

# Medición de Corrientes EDM sobre Rodamientos en el Conjunto Motor de Inducción y Variador de Frecuencia\*

## Methodology to Measure Electric Discharge Machining (EDM) Bearing Currents in Induction Motors with Supply from a Variable Speed Drive (VSD)

Artículo de Investigación científica - Fecha de Recepción: 15 de Marzo de 2013 - Fecha de Aceptación: 15 de Noviembre de 2013

David Raúl Quintero Sarmiento

Ingeniero Electricista. Redes e Ingeniería Eléctrica Ltda. Bogotá D.C. Colombia. drquinterosa@unal.edu.co

Javier Rosero García

Ingeniero Electricista. Doctor en Ingeniería Electrónica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. Colombia. jaroserog@unal.edu.co

William Mejía López

Ingeniero Electricista. Empresa de Energía de Cundinamarca S.A. E.S.P. Bogotá D.C. Colombia. wmejial@unal.edu.co

Para citar este artículo / To reference this article:

D. Quintero, J. Rosero, and W. Mejía, "Medición de corrientes EDM sobre rodamientos en el conjunto motor de inducción y variador de frecuencia," INGE CUC, vol. 9, no. 2, pp. 83–93, 2013.

**Resumen:** En este artículo se establece una metodología para la medición de corrientes de rodamiento del tipo "Electric Discharge Machining (EDM)" en motores de inducción alimentados por variador de velocidad (VSD - Drive). Este artículo hace una introducción a los tipos de corriente de rodamiento causadas por la operación conjunta motor-variador de velocidad, y establece una metodología de medición de corriente EDM que incluye el diseño y construcción de una bobina de Rogowski que permite la detección y medida de corrientes de rodamiento EDM. Finalmente se realizan pruebas de laboratorio para el registro, caracterización y validación de la metodología de medición de corrientes de rodamientos "EDM".

**Palabra clave:** motor de inducción (IM), variador de velocidad (VSD, Drive), corriente de rodamiento, "Electric Discharge Machining (EDM)", bobina de Rogowski.

**Abstract:** This paper establishes a methodology to measure Electric Discharge Machining (EDM) bearing currents in induction motors with supply from a variable speed drive (VSD). This paper is an introduction to the types of bearing currents caused by the joint operation of the motor and the variable speed drive, and establishes a methodology to measure EDM current, which includes the design and construction of a Rogowski coil that allows the detection and measurement of EDM bearing currents. Finally, laboratory tests are made to register, characterize and validate this methodology.

**Keywords:** Induction motor (IM), speed drive (VSD), bearing current, Electric Discharge Machining (EDM), Rogowski coil.

\* Artículo de investigación científica derivado del proyecto de investigación titulado: Medición de corrientes de rodamientos en el conjunto motor de inducción y variador de frecuencia, de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. Fecha de Inicio: Enero de 2012. Fecha de terminación: Diciembre de 2014.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de motores de inducción alimentados por convertidor de frecuencia comenzó a popularizarse en la industria debido al acelerado avance de la electrónica de potencia y requerimientos de sistemas óptimos y eficientes en procesos industriales. A su vez, también se ha encontrado que los inversores de frecuencia modulados por ancho de banda (PWM) son los principales causantes de fallas por corrientes de alta frecuencia, que se inducen en los rodamientos del sistema motor - convertidor [1].

Las corrientes de rodamientos ( $i_b$ ) en un conjunto motor de inducción - variador de velocidad se generan principalmente por efecto de las tensiones de modo común ("Common mode, CM") respecto a tierra. Estas tensiones "CM" son causadas por la frecuencia de conmutación del inversor en los dispositivos de IGBTs que generan altas  $dv/dt$  en las terminales del motor. Este fenómeno se puede ver afectado por el tamaño del motor y el tipo de instalación que se tenga [2-4].

Se han realizado estudios sobre las corrientes de rodamientos en los motores de inducción relacionados con la vida útil, reducción de eficiencia energética y pérdidas económicas [5-8]. Estos estudios muestran que para máquinas de baja potencia (< 20 kW), la corriente de rodamiento que ocurre con más frecuencia es por descarga electrostática (EDM); los valores picos de estas corrientes están alrededor de 0.5 a 3 A. Las corrientes EDM se producen por descargas electrostáticas entre el eje de la máquina, la pista interna y la pista externa del rodamiento.

Las metodologías desarrolladas para detectar y medir corrientes de rodamientos EDM [6-8] contemplan el uso de transductores de corriente de alta frecuencia y antenas de radiofrecuencia. Para la medición y caracterización de las corrientes en rodamientos EDM en este artículo se desarrollaron pruebas por medio de un transformador de corriente (Pearson) y una bobina Rogowski, que fue diseñada para tal fin. Para validar la construcción de la bobina Rogowski se realizaron pruebas de medición de corrientes de modo común en un motor de inducción alimentado por un variador de velocidad.

El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis riguroso del diseño y construcción de una sonda Rogowski, sino mostrar una metodología que permitiría medir las corrientes de rodamientos EDM en el conjunto IM+VSD de una forma barata y flexible, considerando aspectos técnicos, disponibilidad de equipos y materiales, funcionalidad en los montajes y la validación mediante pruebas de laboratorio.

## II. TEORÍA DE CORRIENTES DE RODAMIENTO

En un motor de inducción alimentado por una red trifásica sinusoidal se obtienen tensiones equilibradas y simétricas, por lo tanto, el resultado de la suma fasorial de cada una de sus fases es cero. La tensión en las terminales de entrada de un motor alimentado por un variador de velocidad son PWM (Pulse Width Modulation), y la suma fasorial de cada una de las fases con respecto a tierra es diferente de cero. Esto genera la aparición de tensiones y corrientes de modo común en el conjunto motor de inducción y variador de velocidad.

Las tensiones de "CM" tienen frecuencias proporcionales a la capacidad de conmutación del variador de velocidad, es decir que su frecuencia es del orden de los kHz. Por otro lado, el motor de inducción tiene unas capacitancias parásitas asociadas entre estator, rotor, carcasa y rodamiento; estas capacitancias se pueden observar en la figura 1 y en la tabla I. La interacción entre la tensión de modo común y las capacitancias parásitas de IM dan lugar a las corrientes de rodamientos ( $i_b$ ). Este tipo de corrientes generan problemas para el rodamiento, lo cual ocasiona deterioro del lubricante y de las carreras internas y externas del rodamiento; este daño puede presentarse en forma de picaduras y de estrías.

