

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DIGITAL PARA DIAGNÓSTICAR FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DIGITAL PROTOTYPE TO DIAGNOSE FAULTS IN INDUCTION MOTORS

FERNANDO VILLADA DUQUE

Ingeniero Electricista, Ph.D, Universidad de Antioquia. fvillada@udea.edu.co

RICARDO A. VELÁSQUEZ V

Ingeniero Electrónico, Universidad de Antioquia. ricardo@microe.udea.edu.co

DIEGO R. CADAVID C

Ingeniero Electricista, M.Sc, Universidad de Antioquia. dcavid@udea.edu.co

Recibido para revisar octubre 06 de 2006, aceptado febrero 05 de 2007, versión final febrero 28 de 2007

RESUMEN: En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo digital utilizando un procesador de señales digitales DSP, al cual se le han incorporado dos algoritmos para diagnosticar fallas en el estator de motores de inducción. El primer algoritmo utiliza las redes neuronales artificiales para estimar la corriente de secuencia negativa, la cual es utilizada como indicador de falla. El segundo algoritmo utiliza la impedancia de secuencia inversa como indicador de falla. Se presenta la estructura general del prototipo y su implementación. Se incluyen los resultados obtenidos experimentalmente en un motor de 3 HP utilizando medida en línea a través del prototipo digital.

PALABRAS CLAVE: Procesamiento digital de señales (DSP), Redes neuronales, Motor de inducción, Fallas en estator, Diagnóstico.

ABSTRACT: The development of a digital prototype using a digital signal processor (DSP), which can perform two algorithms to diagnose faults in the stator of induction motors is shown in this work. The first algorithm uses artificial neural networks to estimate the negative sequence current, which is used as a fault indicator. The second algorithm uses the negative sequence impedance as a fault indicator. The general structure of the prototype and its implementation are presented in detail. Experimental results by online measurements using a 3 HP induction motor are also included.

KEYWORDS: Digital signal processors (DSP), Artificial neural networks, Induction motors, Stator faults, Diagnosis.

1. INTRODUCCIÓN

La detección temprana de las fallas en los motores de inducción es de vital importancia porque evita la posibilidad de un paro no deseado y reduce los costos por lucro cesante. Una de sus fallas más frecuentes es el cortocircuito en las bobinas del estator, la cual empieza con pocas espiras hasta llegar a una falla más severa [1].

Las técnicas recientes para diagnosticar fallas en los motores de inducción comprenden el

análisis espectral de corriente, el flujo axial de dispersión, la impedancia de secuencia inversa, el par electromagnético y la aplicación de redes neuronales artificiales.

El análisis espectral de corriente ha mostrado sensibilidad al diagnóstico de fallas en las barras del rotor del motor de inducción pero tiene limitaciones en la detección de fallas en el estator [2]. El flujo axial de dispersión [3], la impedancia secuencia inversa y el par electromagnético [4] han mostrado una

relación directa con el nivel de falla estática pero tienen limitaciones en la etapa inicial cuando la falla ocupa una o dos espiras. De estas últimas, la impedancia de secuencia inversa ha mostrado ventajas debido a relación directa con el nivel de falla y se mantiene aproximadamente constante para diferentes condiciones de carga.

Normalmente, las técnicas de diagnóstico requieren que el usuario tenga algún grado de experiencia para distinguir entre una operación normal y un modo de falla potencial; con el fin de sobrellevar esta limitación, en la actualidad, las técnicas emergentes como la Inteligencia Artificial y en particular las Redes Neuronales Artificiales (RNA), están siendo aplicadas al monitoreo por condición para diagnosticar fallas eléctricas en los motores de inducción [5]. Estas últimas presentan la ventaja de no requerir el conocimiento del modelo del sistema en sí mismo; si no que es suficiente con realizar un mapeo de las variables de entrada y salida de dicho sistema.

En la práctica el monitoreo por condición se realiza en línea, por lo que se hace necesario implementar dispositivos electrónicos para sensar las señales de interés y luego procesarlas con el fin de obtener información del estado de la máquina. El procesador de señales digitales (DSP por sus siglas en inglés) es uno de tales dispositivos, el cual ha sido usado ampliamente para implementar algoritmos de monitoreo en línea.

