

## **Desarrollo de Sensores para Detección de Falla por Medio del Campo Magnético de Dispersión en Máquinas Eléctricas**

Sensors Development for Fault Detection by Means of the Dispersive Magnetic Field in Electrical Machines

### **Salmerón Ochoa Daniel**

DICIS Universidad de Guanajuato  
d.salmeronochoaza@ugto.mx

### **Cruz Torres Roberto**

DICIS Universidad de Guanajuato  
rctorres@ugto.mx

### **González Parada Adrián**

DICIS Universidad de Guanajuato  
gonzaleza@ugto.mx

## **Resumen**

Hoy en día las máquinas eléctricas (motores de inducción) son muy importantes debido que tienen muchas aplicaciones, tanto para la industria, fabricas, centros comerciales y edificios cuya función es mover, elevar o transportar cualquier tipo de material, ya que son fáciles de instalar y buen funcionamiento, por ese motivo es importante anticipar las fallas de manera temprana, para mantener las máquinas en buen estado, siendo las fallas mas comunes: cortocircuito entre espiras, cojinetes dañados, excentricidad del eje y barras rotas del rotor. El proceso de analizar fallas se lleva a cabo de manera periódica ya que permite a cualquier industria, centro comercial, etc. ofrecer una garantía de calidad en el proceso y el aumento o continuidad de la productividad. Para realizar dicho análisis de fallas existen diferentes métodos que ayudan a tener las máquinas en óptimas condiciones y a realizar el mantenimiento cuando lo necesite. En el presente reporte se desarrolla un sensor para la medición del campo magnético que tiene el motor durante su funcionamiento, el cual es generado por el estator y se hace la simulacion en elemento finito de dos tipos de fallas mas comunes en las máquinas electricas. El objetivo es el desarrollo a futuro de un dispositivo que facilite e indique como está operando la máquina a cada instante sin hacer un paro total del equipo y estar checando los diferentes comportamientos.

**Palabras clave:** Sensor de campo magnético, campo magnético de dispersión, motores eléctricos.

## **Antecedentes**

En investigaciones recientes ha incrementado el interés por detectar las fallas en máquina eléctricas de una manera temprana para proteger el equipo y al personal, tanta es la importancia que los fabricantes y los usuarios de dichos equipos necesitan implementar una herramienta que ayuda a detectar las variaciones de voltaje, frecuencia, vibraciones, ausencia de par, etc. Conjuntar todos los métodos posibles en un software que se venda con el equipo y así se garantiza un buena protección además de localizar los armónicos que están involucrados cuando ocurre la falla, emplean técnicas completamente diferentes, como mediciones térmicas, análisis químicos, etcétera, para averiguar la naturaleza y el grado de la falla.

La protección de los equipos sw viene realizando anteriormente, en donde solo se ponían protecciones de sobrecorriente, sobretensión, falla a tierra, etcétera, para garantizar un funcionamiento seguro y confiable de los equipos, pero con la llega de la electrónica de potencia y a medida que las tareas fueron más complejas pues ya no era útil solo con las protecciones que había tuvieron que ir mejorando para mejorar en el campo de detección de fallas.

En la actualidad es de mayor importancia saber detectar una falla ya que todo genera un costo y por consiguiente genera pérdidas tener un equipo eléctrico parado. El porcentaje de fallas de los componentes en los motores de inducción es típicamente:

- Estator 38%.
- Rotor 10%.
- Rodamientos 40%.
- Otros 12 %.

Por mencionar algunas fallas en las máquinas eléctricas (motores)

- Fallas del estator que resultan en la apertura o cortocircuito de uno o más de los devanados de fase del estator.
- conexión anormal de los devanados del estator.
- Barra de rotor rota o anillos de extremo de rotor agrietados.
- Irregularidades estáticas y/o dinámicas del entrehierro.
- eje doblado (similar a la excentricidad dinámica) que puede resultar en un roce entre el rotor y el estator, causando graves daños al núcleo del estator y a los devanados.
- Bobinado de campo de rotor en cortocircuito.
- Fallos de rodamientos y cajas de conexiones.

