicos aumenta con respecto a un valor predeterminado, se puede pensar seriamente en una falla debido al cortocircuito del devanado del estator. El flujo axial de dispersión puede ser medido mediante el uso de bobinas exploradoras, éstas son transductores que permiten introducir una señal de tensión proporcional al flujo captado

en el correspondiente instrumento electrónico, para analizar luego el contenido de armónicos del flujo axial de dispersión mediante el estudio de la fuerza electromotriz producida por la variación del flujo. Una bobina de flujo axial consiste tan solo en un bobinado de hilo de cobre, que puede tener o no núcleo magnético y que con un número bajo de vueltas (100 aproximadamente) es capaz de obtener suficiente tensión para el análisis en cualquier instrumento digital de medida. De acuerdo a Cabanas [1], la bobina para la medición puede estar ubicada dentro o fuera del motor, ya que en cualquiera de las dos formas se produce una señal de tensión perfectamente válida para el estudio directo en un analizador dinámico o cualquier otro instrumento de medida.

### **Impedancia de secuencia inversa**

Se ha demostrado también, que es posible diagnosticar la presencia de espiras en cortocircuito en el bobinado del estator de un motor de inducción en funcionamiento por medio de un parámetro llamado la impedancia efectiva de secuencia inversa o negativa ( $Z_{2ef}$ ).

Basado en la teoría de las componentes simétricas [9], este método se constituye en una gran herramienta dentro de los nuevos métodos para el diagnóstico de fallas en los que no se hace necesario un paro de la operación normal de la máquina para detectar fallos dentro de ésta.

### **Par electromagnético**

El par electromagnético es otro de los métodos nuevos y no convencionales de diagnóstico de fallas en las máquinas rotativas que buscan evitar la parada y desmontaje de la máquina.

El par es generado cuando una serie de armónicos en las fuerzas magnetomotrices del rotor y el estator interactúan. Algunas de esas componentes interactúan y generan par motriz mientras las otras solo generan fuerzas pulsantes que producen variaciones en la velocidad.

La metodología para calcular el par en el entrehierro de los voltajes y corrientes instantáneas, se

basa en la teoría de vectores espaciales y particularmente en la aplicación de la transformada de Park. Haciendo uso de visualizadores de vectores se observan los vectores de flujos, corrientes y tensiones, y luego se halla el par interno por integración mediante la aplicación directa de la transformada de Park.

### Descripción del banco de ensayos

Los ensayos experimentales fueron realizados en el laboratorio de máquinas eléctricas del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Antioquia (véase tabla 1).

Los materiales y equipos utilizados para la realización de dichas pruebas fueron entre otros:

Analizador de vibraciones referencia Microlog-CMVA55 de SKF; Motor de inducción trifásico con derivaciones en una de las fases; pinzas amperimétricas; multímetros. Dispositivos sensores tales como acelerómetros, pinza amperimétrica y bobinas de núcleo ferromagnético desarrolladas en nuestro grupo de investigación para sensar el flujo axial de dispersión [10]; generador sincrónico (carga mecánica del motor); módulos de resistencias; cables; fuente de alimentación variable; tacómetro; interruptor termomagnético; variador de velocidad ATV28HU41M2 de 3 H. P.

**Tabla 1** Datos de placa del motor de inducción trifásico

| <i>Datos de placa</i>  |                           |
|------------------------|---------------------------|
| Tensión                | 220 [V]                   |
| Potencia               | 2,7 [Hp]                  |
| Corriente              | 6 [A]                     |
| Velocidad              | 1.674 [r. p. m.]          |
| Frecuencia             | 60 [Hz]                   |
| Conexión               | $\Delta$                  |
| Número de bobinas      | 48                        |
| Número de ranuras      | 48                        |
| Bobinas/grupo          | 4                         |
| Espiras/bobina         | 27                        |
| Número de grupos       | 12                        |
| Número de polos        | 4                         |
| Paso de bobinas        | 1-12                      |
| Diámetro del conductor | 1,4761 [mm <sup>2</sup> ] |

### Resultados

Procederemos ahora a mostrar los resultados del espectro de corriente, vibraciones y flujo axial obtenidos a través de los ensayos realizados en el laboratorio a un motor de inducción de rotor en jaula de ardilla, cuyos datos característicos y de placa fueron establecidos previamente.

Las tablas 2 y 3 muestran las diferentes variables medidas durante la prueba con 5 y 10 espiras en cortocircuito, respectivamente, donde  $V_1$  es el voltaje de alimentación,  $I_{f1}$ ,  $I_{f2}$  e  $I_{f3}$  son las corrientes por cada una de las fases,  $N_r$  es la velocidad a la cual gira el motor en revoluciones por minuto,  $I_d$  es la corriente que circula por el

**Tabla 2** Variables medidas durante las pruebas con 5 espiras en cortocircuito

| Prueba | $V_{1(V)}$ | $I_{f1(A)}$ | $I_{f2(A)}$ | $I_{f3(A)}$ | $N_{r(r.p.m.)}$ | $I_{d(A)}$ | # Esp. | $R_r (\Omega)$ | $I_{r(A)}$ | $V_{r(V)}$ | $F_{max(Hz)}$ | $V_{c(V)}$ | $I_{c(A)}$ | $I_{exc(mA)}$ |
|--------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|------------|--------|----------------|------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|
| 1      | 210        | 6,1         | 5,5         | 6,1         | 1.695           | 1,9        | 0      | $\alpha$       | 0,0        | 0,00       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |
| 2      | 210        | 6,1         | 5,5         | 6,1         | 1.695           | 2,2        | 5      | 0,250          | 2,7        | 1,35       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |
| 3      | 210        | 6,1         | 5,5         | 6,1         | 1.695           | 2,5        | 5      | 0,150          | 3,4        | 1,20       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |
| 4      | 210        | 6,1         | 5,5         | 6,1         | 1.695           | 2,7        | 5      | 0,093          | 3,8        | 1,14       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |
| 5      | 210        | 6,1         | 5,5         | 6,1         | 1.695           | 21,7       | 5      | 0,000          | 24,8       | 0,59       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |

