

## **Análisis del cortocircuito entre espiras de un motor de inducción tipo jaula de ardilla mediante la aplicación del método de elementos finitos (mef)**

### **Inter-turn shortcircuit analysis in an induction machine by finit elements method**

*Darío Díaz\*, Rodrigo Díaz, Martha Cecilia Amaya, Jairo Palacios*

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica - Universidad del Valle, Calle 13 N.º 100-00. Cali, Colombia

(Recibido el 20 de febrero de 2009. Aceptado el 21 de agosto de 2009)

#### **Resumen**

En este artículo se realiza el análisis del par y la impedancia de secuencia inversa con la evolución de una falla de cortocircuito entre espiras de un devanado estático de un motor de inducción tipo jaula de ardilla de 3HP, 220V.

---- *Palabras clave:* Impedancia de secuencia inversa, par electromagnético, cortocircuito entre espiras, método de elementos finitos, motor de inducción

#### **Abstract**

The torque and sequence negative impedance analysis with the evolution of short-circuit turns of the stator phase winding in a 3HP induction machine is performed in the present paper.

----- *Keywords:* Impedance of inverse sequence, electromagnetic torque, inter-turn short-circuit, finite element method, induction machine

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 +2 + 321 21 00, fax: +57 + 2 + 339 23 61, correo electrónico: dariodiazs@gmail.com (D. Sánchez).

## Introducción

Los motores eléctricos de inducción se usan en más del 90% de aplicaciones en la industria, y en algunas de ellas es vital garantizar su correcto funcionamiento. Esto hace necesario una herramienta que permita conocer la condición del motor sin intervenir en la operación del equipo.

La mayoría de procesos industriales requieren confiabilidad y operación segura y continua de los motores eléctricos. Sin embargo, fallas inesperadas se traducen en pérdidas de producción, costos altos de mantenimiento de emergencia, daños a otras máquinas relacionadas y paradas prolongadas. Por lo tanto, el mantenimiento se programa con el fin de detectar problemas antes de que pueda resultar en un fallo catastrófico. Debido a esto, surge una demanda considerable por reducir los costos de mantenimiento y evitar tiempos de parada no programada para sistemas de accionamiento eléctrico. Las principales fallas de las máquinas eléctricas en general, pueden clasificarse de la siguiente manera [1]:

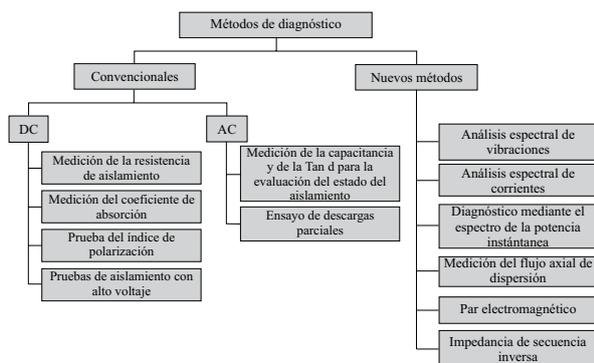
- Fallas resultantes de la apertura o el cortocircuito de uno o más de los devanados estatóricos.
- Conexión errónea del devanado estatórico
- Rotura de barras o de anillos de cortocircuito
- Excentricidades dinámicas y/o estáticas
- Campo de rotor bobinado en corto
- Fallas en los cojinetes y rodamientos

Una falla en un componente se define usualmente como una condición de reducción de la capacidad relacionada a requisitos mínimos de especificación y es el resultado del desgaste normal, un mal diseño o especificación pobre, montaje incorrecto, uso equivocado, o una combinación de éstas. Si una falla no se detecta a tiempo o si se le permite desarrollarse más allá puede conducir a un colapso de la máquina. Hoy en día es importante considerar la implementación de una estrategia de

diagnóstico de fallas para aumentar la vida útil de componentes de las máquinas, incrementando así su disponibilidad y la productividad de la planta. La determinación de problemas en motores debe ser confiable y segura, por esto un análisis de motores eléctricos debe contener resultados en las siguientes zonas de falla: circuito de potencia, aislamiento, estator, rotor, entrehierro y calidad de energía.