Los motores eléctricos son los más utilizados en la industria ya a los cuales debemos poner más atención para tenerlos en buen estado y operando.

Para llevar a cabo un análisis de detección de fallas se tienen varios tipos de análisis por mencionar algunos:

- MCSA (Aplicaciones de análisis de formas de corrientes del motor).
- RBM (Mantenimiento Basado en Riesgo)
- CBM (Mantenimiento basado en la condición)

Pero para poder estar monitorizando un motor se tiene que instalar algún tipo de sensor que nos permita estar monitoreando cada instante de tiempo el comportamiento de las máquinas eléctricas y en un momento determinado, hacer la detección anticipada por medio de algún sistema comparativo con un motor en buenas condiciones.[2]

## Marco teórico

El desarrollo de este sensor se basa en la ley de inducción de Faraday, en donde por medio de una bobina de inducción se detectan las líneas de campo magnético generado por el motor durante su funcionamiento, estas líneas tienen un patrón consistente de acuerdo con la operación del motor y este patrón se verá afectado por cualquier condición externa y ajena al funcionamiento normal del motor. La operación del sensor consiste en detectar las líneas de campo magnético de dispersión que atraviesan las espiras del sensor produciendo una FEM y una corriente que es proporcional al campo magnético que le llega al sensor. El flujo magnético que le llega al sensor está dado por:

$$\Phi_B = \int B * dA$$

Donde:

$\Phi_B =$  Flujo magnetico

$B =$  Campo magnetico  
 $dA =$  Diferencial de area

Como el campo magnético es constante y tiene dirección y sentido se llega a la ecuación:

$$\Phi_B = BA \cos(\theta)$$

$\Phi_B =$  Flujo magnetico  
 $B =$  Campo magnetico  
 $A =$  Area  
 $\theta =$  Angulo que se forma con la normal y la superficie

La Ley de Faraday se puede definir como:

El voltaje inducido en la bobina es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético en el tiempo que atraviesa una superficie.

$$V = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$V;$  Voltaje

-: el signo menos es por la Ley de Lenz, que dice la corriente en un circuito inductivo cerrado se opone a la dirección que la produce.

$d\Phi =$  diferencial del campo magnetico  
 $dt;$  diferencial del tiempo

Y como el sensor de búsqueda está formado por varias vueltas, para aumentar la sensibilidad; entonces la ecuación anterior se convierte en :

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$V;$  Voltaje

-: el signo menos es por la Ley de Lenz, que dice la corriente en un circuito inductivo cerrado se opone a la dirección que la produce.

$N =$  Numero de vueltas  
 $d\Phi =$  diferencial del campo magnetico  
 $dt =$  diferencial del tiempo

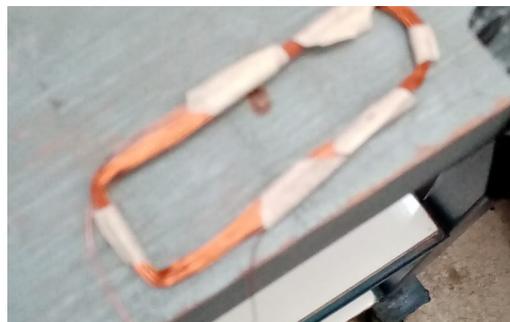


Figura 1. Sensor de búsqueda

## Principio de operación

El campo magnético en una maquina eléctrica es originado por la totalidad de las corrientes que circulan en sus devanados. Aunque este campo magnético es único, para su análisis el campo magnético total de una maquina eléctrica se lo puede descomponer en dos:

El campo magnético común, principal o magnetizaste es aquel que trasmite la energía entre el estator y rotor, luego sus líneas de campo o líneas de inducción concatenan a todos los devanados de la máquina, recorren tanto el estator como el rotor y atraviesan el entrehierro dos veces

Los campos magnéticos de dispersión, también denominados de fuga, no contribuyen a la transmisión de energía a través del entrehierro e incluyen el resto de las líneas de campo. Es decir, las líneas de inducción de estos campos magnéticos no concatenan a todos los devanados de la maquina y gran parte de ellas no cruzan el entrehierro