TABLA I. PARÁMETROS DE LA FIGURA 1

$V_{cm}$	Tensión de modo común
$I_{cm}$	Corrientes de modo común
$C_{sf}$	Capacitancia entre el devanado del estator y la carcasa
$C_{sr}$	Capacitancia entre el rotor y el devanado del estator
$C_{rf}$	Capacitancia entre la carcasa y el rotor
$I_{sr}$	Corriente desde el devanado del estator hacia el rotor
$I_b$	Corriente de rodamiento
$C_b$ ( $C_{nde}$ and $C_{de}$ )	Capacitancias en los rodamientos

En varios artículos se ha encontrado que las corrientes en rodamientos pueden afectarse por diferentes factores, como los tipos de rodamientos, tamaño del motor, tipo de instalación, etc. En consecuencia, las corrientes en rodamientos se pueden clasificar según la causa que las produce como se muestra en la figura 2.

A continuación se hará una breve descripción de estos tipos de corrientes.

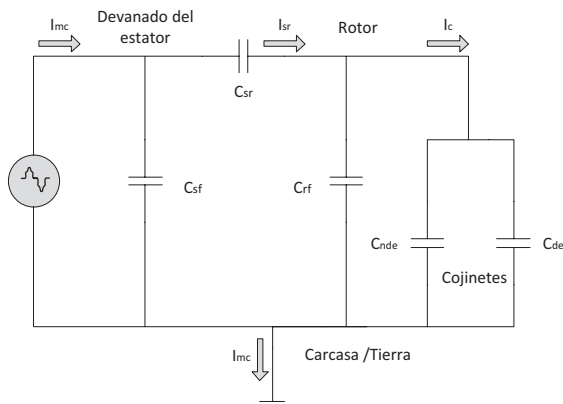


Figura 1. Capacitancias parásitas del motor de inducción  
Fuente: Elaboración propia.

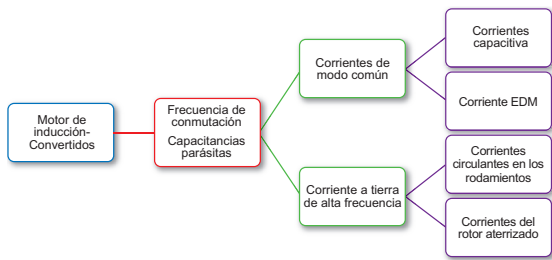


Figura 2. Tipo de corriente de rodamiento  
Fuente: Elaboración propia.

### A. Corriente capacitiva en los rodamientos

La corriente capacitiva en los rodamientos se genera por las tensiones “CM” y los trayectos de modo común originados por las capacitancias parásitas del motor de inducción. Este tipo de corriente tiene una magnitud menor a 500 mA y no representa un daño al rodamiento [8].

### B. Corriente de Rodamiento de EDM

Al igual que la anterior, la corriente de EDM se genera debido a las tensiones de modo común que hay en el eje; a diferencia de la corriente capacitiva, esta se presenta cuando la tensión que existe en el eje es de tal magnitud que supera la rigidez dieléctrica del lubricante del rodamiento. Cuando esto sucede, se presenta una descarga eléctrica que tiene como trayecto el eje, la carrera interna y externa del rodamiento, la carcasa y el conductor a tierra. Este tipo de descarga varía de acuerdo con las propiedades dieléctricas del lubricante, su temperatura, distancia de contacto entre las esferas y las carreras externas e internas del rodamiento, la velocidad del motor, etc. En la figura 3 se presenta una sección del eje y de un rodamiento del motor; en ella se observan las corrientes “EDM” que son originadas por las corrientes y tensiones de modo común.

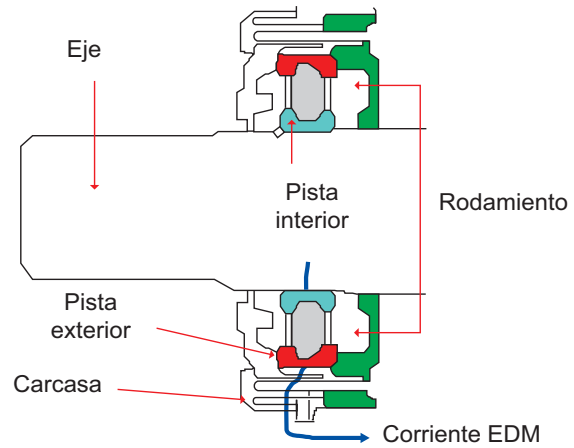


Figura 3. Corrientes de cojinete EDM  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4 se observa el circuito que modela el tipo de corriente de rodamiento EDM; este incluye las capacitancias entre el estator y la carcasa ( $C_{sf}$ ), entre el rotor y el estator ( $C_{sr}$ ) y la capacitancia entre rotor y carcasa ( $C_{rf}$ ).

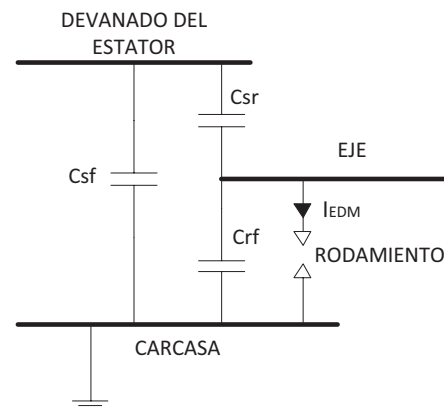


Figura 4. Modelo de circuito de corriente de rodamiento EDM  
Fuente: Elaboración propia.

### C. Corrientes de modo circulante en los rodamientos

La tensión en los ejes de la máquina se puede producir por la asimetría del campo magnético existente entre los extremos del rotor o por las corrientes de modo común que circulan entre las capacitancias parásitas del estator y la carcasa. Estas últimas corrientes a tierra son de alta frecuencia; son originadas por las formas de onda del variador y las capacitancias parásitas.

Las corrientes a tierra de alta frecuencia generan un flujo axial en el motor de inducción; este flujo induce una tensión alrededor de la máquina que produce una corriente de modo circulante; su trayectoria es a través del eje del motor, rodamiento, carcasa y el rodamiento del otro extremo. La magnitud de las corrientes circulantes no es significativa en motores de menos de 100 kW.