Las fallas estatóricas constituyen el 37% de las fallas en motores eléctricos, siendo la más común el cortocircuito entre espiras, la cual reduce la habilidad de producir un campo magnético balanceado, lo que a su vez trae otras consecuencias como un aumento en la vibración de la máquina, y por ende degradación del aislamiento y daños a los rodamientos del motor. En la mayoría de los casos, el cortocircuito entre espiras abarca las siguientes posibilidades: “espira a espira”, “fase a fase” ó “fase a tierra”, causando el colapso del motor. El tiempo que transcurre entre la aparición de una falla (cortocircuito entre espiras) y el colapso total del motor es variable. Estudios previos demostraron que un motor bajo falla es capaz de tolerar arranques severos y ciclos de parada. Sin embargo, existen casos en los cuales el colapso del motor ocurre inmediatamente después se detecta la falla. Este desempeño variable parece estar relacionado con la localización de la falla en el devanado. De hecho, la distancia entre las espiras bajo falla y el núcleo magnético de la máquina parece tener una influencia en el tiempo que transcurre hasta el colapso del motor [2].

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, para las cuales se han desarrollado variadas técnicas de diagnóstico [3], entre las que destacan análisis de vibraciones, análisis espectral de corrientes, análisis del flujo axial de dispersión y las más recientes, las cuales combinan modelos de simulación del comportamiento del motor ante fallas [4-5] y aplicación de inteligencia artificial (redes neuronales) [6].



**Figura 1** Métodos de diagnóstico

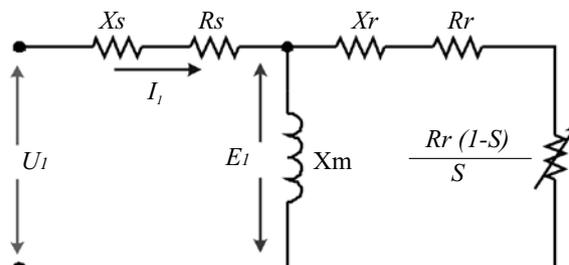
La figura 1 muestra los métodos de diagnóstico de fallas en máquinas rotativas [6-7]. Este trabajo resume la utilización de los métodos no convencionales de análisis de par electromagnético e impedancia de secuencia inversa, ya que los convencionales presentan la desventaja que al aplicarlos pueden deteriorar los aislamientos.

**La impedancia de secuencia inversa [3]**

Se ha demostrado, que es posible diagnosticar la presencia de espiras en corto circuito en el devanado estatórico de un motor de inducción por medio de un parámetro denominado la impedancia (o el inverso, la admitancia) efectiva de secuencia inversa [8]. Este parámetro se apunta de gran utilidad como indicador de fallos en los devanados del estator de motores de inducción en funcionamiento. Con base en la teoría de las componentes simétricas, 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 [6].

En la práctica, el sistema de tensiones que alimenta a un motor nunca es del todo equilibrado, siempre existen ligeras diferencias entre los valores eficaces de la tensión y/o de los ángulos de desfase. El comportamiento de un motor de inducción en buen estado, alimentado por un sistema desequilibrado, puede analizarse estudiando sus circuitos equivalentes de secuencia directa e inversa. La figura 2 muestra el circuito equivalente de secuencia directa, donde  $R_s$  y  $R_r$  representan

las reactancias de estator y rotor respectivamente. Las reactancias de dispersión de estator y rotor y la reactancia de magnetización corresponden a  $X_s$ ,  $X_r$  y  $X_m$  respectivamente.



**Figura 2** Circuito equivalente de secuencia directa

La componente variable de la resistencia del rotor  $R_{L1}$ , es la que permite calcular la potencia mecánica del motor como una función del deslizamiento del rotor ( $S$ ).

$$R_{L1} = R_r \frac{1-S}{S} \tag{1}$$

Este valor es muy sensible a los cambios de deslizamiento, como se puede apreciar en la función derivada.

$$\frac{d(R_{L1})}{dS} = R_r \frac{-1}{S^2} \tag{2}$$

Dado que el campo de secuencia inversa gira en oposición al campo directo, el circuito equivalente para la secuencia inversa puede obtenerse sustituyendo el deslizamiento,  $S$ , en el circuito de de secuencia directa por la cantidad  $(2-S)$ .