**Tabla 3** Variables medidas durante las pruebas con 10 espiras en cortocircuito

| Prueba | $V_{1(V)}$ | $I_{f1(A)}$ | $I_{f2(A)}$ | $I_{f3(A)}$ | $N_{r(r.p.m.)}$ | $I_{d(A)}$ | # Esp. | $R_r (\Omega)$ | $I_{r(A)}$ | $V_{r(V)}$ | $F_{max(Hz)}$ | $V_{c(V)}$ | $I_{c(A)}$ | $I_{exc(mA)}$ |
|--------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|------------|--------|----------------|------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|
| 1      | 210        | 6,0         | 5,4         | 6,2         | 1.695           | 3,0        | 0      | $\alpha$       | 0,0        | 0,00       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |
| 2      | 210        | 6,0         | 5,6         | 6,2         | 1.695           | 4,8        | 10     | 0,250          | 7,0        | 2,90       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |
| 3      | 210        | 6,0         | 5,7         | 6,2         | 1.695           | 6,3        | 10     | 0,150          | 8,6        | 2,50       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |
| 4      | 210        | 6,0         | 5,7         | 6,2         | 1.695           | 8,4        | 10     | 0,093          |            | 2,15       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |
| 5      | 210        | 6,3         | 6,4         | 6,4         | 1.695           | 31,0       | 10     | 0,000          |            | 0,70       | 1.600         | 276        | 2,4        | 380           |

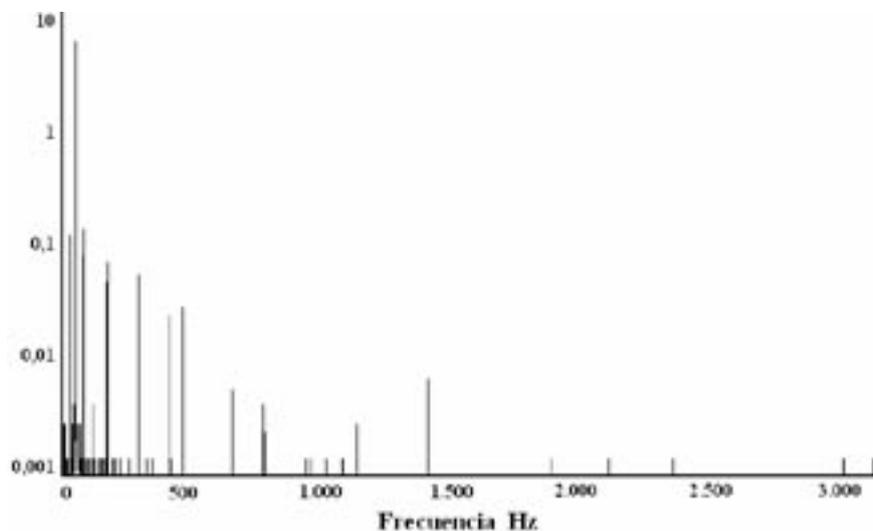
devanado donde se induce la falla, # Esp. es el número de espiras en cortocircuito,  $R_r$  es el valor de la resistencia conectada en paralelo al punto de avería para limitar la corriente,  $V_r$  es el voltaje en las terminales de  $R_r$ ,  $F_{max}$  representa la máxima frecuencia (valor predeterminado) que registrará el equipo de medida,  $V_c$  es el voltaje en bornes del generador sincrónico acoplado al motor,  $I_c$  representa la corriente que fluye a través de los módulos resistivos (carga del generador),  $I_{exc}$  es la corriente de campo del generador.

De las tablas 2 y 3 y comparando los valores de " $I_d$ " con cualquiera de las corrientes de fase cuando no se tiene conectado en paralelo la resistencia limitadora  $R_r$ , es decir,  $R_r = 0$ , se puede observar claramente la excesiva corriente que circula al interior de la máquina (31 y 21,7 [A]), y como las fases de alimentación del motor no registran estas elevadas intensidades de corriente para activar las respectivas protecciones eléctricas, lo que ocasiona la degradación progresiva del aislamiento de las espiras en corto, extendiéndose hacia los devanados vecinos hasta el punto de sacar de funcionamiento el motor (ya que esta corriente está circulando y circulando continuamente a través de las espiras en corto) por la destrucción total del aislamiento del bobinado de la fase en estado de fallo.

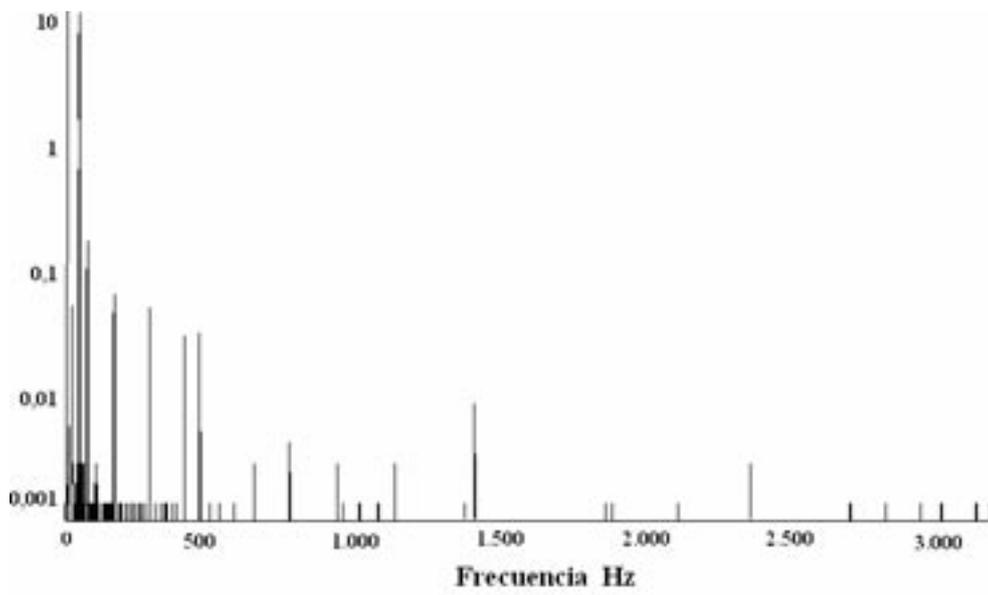
Debido a este tipo de situaciones es que se hace tan importante el mantenimiento predictivo que brindan los análisis espectrales de corriente, vibraciones y flujo axial, los cuales permiten detectar posibles averías en su estado incipiente, averías imposibles de detectar a simple vista desde el exterior.

