

EL FLUJO DE DISPERSIÓN MAGNÉTICO COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESPECTRAL

FLOW MAGNETIC OF DISPERSION LIKE TOOL OF ANALISYS FOR DETECTIONS OF FAULTS IN MOTORS OF INDUCTION ACROOS TECHNICAL OF ESPECTRUM ANALYSIS



AUTOR

ANTONIO ALEXI ANTELIZ JAIMES
Especialista en Docencia Universitaria
Unidades Tecnológicas de Santander
Docente
Tecnología en Electromecánica
anteliz3@hotmail.com
COLOMBIA.

INSTITUCIÓN

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE
COLOMBIA
UTS
Institución de Educación Superior
Calle de los estudiantes No. 9-82
cinv@uts.edu.co
COLOMBIA.

Recepción: Junio 10 de 2009

Aceptación: Septiembre 17 de 2009

tematica: Tercera Edición: Procesamiento de señales, Electrónica y Modelado de elementos físicos.

Artículo Tipo: Artículo de Investigación Científico y tecnológico

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados de la caracterización espectral del flujo de dispersión magnético presente en los motores de inducción bajo diferentes condiciones de operación, para ello se han utilizado un sensor de campo magnético y las técnicas de tratamiento digital de señales. Los resultados obtenidos muestran una clara relación entre el contenido espectral del flujo de dispersión y las diferentes condiciones de operación evaluadas, lo que permite intuir la posibilidad de utilizar esta técnica como herramienta de detección de fallas en los motores de inducción.

PALABRAS CLAVES

Falla
Flujo de dispersión
Armónicos
Espectro

KEYWORDS

Fault
Flow of dispersion
Spectrum
Armonics

ABSTRACT

The purpose of this work is to show the result of spectral characterization of flow magnetic dispersion in the motors of induction below different conditions of operation, for it they have utilized a sensor of magnetic field and the techniques of digital treatment of signals, result obtained evidence an obvious relations between the spectral contents of flow of dispersion and the differ conditions of operation evaluated, it that permits intuiting the possibility to utilize this technique like tool of detection of faults in the induction motors.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el 70% de las máquinas eléctricas utilizadas en los procesos de producción son motores de inducción, debido a que éste presenta claras ventajas como la robustez, confiabilidad, y bajo costo de mantenimiento. A pesar de estas ventajas el motor de inducción es susceptible de sufrir diversas averías de origen eléctrico o mecánico [2], [4]. Las fallas de origen mecánico se relacionan con daños en el eje del motor o en los sistemas de rodamiento, mientras que las fallas eléctricas conciernen a los devanados del estator, barras en el rotor, fuente de alimentación o anillos de cortocircuito.

Las fallas mecánicas en el motor de inducción normalmente están relacionadas con desviaciones en el eje o anomalías en los rodamientos, y evolucionan en forma lenta, lo que permite establecer planes de monitoreo para identificarlas en estados tempranos de desarrollo. Las fallas eléctricas se encuentran asociadas con pérdidas de aislamiento entre espiras de la misma bobina, entre bobinas de la misma fase o entre conductores y carcasa, las fallas eléctricas en el rotor son poco frecuentes, normalmente se relacionan con roturas o fisuras en las barras o anillos rozantes. Análisis de datos históricos sobre el mantenimiento de gran variedad de máquinas eléctricas han reportado que un 40% de las fallas mecánicas se relacionan con defectos en los rodamientos, entre un 30% y 40% con fallas de origen eléctrico en el estator, un 10% a fallos en el rotor, un 10% corresponden a diversas fallas [6], estos mismos estudios muestran que a medida que aumenta la potencia del motor, las fallas en el rotor se hacen más significativas.