La aparición de corrientes de modo circulante y su magnitud dependen del tamaño de la máquina, las capacitancias parásitas y el flujo axial [6]. En la figura 5 se muestra el circuito equivalente de este fenómeno.

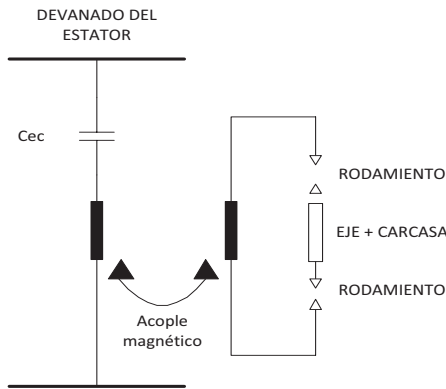


Figura 5. Modelo de circuito de corriente circulante de rodamiento propia  
Fuente: Elaboración propia.

#### D. Corrientes de rotor a tierra

La corriente de rotor a tierra se produce en el rodamiento cuando hay una mala conexión a tierra en la carcasa del motor y el eje del rotor está aterrizado. En este caso, las impedancias de los rodamientos, del eje y la carga acoplada mecánicamente son menores que la impedancia del circuito de puesta a tierra, esto genera que la corriente circule a través de las trayectorias de baja impedancia. En conclusión, la corriente circula desde el eje de la máquina hacia la carga; esta corriente puede ser significativamente grande en caso de que se presente una falla eléctrica entre el devanado del estator y tierra. La corriente de rodamiento de rotor aterrizado está representada en la figura 6.

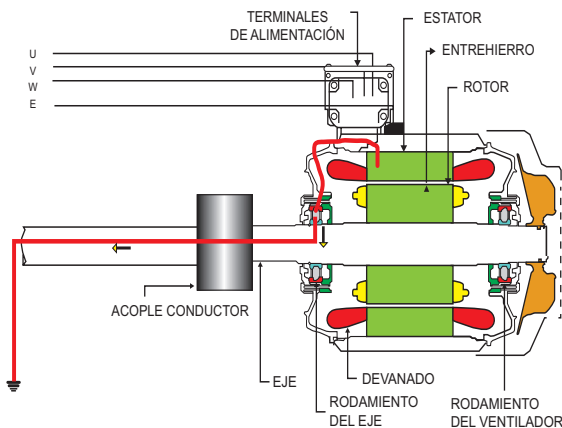


Figura 6. Trayectoria de la corriente de rodamiento de rotor aterrizado  
Fuente: Elaboración propia.

#### V. METODOLOGÍA DE MEDIDA DE CORRIENTES EDM

La medición de corrientes de rodamiento EDM es compleja y en muchos casos no es posible registrar su medición directamente, debido a que la frecuencia de las corrientes EDM es del orden de MHz y se puede confundir con las EMI's generadas por las conmutaciones del variador. Para la medición se debe identificar el tipo de corriente de rodamiento que se va a medir y la trayectoria por la cual está circulando esta corriente [8]. Algunos estudios muestran metodologías para la medición de corrientes de rodamientos como la sonda Rogowski, el uso de antenas y de transductores de corriente [1, 4, 8-11]. En la tabla 2 se muestra los criterios de selección de la metodología que se va a desarrollar para la medida de corrientes de rodamiento, y se muestra las diferentes alternativas que se tienen para medir este tipo de corrientes. Las metodologías más convenientes fueron la medida con sonda Rogowski y la medida con transductor de corriente Pearson [12].

TABLA II. FACTIBILIDAD DEL MÉTODO DE MEDIDA

Método	Ancho de banda	Simplicidad en el montaje	Disponibilidad equipo	Costo equipo
Bobina Rogowski Integradora	✓	✓	✗	✗
Bobina Rogowski simple	✓	✓	✓	✓
Transductor Pearson	✓	✓	✓	✓
Antena RF	✓	✗	✗	✗

En el caso de la sonda Rogowski, el núcleo de la bobina es de aire o de un material diamagnético. La bobina forma un lazo cerrado, a través del cual pasa la corriente que se desea medir, por lo tanto, la salida de tensión que se induce en la bobina es proporcional a la variación de la corriente que se está midiendo. Para adquirir la medida de corriente se tiene que integrar y amplificar la tensión que registra la bobina.

Para medir las corrientes en rodamiento se definió construir una bobina Rogowski simple sin la etapa de integración que permita registrar los pulsos de tensión inducida debida a la corriente de rodamiento EDM; para lograr lo anterior se debe tener primero un modelo eléctrico que describa el comportamiento de la bobina; después de analizar este modelo se determinan los parámetros eléctricos y físicos de la bobina. Estos se definieron de tal forma que la sonda Rogowski se comportara como autointegradora, es decir que para un cierto rango de frecuencias la salida que se registra en la bobina va a tener la misma forma de onda que la señal medida. Por último, para validar su construcción se realizan varios montajes en los cuales se mide corrientes de rodamiento y de modo común. Todas las medidas registradas por la sonda Rogowski fueron

comparadas con un dispositivo de medida patrón; en este caso es un transformador de corriente Pearson.

A. Modelamiento de la bobina Rogowski

J. Cooper plantea la utilización de la bobina Rogowski como elemento de medida para la medición de descargas eléctricas [13], para la cual se modela la bobina como una línea con parámetros distribuidos. En este modelo, las señales que se obtienen presentan retrasos cuando el tiempo de viaje de la onda es similar a la respuesta transitoria de la señal adquirida; este modelo es una buena aproximación para estudios de alta frecuencia en una sonda Rogowski. En otros trabajos [14-16] se expone el modelo de parámetros concentrados como un diseño alternativo y como una aproximación para un rango de frecuencias, pero este presenta grandes limitaciones cuando se requiere hacer estudios de alta frecuencia. Este modelo de parámetros concentrados se puede apreciar en el circuito de la figura 7, donde  $V_{coil}$  es la tensión inducida en la bobina, R es la resistencia del conductor de las espiras, C es la capacitancia parásita entre espiras y entre el cable de retorno, L es la inductancia propia y  $Z_0$  es la impedancia de ganancia o de salida que se coloca en paralelo con la bobina.

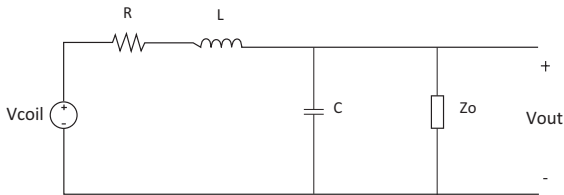


Figura 7. Modelo de parámetros concentrados de sonda Rogowski Fuente: Elaboración propia.

