

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS Y ESPIRAS CORTOCIRCUITADAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN UTILIZANDO ALGORITMOS DE ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES (MCSA)

Barreto J. Rafael ,Ing.
Universidad San Francisco de Quito

Morales M. Náthali , Ing.
Escuela Politécnica Nacional

Resumen: El sistema propone una alternativa para detectar barras rotas y espiras cortocircuitadas en motores de inducción a través de algoritmos de Análisis Espectral de Corrientes (MCSA). El sistema acondiciona señales de voltaje y corriente de alimentación del motor, las filtra análogamente eliminando ruido y *aliasing*, las digitaliza y envía a un computador. Se las filtra digitalmente para evitar ruido remanente y periodicidad del espectro de frecuencia. Después se halla su contenido espectral donde, según los criterios de MCSA respectivos, se detecta picos en frecuencias específicas y sus amplitudes que determinan el estado del motor discriminando la naturaleza de la falla. El software, implementado en LabVIEW, presenta las señales adquiridas en dominios del tiempo y frecuencia. Además, al terminar la prueba, se presenta un diagnóstico y una recomendación, se almacena datos en una hoja de cálculo o en una base de datos elegible al usuario. Opcionalmente, el programa genera reportes automáticamente en formato de documento portátil en el que se muestra las señales de interés, diagnóstico y configuración del motor. El sistema fue evaluado en un banco de pruebas con motores monofásicos y trifásicos.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad muchas de las tareas que una industria moderna debe llevar a cabo son realizadas por motores de inducción, el mercado de estos motores ha crecido de manera tal, que tener un control y monitoreo continuo y eficiente de su comportamiento se ha vuelto indispensable.

Un motor de inducción es un sistema electromecánico, por lo que las fallas que pueden suscitarse en éste, son de naturaleza eléctrica o mecánica, como por ejemplo, fallas en el estator por cortocircuitos, recalentamiento y vibración excesiva. Además, una de las fallas no tan frecuente pero de serias consecuencias, es la ruptura de las barras del rotor, causada por el desgaste de los materiales y esfuerzos térmicos y mecánicos exagerados. El sistema desarrollado se enfoca a la detección de espiras cortocircuitadas en el estator y barras rotas en el rotor.

El presente artículo hace un análisis y presenta una alternativa al problema de la detección de fallas por ruptura de barras de la jaula de ardilla de un motor de inducción, así como por espiras cortocircuitadas en el estator, implementando un sistema que permite diagnosticar la naturaleza de la falla y la severidad de la misma.

II. CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE BARRAS ROTAS Y ESPIRAS CORTOCIRCUITADAS.

Las causas para que se produzca la ruptura de las barras de la jaula de un motor de inducción o la ruptura de los anillos que unen dichas barras, son principalmente esfuerzos térmicos y mecánicos a los que un motor puede ser sometido. Estas causas se originan por: [1,2]

- El arranque directo de motores que para cumplir su ciclo de trabajo deben arrancar varias veces periódicamente y cuyo rotor y jaula no están diseñados para soportar este modo de funcionamiento, lo que provoca altos esfuerzos térmicos y mecánicos.
- La presencia de cargas mecánicas intermitentes, como es el caso de los compresores y trituradoras, pueden someter a la jaula del rotor a altos esfuerzos mecánicos.
- Fallas en el proceso de fabricación del rotor, que podrían ocasionar esfuerzos adicionales a los necesarios.
- Esfuerzos magnéticos causados por fuerzas electromagnéticas desbalanceadas, ruido electromagnético y vibración.
- Degradación del material del rotor debido a químicos o humedad, presentes en el ambiente de trabajo del motor.
- Esfuerzo térmico debido a sobrecarga en el motor, carga desbalanceada, puntos calientes o pérdidas excesivas.
- Esfuerzos mecánicos debido a laminaciones flojas, partes gastadas y fallas en los rodamientos.

La presencia de barras rotas [1] en la jaula de ardilla no provoca la falla inminente del motor, pero puede ocasionar serios efectos

secundarios, constituyéndose en un potencial problema. Al poner en funcionamiento el motor, las barras rotas tienden a desprenderse a gran velocidad pudiendo ocasionar daños en los devanados o en el núcleo del estator al golpearlos. Esto afecta el aislamiento, desembocando en una falla cuya consecuencia sería una costosa reparación y la pérdida de la producción por la paralización del proceso al cual el motor está asociado.

Las principales razones para que se produzca cortocircuitos en los devanados estáticos son: [1,2]

- Altas temperaturas del núcleo o de los bobinados.
- Laminación del núcleo y juntas flojas.
- Pérdida del aseguramiento del final de las bobinas.
- Contaminación por aceite, humedad y suciedad.
- Pérdidas en los sistemas de enfriamiento.
- Desbalanceo de una de las fases.

Se pueden presentar varios tipos de cortocircuitos con las siguientes consecuencias [3]:

- *Cortocircuito entre fases.* El motor falla y la protección del equipo desconecta la alimentación.
- *Cortocircuito fase-tierra.* El motor falla y la protección del equipo desconecta la alimentación.
- *Cortocircuito espira-espira en una bobina.* El motor continúa trabajando durante un tiempo indeterminado con sobrecalentamiento, baja eficiencia y riesgo de daño severo.
- *Cortocircuito entre bobinas de la misma fase.* El motor continúa trabajando durante un tiempo indeterminado, con sobrecalentamiento, baja eficiencia y riesgo de daño severo.

Los dos primeros son bastante graves, para lo cual una detección preventiva es casi imposible de hacer, mientras que las otras tienen un tiempo preliminar indeterminado antes de que lleguen a una falla grave, permitiendo su detección.

III. FUNDAMENTOS DE MCSA

MCSA se fundamenta en que a un motor eléctrico convencional, se lo puede ver también como un transductor eficiente y conectado permanentemente, ya que a través de él se puede detectar variaciones en la carga o variaciones de naturaleza mecánica en su funcionamiento. Estas variaciones generadas

dentro del sistema mecánico, son convertidas como señales distintivas o "marcas" en la corriente eléctrica de alimentación al motor, por lo que para obtenerlas, es necesario tomar una muestra de dicha corriente, lo que se puede hacer de forma confiable y segura con métodos no invasivos. La muestra tomada debe ser procesada con el fin de suministrar indicativos de la condición del motor. Para este análisis se puede usar el dominio del tiempo o el dominio de la frecuencia, siendo este último el método más usado actualmente.

MCSA [4], usa como criterio que a través de una combinación de las componentes frecuenciales de señales de voltaje y corriente de alimentación al motor se puede detectar y diferenciar fallas relacionadas con la carga y la alimentación al motor. Se puede, entonces, clasificar a las fallas como de naturaleza eléctrica o mecánica con el siguiente principio:

- Si las componentes que se muestran en la señal de corriente, se reflejan también en la señal de voltaje, se concluye que la falla es de naturaleza eléctrica.
- Si las componentes se muestran en la señal de corriente, pero no en la señal de voltaje, se concluye que el problema es de naturaleza mecánica.