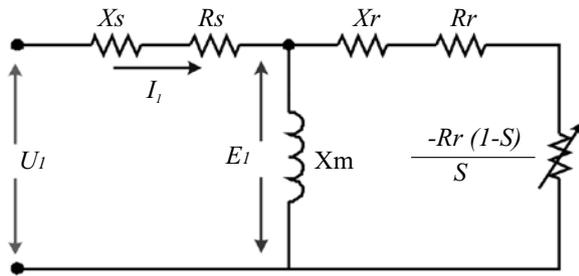
En la figura 3 se observa el circuito resultante.

Ahora, la componente variable de la impedancia se expresa como:

$$R_{L2} = -R_r \frac{1-S}{2-S} \tag{3}$$

Esta expresión ya no es tan sensible a los cambios del deslizamiento como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$\frac{d(R_{L2})}{dS} = R_r \frac{-1}{(2-S)^2} \tag{4}$$



**Figura 3** Circuito equivalente de secuencia inversa

Teniendo en cuenta que la mayoría de los motores de inducción funcionan con deslizamientos muy bajos, del orden del 3%, se pueden hacer dos observaciones interesantes:

La primera es que la impedancia de secuencia inversa es mucho menor que la impedancia de secuencia directa en un motor; por lo tanto, para niveles bajos de tensión de secuencia inversa, circulan niveles relativamente altos de corriente de secuencia inversa. Esto es un problema a la hora de monitorear la corriente de línea, ya que ésta se ve afectada por pequeños desequilibrios de tensión y por lo tanto se oculta cualquier síntoma de fallo incipiente.

Otra observación interesante es que, a diferencia de la impedancia de secuencia directa, la impedancia de secuencia inversa de un motor de inducción es poco sensible a los cambios de deslizamiento en consecuencia la impedancia de secuencia inversa es prácticamente constante frente a las variaciones de carga y al flujo de corriente de secuencia inversa.

Este valor de impedancia puede calcularse como el cociente entre la componente de secuencia inversa de voltajes y la componente de secuencia inversa de corrientes, como se ve en la ecuación 5.

$$Z_{2ef} = V_{r2} / I_{r2} \quad (5)$$

Donde:

$V_{r2}$  e  $I_{r2}$  son las componentes de secuencia inversa de voltajes y las corrientes respectivamente, calculados con la teoría de componentes simétricas como se ve en las ecuaciones 6 y 7.

$$V_{r2} = \frac{1}{3}(V_r + a^2 \cdot V_s + a \cdot V_t) \quad (6)$$

$$I_{r2} = \frac{1}{3}(I_r + a^2 \cdot I_s + a \cdot I_t) \quad (7)$$

Donde:

$V_r, V_s, V_t$  son las tensiones de las fases r, s y t respectivamente.

$I_r, I_s, I_t$  son las corrientes de las fases r, s y t respectivamente.

$a$ , el vector unitario  $e^{+j120}$ .

Cuando se empieza a poner de manifiesto alguna deficiencia en el estado del aislamiento del estator, la simetría se pierde y el motor deja de presentar un valor constante de la impedancia a la corriente de secuencia inversa. En este caso, las componentes de distinta secuencia influyen entre sí, ocurriendo que las caídas de tensión pueden deberse a la circulación de componentes de corriente de cualquier secuencia. Debido a estos efectos,  $Z_{2ef}$  se altera durante una falla incipiente y puede utilizarse para propósitos de monitoreo de las fallas.

Experimentos llevados a cabo con éste método concluyen que la impedancia de secuencia negativa presenta una tendencia de evolución determinada por la presencia de fallos en el aislamiento estático; es decir, su módulo cambia considerablemente de valor, incluso cuando aparece un cortocircuito que afecta tan sólo a un par de espiras.