La confiabilidad de las cadenas productivas y por ende de las máquinas eléctricas que hacen parte de ella, normalmente se han basado en estrategias del mantenimiento preventivo, que consiste en la revisión periódica y sistemática de los equipos en busca de fallas (existan o no) antes de que causen daños de mayor magnitud, sin embargo las tendencias actuales de producción tienden a incrementar su confiabilidad centrándose en el mantenimiento predictivo, el cual orienta sus esfuerzos a detectar fallas en estados tempranos de desarrollo mediante la monitorización continua de los equipos. Es en este punto es donde las novedosas técnicas de tratamiento digital de señales desempeñan un papel importante para desarrollar estos planes de mantenimiento predictivo. En general se puede afirmar que conocer los parámetros de funcionamiento del motor en operación, establecer planes de mantenimiento preventivo y predictivo que permitan diagnosticar fallas en estados tempranos de

desarrollo, es relevante en la industria moderna, para así evitar interrupciones en los procesos productivos que pueden acarrear graves consecuencias [3].

Las avanzadas técnicas de tratamiento digital de señales, que proporcionan alta resolución espectral, unidas a equipos y software de bajo costo están ofreciendo la posibilidad de realizar diagnóstico en línea, es decir mientras la máquina se encuentra en servicio, a diferencia de sistemas tradicionales que para su aplicación requieren que las máquinas fuera de operación. La ventaja de estas novedosas técnicas de mantenimiento predictivo radica en la monitorización continua, lo que aumenta la posibilidad de detectar fallas en estados incipientes de desarrollo.

Diversas investigaciones realizadas en los últimos años en torno a la aplicación del tratamiento digital de señales, para evaluar el contenido espectral de las variables eléctricas y mecánicas que permitan identificar de manera anticipada condiciones anormales o fallas incipientes presentes en el funcionamiento de las máquinas [5] y [7]. La detección de fallas se centra en los cambios en magnitud y frecuencia que se ven reflejados en el contenido espectral de la variable estudiada y que están relacionados con partes específicas del motor.

1. REFERENTE TEÓRICO

1.1 FLUJO DE DISPERSIÓN

El principio de funcionamiento de los motores de inducción trifásico está centrado en el campo magnético giratorio creado en el núcleo del estator, cuando por sus devanados circula un sistema trifásico de corrientes sinusoidales, así mismo este campo magnético giratorio presente en el estator, induce un campo magnético en el rotor, que interactúa con el campo magnético del estator, generando el movimiento de rotación.

Tanto el campo magnético del estator como el del rotor, no se confinan totalmente en sus respectivos circuitos magnéticos, sino que parte de ellos circulan por el sector externo de sus respectivos circuitos, modificándose entre sí, estos flujos externos se manifiestan esencialmente en la parte externa de la carcasa del estator (flujo de dispersión estatorico) y el eje del motor (flujo de dispersión axial), el flujo de dispersión es esencialmente producido por el sistema trifásico de corrientes del estator, mientras que el flujo de dispersión axial en una combinación de los dos campos magnéticos presentes en el motor. En general la presencia del flujo de dispersión está relacionado con diversas causas, entre las que se pueden mencionar: la imposibilidad de construir máquinas perfectamente

simétricas, asimetrías en los circuitos eléctricos y magnéticos del motor (asimetrías en la disposición de las bobinas y de las ranuras), y anisotropías propias de los materiales con los cuales fue construida la máquina.

La monitorización continua de las variables de corriente en el devanado de campo y el flujo de dispersión, y su posterior análisis a través del contenido espectral, permiten predecir anomalías en los circuitos eléctricos o magnéticos, dichas anomalías se relacionan con los cambios en amplitud o frecuencia que aparezcan al evaluar el contenido espectral.

1.2 ANÁLISIS ESPECTRAL

El tratamiento digital de señales en tiempo discreto, tiene como herramienta fundamental la Transformada Discreta de Fourier DTF, la cual nos permite obtener información sobre el contenido espectral de las variables involucradas que previamente han sido discretizadas, implementar la DFT ha sido posible gracias a los algoritmos conocidos con el nombre de Transformada Rápida de Fourier (FFT).

El análisis espectral (en el dominio de la frecuencia), proporciona información sobre la componente fundamental y sobre los armónicos presentes en la variable, cada máquina tendrá un contenido espectral específico, cambios en este contenido espectral será el indicador que revelará fallas en el funcionamiento del motor. Diferentes técnicas para la monitorización de las corrientes y del flujo de dispersión [4], [6], han sido propuestas para evaluar la presencia de averías en estados incipientes de desarrollo.