### Espectro de corriente

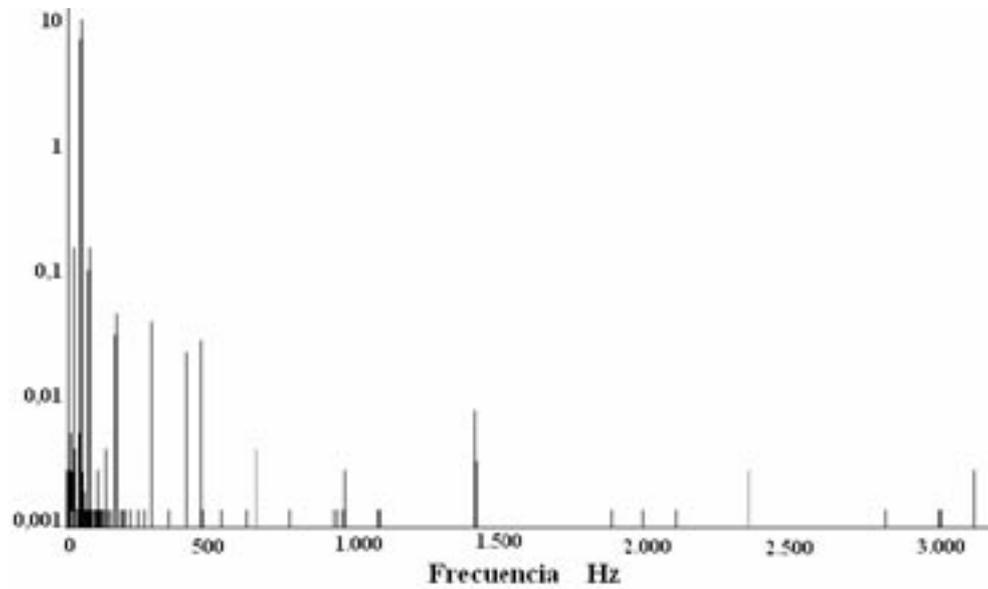
Las figuras 1 a 3 muestran los espectros de corriente del motor bajo prueba cuando es alimentado directamente de la red, para 0, 5 y 10 espiras en cortocircuito, respectivamente. Adicionalmente se muestra en las figuras 4 y 5 dos espectros de corriente para el mismo motor pero esta vez alimentado por medio de un variador de velocidad. El eje vertical de la gráfica determina la amplitud en "V" de cada uno de los armónicos, mientras que en el eje horizontal se encuentra el valor de la frecuencia en Hz. Ambos ejes se encuentran en escalas lineales. Algunos autores recomiendan emplear una escala logarítmica en el eje vertical, ya que esta permite observar la amplitud de todos las frecuencias en una misma gráfica, gracias a que reduce las amplitudes mayores e incrementa las más pequeñas, facilitando así el correspondiente análisis.



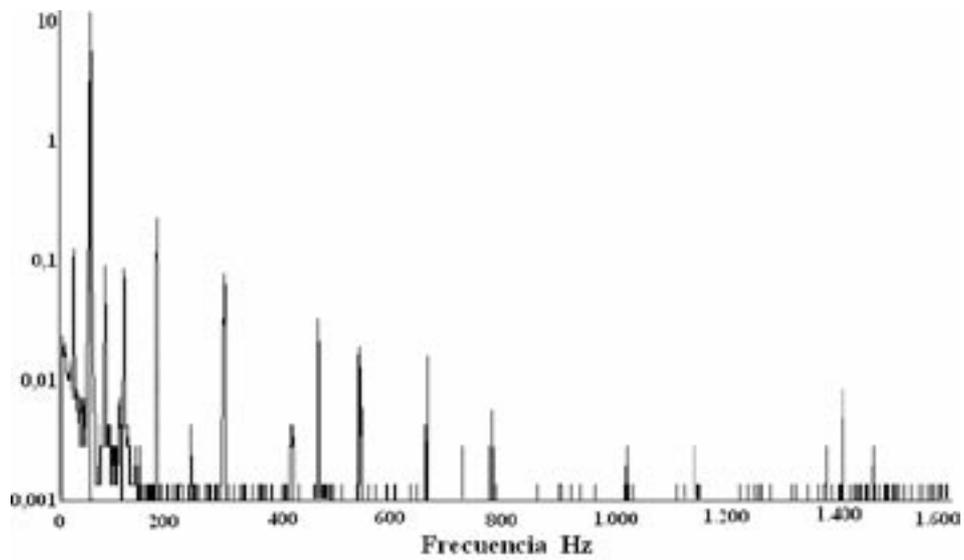
**Figura 1** Espectro de corriente para 0 espiras del estator en cortocircuito



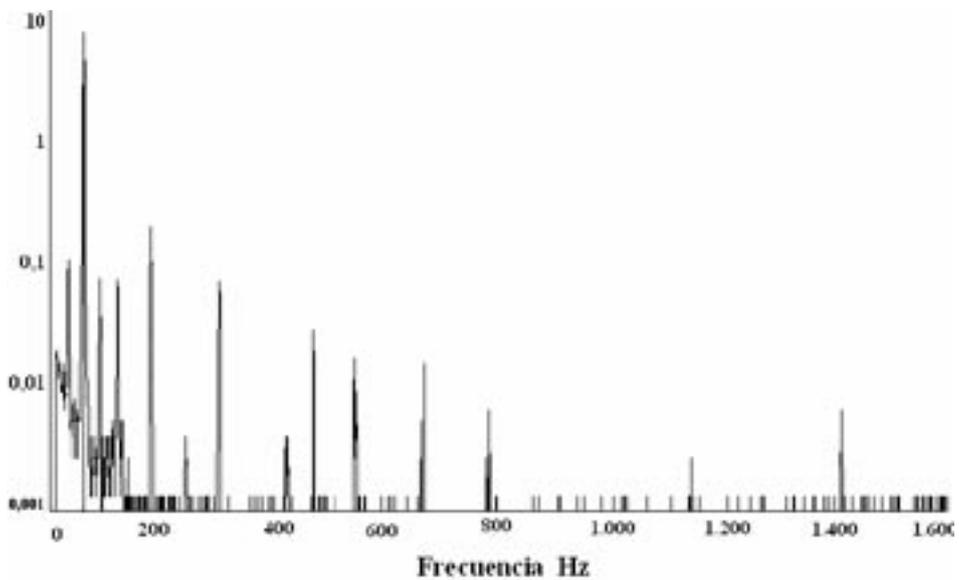
**Figura 2** Espectro de corriente para 5 espiras del estator en cortocircuito



**Figura 3** Espectro de corriente para 10 espiras del estator en cortocircuito



**Figura 4** Espectro de corrientes para el motor alimentado a través de un variador de velocidad, con 0 espiras en cortocircuito



**Figura 5** Espectro de corriente para el motor alimentado a través de un variador de velocidad, con 5 espiras en cortocircuito

De las figuras 1 a 5 puede observarse que es difícil hallar los cambios de cada uno de los espectros a simple vista, debido a que las variaciones de las frecuencias son muy leves cuando se presentan este tipo de fallas, por lo que se requiere un análisis detallado punto a punto de cada frecuencia para poder diagnosticar de una manera más aproximada el verdadero estado en el que se encuentra el devanado estático de la máquina, además se puede observar claramente

la distorsión y la gran cantidad de armónicos adicionales que induce un variador de velocidad al espectro dificultando el correspondiente análisis, resultados similares se obtuvieron durante los ensayos para vibraciones y flujo axial.