IV. MCSA PARA DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS

El principio de operación de un motor de inducción consiste en que al ser alimentado con una fuente de corriente alterna trifásica y balanceada, existe circulación de corriente a través de los devanados de armadura, simétricamente dispuestos. Por efecto de inducción aparece una corriente alterna en el rotor. Como resultado de esto, se produce un campo magnético rotatorio de armadura que gira a velocidad sincrónica y que adelanta al campo en el rotor, dando como resultado que al colocar el rotor dentro de estos campos tienda a girar arrastrado por ellos, siempre a una velocidad menor que la sincrónica. Si el motor tiene barras rotas, crea condiciones no balanceadas o de asimetría que generan un campo magnético giratorio adicional en retraso, que gira a velocidad de deslizamiento y corta los bobinados del estator, induciendo en ellos un voltaje y una corriente con la misma frecuencia del campo rotatorio, denominada f_{sb} cuya ubicación está dada por:

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s) \quad (1)$$

donde f_{sb} es la frecuencia de bandas laterales debido a barras rotas, f_1 es la frecuencia de red de alimentación al motor y s es el

deslizamiento. La demostración físico-matemática completa se encuentra en [1].

Debido a que un motor en buen estado que no tenga rotas sus barras puede presentar asimetrías debido a un desbalance en las impedancias de sus devanados, las bandas laterales pueden existir pero éstas son pequeñas comparadas con las provocadas por el efecto de barras rotas. Es por esto que la presencia de las bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental en un motor de inducción sin falla es normal como se muestra en las Figuras 1, 2 y 3.

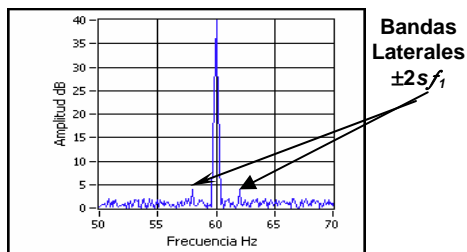


Figura 1. Componentes espectrales de un motor ideal

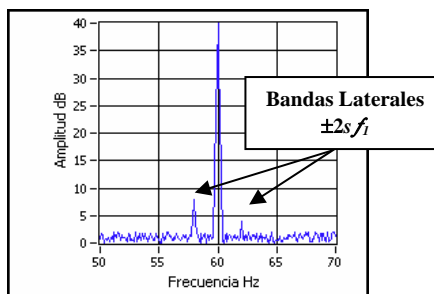


Figura 2. Componentes espectrales con bandas laterales inherentes a asimetrías en los devanados del rotor

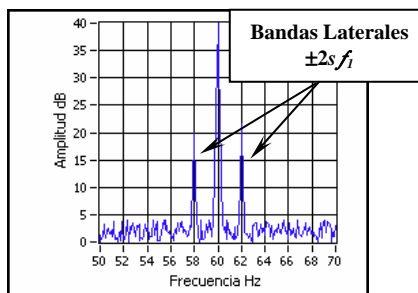


Figura 3. Componentes espectrales con bandas laterales debidas a barras rotas

Para hacer una distinción entre las bandas laterales inherentes al desbalance en los devanados y a las correspondientes a barras rotas hay que basarse en la diferencia de amplitudes que existe entre las bandas laterales y la fundamental. Mediante pruebas

hechas por los laboratorios *Microlog CMVA55* [5] junto con datos recolectados experimentalmente y del conocimiento empírico del personal de mantenimiento, se ha logrado determinar la condición de un motor de inducción con referencia a la falla por barras rotas de acuerdo a la Tabla 1:

Tabla 1. Diagnóstico para motores de inducción respecto de la falla de barras rotas [5].

Diferencia entre amplitud fundamental y bandas laterales (dB).	Estado del motor.
54-60	Excelente
48-54	Bueno
42-48	Probablemente el motor tenga barras rotas
36-42	El motor tiene barras rotas en su interior
30-36	Motor con barras rotas y probablemente otra fuente de alta resistencia
<30	Motor tiene un daño severo

En síntesis, si el motor tiene barras rotas en su rotor, se las puede detectar hallando las diferencias entre las componentes o picos en el espectro de la onda de corriente de alimentación ubicadas según la ecuación (1) y la fundamental de acuerdo a la Tabla 1. Este criterio es válido siempre y cuando el espectro de voltaje no muestre los mismos picos según se discutió anteriormente.

Para completar el análisis se debe tomar en cuenta que existen dos efectos debidos a la carga. El primero se produce si el torque de la carga varía con la posición del rotor. En este caso la corriente contiene componentes espectrales que pueden coincidir con los causados con la condición de falla [6]. Una situación en la que se evidencia este problema es cuando el motor es usado en compresores o trituradores en cuyo caso la carga no es constante en el tiempo. El segundo se produce cuando, aunque teniendo una carga constante, esta no hace que el deslizamiento sea lo suficientemente representativo para alejar las bandas laterales respecto de la fundamental que las “esconde”. De aquí que este método es conveniente para motores con carga constante y equivalente a por lo menos el 75% de su capacidad nominal.

V. MCSA PARA DETECCIÓN DE ESPIRAS CORTOCIRCUITADAS

En un motor ideal, la alimentación eléctrica, el número de espiras por fase y los campos magnéticos radiales están totalmente

equilibrados. Esto hace que la fuga de flujo magnético axial sea nula, ya que en condiciones libres de falla, las corrientes del rotor y del estator están perfectamente balanceadas. En la práctica, las asimetrías existen por las imperfecciones inherentes a la fabricación de los elementos, como al enrollado de los bobinados, así como también, deformaciones e imperfecciones en los materiales de construcción.

Una falla representa una asimetría grande y periódica, sobretudo en los bobinados del estator. De esta manera, es posible deducir matemáticamente las componentes armónicas generadas por una falla en particular.

En el caso de las espiras cortocircuitadas, la asimetría se produce porque este conjunto de espiras, forman una bobina diferente a la original que, además, están acopladas magnéticamente. Al cortocircuitar algunas, se tiene un circuito equivalente a una bobina inducida mutuamente por otra conectada a la alimentación. Ya que la resistencia de la bobina que hace el cortocircuito es pequeña, la corriente tiende a ser muy alta y a producir calor. Este acoplamiento magnético es el que da una asimetría representativa en el flujo axial de la bobina del motor que se presenta como una componente en el espectro de corriente en el estator en las frecuencias calculadas por:

$$f_{cc} = f_{red} \left(k + \frac{n}{p} (1-s) \right) \quad (2)$$

donde f_{cc} es la frecuencia de la banda debida a espiras cortocircuitadas, f_{red} es la frecuencia de red de alimentación al motor, s es el deslizamiento, p es el número de polos, $k=1,3,\dots$ y $n=1,2,3,\dots$. La demostración físico-matemática completa se encuentra en [7].