El campo magnético de dispersión está conformado por dos formas en las que se acomoda el flujo:

- Flujo axial
- Flujo Radial

El flujo axial (figura 2), está contenido en el plano del eje de la maquina y es generado por la corriente que circula por las cabezas de bobina del estator y por el anillo de cierre por ser un motor de jaula de ardilla, esto se da debido a que es imposible, hasta el momento, crear una maquina eléctrica sin imperfección alguna es decir que sean exactamente simétricas ya sea por las tolerancias dadas en su diseño y fabricación o por el material en sí.

Dichas anomalías dan paso a pequeñas variaciones de nivel de corriente que circula por las bobinas de la máquina, esto da como resultado una variación de corriente en una bobina y su compañera diametralmente opuesta dando cabida a un flujo axial neto.

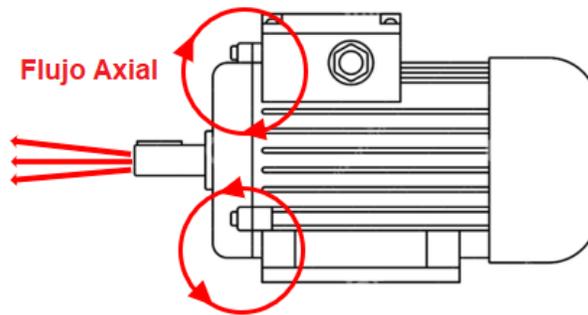


Figura 2. Esquema de dispersión de flujo axial en un motor de inducción.

Por otro lado, el flujo radial (figura 3) se ve atenuado por la carcasa del propio motor y por el propio núcleo del estator, ya que se encuentra por los lados laterales del motor, es algo complejo determinar un modelo matemático para el campo magnético de dispersión ya que depende fuertemente de cada motor,

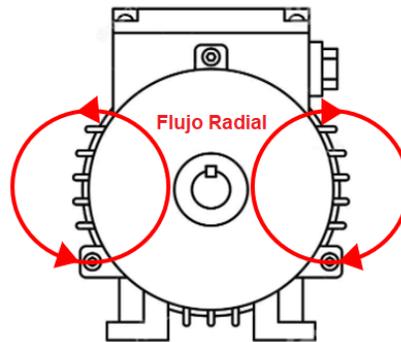


Figura 3. Esquema de dispersión del flujo radial en un motor de inducción.

## Simulación de Falla de un Motor Eléctrico

Con el fin de conocer y visualizar de mejor manera el comportamiento del flujo magnético del motor y como los dos tipos de fallas propuestos en el trabajo, se hizo el modelado del motor con las características de placa presentes en los motores del banco de pruebas del laboratorio (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características generales de los motores.

Descripción	Valor
Potencia	0.75 Hp
Tensión de operación	230/430 V
Corriente	3.2/1.5 A
Velocidad	1725 rpm
Número de polos	4
Frecuencia	60 Hz
Conexión	YY/Y

Para llevar a cabo la simulación se utilizó el programa FEMM, en el cual para la construcción del modelo del motor tomando en cuenta la siguiente lista de materiales que se encuentran dentro de la galería (tabla 2):

**Tabla 2.** Componentes utilizados para la construcción de la simulación.

Material utilizado para la simulación	
Air	aire - utilizado para simular el contorno exterior del modelo del motor y para simular las fallas en las barras metálicas del rotor y cortos circuitos en las bobinas del mismo
M - 22 Steel	Metal - Utilizado para la simulación de la carcasa y eje del motor
22 AWG	cable - Empleado para simular el calibre del conductor en las bobinas del estator
Aluminium 6061 - T6	aluminio - Empleado para la simulación de las barras metálicas del rotor

Modelo realizado de acuerdo con los materiales considerados en la tabla 2, se muestra en la figura 4.