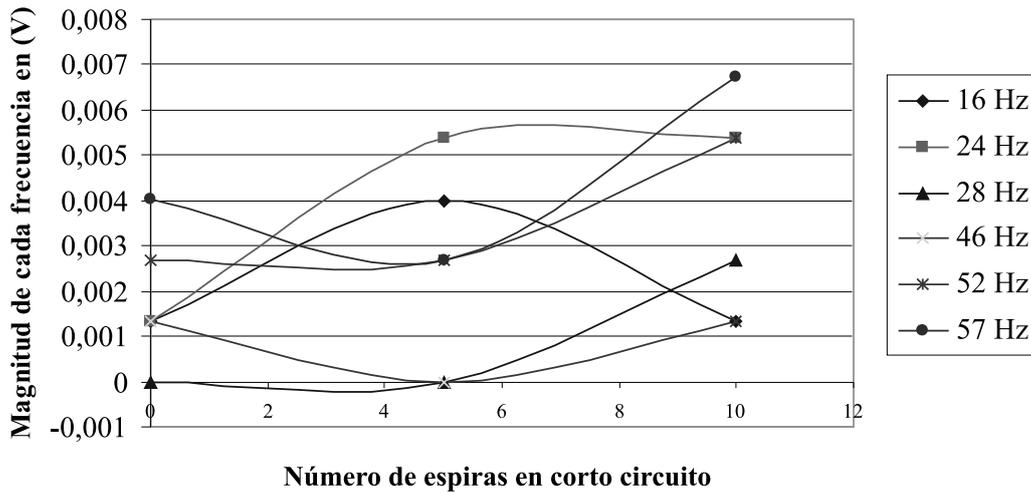
La tabla 4 muestra las frecuencias que presentaron las mayores variaciones con sus respectivos valores, además la figura 6 muestra el gráfico de algunas de estas frecuencias.

**Tabla 4** Variaciones en la amplitud de cada frecuencia para 5 y 10 espiras en cortocircuito

| <i>Frecuencia (Hz)</i> | <i>Amplitud para 0 espiras en corto</i> | <i>Amplitud para 5 espiras en corto</i> | <i>Amplitud para 10 espiras en corto</i> |
|------------------------|---|---|--|
| 16                     | 0,00134                                 | 0,00400                                 | 0,00134                                  |
| 24                     | 0,00134                                 | 0,00540                                 | 0,00540                                  |
| 28                     | 0,00000                                 | 0,00000                                 | 0,00270                                  |
| 32                     | 0,20910                                 | 0,21980                                 | 0,23330                                  |
| 46                     | 0,00134                                 | 0,00000                                 | 0,00134                                  |
| 52                     | 0,00270                                 | 0,00270                                 | 0,00540                                  |
| 57                     | 0,00404                                 | 0,00269                                 | 0,00674                                  |
| 60                     | 8,48490                                 | 8,56720                                 | 8,90030                                  |
| 88                     | 0,13890                                 | 0,14700                                 | 0,15240                                  |
| 96                     | 0,00000                                 | 0,00000                                 | 0,00134                                  |
| 180                    | 0,07140                                 | 0,05799                                 | 0,04580                                  |
| 300                    | 0,05520                                 | 0,04450                                 | 0,03910                                  |
| 965                    | 0,00000                                 | 0,00000                                 | 0,00269                                  |
| 420                    | 0,02420                                 | 0,02697                                 | 0,02290                                  |
| 660                    | 0,00539                                 | 0,00269                                 | 0,00404                                  |
| 1.414                  | 0,00674                                 | 0,00809                                 | 0,00800                                  |
| 2.356                  | 0,00134                                 | 0,00269                                 | 0,00269                                  |
| 3.131                  | 0,00134                                 | 0,00134                                 | 0,00269                                  |

De la tabla 4 se puede afirmar que las frecuencias de 24, 28, 32, 52, 57, 60, 88, 96, 965, 1.414, 2.356 y 3.131 Hz, tuvieron incrementos en su amplitud a medida que aumentaba el número de espiras en corto, mientras que las frecuencias 180, 300,

420 y 660 Hz, presentaron una reducción en la amplitud cuando se pasó de 0 a 10 espiras en cortocircuito. Las frecuencias de 16 y 46 Hz, se mantuvieron constantes durante la evolución de la avería.