En este artículo, se presenta la estructura general de un prototipo digital utilizando DSP, al cual se le han incorporado dos algoritmos de falla para detectar cortocircuitos en el devanado del estator del motor de inducción. Inicialmente se describen las señales sensadas: el cambio en la corriente de secuencia negativa y la impedancia de secuencia inversa. Luego, se presentan la arquitectura general del prototipo, el software de la interfaz gráfica y finalmente se presentan los resultados de la aplicación experimental, para lo cual se utilizó un motor de inducción de 3 Hp acondicionado para inducirle cortocircuitos entre espiras del devanado del estator.

2. ÍNDICES DE DIAGNÓSTICO

Los índices de diagnóstico implementados en este trabajo son el cambio en la corriente de secuencia negativa y la impedancia de secuencia inversa.

2.1 Corriente De Secuencia Negativa

Las componentes de secuencia de tensión y corriente de un motor de inducción están dadas por [6]:

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} & Z_{po} \\ Z_{np} & Z_{nn} & Z_{no} \\ Z_{op} & Z_{on} & Z_{oo} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ I_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde el índice p , n y o , significan las secuencia positiva, negativa y cero de los fasores de tensión y corriente respectivamente. Z_{ij} representa la impedancia de secuencia i debido a la secuencia j .

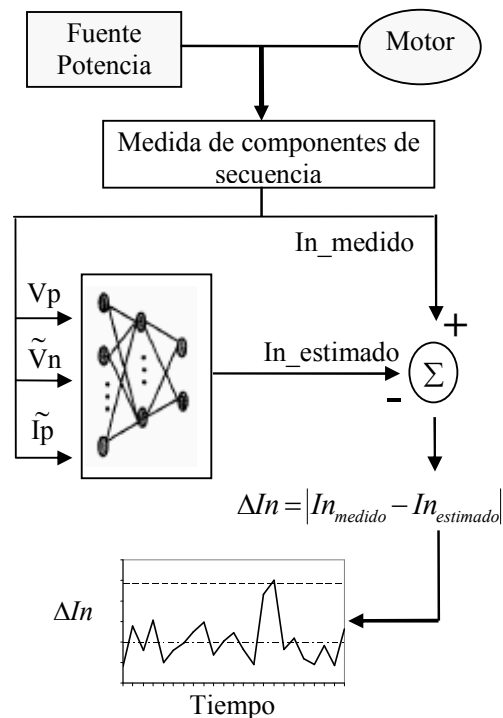


Figura 1. Esquema de diagnóstico de falla.

Figure 1. Fault diagnosis écheme.

Generalmente el motor es alimentado de un sistema trifásico sin neutro, por lo que la

corriente de secuencia cero, I_0 , es cero, y la ecuación (1) se reduce a:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} \\ Z_{np} & Z_{nn} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

De la ecuación (2) se observa que I_n varía con los cambios en la fuente de potencia, las asimetrías del motor y la carga. Cuando ocurre la falla, cambian las impedancias de la matriz dado que el motor llega a ser asimétrico. Entonces, la falla, puede ser detectada comparando I_n (obtenida con el motor y la fuente sana) con I_{n_falla} (obtenida con el motor fallado y la fuente sana). La desviación en la corriente I_n , ΔI_n , es el indicador de falla y se define como:

$$\Delta I_n = I_{n_falla} - I_n \quad (3)$$

El esquema para determinar el indicador de falla (ΔI_n) se ilustra en la figura 1. Para una condición de carga y desbalance, la red neuronal estima la corriente de secuencia negativa; para esa misma condición, estando el motor fallado, la diferencia entre la nueva corriente de secuencia negativa medida y la estimada por la red, indicará la condición de falla.

La red neuronal implementada es del tipo MPL, la cual estima las variaciones de la corriente de secuencia negativa, I_n , en función de las componentes de secuencia V_p , V_n e I_p . El algoritmo retropropagación fue elegido entre varios, debido a su velocidad de entrenamiento, interpolación, aproximación, generalización de funciones y reconocimiento de patrones. El número de neuronas de la capa oculta se estima por ensayo y error.