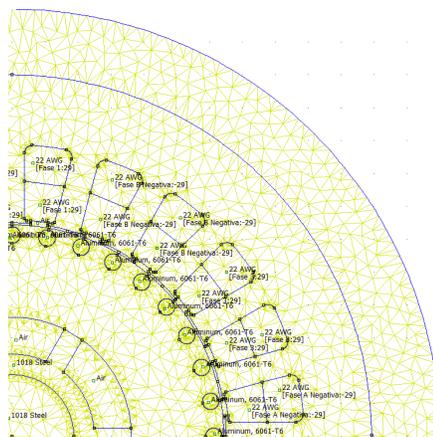


Figura 4 Materiales del modelo y malla realizada para el modelado.

La figura 5, muestra la distribución del campo magnético en el estator de un motor eléctrico sin falla.

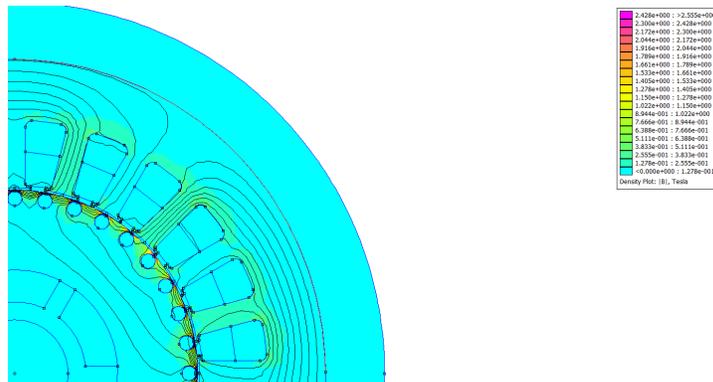


Fig. 5. Distribución del campo magnético en el estator y el rotor, del motor sin falla.

En donde se parecía una distribución uniforme del campo magnético en las ranuras del estator y la inducción magnética en el rotor, esto hace que se presente una distribución del campo magnético, medido en la parte externa del estator, de manera uniforme, concentrándose en una distribución de aproximadamente de  $2.7 \times 10^{-5}$  Teslas, tal y como se observa en la figura 6.

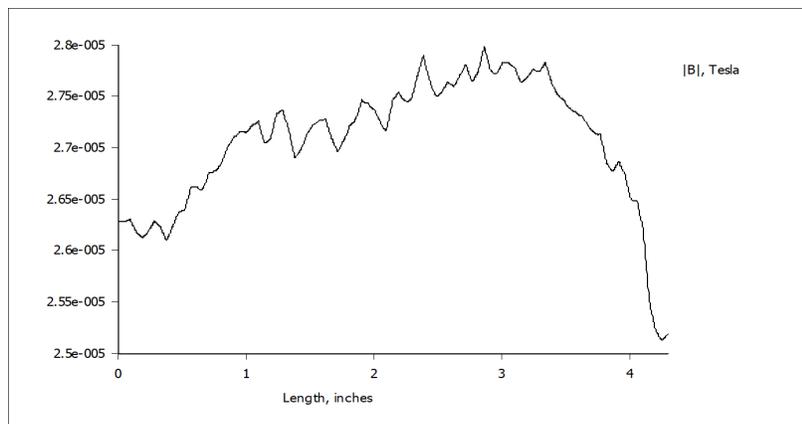


Figura 6. Distribución del campo magnético en la periferia del estator

### Simulación con falla en dos barras Rotas del rotor

Para realizar la simulación del motor con fallas en las barras del rotor, es necesario simular la ausencia de circulación de la corriente inducida en las barras del rotor, por lo que se representa de manera que al no haber barra, el material es sustituido por aire, afectando directamente el campo magnético de dispersión en la periferia del estator, tal y como se observa en la figura 7.