Analizando la forma de onda de la corriente, se puede verificar fácilmente la existencia o no de armónicas en las frecuencias calculadas con (2).

En las Figuras 4 y 5, se puede observar un espectro de corriente ideal y uno con espiras cortocircuitadas en el estator.

De esta manera, se concluye que, si existen picos de corriente representativos en las frecuencias calculadas previamente, el motor tiene espiras cortocircuitadas. Es necesario, además, tomar en cuenta que la presencia de estos picos en la señal de voltaje puede indicar que el problema es por la alimentación y no necesariamente por un cortocircuito en el estator. Para discernir con exactitud, hay que referirse a los principios

generales de corriente y voltaje de MCSA discutidos en la sección III.

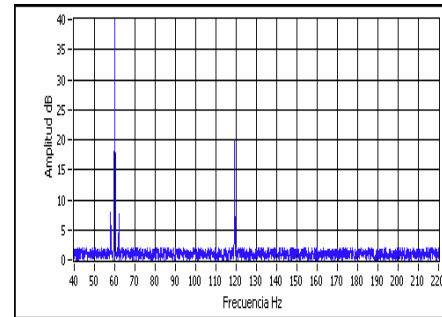


Figura 4. Componentes espectrales de un motor ideal

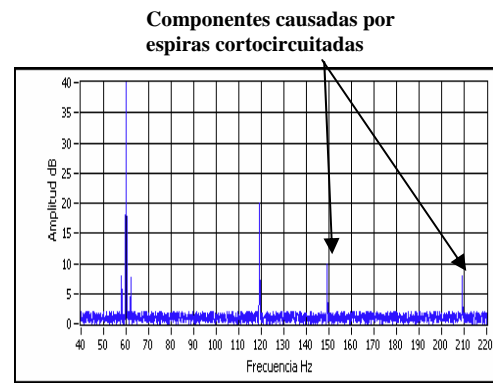


Figura 5. Componentes espectrales de un motor ideal con espiras cortocircuitadas

VI. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El proceso comienza con la puesta en marcha del motor a evaluar. Una vez que está funcionando en estado estable, señales de corriente de línea y voltaje de fase son sensadas y acondicionadas mediante un transductor adecuado para cada una, de manera que se acople a las necesidades del sistema de adquisición de datos, que es la siguiente etapa. En ésta, se digitaliza la señal y se almacena en una PC. Éstas se filtran digitalmente con el fin de dejarlas listas para que entren a una "máquina" digital de detección de fallas, que no es más que un algoritmo que analiza las características de las señales procesadas e implementa los criterios de MCSA para identificar la naturaleza y gravedad de la falla. Al mismo tiempo se envían los datos de las señales de corriente y voltaje en el dominio del tiempo y frecuencia, sea a una hoja de cálculo, a una Base de Datos estandarizada o simplemente no se almacena a criterio del usuario. Finalmente, se genera un reporte que se guarda en la PC.

El sistema funciona en varias partes constitutivas que son:

- Motor.
- Transductor.
- Adquisición.
- Procesamiento digital de señales.
- Detección de la falla usando MCSA.
- Almacenamiento de datos.
- Reporte.

Un esquema de esta arquitectura se encuentra en la Figura 6.

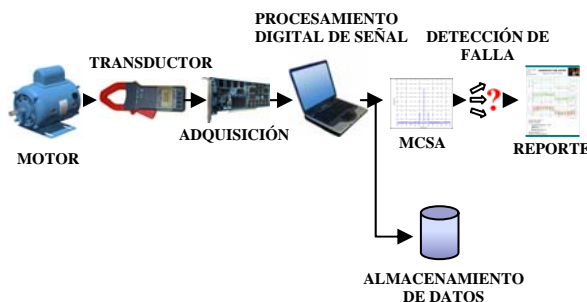


Figura 6. Diagrama de bloques del sistema.

Al analizar el primer bloque, se determinó que el motor a ser monitoreado con MCSA debe cumplir las siguientes características:

- El motor de inducción puede ser trifásico o monofásico, con rotor tipo jaula de ardilla.
- Se debe tener acceso a la línea de alimentación al motor, aún cuando éste se encuentre ubicado en una zona inaccesible.
- Para detectar barras rotas, el motor debe operar con al menos el 75% de su carga nominal para detección de barras rotas.
- El motor debe manejar carga constante.
- El motor no debe tener ningún tipo de control de velocidad, es decir debe operar a velocidad constante.

MCSA es un método aplicable en motores de cualquier potencia siempre y cuando el sensor de corriente sea el adecuado para sentir los niveles de corriente del motor.

Por otra parte, al analizar los transductores necesarios para la implementación del proyecto, se ha definido dos clases: un transductor de corriente y uno de voltaje.

El sensor de corriente debe cumplir con las siguientes características: aplicarse con un método no invasivo, poder medir un rango de corriente de al menos el valor nominal o de plena carga del motor a ser evaluado, la señal de salida debe conservar todas las características de la corriente que circula por la

línea de alimentación al motor y debe poder ser acondicionada al nivel requerido por el sistema de adquisición de datos. Además, debe tener un ancho de banda suficiente para sentir las bandas laterales más alejadas de la fundamental.

Por otro lado, el sensor de voltaje debe cumplir con características similares pero además debe ser capaz de sentir el voltaje de alimentación al motor, que para una red en bajo voltaje puede ser 208/120 V.

Para el diseño del sistema de *adquisición de datos*, las consideraciones generales a ser tomadas en cuenta son:

Frecuencia máxima de la señal, ancho de banda, rango y resolución del convertor A/D.

De acuerdo a la ecuación (1) la máxima frecuencia teórica de las bandas laterales es:

$$f_{sm\acute{a}x} = 60 * (1 + 2s) \Big|_{s=1} = 180Hz \quad (3)$$

Según la ecuación (2) la máxima frecuencia teórica del pico de cortocircuito que puede ser detectada está dada por:

$$f_{sm\acute{a}x} = 60(n/p \cdot 2 \cdot (1-s) + 1) \Big|_{n=5, s=0, p=2} = 360Hz \quad (4)$$

El ancho de banda del sistema de adquisición no puede permitir que haya ganancia negativa en las frecuencias de interés ya que su amplitud determina el diagnóstico del motor. Es decir, que el sistema no puede permitir que haya una atenuación de -3dB en 180 Hz en un caso y 360 Hz en otro ya que esto puede generar un diagnóstico erróneo. De esta manera, es conveniente que la frecuencia de corte del sistema de adquisición sea algo mayor a la frecuencia máxima, es decir, alrededor de 500 Hz para asegurar que se evite cualquier tipo de pérdidas en las bandas inferiores.