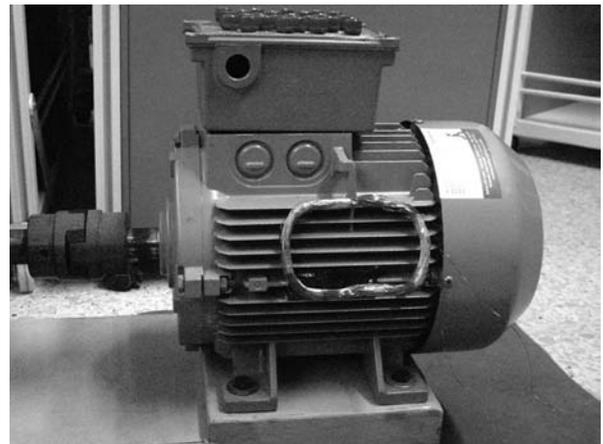
2. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas, en las cuales se tomaron medidas del flujo de dispersión y lecturas en la corriente en la red de alimentación del motor en cada una de sus fases. Estas mediciones fueron realizadas bajo comportamiento normal del motor y luego bajo un desbalance controlado producido en una de las fases de la fuente trifásica de alimentación de la máquina. Las corrientes de la red se midieron a través de un transformador de corriente, con su secundario puesto en cortocircuito mediante una resistencia de muy bajo valor. Se tomaron señales muestreadas a 5000 Hz, frecuencia seleccionada de acuerdo a los criterios del tratamiento digital de señales para no perder información o anexar datos irrelevantes.

El sensor de flujo de dispersión arroja directamente una señal de voltaje en los terminales de una bobina en función del flujo y se ha ubicado en la parte radial de la

carcasa del motor de inducción jaula de ardilla, tal como lo muestra la Figura 1.

Figura 1. Sensor de flujo de dispersión



Tomado de: Autor

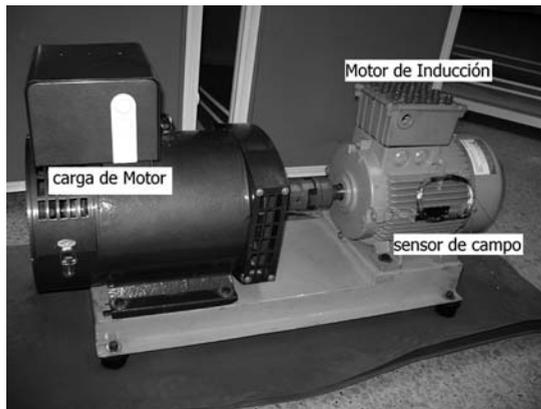
El sensor de campo es una bobina construida con 150 espiras en alambre de cobre AWG 28, y cuyas características en forma, tamaño y número de espiras dependen de cada motor en particular. La bobina debe cubrir un área que involucre varias ranuras del estator para que la señal de flujo sea un reflejo exacto del campo magnético giratorio creado por el sistema trifásico de alimentación del motor. La tensión inducida en la bobina está directamente relacionada con el flujo a través de la inducción magnética.

La señal del sensor de flujo se acopla directamente a una tarjeta de adquisición de datos, cuyas especificaciones son: datos de 16 bits, frecuencia de muestreo 200ks/s; 8 entradas diferenciales, y rangos seleccionables hasta $\pm 10V$.

La máquina de inducción utilizada es un motor de asincrono jaula de ardilla de 1.1 kW, 220/380 V, 3350 rpm, 60 Hz, y un factor de potencia de 0.85 en atraso.

La señal de flujo de dispersión ha sido tomada para diferentes condiciones de carga, la cual ha sido asumida por un generador monofásico acoplado al eje del motor. Los diferentes niveles de carga del motor se han evaluado desde la condición de vacío hasta plena carga, con incrementos del 20%, esta variación en la carga permite encontrar características espectrales del flujo de dispersión, siendo ellas el punto de referencia para el análisis de fallas en el motor. La Figura 2, muestra una vista general del esquema motor, sensor de campo y carga.