2.2 Impedancia De Secuencia Inversa

La impedancia compleja de secuencia inversa está definida por [7]:

$$Z_2 = \frac{V_n}{I_n}$$

Donde Z_2 es la impedancia de secuencia inversa.

Este método tiene las siguientes ventajas: Es muy fácil de aplicar, es prácticamente independiente de la velocidad del motor y es sensible a pocas espiras en cortocircuito.

La aplicación de este método supone una fuente de potencia sinusoidal, sin embargo, en la práctica la red de potencia contiene armónicos por lo que es necesaria una técnica de procesamiento de señales como la Transformada Rápida de Fourier (FFT). En este trabajo, la FFT es aplicada para extraer las componentes fundamentales y con ellas calcular la impedancia de secuencia inversa.

3. ARQUITECTURA DE HARDWARE DEL PROTOTIPO

La arquitectura del prototipo implementado se ilustra en la figura 2, con las siguientes componentes principales:

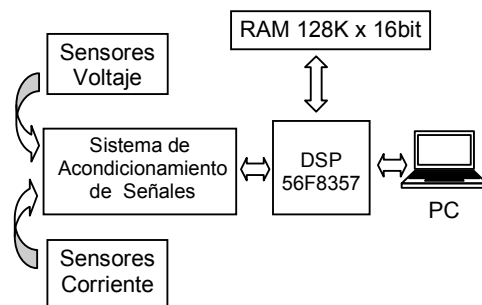


Figura 2. Diagrama de bloques del prototipo.

Figure 2. Block diagram of the prototype.

- Sensores de tensión.
- Sensores de corriente.
- Sistema de acondicionamiento de señales.
- Procesador de señales digitales (DSP por sus siglas en ingles).
- Memoria RAM.
- PC.

3.1 Sensores De Corriente

El sensado de corriente se hace a través de pinzas amperimétricas. El prototipo admite pinzas con las siguientes relaciones: 1mV/A, 3mV/A, 10mV/A, 12mV/A, 100mV/A y 400mV/A. Otras relaciones pueden ser adaptadas por medio de una calibración previa.

3.2 Sensores De Tensión

Para el sensado de tensión se diseñó un circuito especial que utiliza un divisor de tensión resistivo, con amplificadores de aislamiento AD202 de *Analog Devices* [9] y un amplificador operacional de propósito general OP777. El funcionamiento del circuito es el siguiente: el divisor resistivo (Resistencias R2 y R3 en la figura 3) hace las veces de atenuador, disminuyendo la tensión de entrada al rango de entrada máximo del amplificador de aislamiento (10Vpp). El amplificador de aislamiento utiliza una configuración no inversora con ganancia unitaria, este se encarga de proporcionar el aislamiento galvánico necesario para aislar la tierra del prototipo de la tierra del motor. Finalmente la señal de tensión pasa a través de un dispositivo OP777, el cual funciona como buffer para acople de impedancias con la siguiente etapa de acondicionamiento. Es de anotar que el dispositivo AD202 proporciona aislamiento galvánico de 2000Vpp, introduce una distorsión máxima de 0.25% en la señal sensada y el ancho de banda es de 2000Hz.

3.3 Acondicionamiento de Señales

Este sistema adecua las señales provenientes de los sensores de tensión y de corriente para ser capturadas en forma correcta por el conversor análogo digital (ADC por sus siglas en inglés) embebido en el DSP. Entre las adecuaciones

realizadas están la amplificación y el desplazamiento en el nivel para adaptarse a varios rangos de corriente y tensión, y para que las señales entren en el rango del ADC (0-3.3V); además de filtrado de altas frecuencias para cumplir con el teorema del muestreo de Nyquist y evitar de esta forma problemas de aliasing. Entre las características del sistema de acondicionamiento tenemos:

- Tres canales de captura análogos para tensión con un rango de entrada de 100 a 440 V_{RMS}
- Tres canales de captura análogos para corriente con un rango de entrada de 0 a 50A_{RMS}.
- Filtros pasa-bajos con frecuencia de corte configurada digitalmente por el DSP. La Frecuencia de corte se puede variar linealmente entre 100Hz y 64KHz.
- Amplificadores con ganancia configurada digitalmente por DSP. La ganancia de cada canal puede variar linealmente entre 0.1 y 10.1 en pasos de 0.04.
- ADC de 12 bits

La figura 4 muestra el diagrama de bloques de un canal del sistema de acondicionamiento.