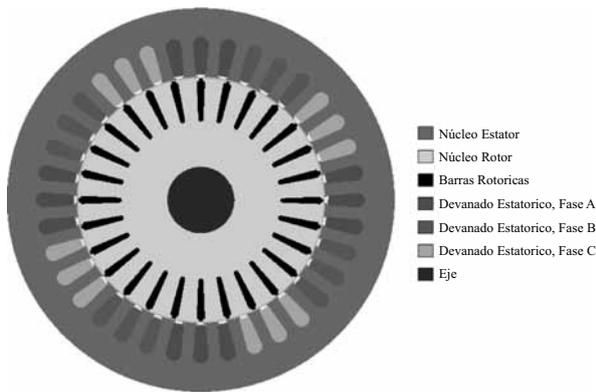
El método aún no se ha implementado a nivel industrial, ya que se encuentran apenas en fase de desarrollo equipos basados en microcontroladores que permitan realizar el cálculo de la impedancia de secuencia inversa en motores de plantas industriales.

### Simulaciones con el método de los elementos finitos

Para realizar el estudio se utilizó el software FLUX2D [9]; el cual tiene incorporada una

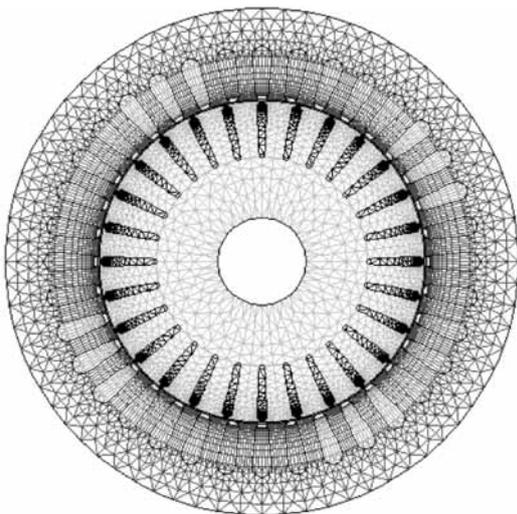
formulación transitoria magnética, que involucra la solución del problema en puntos discretos de tiempo.

La geometría, los materiales, el desarrollo de devanados, se obtuvieron del despiece de un motor real, al cual se le realizaron ensayos de campo. La figura 4 muestra la totalidad de la geometría de la máquina, en ella se puede detallar las regiones del núcleo del estator, el núcleo del rotor y las diferentes barras de la jaula de ardilla. [4]



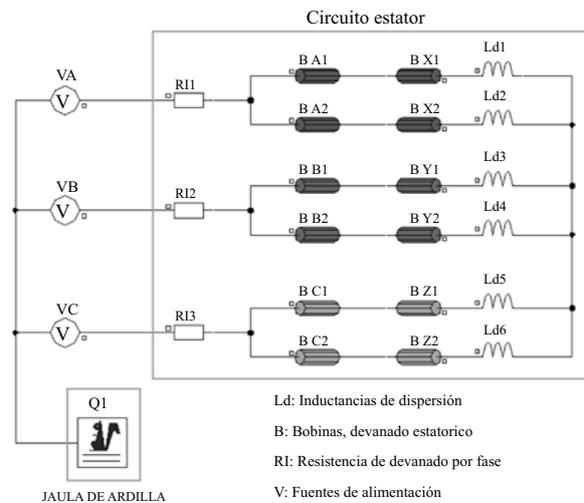
**Figura 4** Geometría del motor NEMA B

En la figura 5 se muestra el mallaje completo de la máquina. Las figuras 6 y 7 corresponden a los detalles del mallaje en las ranuras y el entrehierro respectivamente.