Figura 2. Vista general motor, sensor y carga



Tomado de: Autor

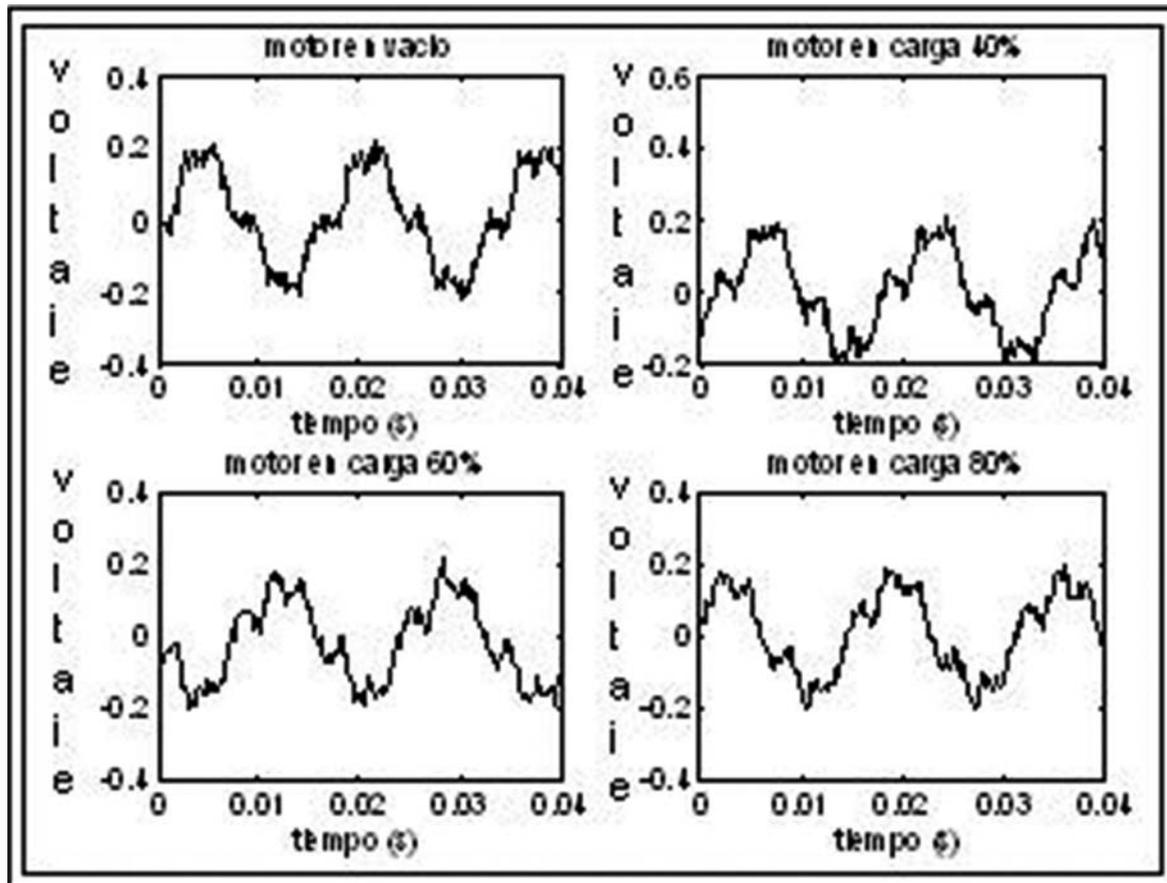
Para efectuar el desbalance controlado antes mencionado, el motor de inducción se conectó en delta a tensión de 220 V, y se efectuó un desbalance del 10%

de la tensión de alimentación en una de sus fases. Este porcentaje de desbalance permite tomar datos de las señales (corriente de alimentación y campo magnético), sin afectar la seguridad del motor.

2.1 ENSAYOS EN EL MOTOR CON CARGA BALANCEADA

Esta prueba inicial pretende caracterizar en el tiempo y en la frecuencia la señal del flujo de dispersión para diferentes condiciones de carga. El motor se alimenta a tensión nominal en conexión delta. La señal de campo es muestreada con una frecuencia de 5000 Hz, tomada directamente de los terminales del sensor de campo (bobina). La señal muestreada para algunas de las diferentes condiciones de carga estudiadas (condición de vacío, 40, 60 y 80%), se detallan en la Figura 3. Su representación es mostrada inicialmente en el dominio del tiempo.