3.4 Procesador Digital De Señales (Dsp)

Como unidad de procesamiento de datos se utiliza una DSP de 16-bit de la familia 56F8300 de Freescale Semiconductors [8]. Esta familia de procesadores de señales se caracteriza por combinar la arquitectura de

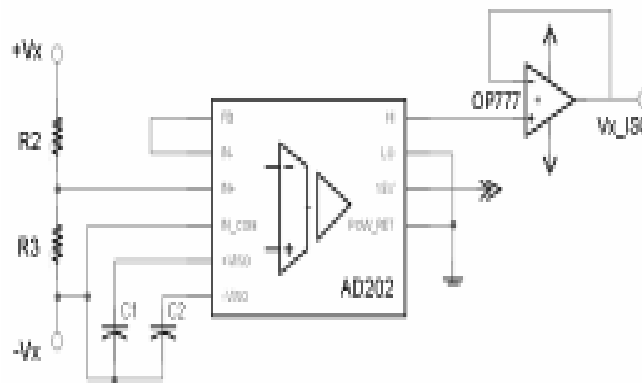


Figura 3. Circuito sensor de tensión.
Figure 3. Sensor of voltage circuit.

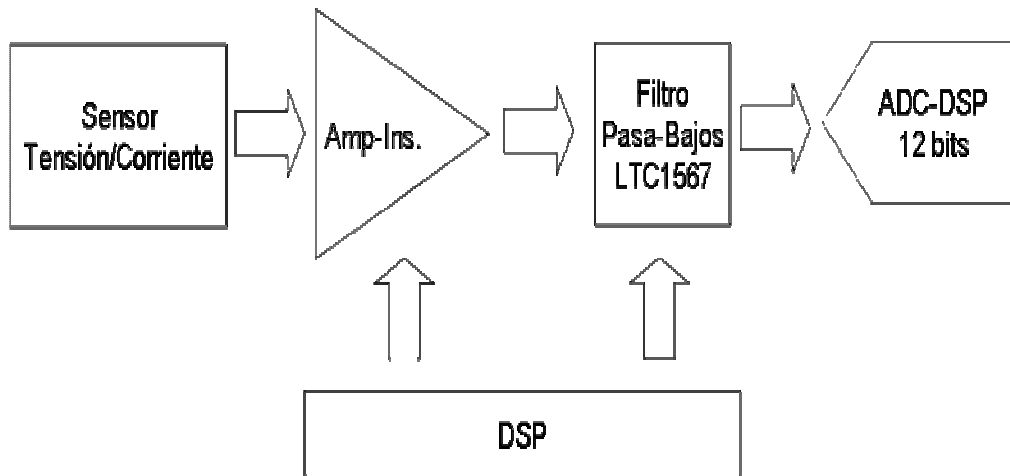


Figura 4. Diagrama de bloques sistema de acondicionamiento.

Figure 4. Block diagram of the conditioning system.

una DSP convencional con la gran variedad de módulos que solo se encuentran en un microcontrolador. Entre los módulos presentes en el DSP tenemos: ADC de 12bits, 2 puertos seriales, 2 módulos de pwm de 6 canales cada uno, 4 módulos timer de 4 canales cada uno y 2 módulos timer de 2 canales que permiten sincronización con ADC, etc. Entre las funciones realizadas por el DSP tenemos:

- Configurar la ganancia en los canales análogos, de acuerdo a una previa calibración de los mismos.
- Configurar la frecuencia de corte de los filtros anti-aliasing presentes en el sistema de acondicionamiento.
- Configurar la frecuencia de muestreo a la que se capturan las señales de tensión y corriente.
- Procesar los datos capturados, para obtener la magnitud y el ángulo de la componente fundamental de cada uno de las tres tensiones y corrientes.
- Obtener las componentes de secuencia y la impedancia de secuencia inversa a partir de la magnitud y ángulo de cada fase.
- Realizar la comunicación con el PC. El DSP recibe los parámetros de configuración del PC y envía los resultados correspondientes a la petición hecha por el PC.

- Ejecutar la red neuronal que estima la corriente de secuencia inversa.