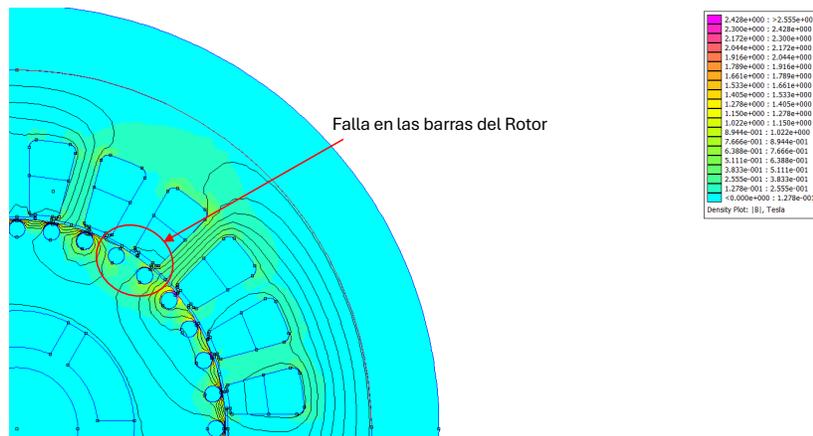


Figura 7. Distorsión del campo magnético en el estator.

Esta distorsión del campo magnético en el estator afectará directamente el campo magnético de dispersión presente en el exterior del estator tal y como se ve en la figura 8, en donde se muestra una variación del campo, aumentando este, ya que el motor trata de compensar la ausencia de una componente del motor.

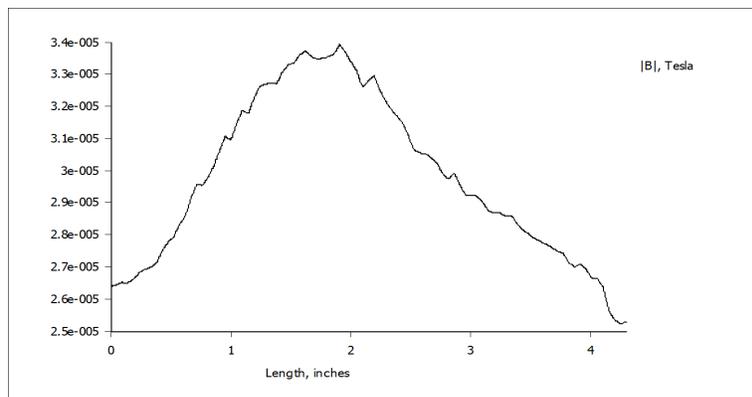


Figura 8 Aumento en la distribución del campo magnético de dispersión en la periferia del estator

### Simulación con falla del 10% en la fase B del motor

Para poder realizar la simulación que ocurre, cuando se presenta una falla incipiente en el devanado, es necesario hacer una reducción del número de vueltas del devanado, en este caso se realizó una reducción del 10% en el número de vueltas de la fase B, encontrándose una distorsión en la distribución de campo magnético del rotor, tal y como se muestra en la figura 9.

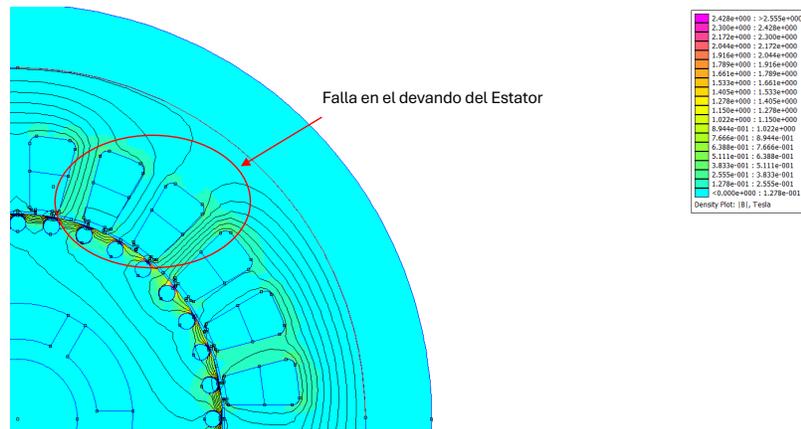


Figura 9. Distribución del campo magnético en el estator con el 10 % de falla en el devanado

Esta distorsión del campo magnético en el estator, al igual que cualquier falla que se presente en el motor, independientemente del origen, se verá reflejado en la distribución del campo en el estator y por consecuencia se verá reflejado en el campo magnético externo o de dispersión del estator, esto se muestra en la figura 10.