Figura 3. Señal muestreada para diferentes condiciones de carga

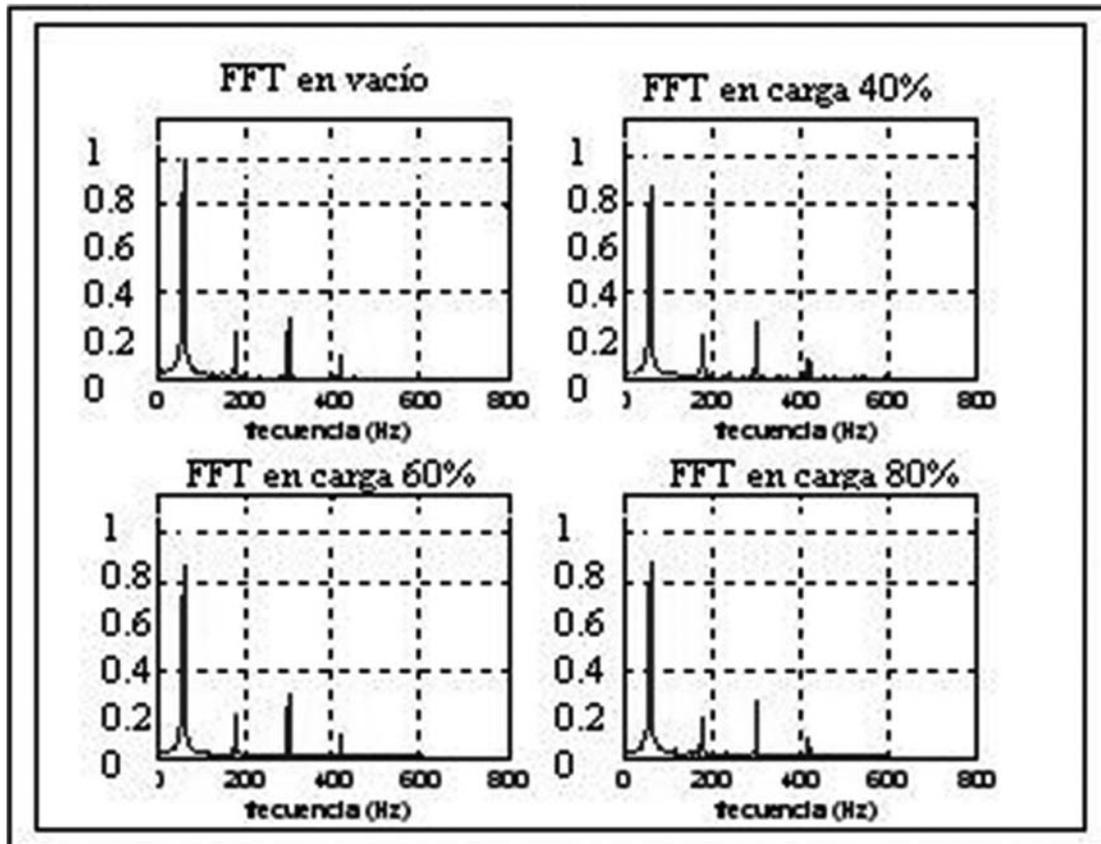


Tomado de: Autor

La evaluación del contenido espectral de la señal de flujo de dispersión se muestra en la Figura 4, en ella se observan las componentes armónicas del campo magnético, su amplitud normalizada y su frecuencia.

La componente fundamental se ubica en 60 Hz, los armónicos aparecen en 180, 300 y 420 Hz, relacionados con el tercero, quinto y séptimo armónico.