3.5 Memoria Ram

El procesamiento de datos y especialmente la ejecución de las transformadas, exige una gran cantidad de memoria, lo cual hace insuficiente la memoria interna en el DSP. Por lo anterior, un modulo de memoria externa de 128K x 16 bits soluciona el problema y nos da gran libertad en el procesamiento de los datos. De esta forma es posible realizar FFTs de una longitud de 4096 puntos para cada una de las tres fases de tensión y corriente.

4. DESCRIPCIÓN DE SOFTWARE

Para interactuar y controlar el prototipo de hardware, se diseñó una interfaz gráfica en Matlab por medio de la cual se puede acceder a todas las capacidades de este [10]. La interfaz gráfica permite que el usuario seleccione una de las cuatro utilidades que proporciona el prototipo, configurar diversos aspectos de la captura de los datos, y además la posibilidad de visualizar y salvar los resultados generados en el DSP. A continuación se hace una descripción de las utilidades que ofrece la interfaz de usuario.

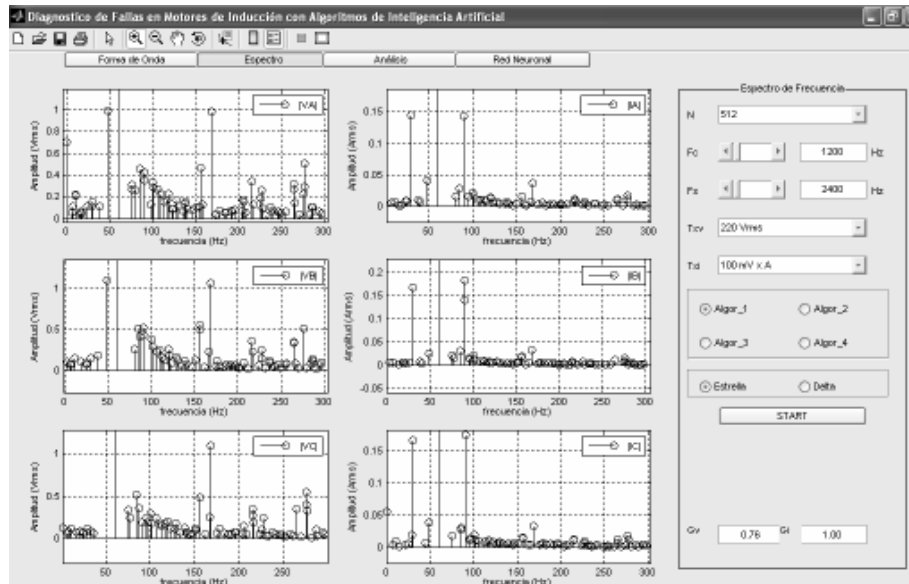


Figura 5. Panel del espectro de frecuencias

Figure 5. Frequency spectrum panel

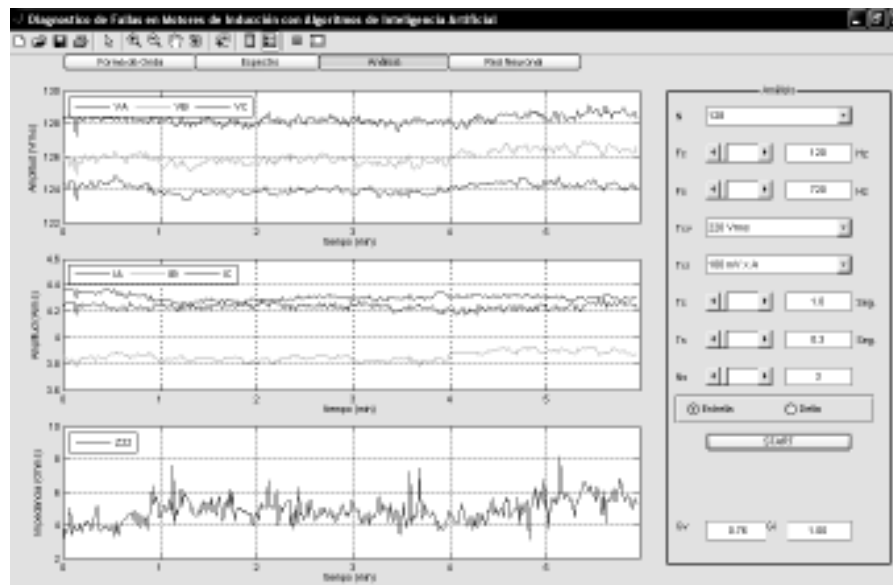


Figura 6. Panel de impedancia de secuencia inversa.