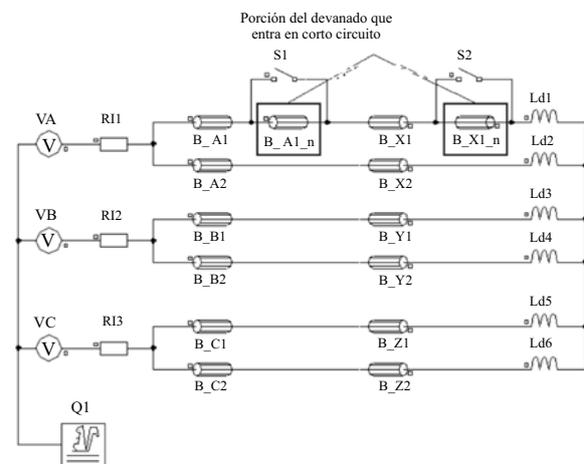


**Figura 5** Mallaje completo del motor NEMA B

En la figura 6 se muestra el circuito eléctrico utilizado en las simulaciones del motor sin fallas. Este circuito está dividido en tres partes: las fuentes externas, el circuito del estator y la jaula de ardilla. Para realizar las diferentes simulaciones del motor con espiras en cortocircuito se dividió el devanado en 2 partes, una que corresponde a las espiras que sufren el corto circuito y otra que corresponde a las demás espiras; agregando un interruptor para ocasionar el corto a las espiras que se requieran. El circuito utilizado para realizar la simulación de dicha falla se muestra en la figura 7 [5].



**Figura 6** Circuito de acoplamiento del motor NEMA B

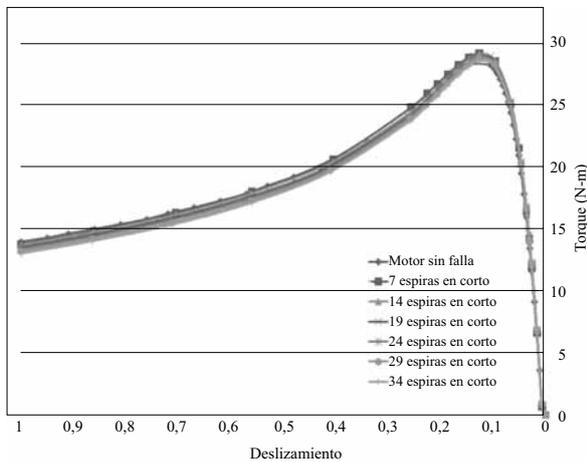


**Figura 7** Circuito de acoplamiento del motor NEMA B con espiras en corto circuito

El modelo de elementos finitos permite al usuario definir las espiras del devanado que van a entrar en cortocircuito, para lo cual, se debe definir la posición geométrica de las espiras dentro del devanado. El circuito externo permite definir el modo de conectar las espiras y así establecer la posición en el devanado (eléctricamente hablando). Esta propiedad es de gran importancia debido a que las espiras geoméricamente adyacentes no necesariamente deben estar eléctricamente contiguas [2].

### Análisis del par electromagnético

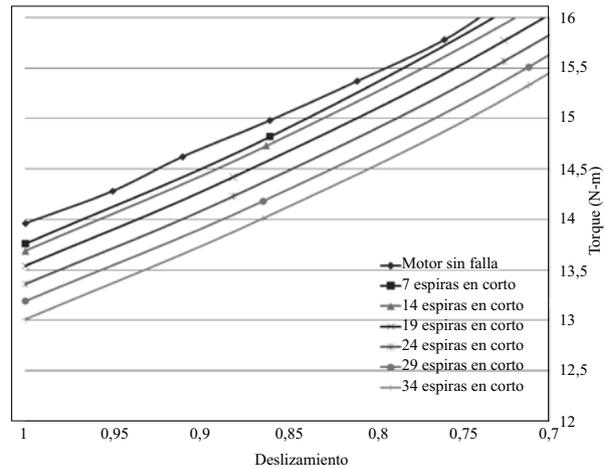
En la figura 8 se muestran las curvas de par obtenidas en las simulaciones MEF con la máquina sin falla y con cortocircuito entre espiras.



