

8

APROXIMACIÓN AL MANTENIMIENTO ELÉCTRICO PREDICTIVO DE UN MOTOR IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL*

Por: César Javier Gil Arrieta**

Fecha de recibido: 5 de julio de 2010 • Fecha de aceptación: 30 de septiembre de 2010

RESUMEN:

Se presenta en este documento los resultados preliminares obtenidos a partir de la medición de algunas de las variables de funcionamiento más importantes de un motor trifásico de inducción que acciona una bomba centrífuga (grupo motor-bomba), mediante las cuales fue posible establecer acciones que indican que es factible relacionar diferentes regímenes de operación del grupo bajo estudio con algunas técnicas de mantenimiento predictivo aplicando a su vez herramientas de inteligencia artificial que permitirán establecer fechas de mantenimiento en función de la eficiencia del motor y otros aspectos técnico-constructivos como por ejemplo, la temperatura máxima de operación según el fabricante, conformando así un conjunto de estrategias que permitirán en última instancia “construir una curva inteligente de información aplicable a la gestión del mantenimiento antes que suceda la falla”.

PALABRAS CLAVE:

Mantenimiento predictivo, Mantenimiento correctivo, Inteligencia artificial, Eficiencia, Redes neuronales, Predicción, Ahorro de energía, Eficiencia.



* Proyecto de investigación Identificación del Mantenimiento Eléctrico Predictivo de un Grupo Motor-Bomba utilizando Inteligencia Artificial en la Línea de Calidad de Energía del Grupo de Investigación GIOOPEN, en la línea de Investigación Calidad de Energía y del proyecto de tesis que actualmente adelanta en el programa de maestría en Ingeniería Electrónica de la Universidad del Norte con la asesoría del doctor en Ingeniería John Edwin Candelo Becerra, profesor titular tiempo completo de dicha universidad. Investigador Principal César J. Gil Arrieta.

** Ingeniero electricista y candidato a Magíster en Ingeniería Electrónica de la Universidad del Norte, Barranquilla. Docente Tiempo Completo de la Corporación Universitaria de la Costa, CUC, Calle 58 No. 55-66. cgil@cuc.edu.co





8

PREDICTIVE APPROACH TO ELECTRICAL MAINTENANCE OF A DRIVER OF A CENTRIFUGAL PUMP USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

By: César Javier Gil Arrieta

ABSTRACT:

We report here in the preliminary results obtained from the measurement of some of the major operating variables of a three-phase induction motor which drives a centrifugal pump (motor-pump), whereby it was possible to establish actions that indicate that it is possible to relate different operating regimes of the group under study with some predictive maintenance techniques applied in turn artificial intelligence

tools that will provide maintenance dates depending on engine efficiency and other technical aspects such as constructive maximum temperature operating according to the manufacturer, thus comprising a set of strategies that will ultimately “build an intelligent information curve applicable to the management of maintenance before the failure happens.”

KEY WORDS:

Predictive maintenance, Corrective maintenance, Artificial intelligence, Efficiency, Neural networks, Prediction, Energy saving and efficiency.



I. INTRODUCCIÓN

Las actividades de mantenimiento de máquinas eléctricas como motores de inducción de bombas centrífugas al interior de la mayoría de las pequeñas y medianas empresas de la región Caribe colombiana, son realizadas en un amplio porcentaje aplicando técnicas convencionales y tradicionales como por ejemplo, la revisión visual de los contactos a los cables conductores de voltajes, “medición de temperatura” del chasis metálico de la máquina mediante el contacto directo con las manos por parte del operador, reparación posterior a la falla del motor, cambio de rodamientos solamente cuando se producen desbalances que superan los valores máximos de vibración dados por el fabricante y la máquina ya ha presentado daños anteriores, entre otros.

Estos procedimientos empíricos son realizados normalmente sin soportes técnicos basados en mediciones poco confiables efectuadas sin instrumentos análogos o digitales enmarcados en estándares, guías o cualquier otro tipo de protocolos, lo que limita en muchas ocasiones la toma de decisiones solamente al cambio del motor una vez se presenta la falla en la máquina y el proceso que alimenta dicha máquina se detiene o debe ser suspendido con sus respectivas consecuencias técnicas y económicas, como por ejemplo, el aumento del consumo energético.