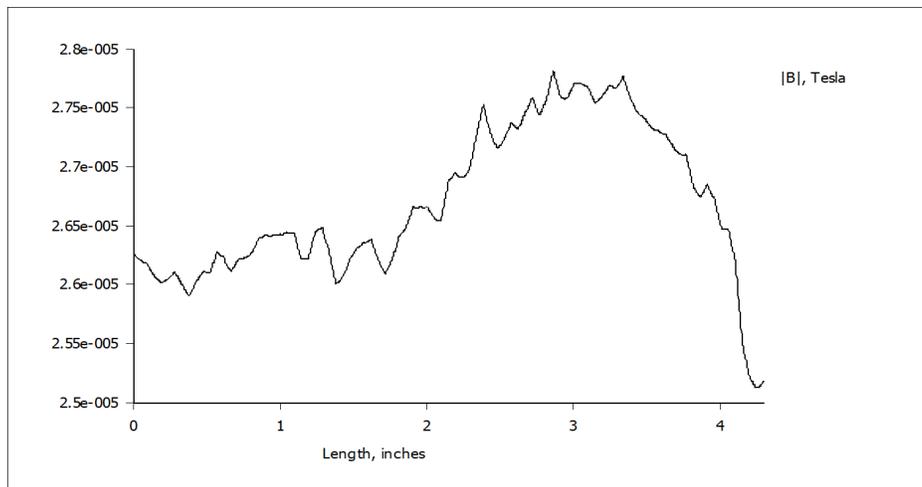


Figura 10. Distribución de la distribución del campo magnético en la periferia del estator

## Construcción del sensor

Tomando como principio lo ya mencionado en la sección anterior, básicamente el campo magnético disperso generado en el motor es captado por esta bobina, este flujo inducirá una fuerza electromagnética (FEM) de acuerdo a la ley de inducción de Faraday [7], esta tensión tendrá la forma de onda de la derivada de la corriente a medir.

Este voltaje será integrado por un amplificador operacional de alto rendimiento, así, al final se tendrá la forma de onda similar a la corriente. El material no ferromagnético permite que ante estímulos de alta frecuencia se obtengan resultados lineales en todo momento.

Para el desarrollo de los sensores de detección de campo se consideró una geometría de forma rectangular de tal manera que pudiera ser colocada de manera horizontal sobre el estator. A continuación, se muestran las características generales de la construcción del sensor sobre una base de fibra de vidrio.

**Tabla 3.** Características generales de los sensores.

<b>Características generales de los sensores</b>	
Conductor	Cobre (Cu)
Calibre del conductor	31 AWG
N° de vueltas	60
Dimensiones	15 x 7 cm
Encapsulado	Resina epoxica

En la figura 11, se muestra el proceso de la construcción del sensor de acuerdo a las características mostradas en la tabla 3.

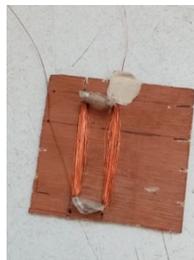


Figura11. Construcción del sensor.

## Pruebas de calibración

Para poder realizar la calibración del sensor se colocó la bobina en el autotransformador de 2 posiciones diferentes horizontal y vertical con un amperímetro de gancho, como se observa en la figura, se comprobaba cuanta corriente estaba pasando por el autotransformador con ayuda del voltímetro se controlaba el voltaje, para observar el comportamiento de la corriente y ver en que valores de corriente se mostraba la señal para proseguir con la obtención de valores, tal y como se ve en la figura 12.



Figura 12. Sistema de calibración empleado.