Figura 4. Contenido espectral del flujo de dispersión bajo diferentes condiciones de carga



Tomado de: Autor

2.2 ENSAYO CON MOTOR CON CARGA DESBALANCEADO.

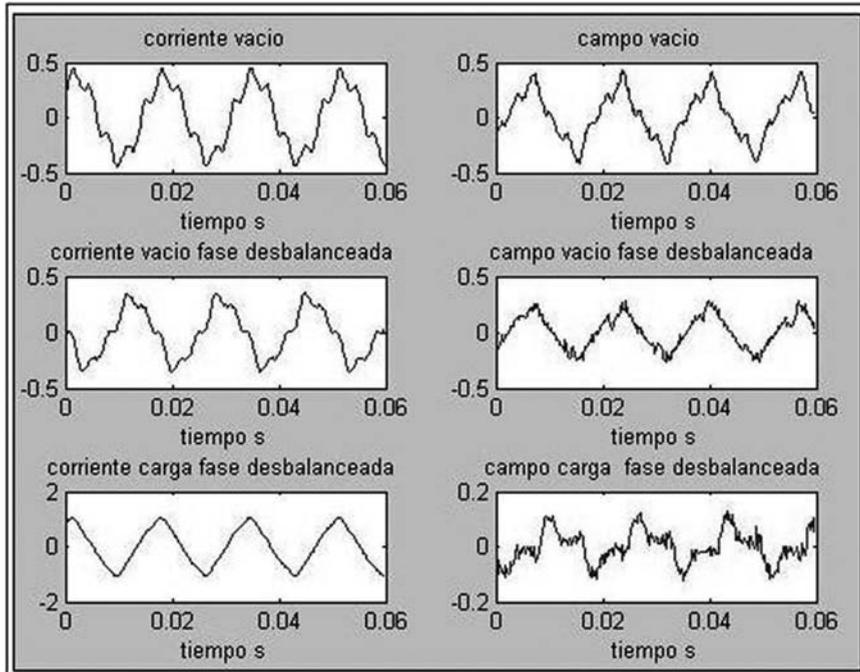
En esta parte se aplica un desbalance controlado del 10%, en una de las del sistema de alimentación, este desbalance controlado permite garantizar la seguridad del motor, sin llegar a producirle daños.

La figura 5 muestra los datos obtenidos para diferentes condiciones. Se han tomado lecturas de la corriente y flujo de dispersión condición de vacío con fuente balanceada, datos de corriente y flujo de dispersión en condición desbalanceada en vacío y carga nominal.

El análisis del contenido espectral se muestra en la figura 6; en la columna de la izquierda se muestran los datos obtenidos para la corriente en la fase desbalanceada para diferentes condiciones de operación, mientras que en la columna de la derecha se muestra el contenido espectral de la señal del flujo de dispersión normalizado.

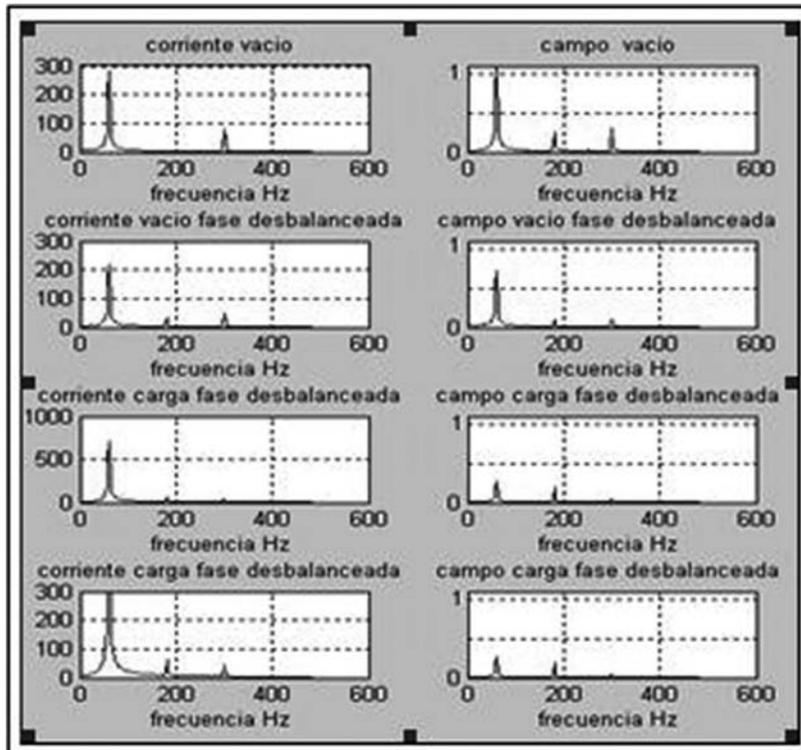
La última fila de la Figura 6, se ha ampliado para visualizar de una manera más clara los armónicos presentes (Figura 7), donde se detalla el análisis espectral de la corriente en la fase desbalanceada y se ha tomado una representación semi-logarítmica para apreciar con mayor detalle la presencia de armónicos.