En algunos modelos se desprecia la resistencia en serie con la bobina [14], mientras que en otros la resistencia se considera como parte del modelo [15-16]; todo esto depende de la variación de la resistencia por el efecto piel que se presente en el conductor. Para el análisis del comportamiento de la sonda Rogowski se escogió el modelo de parámetros concentrados; esto debido a que es un modelo simple de analizar y para el rango de frecuencias que se va a medir es bastante aproximado. Para el diseño de la bobina se tuvo en cuenta también que la impedancia de ganancia  $Z_0$  es puramente resistiva, lo cual ayuda a que el modelo sea aun más simple.

También se observa en la figura 7 que el modelo de parámetros concentrados consiste de un circuito serie con una impedancia en paralelo a la capacitancia; entonces, aplicando la ley de corrientes de Kirchoff se puede obtener las ecuaciones (1) a (3):

$$i_{inductancia} = i_{capacitancia} + i_{impedancia} \tag{1}$$

$$\frac{v_{coil} - (v_{inductancia} + v_{out})}{R} = C \frac{dv_{out}}{dt} + \frac{v_{out}}{Z} \tag{2}$$

$$\frac{v_{coil} - \left( L \frac{d}{dt} \left( C \frac{dv_{out}}{dt} + \frac{v_{out}}{Z} \right) + v_{out} \right)}{R} = C \frac{dv_{out}}{dt} + \frac{v_{out}}{Z} \tag{3}$$

La ecuación (3) es la ecuación diferencial que describe el comportamiento del circuito de la figura 7; aplicando la transformada de Laplace y teniendo en cuenta que las condiciones iniciales del sistema son cero se obtiene la función de transferencia de la ecuación (4).

$$\frac{v_{out}}{v_{coil}} = H(s) = \frac{Z_0}{LCZ_0s^2 + (L + RCZ_0)s + R + Z_0} \tag{4}$$

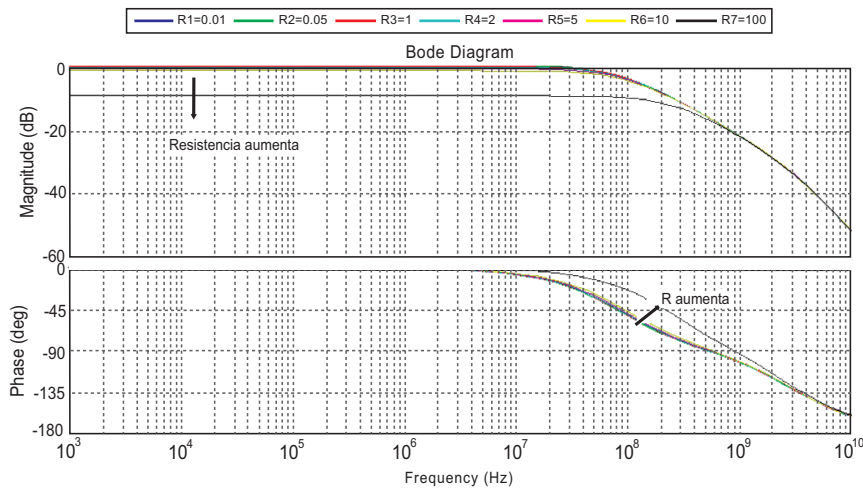


Figura 8. Respuesta en frecuencia vs. variación de resistencia Fuente: Elaboración propia.

MEDICIÓN DE CORRIENTES EDM SOBRE RODAMIENTOS EN EL CONJUNTO MOTOR DE INDUCCIÓN Y VARIADOR DE FRECUENCIA

Los valores de los parámetros eléctricos R, L y C determinan la respuesta en frecuencia de la bobina Rogowski (la función de transferencia  $H(s)$ ). Para verificar los resultados de diseño y estudiar el comportamiento de la sonda se escogió los siguientes valores iniciales:  $R=0.1\Omega$ ,  $L=0.1\mu\text{H}$ ,  $Z_0=50\Omega$  y  $C=1\text{pF}$ , después se analiza la variación y la influencia de cada uno en la función de transferencia. En la figura 8 se muestra la variación de la resistencia del conductor; inicialmente se empieza con un valor de  $0.01\Omega$  hasta  $100\Omega$ ; en esta figura se puede observar que la ganancia de la función de transferencia tiende a disminuir a medida que aumenta la resistencia; por ejemplo, cuando R es igual a  $100\Omega$ , la atenuación es cercana a los  $-10\text{ dB}$ .

En la figura 9 se muestra la variación de la función de transferencia cuando se varía la inductancia; se concluye que a medida que el valor de la inductancia aumenta, el ancho de banda disminuye; ahora, si se observa el diagrama de fase, se puede resaltar que con una inductancia de  $1\mu\text{H}$  la curva tiene un aplastamiento mayor a los  $90^\circ$ , es decir que cuando se incrementa la inductancia, el rango de frecuencias en el que la bobina es autointegradora es mayor.

En la figura 10 se muestra la variación de la función de transferencia cuando se varía la capacitancia; al aumentar la capacitancia, se observa que el ancho de banda disminuye; también se puede resaltar que el cambio de ángulo en el diagrama de fase es más pronunciado que las gráficas que tienen una menor capacitancia.

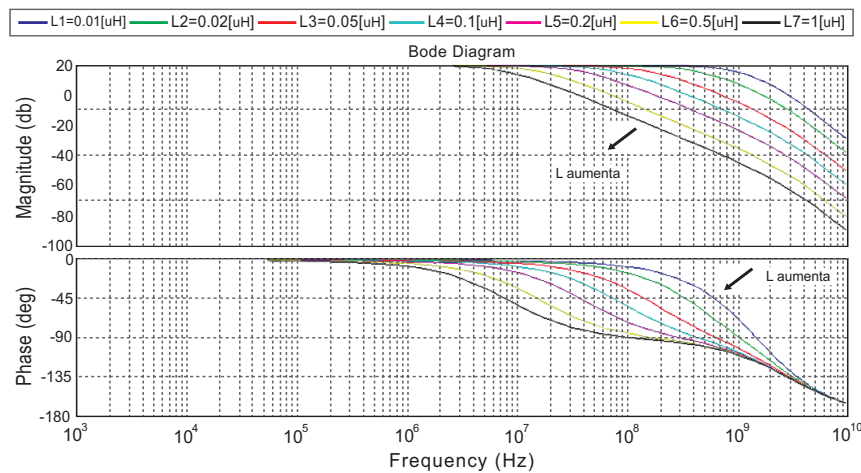


Figura 9. Respuesta en frecuencia para la variación de inductancia  
Fuente: Elaboración propia.