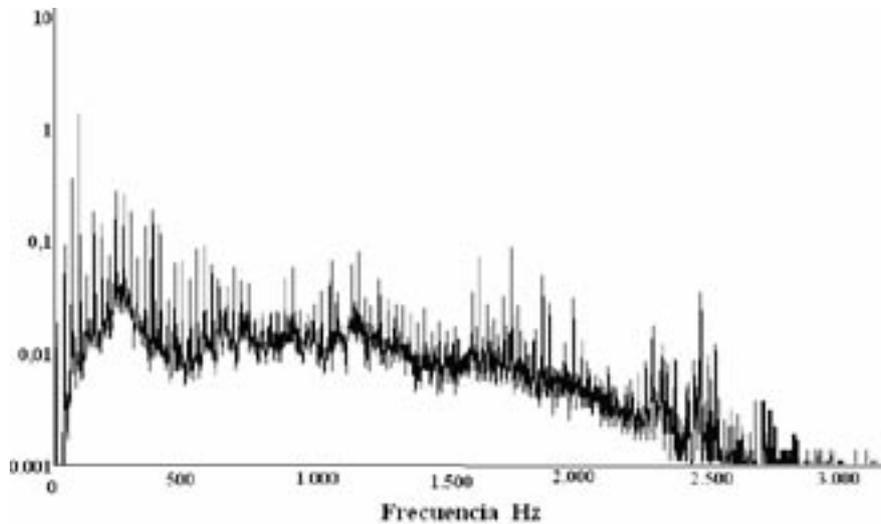


**Figura 6** Variaciones en la amplitud de algunas frecuencias versus 5 y 10 espiras en cortocircuito

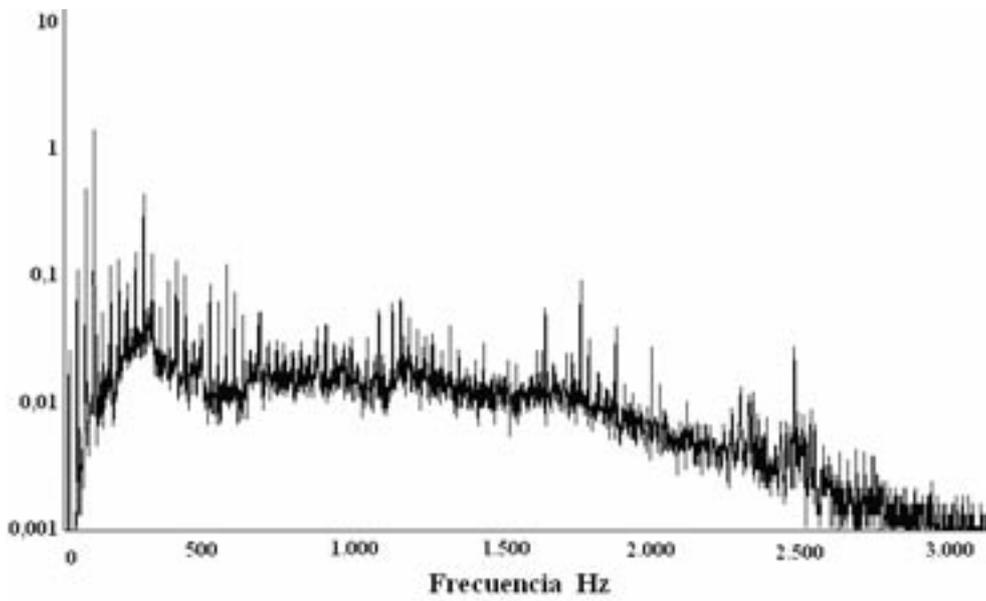
De lo anterior se puede concluir que las frecuencias que son generadas por las corrientes circulantes en el rotor de la máquina presentan incrementos en su amplitud a medida que evoluciona el fallo. Mientras que las frecuencias debidas a la circulación de corrientes por el devanado estático (frecuencias múltiplos de la fundamental “60 Hz”) presentan una disminución en su amplitud a medida que se acentúa la falla.

### Espectro de vibraciones

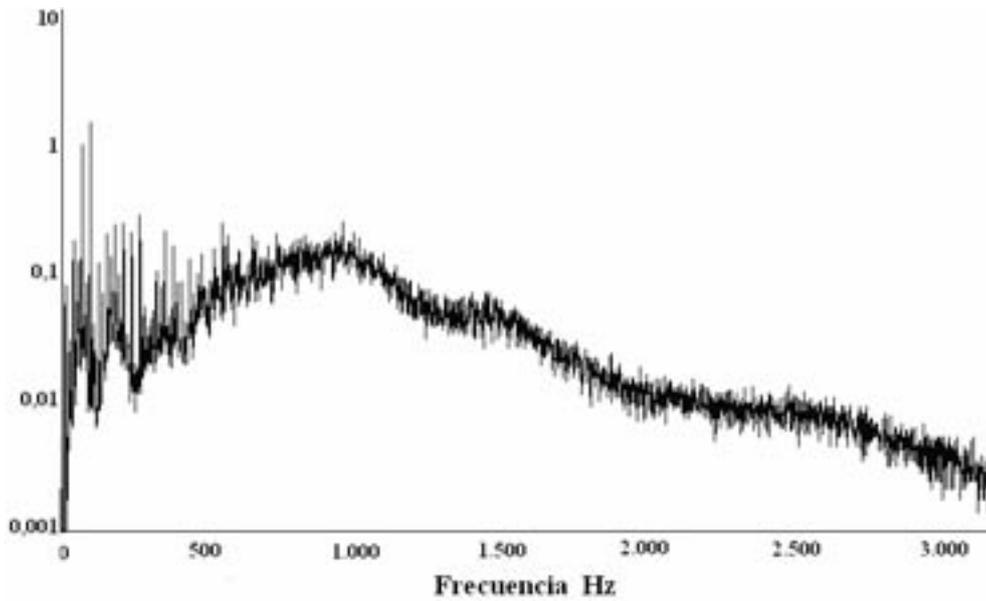
Las figuras 7 a 9 muestran los espectros de vibración del motor bajo prueba cuando es alimentado directamente de la red, para 0, 5 y 10 espiras en cortocircuito, respectivamente. El eje vertical de la gráfica determina la amplitud en “V” de cada uno de los armónicos, mientras que en el eje horizontal se encuentra el valor de la frecuencia en Hz.



**Figura 7** Espectro de vibraciones para 0 espiras en cortocircuito



**Figura 8** Espectro de vibraciones para 5 espiras en cortocircuito



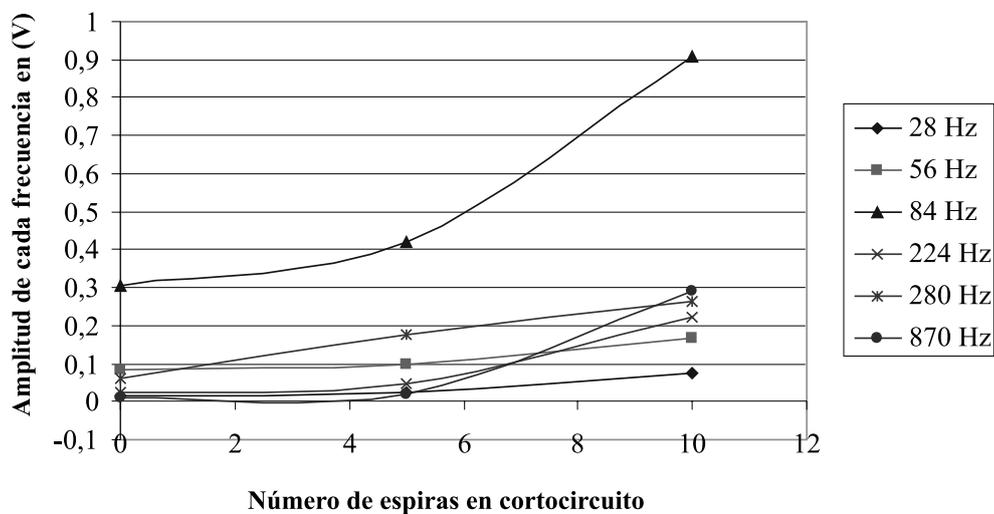
**Figura 9** Espectro de vibraciones para 10 espiras en cortocircuito

La tabla 5 muestra las frecuencias que presentaron las mayores variaciones con sus respectivos

valores, además la figura 10 muestra el gráfico de algunas de éstas frecuencias.