La amplitud de la entrada está definida por la amplitud que puede recibir el convertor A/D que digitalice la señal. Ya que la alta velocidad de transformación no es imprescindible y la frecuencia de trabajo no se acercará a la frecuencia de corte del dispositivo puesto que es en banda base, el convertor A/D es de tipo aproximaciones sucesivas.

La resolución de este dispositivo es determinada por el número de bits de salida del convertor:

$$R = \frac{D}{2^N} \quad (5)$$

donde:

R: Resolución dada en Voltios.

D: Rango dinámico de la señal en Voltios.

N: Número de bits del conversor ADC.

Para el proyecto será necesario que la amplitud de entrada al sistema de adquisición sea diseñado para usar señales de -15 y 15 voltios según se indica en la sección VI, en donde el rango dinámico es 30 V y será necesario un dispositivo con un mínimo de resolución de 12 bits, de manera que:

$$R = \frac{30V}{2^{12}} = 7,32mV \text{ máximo.} \quad (6)$$

Lo que quiere decir que el mínimo valor a ser leído es 7,32 mV y que se puede tener una relación señal a ruido de cuantización (SQNR), de acuerdo a la expresión aproximada:

$$SQNR = 6,02 * N \quad (7)$$

de donde se obtiene que para 12 bits, la SQNR es de aproximadamente 74 dB.

Muestreo

La velocidad de muestreo depende de la frecuencia máxima que se quiera analizar. Para esta consideración se debe tomar en cuenta el teorema de Nyquist de muestreo [8] para evitar el fenómeno de *Aliasing*. Ya que la máxima frecuencia a muestrear es de 500 Hz, la frecuencia mínima teórica de muestreo ideal debería ser 1 kHz o muestras por segundo (*Samples per second: S/s*), pero en la práctica, se tomó en cuenta el rango entre 2,5 y 4 kS/s.

Ya que existen dos canales, y que la simultaneidad de la medición no es crítica pero sí es necesaria, el proyecto puede utilizar el muestreo simultáneo, o por multiplexación que pueden ser los óptimos para adquirir señales de voltaje y corriente.

Los datos obtenidos se almacenan dependiendo de la arquitectura del sistema, ya sea en una memoria interna o puede ser DMA (*Direct Memory Access*) a través de un multiplexor que envía los datos directamente a la memoria RAM del computador.

Filtro Anti-Aliasing.

Para evitar cualquier tipo señal análoga parásita que tenga una frecuencia mayor a la frecuencia de Nyquist y aparezca en el espectro digital por el efecto de *Aliasing*, se debe poner a la entrada un filtro analógico tipo pasabajas de manera que se tenga una atenuación a nivel de ruido de cuantización en la frecuencia de Nyquist.

Ya que es importante que la respuesta sea lo más lineal posible en la banda de paso, y que la banda de transición debe ser lo más angosta posible, la topología a ser usada debe ser Butterworth de mínimo cuarto orden. La frecuencia de corte del filtro puede coincidir con el ancho de banda del sistema de adquisición, esto es alrededor de 500 Hz. El filtro debe llegar a tener una atenuación a nivel de ruido de cuantización a $f_s/2$. Esto es -72 dB entre los valores de 1,25 - 2 kHz [9].

Por otra parte, para evitar en lo posible el que el ruido interno ingrese a las señales del sistema, las conexiones tienen aislamiento capacitivo conectado a tierra, son en par trenzado y se ha implementado filtros pasabajas análogos que funcionan tanto como *anti-aliasing* como para filtrar ruido.

Procesamiento digital de señales

Se requiere implementar tres tareas: eliminación de periodicidad en frecuencia por efecto de muestreo, eliminación de ruido y componentes parásitas en la señal y la obtención del espectro de la señal.

Debido a que un muestreo de una señal analógica introduce en frecuencia una repetición del espectro centrado en n veces la frecuencia de muestreo ($n = 1, 2, 3...$), es indispensable utilizar un filtro digital pasabajas con una atenuación a nivel de ruido en por lo menos la frecuencia de muestreo sobre dos [8]. Con esto se logra anular frecuencias que aparecen en la representación digital de la señal pero que no existen en la realidad.

El diseño de este filtro puede coincidir con el de la eliminación digital de ruido y componentes parásitas.

Ya que el sistema necesita que la respuesta en banda de paso sea lo más plana posible y que el error en ésta sea el mínimo, además de que la banda de transición no necesita ser muy angosta y la fase de respuesta en frecuencia no es analizada en ningún caso, la mejor elección es la de escoger un filtro IIR, tipo pasabajas de topología Butterworth de segundo o máximo cuarto orden en los que la frecuencia de corte sea $f_s/2 = 500$ Hz. Con esto se filtra cualquier ruido de alta frecuencia y cualquier alias producido por los armónicos de 60 Hz que puedan estar sobre la frecuencia de Nyquist u otras componentes parásitas, además de eliminar la periodicidad en frecuencia.

Por otra parte, al obtener el espectro de la señal, la resolución en frecuencia debe ser capaz de diferenciar un pico en la señal del

espectro de corriente o voltaje. Debido a que las frecuencias de interés pueden moverse por las variaciones de deslizamiento en un rango pequeño, el espaciamiento en frecuencia debe ser pequeño también, esto es, menor que 1.

Para tener una representación en frecuencia lo más aproximada a la realidad es necesario muestrear numerosos períodos de señal, de manera que si se obtiene 100 períodos, se podrá obtener un espectro cercano al real. Si la frecuencia de interés tiene una componente fundamental de 60 Hz, se debe muestrear por 1,6 segundos aproximadamente.

Si la frecuencia de adquisición es 4 kS/s y se muestrea por 1,6 segundos, el número de muestras a adquirir es de 6400.

Se tiene, además, que:

$$\Delta f = df = \frac{f_s}{N} = \frac{4kS/s}{6400} = 0,625Hz \quad (8)$$

Esto quiere decir que el espaciamiento en frecuencia será de 0,625 Hz, que es menor que 1 como se requería anteriormente.

Por otra parte, los algoritmos de FFT necesitan una secuencia de entrada que sea potencia de dos, así: $N=2^m$. Si esto no es así, se debe implementar *Zero Padding* a dicha secuencia.

Para evitar el efecto de dispersión de energía por no iniciar el muestreo desde exactamente el inicio del periodo en la práctica y porque las señales a ser tratadas no son periódicas en tiempo infinito en la adquisición, se pasa la señal por una "ventana" que minimice los efectos de la discontinuidad. Esto es, multiplicar en el dominio del tiempo una señal por otra conocida como "ventana", cuya amplitud varía lentamente y decae gradualmente a cero en las discontinuidades. El resultado de esto es una señal con discontinuidades muy pequeñas o sin ellas. La ventana que se ajusta mejor para esta aplicación es la tipo Hanning, [10].