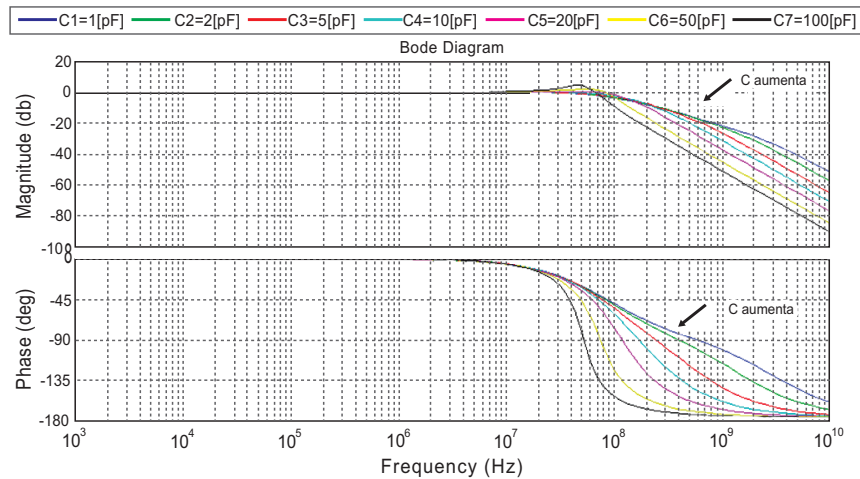


Figura 10. Respuesta en frecuencia para la variación de capacitancia  
Fuente: Elaboración propia.



Las características eléctricas R, L y C dependen directamente de la geometría de la sonda y del conductor. La resistencia del alambre depende de su diámetro y de la resistividad del cobre, como se describe en la ecuación (5), donde  $l_{cu}$  es la longitud del alambre,  $d$  el diámetro del alambre y es la resistividad del cobre ( $\rho=1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ).

$$R = \rho \frac{cu}{d} \tag{5}$$

La inductancia propia L representa la incidencia del campo magnético inducido por la corriente que circula a través de la bobina, como se expresa en la ecuación (6). En esta ecuación,  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío ( $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ ), N el número de vueltas,  $a$  es el diámetro interno,  $b$  es el diámetro externo y  $W$  es la altura. Los anteriores parámetros geométricos de la bobina Rogowski se observan en la figura 11.

$$L = \frac{\mu_0 W N^2}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \tag{6}$$

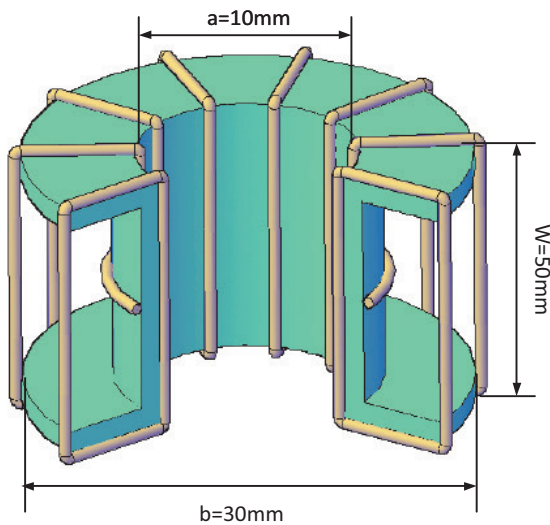


Figura 11. Carrete del núcleo de la bobina.  
Figura con parámetros y datos de diseño definitivo  
Fuente: Elaboración propia.

La capacitancia depende de la geometría del núcleo, la distancia entre espiras, el número de espiras y la permitividad eléctrica, que en este caso es la permitividad del vacío  $\epsilon_0$ . La capacitancia que influencia sobre el modelo es la capacitancia entre los conductores de las espiras y el hilo conductor de retorno de la bobina. Las capacitancias entre espiras no se tienen en cuenta, ya que su valor es más pequeño que la capacitancia que hay con respecto al hilo de retorno.

En la ecuación (7) se describe el valor de la capacitancia que existe entre espiras y el cable de retorno de la bobina Rogowski, donde  $\frac{b+a}{2}$  es el radio medio del núcleo,  $\frac{b-a}{2}$  es la sección transversal de la bobina y  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío ( $\epsilon_0=8.85 \cdot 10^{-12} F/m$ ).

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b+a}{b-a}\right)} \tag{7}$$

Con las ecuaciones (5), (6) y (7) se calculan los parámetros eléctricos de la bobina, de tal forma que la señal que registrara la sonda Rogowski tuviera una ganancia apreciable y el ancho de banda estuviera dentro del rango para medir pulsos de frecuencias cercanas a los 10 MHz. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros eléctricos de la bobina calculados

Parámetros eléctricos de la bobina	
R	0.1472 [ $\Omega$ ]
L	1.582 [ $\mu H$ ]
C	1.0086 [ $pF$ ]

La figura 12 muestra la respuesta en frecuencia H(s) para los valores de R, L, C calculados. Se tiene que la primera frecuencia de corte está alrededor de 2.52 MHz, y en adelante tiene una ganancia de -20 dB por década hasta una frecuencia de 46 MHz. Finalmente, a 354 MHz tiene una ganancia de -40 dB por década; a partir de esta frecuencia la ganancia de la bobina disminuye con una gran pendiente.

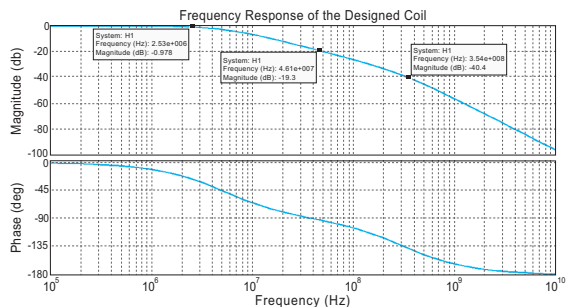


Figura 12. Respuesta en frecuencia de la bobina diseñada  
Fuente: Elaboración propia.