Las actividades y/o acciones anteriormente descritas, pertenecen en gran porcentaje a técnicas de mantenimiento correctivo ya que generan restricciones sobre la productividad de cualquier empresa, al realizarse las reparaciones de las máquinas una vez se presenta la falla de operación, pudiendo afectar también el sistema eléctrico por posibles desbalances de corrientes de alimentación, disparos inadecuados de protecciones eléctricas y posibles desequilibrios y desajustes de elementos constituyentes de las cargas mecánicas impulsadas que interactúan en doble sentido: sobre el motor principal y sobre la bomba misma que es la máquina que efectúa el trabajo útil.

Como resultado final de estas acciones que dependen de un alto porcentaje probabilístico de ocurrencia, se plantea la hipótesis para obtener, a partir de mediciones y pruebas estandarizadas, las características de operación y funcionamiento en diferentes regímenes de operación que pueden usarse en la predicción del mantenimiento relacionándolas con la vida útil de materiales, valores máximos de referencia dados por fabricantes, curvas de eficiencia versus funcionamiento y demás aspectos asociados con la creación de una “curva de vida” que permita identificar con anticipación la necesidad de realizar mantenimiento al motor sin recurrir al mantenimiento correctivo, preventivo o detención total de las máquinas bajo estudio.

En la primera fase, que se describe a continuación, se llevó a cabo la medición de armónicos y sus respectivos análisis de acuerdo con el funcionamiento a plena carga del motor y la bomba asumiendo el llenado de un tanque de 25 litros con ciclo abierto para traspasar el agua contenida en un estanque subterráneo con igual capacidad.

2. DIAGRAMA DE FLUJO PRELIMINAR DEL PROYECTO CON SU DESCRIPCIÓN

2.1. Definiciones y aspectos fundamentales

- Los motores eléctricos de inducción trifásicos jaula de ardilla son aquellas máquinas que convierten la energía eléctrica en energía mecánica, de tal forma que permiten el accionamiento de cargas rotacionales que son esenciales para la transmisión de movimientos en los sistemas de producción con el fin de modificar, adaptar y transferir variables de acción y control como la presión, fuerza, desplazamiento, energía cinética y demás que hacen parte de los sistemas de potencia y control de procesos.

La transferencia de potencia se hace desde la red de alimentación o circuito alimentador trifásico para el caso de las máquinas de inducción trifási-

ca con las características especiales de transferir campos magnéticos desde los devanados del estator a la superficie del rotor interactuando los dos campos magnéticos produciendo el par de rotación [3].

De acuerdo con la potencia seleccionada y el nivel de tensión aplicado unido con las caídas de tensión y regulación de voltaje y los periodos de arranque y estabilización se producen efectos de variación de voltaje que afectan la velocidad y potencia mecánica de salida en el eje de un motor de inducido de jaula de ardilla o de rotor devanado y las características de funcionamiento normal del motor de inducción en marcha (desde vacío hasta plena carga) identificando algunos estados de operación:

- Caso sin carga y vacío.
- Caso de media carga.
- Condición de plena carga y más allá de plena carga.
- El factor de potencia.
- Deslizamiento.

El par de la máquina depende de las restricciones impuestas por la carga impulsada, lo cual redundará en el calentamiento propio del motor por el ni-

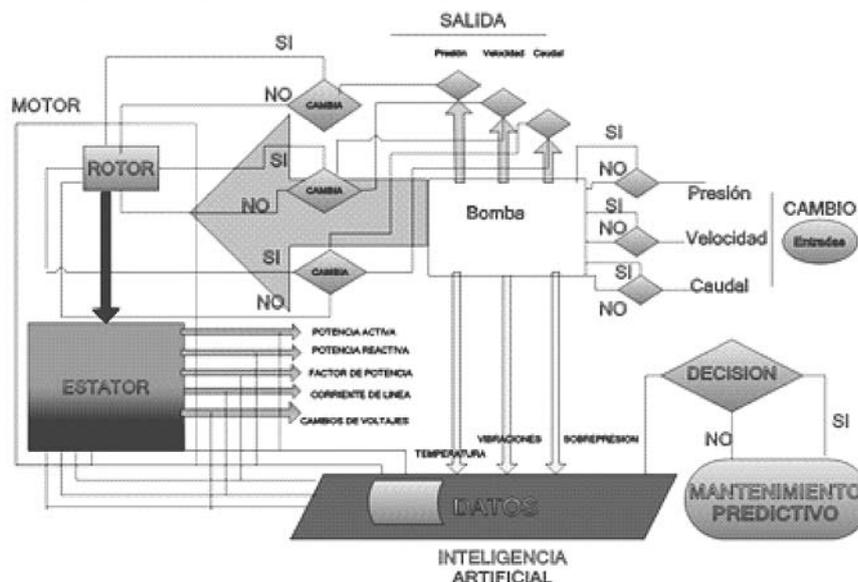
vel de corriente de estator que aumenta cuando incrementa el valor de la fuerza rotacional de la máquina impulsada. Esta fuerza puede ser lineal, cuadrática, cúbica o comportarse de otra forma diferente o no lineal de tal forma que es imprescindible realizar la medición de dicha variable relacionándola con las demás que dependen cada una entre ellas y entre sí para caracterizar totalmente el funcionamiento del motor.