Almacenamiento de datos

El almacenamiento de datos es necesario en cualquier proceso industrial [11], y estos pueden variar mucho entre sus naturalezas. En el caso de este sistema, la elección de las variables a almacenar es una tarea relativamente sencilla. Los datos deben ser útiles para la generación de reportes y el análisis de datos con herramientas externas que sean accesibles en la mayoría de los computadores dedicados a este fin. Éstas son: variación de tiempo, señal de corriente en tiempo, señal de voltaje en tiempo, variación de

frecuencia, señal de corriente en frecuencia, señal de voltaje en frecuencia.

VII. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.

El proyecto está dirigido a monitorear el estado de motores de inducción siguiendo los siguientes atributos [12]: ser confiable, ser fácil y seguro de operar, proveer buena relación costo-beneficio, ser no invasivo, ser capaz de adquirir, procesar, interpretar y almacenar varios conjuntos de datos, poseer criterios de escalabilidad y de optimización de recursos [13], mostrar diagnóstico al terminar la prueba, generar reportes automáticamente.

Software a utilizar

El sistema está desarrollado en LabVIEW, que es una aplicación para desarrollo de programas parecido a otros sistemas basados en C++ o BASIC. LabVIEW no está basado en líneas de código sino en programación gráfica: Lenguaje G [12]. Además posee librerías específicas de análisis de señales, y adquisición de datos.

Transductores

Por otra parte, se ha determinado que una de las mejores opciones que cumple con los requerimientos para el sensado de corriente es la pinza amperimétrica Fluke 80i-600A, mientras que para sensar el voltaje, la mejor opción es un transformador simple que tenga un factor de conversión necesario. Dependiendo de la amplitud de corriente y voltaje, ambos transductores pueden ser acondicionados a través de divisores de voltaje como se muestra en las Figuras 7 y 8.

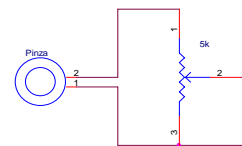


Figura 7. Acondicionamiento de la señal de corriente.

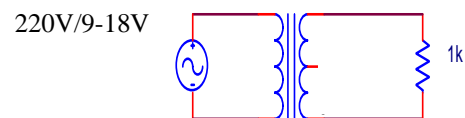


Figura 8. Acondicionamiento de la señal de voltaje.

Filtro Anti-Aliasing

La banda de paso del filtro debe ser lo más plana posible y la banda de transición lo más angosta posible. Por esto el filtro es de tipo

Butterworth, de séptimo orden diseñado utilizando el programa *Filterlab* distribuido en línea por *Microchip*. En una simulación e ORCAD Pspice, la magnitud de salida a una señal de entrada de 15 V en 2 kHz es de 4,2 mV, lo que corresponde a una atenuación aproximadamente de -71 dB que está en un nivel bastante aceptable para estas frecuencias, mientras que el ancho de banda está en 544 Hz. El filtro ha sido implementado en cuatro etapas de topología Sallen-Key, la primera de primer orden y las otras tres de segundo orden cuyas funciones de transferencia son:

$$G(s) = \frac{1}{0,00027s + 1} \quad (9)$$

$$G(s) = \frac{1}{4,85E - 8s^2 + 5,18E - 4s + 1} \quad (10)$$

$$G(s) = \frac{1}{6,94E - 8s^2 + 3,28E - 4s + 1} \quad (11)$$

$$G(s) = \frac{1}{7,53E - 8s^2 + 1,44E - 4s + 1} \quad (12)$$

Equipo de adquisición de datos

Uno de los equipos de adquisición de datos más convenientes para la implementación del sistema es la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6900. La velocidad de muestreo es de 4 kS/s configurada por software, utiliza una interfase USB, se usa un rango de $\pm 15V$, la conversión A/D es por aproximaciones sucesivas de 14 bits, con un SQNR de 84 dB y envía los datos a una PC con DMA. Además tiene ocho canales de entrada analógica de los cuales se usan cuatro con muestreo simultáneo para las señales de corriente y voltaje (dos canales para cada una en configuración diferencial), y diez de E/S digitales de los que se usan dos. La eliminación a distintas fuentes externas de ruido se la realiza principalmente utilizando par trenzado para la conexión entre la DAQ, el filtro Anti-Aliasing y las señales de los transductores, además de tener un plano de tierra bordeando la tarjeta impresa en donde se encuentra el filtro.

Procesamiento digital de señales

La eliminación de la periodicidad en frecuencia debido al muestreo, de ruido y componentes parásitas se la hace a través del filtro digital descrito anteriormente que es implementado en un paquete llamado *Express* que viene integrado en LabVIEW.

Por otro lado, para hallar la representación frecuencial se toma en cuenta que el análisis en frecuencia es por transformada de Fourier con implementación mediante FFT cuya secuencia de entrada debe usar *zero padding*.

La optimización de FFT es mediante promedio RMS con ventana tipo Hanning.

Para la implementación del algoritmo FFT, tanto para corriente como para voltaje, se utilizó la herramienta *Power Spectrum* de *Signal Express* integrado en LabVIEW que usa *zero padding* [15].

Algoritmo de MCSA

El algoritmo de MCSA es implementado en una función que recibe como datos un arreglo de valores de magnitud de corriente o voltaje en frecuencia, espaciamiento en frecuencia, frecuencia de red, número de polos y la velocidad real del motor.

Con estos datos se calculan las frecuencias de las bandas central y laterales esperadas, y se halla su índice correspondiente en el espectro.

A su vez, se detecta los picos de los espectros con la función "Peak Detector". Con la función "In Range?" se evalúa si existe un pico entre los límites de cada índice anteriormente calculado menos dos muestras y el mismo índice más dos muestras. De existir, se halla el valor de la magnitud del pico. De la magnitud de los picos correspondientes a las bandas laterales se toma la de mayor valor y es restada de la amplitud del pico en la frecuencia fundamental (ΔV y ΔC). Estos valores corresponden a la salida de la función. Si es que algún pico de las bandas laterales no existiere se envía un valor de amplitud pico de -1000 dB que restado de la amplitud de la fundamental, de existir, equivaldría al criterio que el motor está en buen estado según la Tabla 1. Si el pico de la banda fundamental no existe, se envía un valor de salida de -1 que equivale a decir que existe un error en el proceso de detección. De acuerdo a la salida de esta función se determina si la falla realmente existe o no de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2. Criterio de detección de barras rotas.

ΔV (dB)	ΔC (dB)	Salida
-1	Cualquier valor.	"electrico"
Cualquier valor	-1	"electrico"
>42 dB.	> 54 dB.	"excelente"
	Entre 48 y 54 dB	"bueno"
	Entre 42 y 48 dB	"moderado"
	Entre 36 y 42 dB	"roto"
	Entre 30 y 36 dB	"múltiples"
	≤ 30 dB.	"severo"
< 42 dB.	Todos los valores	"electrico"

De acuerdo a la Tabla 2, se muestra un diagnóstico y una recomendación que corresponde a la Tabla 3.