Figure 6. Negative impedance panel.

4.1 Formas De Onda

Este panel permite la captura de las formas de onda de tensión y corriente de alimentación del motor. Para ello, el usuario puede configurar los controles disponibles como son: número de muestras (N), la frecuencia de corte del filtro pasa-bajos (Fc), la frecuencia de muestreo (Fs), el rango de la tensión de entrada (Txv) y la

relación de la pinza amperimétrica utilizada (Tx_i).

4.2 Espectro De Frecuencia

Otra de las capacidades que brinda el prototipo es la posibilidad de analizar el espectro de las señales de tensión y corriente.

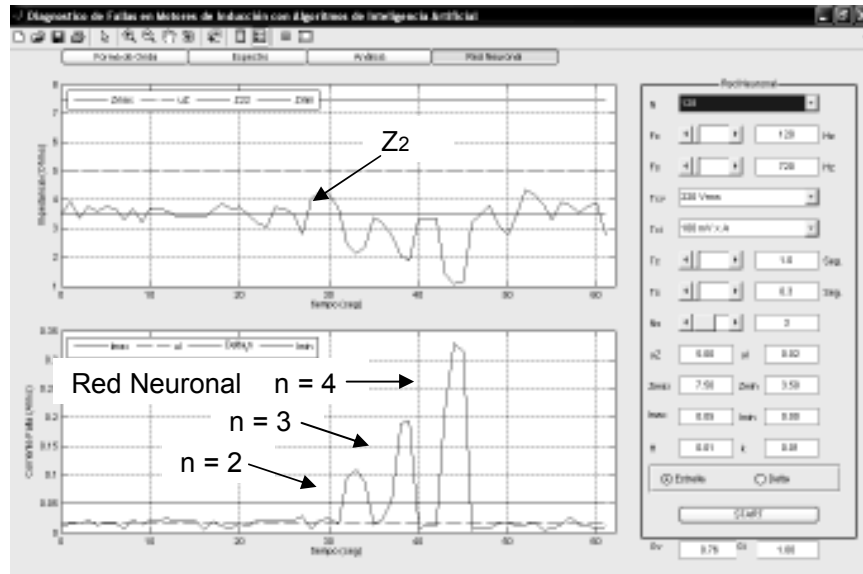


Figura 7. Panel indicador de falla con RNA e impedancia de secuencia inversa.
Figure 7. Panel of the fault indicator with RNA and inverse sequence impedance.

De forma similar al panel de forma de onda, es posible configurar diferentes aspectos del análisis de espectro. Este panel incluye además la posibilidad de escoger entre cuatro algoritmos diferentes para obtener el espectro frecuencia. La figura 5 ilustra el panel de espectro de frecuencia.

4.3 Análisis De Impedancia De Secuencia Inversa

El panel de análisis de impedancia nos presenta la evolución en el tiempo de las magnitudes de las tensiones y corrientes, y de la impedancia de secuencia inversa. Este panel agrega nuevos controles relacionados con el tiempo de captura de datos. La figura 6 muestra el panel de análisis de impedancia.

4.4 Indicador De Falla Aplicando Rna

Finalmente, el panel de red neuronal nos permite comparar dos indicadores de falla, como son la impedancia de secuencia inversa y el indicador de falla utilizando red neuronal artificial. Este panel, carga la configuración y los datos de la red neuronal previamente entrenada, muestra la evolución en el tiempo del indicador de falla (ΔIn) y el límite de alarma. La figura 7, ilustra dicho panel.