Para analizar la respuesta en frecuencia real de la bobina construida se realizó el montaje de la figura 13. En el montaje se utilizó un generador de señales con rango de frecuencia de hasta 10 MHz. Se instaló la bobina en serie con una resistencia de 50 $\Omega$  y se midió la señal de tensión de la resistencia y de la bobina.

## MEDICIÓN DE CORRIENTES EDM SOBRE RODAMIENTOS EN EL CONJUNTO MOTOR DE INDUCCIÓN Y VARIADOR DE FRECUENCIA

Los resultados obtenidos en las mediciones se emplearon para encontrar un equivalente total de impedancia  $Z$  de la bobina en función de la frecuencia, y el resultado obtenido se muestra en la figura 14.

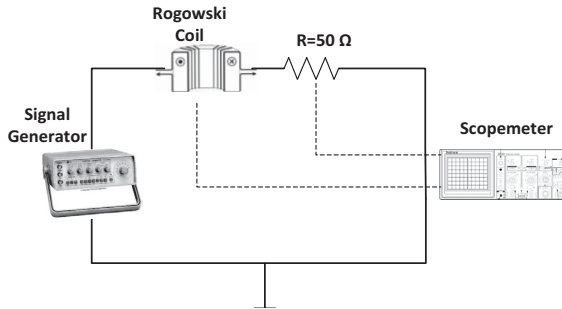


Figura 13. Circuito de prueba para respuesta en frecuencia real de la bobina diseñada  
Fuente: Elaboración propia.

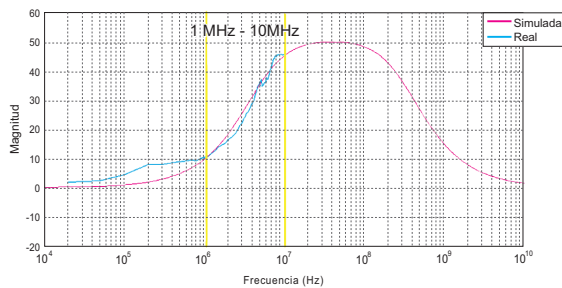


Figura 14. Magnitud de la impedancia equivalente de la bobina real vs. simulada  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 14 se puede observar los resultados del barrido en frecuencia que se realizó con el circuito de prueba a la bobina que se construyó; este barrido se compara con la respuesta en frecuencia de la función de transferencia; esta contiene los parámetros eléctricos calculados de la bobina. En la figura 15 se concluye que para el rango de frecuencias de 1 Mhz a 10 MHz sus comportamientos son muy similares y lineales, por lo tanto, el dispositivo construido es ideal para medir y detectar corrientes dentro de estos rangos de frecuencia, tales como corrientes de rodamiento y de modo común producidas por el conjunto variador de velocidad y motor de inducción.

### II. PRUEBAS EXPERIMENTALES

El siguiente paso después de construir la bobina es validar su construcción mediante pruebas y medidas. Las características de los equipos e instrumentación utilizados para las pruebas de medición de corriente de modo común y de rodamiento se resumen en la tabla 4.

TABLA IV. PARÁMETROS DEL EQUIPO BAJO PRUEBA

Motor de inducción	
Tensión nominal	220/440 V
Corriente nominal	21.8/10.9 A
Potencia nominal	7.5 Hp
Velocidad nominal	1740 r/min
Variador de velocidad	
Potencia nominal	5.5 kW
Esquema de modulación	PWM
Frecuencia portadora	2-16kHz
Corriente nominal	22 A
Sonda Rogowski construida	
Sensibilidad	1.83V/A
Mínima frecuencia	1MHz
Máxima frecuencia	20 MHz
Transformador de corriente Pearson 2877	
Sensibilidad	1 V/A
Corriente pico máxima	100 A
Máxima corriente rms	2.5 A
mínima frecuencia (3dB)	300 Hz
Máxima frecuencia (3dB)	200 MHz

El esquema de prueba se observa en la figura 15; este permite medir corrientes de modo común y comprobar el comportamiento de la bobina construida para la detección y registro de pulsos de corriente de alta frecuencia. En esta figura también se muestra que la corriente de modo común es la corriente que retorna por la conexión a tierra del motor, por lo tanto, los sensores de medida Rogowski y Pearson se instalan en el cable que realiza la conexión a tierra.

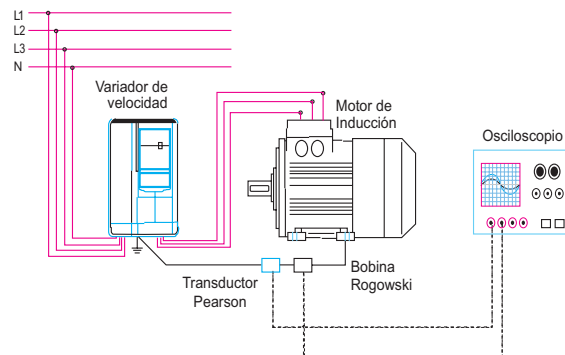


Figura 15. Diagrama de medición de corrientes de modo común en motor de inducción  
Fuente: Elaboración propia.



En la figura 16 se observa un pulso de corriente de modo común registrado por la bobina Rogowski y el transformador de corriente Pearson. La mayor amplitud de tensión registrada por el transductor Pearson fue 1.8 V, que representa una corriente de 1.8 A; en cambio, la bobina Rogowski registró una tensión pico de 4 V. También se puede observar que las formas de ondas registradas por los dos instrumentos son similares.

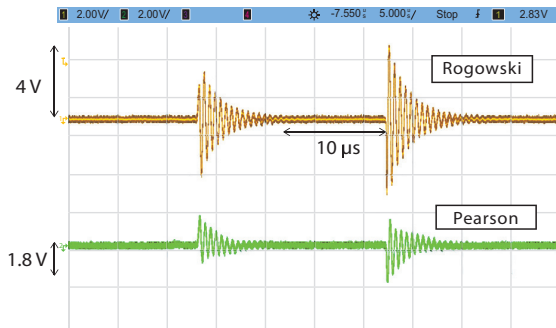


Figura 16. Pulso de corriente de modo común  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 17 muestra dos pulsos ampliados de la corriente de modo común que se registró con la bobina Rogowski y el transformador de corriente Pearson. Se puede observar que la señal registrada por la sonda Rogowski presenta un pequeño adelanto en fase comparado con el transductor de corriente Pearson, aunque las señales son muy similares en forma y tamaño.