Se escogió un rango de valores de 5 A hasta 100 A, para tener una gráfica adecuada donde se pudiera observar el comportamiento de la corriente, donde se realizó un promedio para la columna de los milivoltios así poder obtener la gráfica.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas para la calibración del sensor:

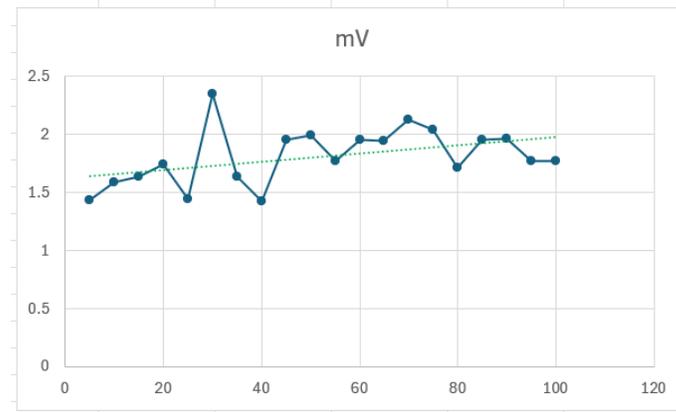


Figura 13. Gráfica de Corriente vs Tension del sensor.

En la figura 13 se muestra la gráfica del comportamiento del sensor cuando existe una variación de la corriente, aumenta la tensión medida.

## Conclusiones

A partir del análisis de los tipos de falla de un motor eléctrico, se han realizado simulaciones necesarias para comprobar que existe el campo magnético de dispersión en una máquina eléctrica y que este puede ser utilizado para monitorear el comportamiento de esta, para en un momento dado realizar un monitoreo que permita conocer el estado en que se encuentra el motor en sí y poder anticipar la falla para evitar paros catastróficos que lleven a costos de producción y mantenimiento. Este trabajo se centra en el diseño y desarrollo de sensores que están monitoreando a cada instante el estado del motor tomando dichas lecturas del campo magnético de dispersión. Para este proceso se necesita un sensor que realice dicha función y en el cual se puede realizar a bajo costo; que no perturbe el motor internamente y ya instalado, se tiene que aplicar alguna técnica de análisis que permita el estudio de las señales. Por lo que las pruebas y caracterización en el motor queda como un trabajo posterior, debido a los tiempos de empleo en el desarrollo del verano.

## Bibliografía

- [1] Willian T. Thomson and Mark Fenger. Current signature analysis to detect induction motor faults, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 20, NO. 4, DECEMBER 2005
- [2] W.T. Thomson "On-Line Current Monitoring to Detect Electrical and Mechanical Faults in Three-Phase Induction IEE Conference Proceeding on Life Management of Power Plants No.401 pp 66-74 Dec. 1994 .
- [3] M El Hachemí Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a médium for faults detection", IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 47, No. 5, pag 984-993, Oct, 2000.
- [4] Ye Zhongming, Wu Bin, "A review on induction motor online fault diagnosis", Proceedings IPEMC 2000. Third Internacional Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435).

- [5] R.M: Tallam, 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", 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003.
- [6] P.J. Tavner, "Review of condition monitoring of rotating electrical machines", IET Electric Power Application, Vol. 2, No. 4, pp 215-247, July 2008.
- [1] Tesla, Nicola (1856 - 1943). Nicola Tesla Serbian American inventor. Britannica, <https://www.britannica.com/biography/Nikola-Tesla>.
- [7] Faraday, Michael (1791 - 1867). Michael Faraday British physicist and chemist. Britannica, <https://www.britannica.com/biography/Michael-Faraday>.
- [2] David A. Fernández, Juan P. Nieto (2014). Detección de barras rotas en motores de inducción utilizando SMCSA (Square Motor Current Signature Analysis). Corporación Mexicana de investigación de materiales, S.A. de C.V, COMIMSA
- [3] C. J. Vericci and G. G. Acosta: Técnicas de detección y diagnósticos de fallos en máquinas eléctricas de inducción. En: IEEE Latin American Transactions (2007).
- [8] Lenz, Heinrich (1804 - 1865). Heinrich Friedrich Emil Lenz Russian physicist. Britannica, <https://www.britannica.com/biography/Heinrich-Friedrich-Emil-Lenz>