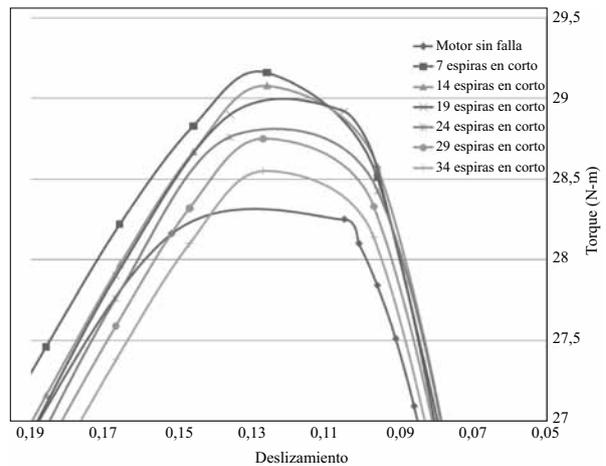
**Figura 8** Curvas de par obtenidas de las simulaciones con el MEF

En las figuras 9A y 9B se muestra un detalle de la figura anterior en la zona de par de arranque y par máximo, ya que como se ve en la figura anterior no es muy considerable el cambio en la curva de par cuando el motor tiene espiras en corto circuito de la fase A.

Al analizar las curvas de par de las figuras 8 y 9, se puede ver que las variaciones alrededor del punto de trabajo de la máquina (1740 rpm) son pequeñas. Las curvas entre los valores de 0,001 y 0,04 para el deslizamiento, se superponen.



**Figura 9a** Curvas de par en la zona de arranque obtenidas de las simulaciones MEF



**Figura 9b** Curvas de par en la zona de par máximo obtenidas de las simulaciones MEF

Donde hay una variación del par para un motor con espiras en corto circuito, según las figuras, es en el inicio de la marcha de la máquina y en la zona de par máximo. En las curvas se puede ver que la diferencia de par de arranque entre el motor sano y con 34 espiras en corto circuito es de 1 N-m (7% del par de arranque normal).

Se puede entonces concluir que el cortocircuito entre espiras causa una disminución en el par de arranque y un aumento en el par máximo ya que  $R_2$  disminuye a medida que aumenta el número de espiras en corto y también es directamente

proporcional al par de arranque, por otro lado, el par máximo es inversamente proporcional a  $X_{cc}$  y por lo tanto esta disminuye lo que se traduce en el aumento del par máximo [5].

### Análisis de impedancia de secuencia inversa

Con base en la teoría expuesta previamente, se procede ahora a mostrar los resultados obtenidos a través de la impedancia de secuencia inversa calculada por medio de las simulaciones MEF del motor.

A partir de los datos que entregan las simulaciones transitorias, es posible hallar la magnitud y ángulo de fase de las tres señales tanto de voltajes como de corrientes y calcular la respectiva impedancia de secuencia inversa para el motor con varias espiras de cortocircuito.

En la figura 10 se muestra la evolución de la impedancia de secuencia inversa del motor a velocidad nominal (1740 rpm) en función del número de espiras en cortocircuito.

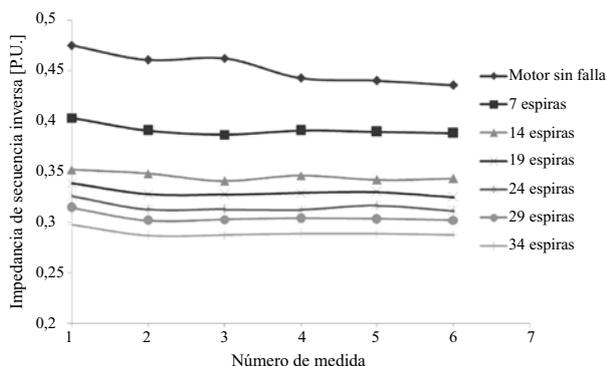


Figura 10 Impedancia de Secuencia Inversa del motor

La figura 11 muestra la variación de la impedancia de secuencia inversa a medida que se incrementa el grado de avería del motor a 1740 rpm con 7, 14, 19, 24, 29 y 34 espiras de la fase A en corto circuito.

En la figura 11 se puede observar la disminución que presenta la impedancia de secuencia inversa,

debido a que cuando crece el número de espiras en corto circuito, aumenta la corriente de secuencia inversa en una de las fases. De este modo al ser la impedancia de secuencia inversa, inversamente proporcional a la corriente de secuencia, ésta disminuye ( $Z= V/I$ ).