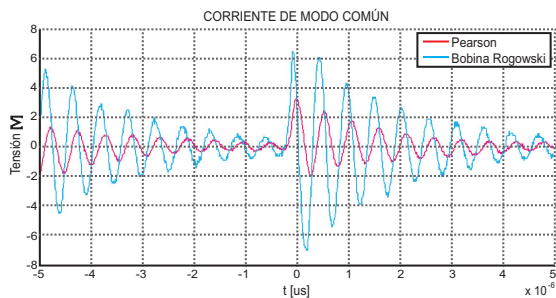


Figura 17. Desfase entre las señales de la bobina y el transductor Pearson  
Fuente: Elaboración propia.

Para la prueba de medición de corrientes en un rodamiento se aplica un nivel de tensión DC a un rodamiento normal en movimiento y se registran las señales de corriente tomadas por los sensores Rogowski y Pearson. Para el montaje de la prueba se elabora un soporte para el rodamiento y un acople para el eje metálico del rodamiento. Este acople va conectado con un motor de inducción que produce el giro del rodamiento, y tanto el soporte como el acople son de material aislante (Nylon 6). Esto ga-

rantiza que ninguna interferencia de tipo conducida pueda aparecer en el montaje y que la corriente que circule en el rodamiento no tenga trayectorias indeseadas. Para aplicar tensión al rodamiento se instaló una escobilla que hace contacto con el eje del rodamiento y se conectó un cable en la carrera externa del rodamiento. En la figura 18 se puede observar el esquema del montaje anteriormente descrito y en la figura 19 se muestra una fotografía que describe el soporte, la escobilla, el acople del rodamiento, etc.

Para provocar la presencia de corrientes a través del rodamiento se aplica una tensión DC entre la escobilla y el conductor que va unido a la pista externa del rodamiento; este circuito va en serie con una resistencia de 10Ω. Lo anterior se hace para limitar la corriente de la fuente, ya que el rodamiento es un elemento que tiene una impedancia muy variable. El valor de la tensión que se aplicó fue de 3.8 V<sub>DC</sub>. El terminal positivo de la fuente se conecta a las escobillas y el terminal negativo a la pista externa del rodamiento con el propósito de inducir una descarga a través del mismo. Posteriormente se mide la tensión en el eje por medio de las escobillas y el osciloscopio.

En la figura 20 se muestra la medida de una descarga provocada en el rodamiento acoplado al eje del motor. La tensión medida por el transductor Pearson es de 75 mV en una escala de 100 mV/div, y corresponde a un pico de corriente de 75 mA. La tensión pico inducida en la bobina Rogowski es de 190 mV, a una escala de 500 mV/div. El tiempo de duración del pulso es de 1 µs. La tensión que se induce en la bobina Rogowski es mayor que la tensión del transductor Pearson, por tanto, la bobina Rogowski tiene una mayor sensibilidad y registra con mayor detalle el fenómeno de descarga. El tiempo de duración de descarga concuerda con los resultados obtenidos en estudios realizados por otros autores acerca de este tipo de “EDM” sobre rodamientos [8-9]. En el momento de producirse una descarga electrostática en el rodamiento, la tensión del eje pasa de un nivel DC a cero y permite comprobar la presencia de la corriente de rodamiento EDM en el rodamiento bajo prueba.

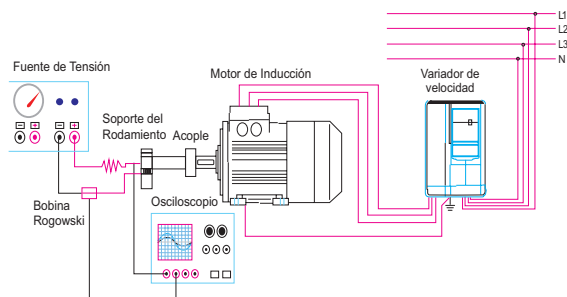


Figura 18. Circuito para medir corriente de descarga en rodamiento externo  
Fuente: Elaboración propia.

MEDICIÓN DE CORRIENTES EDM SOBRE RODAMIENTOS EN EL CONJUNTO MOTOR DE INDUCCIÓN Y VARIADOR DE FRECUENCIA

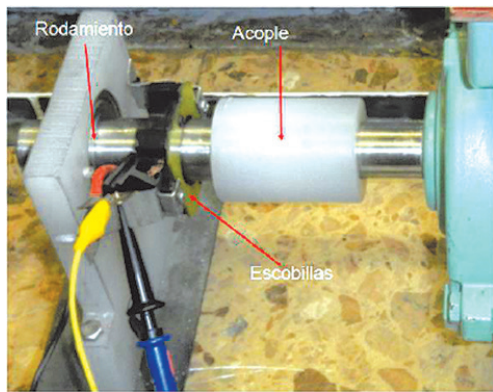


Figura 19. Montaje de rodamiento externo  
Fuente: Elaboración propia.

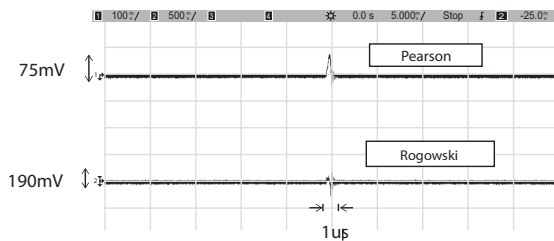


Figura 20. Pulso obtenido en la prueba del montaje de rodamiento externo  
Fuente: Elaboración propia.

No siempre las corrientes que se registraron son descargas electrostáticas; en algunas ocasiones el rodamiento hace contacto metálico, y por lo tanto, este entra en conducción sin la necesidad de que exista disrupción en el lubricante. La figura 21 muestra este fenómeno, en el cual la corriente de contacto del rodamiento medido por el transductor Pearson tiene una duración de 13, mientras que la señal registrada por la sonda Rogowski es totalmente distinta. Lo anterior se debe a que las corrientes de contacto tienen componentes de frecuencia más bajas que las corrientes de descarga, y por tanto, la bobina funciona como un filtro y solo registra la aparición y desaparición de una corriente EDM.