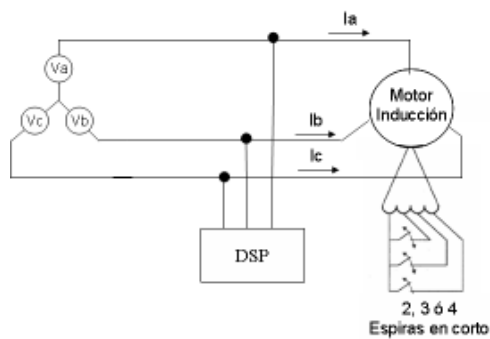


Figura 8. Montaje experimental.
Figure 8. Experimental setup

5. ENSAYOS EXPERIMENTALES

En esta aplicación se utilizó un motor de inducción jaula de ardilla de 3Hp, conexión doble estrella cuyas características se muestran en el apéndice. La figura 8 ilustra el montaje experimental. Inicialmente se registraron las componentes de secuencia del motor sin falla para varias condiciones de desbalance. Luego se entrenó una red neuronal con estructura 5-2, utilizando el algoritmo retropropagación. Luego de entrenar la red, se cargó al prototipo y se evaluó en el tiempo el indicador de falla. Después de 30 segundos, se realizaron varios

cortocircuitos sin limitación de resistencias externas, la impedancia de falla fue aproximadamente 0.088Ω . Los resultados se ilustran en la figura 7, donde se puede apreciar el incremento gradual de la salida de la red neuronal y la señal de impedancia de secuencia inversa con el número de espiras en cortocircuito. Estos resultados indican el potencial de aplicabilidad del prototipo y la fortaleza de los algoritmos implementados, permitiendo detectar de forma confiable fallas a partir de dos espiras.

Tabla 1. Apéndice.
Table 1. Appendix.

Motor – Doble estrella
Potencia = 3Hp
V = 220 Vrms
f = 60 Hz
P = 4
J = 0.04 kg.m ²
N = 102 espiras por cada camino en paralelo
Xs = 1.5068 Ω
Xr = 1.5068 Ω
Xm = 27.810 Ω
Rs = 0.720 Ω
Rr = 0.7817 Ω

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño e implementación de un prototipo digital para diagnosticar fallas en el estator de motores de inducción mediante una DSP. Se utilizaron dos algoritmos: el primero basado en redes neuronales artificiales y el segundo usando la impedancia de secuencia inversa como indicador de falla. Se mostró la estructura general del prototipo y los resultados experimentales en un banco de ensayos acondicionado para tal fin. Se concluye la viabilidad de aplicación del método y la fortaleza de los algoritmos implementados al poder detectar fallas incipientes en motores de inducción. Esto demuestra que en nuestro medio se pueden desarrollar equipos novedosos con gran aplicabilidad en la industria y a un costo reducido.

REFERENCIAS

- [1] ILONEN, J.; KAMARAINEN, J.; LINDH, T.; AHOLA, J.; KÄLVIÄINEN, H.; y PARTANEN, J. Diagnosis tool for motor condition monitoring. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 2005 41(4): 963-971.
- [2] HENAO, H; MARTIS, C, CAPOLINO, G; “An equivalent internal circuit of the Induction machine for advanced spectral analysis”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(3): 726-734.
- [3] VILLADA, F.; VALENCIA, D.A.; MUÑOZ, N.; “Diagnóstico del aislamiento en motores de inducción mediante la medición del flujo axial de dispersión”, *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 2004, 32: 102-113.
- [4] FERNÁNDEZ, M.; GARCÍA, M., ORCAJO, J.A.; CANO, J.; SOLARES, J.; “Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas”, Barcelona, Marcombo, 1998, pp. 121-153.
- [5] AWADALLAH, M.A. y MORCOS, M.M. Application of AI tools in faults diagnosis of electrical machines and drives-An overview. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2003 18(2): 245-251.
- [6] KOHLER, J. L.; SOTTILE, J.; y TRUTT, F. C. Alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 1992 28(5): 1109-1117.
- [7] SOTTILE, J. y KOHLER, J. L. An on-line method to detect incipient failure of turn insulation in random-wound motors. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 1993 8(4): 762-768.
- [8] MC56F8367, Preliminary Technical Data, Rev. 4.0. Freescale Semiconductor, Inc. 2005.
- [9] LOW COST, Miniature Isolation Amplifiers AD202-204, rev. d. Analog Devices, Inc. 2002.
- [10] MATLAB Creating Graphical User Interface. The MathWorks, Inc. 2006.