Figura 5. Señales de corriente (A), y de campo (Voltios), para diferentes condiciones de operación.



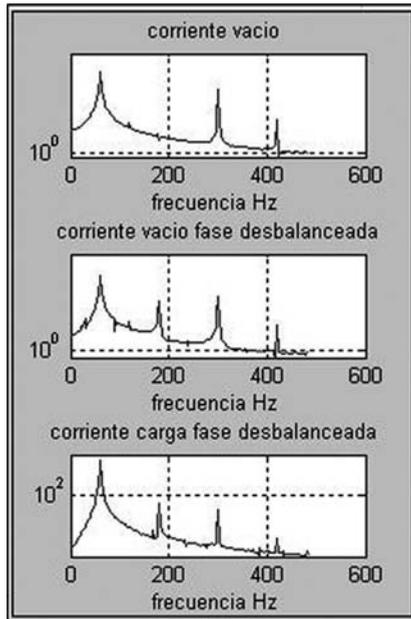
Tomado de: Autor

Figura 6. Contenido espectral de corriente y campo en condición de fallo controlado.



Tomado de: Autor

Figura 7. Análisis espectral de corriente en la fase desbalanceada.



Tomado de: Autor

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

3.1 EN CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN.

La tabla 1 muestra la distribución de magnitudes normalizadas de armónicos en el flujo de dispersión, bajo condiciones normales de operación.

Tabla 1. Distribución de magnitudes normalizadas de armónicos en el flujo de dispersión

Condición de carga	Amplitud de frecuencia fundamental al 60 Hz	Amplitud tercer armónico	Amplitud quinto armónico	Amplitud séptimo armónico
Condición de vacío	1,00	0.23	0.31	0.12
Carga 40%	0.98	0.22	0.3	0.11
Carga 60%	0.97	0.22	0.32	0.12
Carga 80%	0.99	0.21	0.29	0.11

A partir de la tabla 1, respecto al comportamiento del espectro de frecuencias del flujo de dispersión se puede inferir:

- La caracterización espectral del flujo de dispersión ha permitido identificar la presencia de la componente

fundamental y de los armónicos de tercer, quinto y séptimo orden.

- La magnitud de la componente fundamental del flujo de dispersión en condición de carga disminuye aproximadamente un 10% con respecto a su valor en condición de vacío
- La magnitud de cada armónico permanece aproximadamente constante para las diferentes condiciones de carga.
- La amplitud del quinto armónico es mayor en todas condiciones de carga, y el séptimo armónico es siempre la menor.

3.2 EN CONDICIONES DE FALLO CONTROLADO.

La tabla 2 muestra la distribución de magnitudes de espectro de frecuencias para la corriente en la fase desbalanceada.

De la tabla 2 se puede inferir:

- En condición balanceada no existe componente de tercer armónico en la corriente de la fase desbalanceada, lo que es normal para un motor conectado en delta, sin embargo frente a cualquier desbalance de tensión en alguna fases sin importar la condición de carga, la presencia del tercer armónico es evidente.
- La amplitud de las componentes armónicas de tercer, quinto y séptimo orden se ven afectadas de manera significativa al producir desbalances de tensión en una fase.
- Resulta interesante que mientras el tercer y séptimo armónico aumentan su amplitud el quinto armónico la disminuye a medida que se aumenta la carga.