**Tabla 5** Variaciones en la amplitud de cada frecuencia para 5 y 10 espiras en cortocircuito

| <i>Frecuencia (Hz)</i> | <i>Amplitud para 0 espiras en corto</i> | <i>Amplitud para 5 espiras en corto</i> | <i>Amplitud para 10 espiras en corto</i> |
|------------------------|---|---|--|
| 28                     | 0,017200                                | 0,02530                                 | 0,07620                                  |
| 56                     | 0,082200                                | 0,10000                                 | 0,16600                                  |
| 84                     | 0,307000                                | 0,42200                                 | 0,91000                                  |
| 224                    | 0,024800                                | 0,04550                                 | 0,22300                                  |
| 252                    | 0,077100                                | 0,07440                                 | 0,19300                                  |
| 280                    | 0,062000                                | 0,17500                                 | 0,26300                                  |
| 308                    | 0,026700                                | 0,05550                                 | 0,03670                                  |
| 336                    | 0,019400                                | 0,02750                                 | 0,09620                                  |
| 365                    | 0,067900                                | 0,08600                                 | 0,08260                                  |
| 618                    | 0,016700                                | 0,04630                                 | 0,05850                                  |
| 870                    | 0,012600                                | 0,01830                                 | 0,29000                                  |
| 1.077                  | 0,0113                                  | 0,0178                                  | 0,0962                                   |
| 1.124                  | 0,0115                                  | 0,0574                                  | 0,0796                                   |
| 1.646                  | 0,0633                                  | 0,00647                                 | 0,0292                                   |
| 2.002                  | 0,00458                                 | 0,0137                                  | 0,01088                                  |
| 2.669                  | 0,000539                                | 0,00188                                 | 0,0051                                   |



**Figura 10** Variaciones en la amplitud de algunas frecuencias versus 5 y 10 espiras en cortocircuito

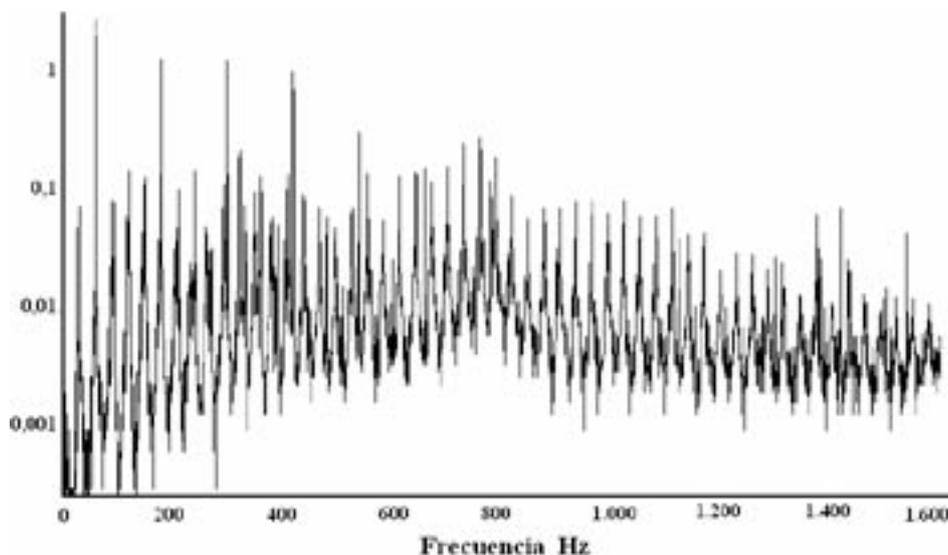
De la tabla 5 se puede observar que las frecuencias de 28, 56, 84, 224, 280, 870, 252, 308, 336, 365, 618, 1.077, 1.124, 2.002 y 2.669 Hz, tuvieron incrementos en su amplitud a medida que aumentaba el número de espiras en corto, mientras que la frecuencia de 1.646 Hz, fue la única que presentó una reducción en la amplitud cuando se pasó de 0 a 10 espiras en cortocircuito.

Se puede afirmar que las frecuencias que presentaron las amplitudes más notorias y las mayores variaciones a medida que se incrementaba el estado de avería de las espiras del motor, son aquellas múltiplos de la frecuencia fundamental de rotación de la máquina que para nuestro caso y de acuerdo con los datos de placa mostrados

en la tabla 4, es de 28 Hz, correspondiente a 1.674 rpm.

### Espectro de flujo axial

Después de realizar el montaje respectivo, se procedió a medir las diferentes variables de interés con el fin de controlarlas y almacenarlas en la base de datos para posteriores análisis. Las figuras 11 a 13 muestran los espectros de corriente del motor bajo prueba cuando es alimentado directamente de la red, para 0, 5 y 10 espiras en cortocircuito, respectivamente. El eje vertical de la gráfica determina la amplitud en “V” de cada uno de los armónicos, mientras que en el eje horizontal se encuentra el valor de la frecuencia en Hz.