Tabla 3. Diagnósticos y recomendaciones que muestra el equipo.

Salida	Diagnóstico a mostrar	Recomendación a mostrar
“excelente”	El motor está en excelentes condiciones.	No se necesita tomar ninguna acción.
“bueno”	El motor está en buenas condiciones.	No se necesita tomar ninguna acción.
“moderado”	Es probable que existan barras rotas en el motor.	Tener precaución y mantener en observación al motor. El motor puede seguir funcionando.
“roto”	El motor tiene barras rotas en su interior.	El motor puede seguir trabajando, pero hay que enviarlo a mantenimiento.
“multiples”	El motor tiene barras rotas y posiblemente otra fuente de alta resistencia.	Sacar de funcionamiento el motor y enviar al mantenimiento.
“severo”	El motor tiene un daño severo.	Sacar el motor inmediatamente de funcionamiento. Enviar a revisión técnica.
“eléctrico”	El motor tiene un daño eléctrico o existe un error en el proceso de detección.	Revisar el estado de la red eléctrica y las configuraciones de software.

En el caso de detección de cortocircuitos, se toman en cuenta como entradas a la función una estructura tipo “case” cuyo controlador es un booleano que indica 1 si existió un pico en la frecuencia fundamental con lo cual se permite la detección según el criterio de MCSA de voltaje y corriente de la sección III. Si el booleano indica 0, se envía un dato de error a la variable de salida.

Al lazo de código entran dos cantidades booleanas que dicen si existió o no un pico en las frecuencias de interés y escriben un mensaje en la variable “resultado” según la Tabla 4.

Tabla 4. Criterio de detección de cortocircuito.

Pico de corriente	Pico de voltaje	Salida
1*	1	eléctrico
0	1	error
1	0	falla
0	0	bien

* 1: Sí se presentó pico, 0: no se presentó pico

El algoritmo implementado considera todas las posibilidades a ocurrir, asegurando la

discriminación entre un proceso correcto, con datos coherentes y uno con datos erróneos o problemas eléctricos.

En base a la Tabla 4, se escriben las recomendaciones mostradas en la Tabla 5:

Tabla 5. Diagnósticos y recomendaciones que muestra el equipo.

Salida	Diagnóstico a mostrar	Recomendación a mostrar
“error”	Existe un error en el proceso de detección.	Revisar el estado de la red eléctrica y las configuraciones de hardware y software.
“eléctrico”	Es probable que exista un error en la red eléctrica.	Revisar la red eléctrica a la que esta conectada el motor.
“falla”	El motor tiene bobinas cortocircuitadas en su interior.	Sacar de operación el motor y llevarlo a mantenimiento.
“bien”	El motor se encuentra en buen estado.	No se necesita tomar ninguna acción.

Almacenamiento de datos y generación de reportes

Se ha implementado una subrutina para que los datos necesarios sean destinados a una hoja de cálculo compatible con Excel o a una base de datos en MS Access. Para esto se han debido configurar los nombres de orígenes de datos previamente. La generación de reportes es a través de DIAdem 9.0 que es un software especializado en esta tarea y está integrado con LabVIEW.

Se ha diseñado una plantilla en la que se incluye: Gráfica general para las formas de onda en dominio del tiempo para corriente y voltaje, gráfica general para las formas de onda de corriente en frecuencia, gráfica general para las formas de onda de voltaje en frecuencia, diagnóstico, frecuencia de red, velocidad real del motor, número de polos, recomendación, adonde se enviaron los datos, fecha y hora de la ejecución del proceso.

VIII. VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL

Tanto para la detección de barras rotas, así como para la detección de espiras cortocircuitadas se ha efectuado pruebas individuales a cada una de las partes constitutivas del sistema y pruebas globales con motores que se conoce tienen las fallas en estudio y en motores en buen estado.

En el caso de barras rotas se diseñó un banco de pruebas que consiste en un motor con barras rotas para ser diagnosticado,

adaptado a un generador sincrónico conectado a un banco de resistencias. El generador con carga eléctrica constituye la carga para el motor.

El motor es de alimentación Monofásica, 220V, 60 Hz, 16A, 3 CV, 2 polos, 3500 RPM.

La fuente de alimentación del motor esta en serie con el contactor del equipo de diagnóstico mientras que la pinza se pone alrededor de uno de los dos cables de alimentación.

Al tomar las formas de onda de corriente y voltaje se notan los picos de frecuencia en corriente (Figura 9) calculados con la ecuación (1), mientras que en las mismas ubicaciones en la señal de voltaje (Figura 10), estos picos no existen. El diagnóstico mostrado por el programa se encuentra en la Figura 11, mientras que en las Figuras 12 y 13 constan las vistas generales de las paletas de configuración y diagnóstico.

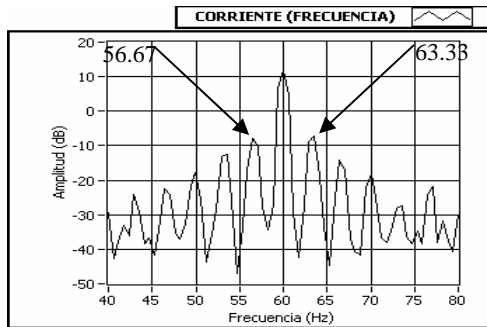


Figura 9. Espectro de frecuencias de corriente

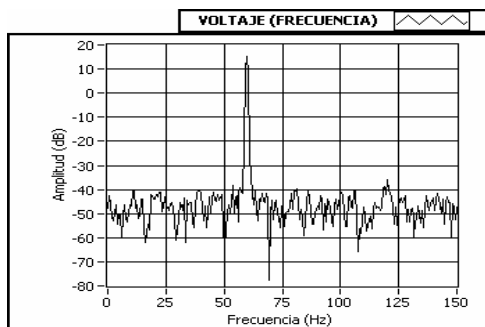


Figura 10. Espectro de frecuencias de Voltaje

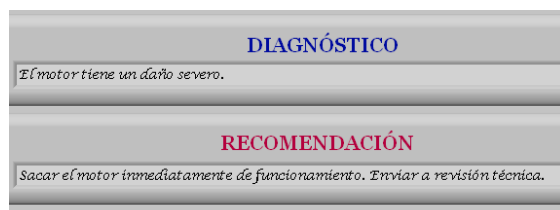


Figura 11. Paleta de diagnóstico y recomendación.



Figura 12. Paleta de configuración



Figura 13. Paleta de diagnóstico

En el caso de espiras cortocircuitadas el banco de pruebas consiste en un motor modificado para conseguir el cortocircuito de varias espiras en el devanado estático. El motor es de alimentación Monofásica, 120V, 60 Hz, 3A, 1/3 HP, 4 polos, 1765 RPM.

La fuente de alimentación al motor y la pinza están dispuestas de igual manera que para el caso anterior.