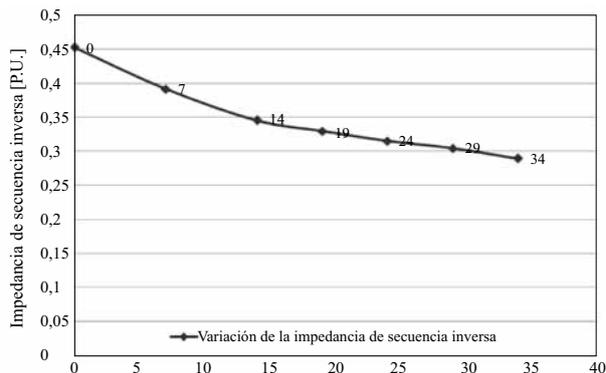


Figura 11 Impedancia de Secuencia Inversa para el motor con varias espiras en corto circuito (1740 rpm)

### Conclusiones

- Es importante considerar que la productividad de una industria aumentará en la medida que las fallas en las máquinas disminuyan en el tiempo. Para lograr lo anterior, resulta indispensable contar con la estrategia de mantenimiento más apropiada y con personal capacitado tanto en el uso de las técnicas de análisis y diagnóstico de fallas implementadas como también con conocimiento suficiente sobre las características de diseño y funcionamiento de las máquinas.
- El MEF permite realizar cualquier tipo de prueba sin exponer a la máquina a ningún tipo de esfuerzo mecánico o electromagnético. Además se puede realizar la prueba repetitivamente cambiando las variables hasta puntos de operación que no se logran realizar en ensayo por considerarse peligrosos para la integridad de la máquina y el personal a cargo.
- La impedancia de secuencia inversa de un motor en buen estado es prácticamente

constante en un amplio rango de funcionamiento, cuando se comienza a poner de manifiesto alguna deficiencia en el estado del aislamiento del estator (como un cortocircuito entre espiras) el motor deja de presentar un valor constante de impedancia de secuencia inversa (disminuye), lo cual permite pensar en su valor como un parámetro válido para la indicación de fallos incipientes en el aislamiento del devanado estático de los motores de inducción.

### Referencias

1. A. Lebaroud, G. Clerc. "Classification of Induction Machine Faults by Optimal Time-Frequency Representations". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 55. 2008. pp. 4290-4298.
2. C. H. Rojas, M.G. Melero. M. F. Cabanas. J. M. Cano. G. A. Orcajo, F. Pedrayes. "Finite Element Model for the Study of Inter-Turn Short Circuits in Induction Motors". *Diagnostics for Electric Machines. Power Electronics and Drives. SDEMPED 2007*. IEEE International Symposium 6-8 Sept. 2007. Cracow (Poland). pp.415-419.
3. M. F. Cabañas, M. García Melero, G. A. Orcajo, J. M. Cano, J. S. Sariago. *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Marcombo editores S.A. Barcelona 1998. pp. 166-344.
4. J. C. Urresty. *Diagnóstico de rotura de barras en un motor de inducción de Jaula de ardilla mediante la aplicación del método de Elementos finitos*. Trabajo de grado. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Cali. 2006. pp. 17-62.
5. D. Díaz, R. Díaz. *Diagnóstico de fallas estáticas en un motor de inducción de Jaula de ardilla mediante la aplicación del método de Elementos finitos*. Trabajo de grado. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Cali. 2007. pp. 64-98.
6. F. Villada, D. Cadavid, N. Muñoz. "Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estáticas". *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. N.º 40. 2007. pp. 76-94.
7. D. F. Percy, J. L. Oslinger. *Pruebas de impulso y de alto voltaje de CD para la evaluación de devanados de máquinas rotativas*. Cátedra de conversión de energía. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. Cali. 1998. pp. 1-58.
8. X. Boqiang, L. Heming, S. Liling. "Negative Sequence Admittance Average Based Detection of Stator Winding Inter-turn Short Circuit Fault in Induction Motors". *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems. ICEMS 2003*. Beijing (China). Vol. 2. 2003. pp.867-870.
9. FLUX2D®. Software de aplicación basado en el método de los elementos finitos. marca registrada del Grupo CEDRAT. <http://www.cedrat.com/en/software-solutions/flux.html>. Consultada el 8 de noviembre de 2008.