Tabla 2. Distribución de magnitudes de espectro de frecuencias para la corriente en la fase desbalanceada

Condición de operación	Amplitud de frecuencia fundamental 60 Hz	Amplitud tercer armónico 180 Hz	Amplitud quinto armónico 300Hz	Amplitud séptimo armónico 420Hz
Corriente en vacío condición balanceada	1,00	0,00	0.28	0.035
Corriente en vacío condición desbalanceada	0.76	0.11	0.18	0.021
Corriente en carga condición desbalanceada	2.52	0.21	0.15	0.03

En la tabla 2 los datos de corriente en la fase desbalanceada han sido normalizados tomando como referencia la amplitud de la frecuencia fundamental de la corriente en vacío.

La tabla 3, muestra los resultados obtenidos para el flujo de dispersión en las diferentes condiciones evaluadas; allí los valores se han normalizado con respecto a la amplitud de la componente fundamental en condición de vacío. A partir de esta tabla podemos inferir:

Tabla 3. Distribución de magnitudes de espectro de frecuencias para el flujo de dispersión

Condición de operación	Amplitud de frecuencia fundamental I 60 Hz	Amplitud tercer armónico o 180	Amplitud quinto armónico o	Amplitud séptimo armónico o
Campo en vacío condición balanceada	1,00	0.23	0.29	0.012
Campo en vacío condición desbalanceada	0.68	0.1	0.09	0.016
Campo en carga condición desbalanceada	0.27	0.17	0-04	0.024

•Para la misma condición de falla controlada, la amplitud de la componente fundamental y del quinto armónico disminuyen a medida que la carga aumenta.

•La amplitud del tercer y séptimo armónico aumentan a medida que la carga aumenta, para la misma condición de falla.

4. CONCLUSIONES

Se evidencia que existe una relación estrecha entre las fallas eléctricas y el comportamiento de flujo de dispersión.

Se encontró que para el motor jaula de ardilla en las condiciones mencionadas, el espectro de frecuencia de la corriente en la fase desbalanceada muestra aumento en la amplitud de la componente fundamental, el tercer y el séptimo armónico, mientras que en el quinto armónico aumenta; con respecto a la corriente medida con fase balanceada. Este comportamiento es similar en la medición del flujo de dispersión.

El análisis espectral del flujo de dispersión se puede convertir en una herramienta de diagnóstico válida para predecir condiciones de falla en los motores de inducción, dado que la amplitud y la frecuencia de los armónicos se ven modificadas al variar los parámetros eléctricos que

definen el comportamiento (desbalances en la fuente de alimentación, corto circuitos entre espiras de una bobina, corto circuitos entre bobinas o cortocircuitos entre bobinas y carcasa) del motor de inducción.

5 REFERENCIAS

- [1] BENBOUZID. M.E.H, Viera. M- Theys. Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques. Power Electronics. IEEE Transactions on Volume). P 14-22.1999
- [2] Bonnett. A. H, Soukup, G.C. Analysis of rotor failures in squirrel cage induction motors. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 24-6. P1124-1130. Nov-Dic 1988
- [3] Gleichman, R. C. Failure Modes and Field Testing of Medium-Voltage Motor Windings, IEEE. Transactions on Industry Applications, 38(5), 1473-1476
- [4] Hachemi B. M, A review of Induction Motor Signature Analysis as a Medium for Faults Detection. IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol 47-5 p 984-993. Oct 2000
- [5] Jarzyna, W. "Diagnostic characteristics of axial flux in an induction machine. Electrical Machines and Drive. 1995. Seventh International Conference on p 141-148. 1995
- [6] Motor Reliability Working Group, "Report of large motor reliability. survey of industrial and commercial installations Part I, and II," *IEEE. Trans. Ind. Appl.*, vol. 21-4, pp. 853-872, July-Aug. 1985
- [7] Penman. J, H. G. Sedding, B. A. Lloyd, and W. T. Fink, "Detection and location of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 9, pp. 652-658, Dec.1994
- [8] Veruchhi. C. J, Acosta. G.G, "Técnicas de detección y diagnóstico de fallos en Máquinas eléctricas de inducción". IEEE latin America Transaction Volumen 5 No 1. 2007. p 41-49.