Al analizar las formas de onda de corriente y voltaje aparecen los picos de frecuencia en corriente (Figura 14) calculados con la ecuación (2), mientras que en las mismas ubicaciones en la señal de voltaje (Figura 15), estos picos no existen. El diagnóstico mostrado por el programa se encuentra en la Figura 16.

En las Figuras 17 y 18 muestran las vistas generales de las paletas de configuración y diagnóstico, muy similares a las paletas usadas en el caso de detección de barras rotas.

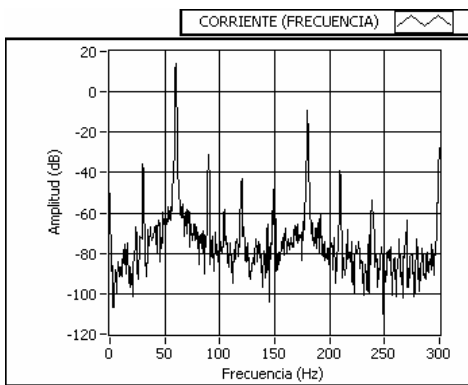


Figura 14. Espectro de frecuencias de Corriente

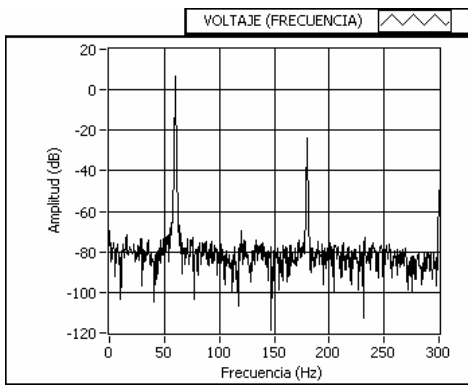


Figura 15. Espectro de frecuencias de Voltaje

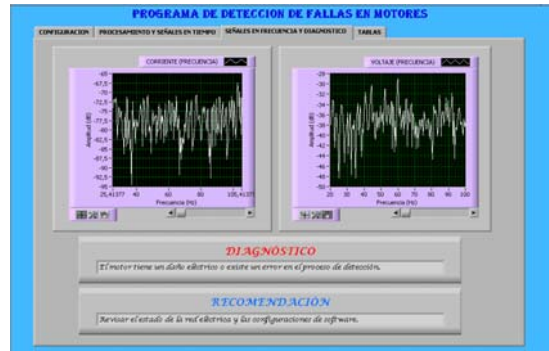


Figura 18. Paleta de diagnóstico.

Para ambas fallas se puede acceder a los datos almacenados para verificación u otras aplicaciones. En la Figura 19 se muestra una gráfica hecha en Excel con los datos almacenados por el programa, mientras que la Figura 20 muestra algunos datos almacenados en MS Access.

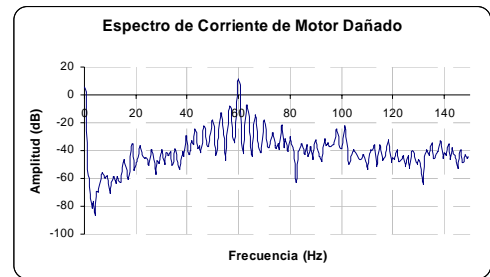


Figura 19. Espectro de corriente desarrollado en Excel.



Figura 16. Paleta de diagnóstico y recomendación.



Figura 17. Paleta de configuración

CorrienteTiempo	VoltajeTiempo	Frecuencia	CorrienteFrecuencia	VoltajeFrecuencia
-4,6167052	-8,9019401	0	2,75465447	-36,2772477558763
-3,7087660	-7,0209377	0,58823529	-0,2549416	-36,4260121807362
-0,1467672	-0,2708997	1,17647058	-53,080718	-51,5140825474706
-0,3904596	-0,6982103	1,76470588	-63,072053	-56,0364454191327
-0,8013564	-1,3813545	2,35294117	-72,688303	-46,9266994658188
-1,3704952	-2,2703566	2,94117647	-77,353589	-45,8781427038205
-2,0452904	-3,2526805	3,52941176	-82,226393	-54,9429007997564
-2,7398286	-4,1859227	4,11764705	-70,394865	-44,328327912475
-3,3524066	-4,9302629	4,70588235	-73,964059	-41,4997783351374
-3,7856174	-5,3747580	5,29411764	-75,229605	-40,2517305910596
-3,9643616	-5,4568930	5,88235294	-74,465346	-39,388060793903
-3,8483274	-5,1696812	6,47058823	-73,047490	-48,8657803704438
-3,4372269	-4,5535352	7,05882352	-70,856073	-43,5533484923526
-2,7686711	-3,6810361	7,64705882	-72,110409	-44,3601585701013
-1,9088991	-2,6429153	8,23529411	-60,457661	-52,2252124823209
-0,9458822	-1,5348618	8,82352941	-59,299728	-49,764835327882
3,56109602	-0,4429793	9,41176470	-61,044031	-54,3593384690116
0,95326695	0,56792518	10	-59,363620	-46,4829922412263
1,74465284	1,45876006	10,5882352	-60,473750	-51,5497225586262
2,37059919	2,21607074	11,1764705	-65,939093	-65,772532414705
2,81752577	2,86058041	11,7647058	-67,901543	-51,9950121454378
3,10673553	3,38049820	12,3529411	-67,70618	67,70618
3,10673553	3,38049820	12,3529411	67,70618	67,70618

Figura 20. Datos almacenados en MS Access

En la Figura 21 se muestra un ejemplo de los reportes generados por el sistema. Tanto para el caso de barras rotas así como para el de cortocircuitos el reporte muestra los parámetros que aparecen en el ejemplo.

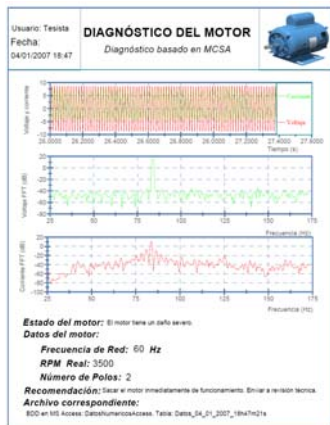


Figura 21. Reporte

En resumen, los transductores de corriente y voltaje se comportan de manera correcta, el Filtro *anti-aliasing* tiene una frecuencia de corte en 560 Hz, no existen errores de programación, las señales visuales están acordes a la configuración, ya que se muestra corriente y voltaje en tiempo y frecuencias en los rangos necesarios. Se detectó con éxito los picos de corriente en frecuencias: fundamental, bandas laterales y de cortocircuitos. Nunca se dieron resultados absurdos, los datos en tablas y bases de datos se almacenaron correctamente y los reportes se generaron con éxito.