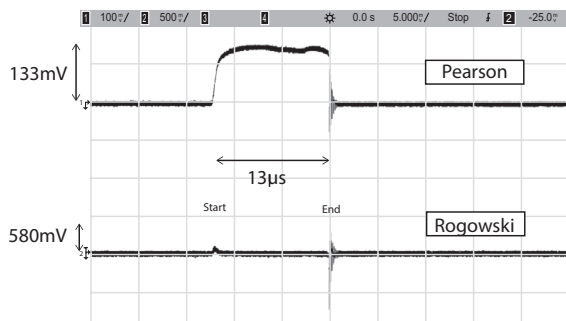


Figura 21. Tensión de contacto en el rodamiento bajo prueba  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 22 también muestra un pulso de corriente de contacto a través del rodamiento con una duración de 12  $\mu$ s. En este pulso se mide la tensión del eje que une el rodamiento y el acople al motor, y se puede observar que la tensión del eje se hace cero cuando el rodamiento entra en contacto.

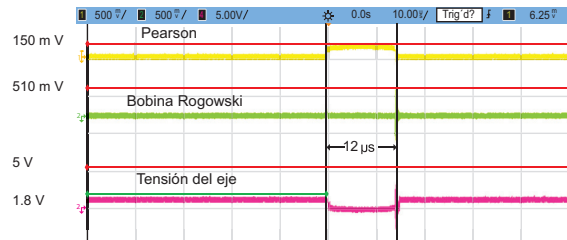


Figura 22. Tensión de contacto y caída de tensión del eje  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 23 muestra una parte ampliada del final de la corriente de contacto, y se puede observar que al final del pulso existe un transitorio que tiene una duración de 0.5, que es registrado por la bobina Rogowski; se puede ver la tensión de la resistencia limitadora de corriente, que está en serie con la fuente y el rodamiento, y la tensión, que es la tensión que hay en el eje.

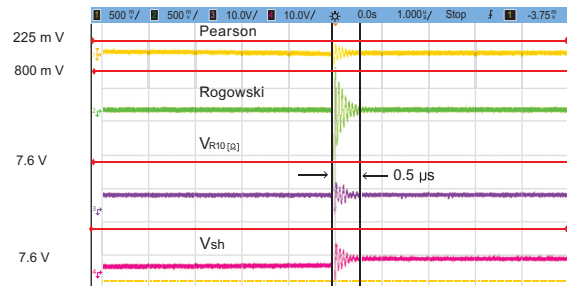


Figura 23. Tensión de contacto y caída de tensión del eje que diferencia este de la figura 22  
Fuente: Elaboración propia.

III. CONCLUSIONES

Para medir corrientes en rodamientos EDM en un motor de inducción se requiere de instrumentos de medida con anchos de banda no inferior a 1 MHz y una sensibilidad mayor o igual a 100 mV. Estas características permiten registrar en una buena forma pulsos de corriente de alta frecuencia.

El diseño y construcción de la sonda Rogowski tiene la capacidad de registrar pulsos de corriente de alta frecuencia en el rodamiento, es decir que de acuerdo con la metodología propuesta, la bobina sirve para registrar descargas electrostáticas.

Medir la tensión de descarga permite conocer de forma rápida y evidente el inicio y final de la descar-

ga en el rodamiento como una descarga electrostática; también permite conocer los principales factores de diseño de la máquina que intervienen en aparición de EDMs.

El montaje de rodamiento aislado propuesto junto con la metodología de medición permiten cuantificar y caracterizar las corrientes de rodamiento EDM de forma simple y económica.

La metodología de la bobina Rogowski propuesta para la medición de corriente de rodamiento es un método fácil y económico de implementar siempre y cuando se tenga en cuenta las buenas prácticas de cada montaje propuesto.

#### REFERENCIAS

- [1] S. Chen, T. A. Lipo, and D. Fitzgerald, "Modeling of motor bearing currents in PWM inverter drives", *IEEE trans. Ind. Applicat*, vol. 32, n° 6, pp. 1365-1370, Nov.-Dec. 1996.
- [2] Guía técnica para motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM. Motores Weg. Available: <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/weg-motores-de-induccion-alimentados-por-convertidores-de-velocidad-pwm-029-articulo-tecnico-espanol.pdf>
- [3] Guía técnica n° 5. Corrientes de los rodamientos en sistemas de accionamiento de CA modernos. ABB Group.
- [4] A. Muetze and A. Binder, "Don't lose your bearings, mitigation techniques for bearing currents inverted-supplied drive systems", *IEEE Industry Applications magazine*, July - August 2006.
- [5] Motor shaft voltages and bearing currents under PWM inverter operation. Gambica-Rema Working Group.
- [6] A. Muetze and A. Binder, "Experimental evaluation of mitigation techniques for bearing currents in inverter-supplied drive-systems - investigations on induction motors up to 500 kW", Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. *IEEE International*, vol. 3, pp. 1859- 1865, June 1-4 June 2003.
- [7] Inverter-Driven Induction motors shaft and bearing current solutions. Industry writes paper. Baldor Inc.
- [8] A. Muetze and A. Binder, "Techniques for measurement of parameters related to inverter-induced bearing currents", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, n° 5, pp. 1274-1283, Sep./Oct. 2007.
- [9] P. Marinov and M. MasudurRahman, "Measuring bearing currents", Master Thesis, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2002.
- [10] V. Särkimäki, "Radio frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors", Lappeenranta University of Technology, Finland, 2009.
- [11] O. Magdun, A. Binder, "Calculation of roller and ball bearing capacitances and prediction of EDM currents", *Industrial Electronics, 2009. Iecon '09. 35th annual conference of IEEE*, pp.1051-1056, Nov, 3- 5 2009.
- [12] Application notes for current monitors manufactured by pearson electronics, Inc. Available: <http://www.pearsonelectronics.com/pdf/application%20notes.pdf>.
- [13] J. Cooper, "On the high-frequency response of a rogowski coil", *Plasma Physics (Journal of Nuclear Energy. Part c)*, vol. 5, pp. 285-289, 1963.
- [14] D. A.Ward and J. Exon, "Using rogowski coils for transient current measurements", *Engineering Science and Education Journal*, vol. 2, n° 3, pp.105-113, junio de 1993.
- [15] G. Robles, J. M. Martínez, J. Sanz, B. Tellini, C. Zappacosta, and M. Rojas, "Designing and tuning an air-cored current transformer for partial discharges pulses measurements", *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. Imtc 2008. IEEE*, pp.2021-2025, May. 12- 15 2008.
- [16] M. Montero, "Estudio de una bobina de Rogowski como sonda detectora de pulsos de alta frecuencia", trabajo de investigación en Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, 2005.