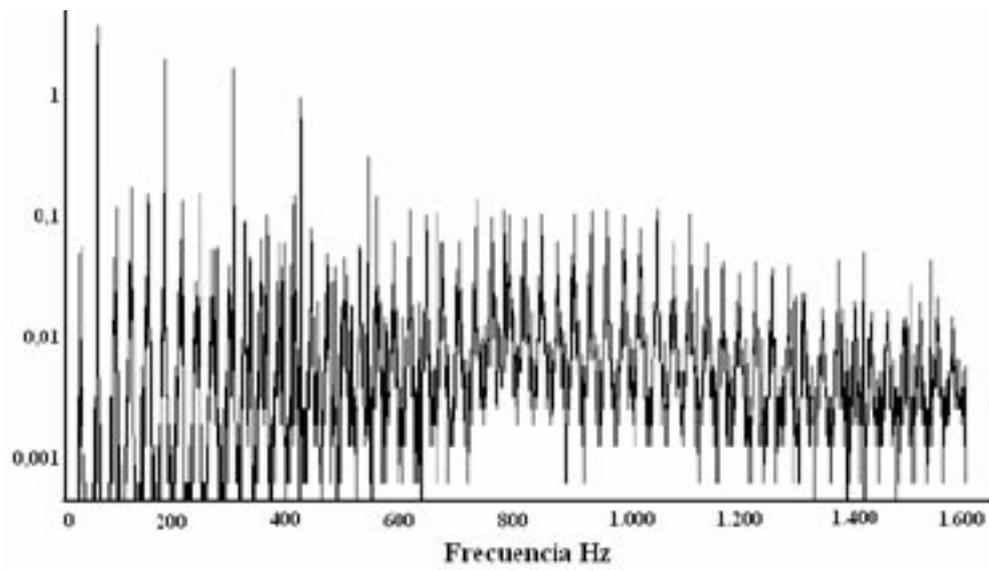


**Figura 11** Espectro de flujo axial para 0 espiras del estator en cortocircuito

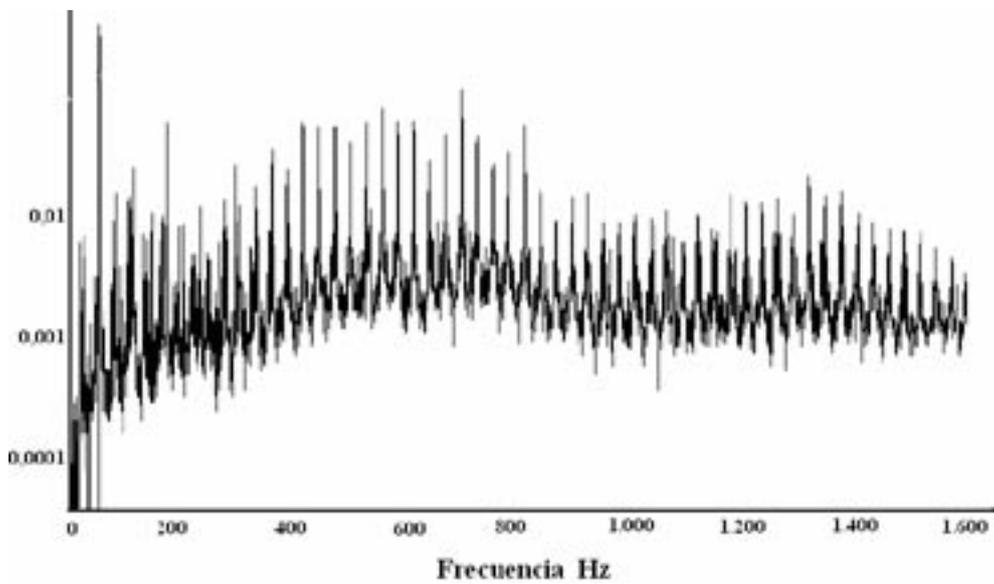
A medida que se avanzó en el análisis experimental se pudo notar que las frecuencias que variaban significativamente corresponden a valores bajos de  $K_2$ , incluyendo  $k_2 = 0$ . Dado este hecho, se facilitó un poco el trabajo, ya que el número de frecuencias a estudiar que variaban prácticamente

se redujo en forma significativa. Estas frecuencias se pueden resumir en la tabla 6.

El análisis espectral se realizó hasta la frecuencia de 1.200 Hz, ya que a medida que la frecuencia aumenta se hace más difícil encontrar los armóni-



**Figura 12** Espectro de flujo axial para 5 espiras del estator en cortocircuito



**Figura 13** Espectro de flujo axial para 10 espiras del estator en cortocircuito

cos cuyas amplitudes son crecientes con la avería; esto debido a que las amplitudes se reducen de manera considerable y por lo tanto sus valores no son muy confiables. Por esta razón el estudio del flujo axial se concentró en frecuencias no superio-

res a 800 Hz. La tabla 7 muestra las frecuencias que presentaron las mayores variaciones con sus respectivos valores, además la figura 14 muestra el gráfico de algunas de estas frecuencias.

**Tabla 6** Principales frecuencias para el análisis del flujo axial

| <i>K1*f + K2*fr</i> |          |          | <i>K1*f - K2*fr</i> |          |
|---------------------|----------|----------|---------------------|----------|
| <i>K1\K2</i>        | <i>0</i> | <i>1</i> | <i>K1\K2</i>        | <i>1</i> |
| 1                   | 60       | 88,25    | 1                   | 31,75    |
| 2                   | 120      | 148,25   | 2                   | 91,75    |
| 3                   | 180      | 208,25   | 3                   | 151,75   |
| 4                   | 240      | 268,25   | 4                   | 211,75   |
| 5                   | 300      | 328,25   | 5                   | 271,75   |
| 6                   | 360      | 388,25   | 6                   | 331,75   |
| 7                   | 420      | 448,25   | 7                   | 391,75   |
| 8                   | 480      | 508,25   | 8                   | 451,75   |
| 9                   | 540      | 568,25   | 9                   | 511,75   |
| 10                  | 600      | 628,25   | 10                  | 571,75   |
| 11                  | 660      | 688,25   | 11                  | 631,75   |
| 12                  | 720      | 748,25   | 12                  | 691,75   |
| 13                  | 780      | 808,25   | 13                  | 751,75   |
| 14                  | 840      | 868,25   | 14                  | 811,75   |
| 15                  | 900      | 928,25   | 15                  | 871,75   |
| 16                  | 960      | 988,25   | 16                  | 931,75   |
| 17                  | 1.020    | 1.048,25 | 17                  | 991,75   |
| 18                  | 1.080    | 1108,25  | 18                  | 1.051,75 |
| 19                  | 1.140    | 1.168,25 | 19                  | 1.111,75 |
| 20                  | 1.200    | 1.228,25 | 20                  | 1.171,75 |

De la tabla 7 se puede afirmar que las frecuencias de 32, 120, 152, 208, 272, 328, 360, 420, 448, 480, 540, 568, 600, 660, 688, 720 y 752 Hz, tuvieron incrementos en su amplitud a medida que aumentaba el número de espiras en corto, mientras que las frecuencias 60, 88, 180, 240, 300 y 385 Hz, presentaron una reducción en la

amplitud cuando se pasó de 0 a 10 espiras en cortocircuito. De esta manera podemos observar que frecuencias como 32, 89, 152, 208, 272, 328, 420, 448, 478, 510, 540, 568, 600, 624, 688 y 720 Hz presentaron variaciones importantes ante la presencia de cortocircuitos en el devanado estático y pueden ser consideradas como de