IX. CONCLUSIONES

- La falla más común en el rotor de un motor de inducción es la ruptura de las barras en la jaula de ardilla, debido a esfuerzos térmicos o mecánicos a los que el motor pueda someterse.
- MCSA aplicado para la detección de barras rotas, es usado principalmente para decidir si un motor continúa o no operado, pues es capaz de valorar la severidad de la falla.
- Tener barras rotas en el motor, origina dos bandas laterales en el espectro de frecuencia de la corriente de alimentación, ubicadas a frecuencias del doble de la frecuencia de deslizamiento alrededor de la frecuencia fundamental, según la ecuación (1).
- Tener espiras cortocircuitadas en el motor, origina varias frecuencias periódicas ubicadas dependiendo de la frecuencia de red, el deslizamiento y el número de polos del motor según la ecuación (2)
- MCSA para detección fallas de barras rotas es aplicable en motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos o monofásicos, con carga constante y de alrededor del 75 % de su valor

nominal y que no tengan asociados variadores de velocidad.

- MCSA para detección fallas de cortocircuitos en las espiras del estator es aplicable en motores de inducción tipo jaula de ardilla trifásicos o monofásicos, en motores de corriente continua que no tengan asociados variadores de velocidad.
- Para implementar MCSA se requiere sensar las señales de voltaje y corriente de alimentación al motor.
- En el proceso de adquisición de datos se ha construido filtros *anti-aliasing* para evitar que cualquier tipo de señal analógica parásita, que tenga una frecuencia mayor a la frecuencia de Nyquist, aparezca en el espectro digital por el efecto de *Aliasing*. Estos filtros analógicos pasabajas tienen como función atenuar las componentes de alta frecuencia de la señal analógica.
- Debido a que el muestreo de una señal analógica introduce en frecuencia una repetición del espectro centrado en n veces la frecuencia de muestreo ($n = 1, 2, 3...$), es indispensable utilizar un filtro digital pasabajas con una atenuación a nivel de ruido en por lo menos la mitad de la frecuencia de muestreo, para anular frecuencias que aparecen en la representación digital de la señal pero que en la realidad no existen.
- Las características de la FFT que deben ser tomadas en cuenta son la frecuencia de muestreo, la resolución en frecuencia, el número de muestras, el tamaño de la FFT, la mejora de medición a través del promedio, la ponderación y las ventanas a usar.
- El algoritmo de FFT requiere que la secuencia de entrada tenga un número de muestras potencia de dos, sea con muestras reales o completadas con *zero padding*.
- El criterio de detección de barras rotas y el diagnóstico de la severidad de la falla, se basan en calcular la diferencia existente entre el pico de la frecuencia fundamental y la mayor de las bandas laterales.
- El criterio de detección de espiras cortocircuitadas de basa en determinar la existencia o no de picos de corriente en las frecuencias calculadas con (2)
- El sistema cumple con criterios de confiabilidad, seguridad y escalabilidad.
- Sería simple adicionar la implementación de la detección de varios tipos de fallas en motores que estén diagnosticadas con MCSA, no solo para motores de inducción, sino para motores DC y generadores eléctricos.
- Con la ayuda del filtraje digital se puede llegar a tener una señal más nítida de manera que ésta pueda ser analizada de mejor manera.

X. RECOMENDACIONES.

- El tiempo de diagnóstico difiere según la configuración del sistema, es así que tomará más tiempo si se genera reportes o almacena los datos del diagnóstico. Es recomendable configurar el sistema solo con los requerimientos necesarios.
- Es importante que el sistema tenga un aislamiento frente a ruido o contra elementos corrosivos que pueden presentarse en un ambiente industrial y dañar el equipo.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] THOMSON, William; GILMOR, Ronald, Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives - Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories. Proceeding of the thirty-second turbomachinery symposium, 2003.
- [2] NANDI, Subhasis, TOLIYAT, Hamid, Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines- a Review. Texas A&M University, 1999.
- [3] THOMSON, William; On-Line MCSA to Diagnose Shorted Turns in low voltage Sattor Windings of 3-phase induction Motors Prior to failure, The Robert Gordon University, Escocia, 2001.
- [4] PENROSE, Howard, Applications for Motor Current Signature Analysis, BJM Corp, Old Saybrook, 2004.
- [5] EQUIPMENTHEALTH "Motor Current Signature Analysis" Obtenido en línea el 25 de abril de 2006. Disponible en: <http://equipmenthealth.com/mcsa.htm>
- [6] EL HACHEMI, Mohamed, A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Fault Detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 47, No 5, Octubre, 2000.
- [7] BARRETO, Rafael, Diseño e implementación de un sistema de detección de fallas de cortocircuitos en los bobinados estáticos en motores de inducción utilizando algoritmos de análisis espectral de corrientes (MCSA), Universidad San Francisco de Quito, Quito, diciembre 2006.
- [8] OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R.; BUCK, J., Discrete-Time Signal Processing. Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [9] BAKER, Bonnie, Anti-Aliasing Analog Filters for Data Acquisition Systems, Microchip Technology Inc. 1999.
- [10] NATIONAL INSTRUMENTS, LabVIEW Measurements Manual. Abril, 2003.
- [11] GILLBLAD, Daniel; KREUGER, Per; LEVIN, Björn; RUDSTRÖM, Asa, Preparation and Analysis of multiple source

industrial process data. SISC Technical Report. Septiembre, 2005.

- [12] FENGER, Mark; LLOYD, Blake, Case Histories of Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives. Iris Power Engineering Inc. Canadá, 2002.
- [13] HERRERA, Nelson, Diseño e Implementación de un Sistema Prototipo SCADA de Monitoreo y Control de un Proceso Industrial a Través de una Red de Computadores TCP/IP, Apoyados en LabVIEW y PID, Supervisory Control ModuleToolkits de LabVIEW. Escuela Politécnica Nacional. Quito, junio, 2006.
- [14] PILLAY, P.; XU, Z., "Motor Current Signature Analysis". IDM Controls, Georgia. 1996.
- [15] NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW Analysis concepts. 2004.



Rafael Barreto J. Nacido en Caracas, Venezuela, el 26 de octubre de 1982, realizó sus estudios en el Colegio Sebastián de Benalcázar y realizó sus estudios superiores en la Universidad San Francisco de Quito obteniendo los títulos de Bachelor of Science en diciembre de 2005 y de Ingeniero Eléctrico/Electrónico en diciembre de 2006.

e-mail: rafael.barreto.jijon@gmail.com



Nátali Morales M. Nacida en Quito el 20 de febrero de 1983, realizó sus estudios secundarios en el Colegio Manuela Cañizares y continuó con sus estudios en la Escuela Politécnica Nacional. Obtuvo el título de Ingeniera en Electrónica y Control en el año 2007 y actualmente realiza su proyecto de titulación "Diseño de una subestación a nivel de 500 kV, aplicación S/E Pífo de Transelectric S.A" para obtener el título de Ingeniera Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia.

e-mail: nathali.morales@gmail.com