**Tabla 7** Variaciones en la amplitud de cada frecuencia para 5 y 10 espiras en cortocircuito

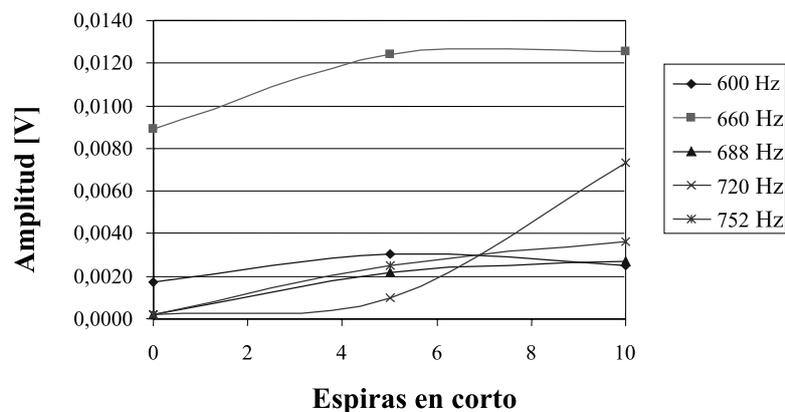
| <i>Frecuencia (Hz)</i> | <i>Amplitud para 0<br/>espiras en corto</i> | <i>Amplitud para 5<br/>espiras en corto</i> | <i>Amplitud para 10<br/>espiras en corto</i> |
|------------------------|---|---|--|
| 32                     | 0,004720                                    | 0,007590                                    | 0,006830                                     |
| 60                     | 1,070000                                    | 0,417000                                    | 0,286000                                     |
| 88                     | 0,032900                                    | 0,020100                                    | 0,015000                                     |
| 120                    | 0,013500                                    | 0,017800                                    | 0,023700                                     |
| 152                    | 0,003370                                    | 0,007250                                    | 0,010400                                     |
| 180                    | 0,514000                                    | 0,035300                                    | 0,057200                                     |
| 208                    | 0,005060                                    | 0,005560                                    | 0,008130                                     |
| 240                    | 0,017000                                    | 0,012500                                    | 0,011700                                     |
| 272                    | 0,000843                                    | 0,004300                                    | 0,005990                                     |
| 300                    | 0,235000                                    | 0,057700                                    | 0,025400                                     |
| 328                    | 0,001350                                    | 0,006240                                    | 0,008430                                     |
| 360                    | 0,005060                                    | 0,004550                                    | 0,007380                                     |
| 385                    | 0,003880                                    | 0,001940                                    | 0,001690                                     |
| 420                    | 0,050200                                    | 0,086000                                    | 0,056600                                     |
| 448                    | 0,002190                                    | 0,011100                                    | 0,052600                                     |
| 480                    | 0,001010                                    | 0,017800                                    | 0,052900                                     |
| 540                    | 0,004210                                    | 0,042100                                    | 0,011100                                     |
| 568                    | 0,001350                                    | 0,028900                                    | 0,005940                                     |
| 600                    | 0,001690                                    | 0,003030                                    | 0,002490                                     |
| 660                    | 0,008490                                    | 0,012400                                    | 0,012600                                     |
| 688                    | 0,000169                                    | 0,002190                                    | 0,002740                                     |
| 720                    | 0,000169                                    | 0,001010                                    | 0,007330                                     |
| 752                    | 0,000169                                    | 0,002530                                    | 0,003620                                     |

gran importancia dentro de un seguimiento que se le haga al comportamiento de una máquina.

Por otro lado frecuencias como la de alimentación (60 Hz) y algunos de sus múltiplos no pueden ser indicadores confiables del estado del devanado estático de la máquina, ya que su variación no obedece a un patrón de falla en el bobinado.

## Conclusiones

Un programa de mantenimiento predictivo debe correlacionar diferentes tipos de datos para obtener una imagen completa del equipo a analizar, determinar el comienzo de los cambios y establecer la causa de los problemas. El análisis de tendencias es crucial; es casi imposible deter-



**Figura 14** Variaciones en la amplitud de algunas frecuencias versus 5 y 10 espiras en cortocircuito

minar la condición de algún motor a partir de un solo conjunto de datos.

Los resultados obtenidos en el laboratorio a partir de la caracterización completa de un motor de inducción, con incrementos graduales en el número de espiras en cortocircuito, mostraron pequeños cambios en algunos componentes de los espectros de frecuencia de las vibraciones mecánicas y de la corriente del estator; sin embargo, el espectro de frecuencia del flujo axial de dispersión mostró cambios significativos en muchas frecuencias. Por lo tanto, un análisis combinado de estas señales constituye un buen indicador para detectar fallas incipientes en el estator de los motores de inducción, con la ventaja adicional de poder implementar estas técnicas mediante una ruta de inspección en línea y sin requerirse la interrupción de la producción.

### Referencias

1. M. Fernández, M. García, G.A. Orcajo, J. Cano, J. Solares. *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona. Marcombo, 1998. pp. 121- 153.
2. R.M. Talam, S.B. Lee, G. Stone, G.B. Kliman, J. Yoo, T.G. Habetler, R.G. Harley. "A Survey of methods for detection of stator related faults in induction machines", *The IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, SDEMPED 2003, Atlanta, USA. Agosto de 2003. pp. 35- 46.
3. M. García, M. Fernández, C. Rojas, G.A. Orcajo, J. Cano, J. Solares. "Study of an induction motor working under stator winding inter-turn short circuit condition", *The IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, SDEMPED 2003, Atlanta, USA. Agosto de 2003. pp. 52- 57.
4. F.C. Trutt, J. Sottile, J.L. Kohler. "Detection of A.C. machine winding deterioration using electrically excited vibrations". *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 37. 2001. pp. 10-13.
5. A. Stavrou, H. Sedding, J. Penman. "Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors." *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 16. 2001. pp. 32-37.
6. D. Valencia, N. Muñoz. *El flujo axial de dispersión como indicador del estado del aislamiento de los devanados de los motores de inducción*. Tesis de grado Universidad de Antioquia. Medellín. Julio de 2003.
7. M. Arkan, D. Kostic-Perovic, P.J. Unsworth. "Modelling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics". *Electric Power Research*. Vol. 75. 2005. pp. 57-66.
8. R.P. Leger, W.J. Garland, W.F.S. Poehlman. "Fault detection and diagnosis using statistical control charts and artificial neural networks." *Artificial intelligence in engineering*. Vol. 12. 1998. pp. 35-47.
9. Stevenson W.D. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. México. McGraw-Hill. 1979. pp. 270-298.
10. D. Parra, G. Ocampo. *Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatórica*, Tesis de grado Universidad de Antioquia. Medellín. Enero de 2005. pp. 119-145.