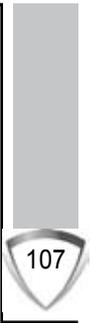
- Las bombas son máquinas electromecánicas que permiten transferir líquidos desde zonas de almacenamiento de baja presión a zonas de alta presión impulsando a una altura mayor en relación con la altura de succión que puede ser positiva o negativa.

El fluido a bombear debe estar almacenado en tanques o recintos cerrados o en movimiento en canalizaciones o ducterías para que la bomba trabaje con su mecanismo de funcionamiento interactuando con la energía del fluido logrando así elevar a un nivel de mayor altura el fluido de trabajo. La figura 1 ilustra las características de funcionamiento y relación de las variables eléctricas y mecánicas de un grupo motor-bomba.

- Las variables del fluido de agua como son la

Figura 1. Diagrama de bloques del grupo motor-bomba bajo estudio





velocidad, el caudal y la presión se tienen en cuenta para determinar la operación del sistema, de tal forma que si estas varían aumentando o disminuyendo, el funcionamiento de la bomba centrífuga impulsada por el motor cambia, estableciendo patrones de funcionamiento que inciden directamente en el consumo energético del motor eléctrico cuyas variables eléctricas como potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, corrientes de líneas y niveles de voltajes están en función de los cambios de las variables de la bomba.

3. TÉCNICAS DE MEDICIÓN MODERNAS

En la actualidad existen diversas técnicas de detección de fallas basadas cada una de ellas en diferentes principios de operación y funcionamiento de motores de inducción trifásicos jaula de ardilla y de rotor devanado que impulsan cualquier tipo de carga mecánica.

Para ello, los investigadores han desarrollado estrategias y sistemas de medición en LÍNEA que permiten a los ingenieros aplicar algún método matemático utilizando para ello la interfaz y software desarrollados para el cálculo de indicadores y parámetros que permiten la “creación de alarmas” a partir de valores medidos en la toma de decisiones de mantenimiento sin recurrir estrictamente al mantenimiento preventivo o correctivo.

En esta amplia clasificación, instrumentos, procedimientos y estrategias son importantes para las prácticas de mantenimiento predictivo de motores de inducción las siguientes:

Medición de armónicos de corriente: Una de estas técnicas, según Carvajal, Francisco Antonio, *et al.* [1], [2] se fundamenta en la medición de las tres corrientes de línea de alimentación del motor simultáneamente en los estados de operación estipulados por el proceso y coordinados manual o automáticamente por el usuario u operador, de tal forma que al aplicar el método de análisis del espectro de las corrientes de fase en

el dominio de la frecuencia con sus respectivas ecuaciones, aproximaciones y correspondencias técnicas de cálculo, es posible determinar, entre otras: barras del rotor rotas, perforaciones o agrietamiento del rotor en cortocircuito del motor de inducción jaula de ardilla, puntos de conexión y enlaces defectuosos de la soldadura de la jaula del rotor del motor, desbalances magnéticos e irregularidades dinámicas y estáticas del entrehierro de la máquina [4].

Desperfectos en las barras del rotor producen temperaturas altas y disminución o pérdida del par en el motor. La detección mediante esta técnica se basa en el análisis del espectro de las corrientes de fase en el dominio de la frecuencia, las cuales pueden determinarse a partir de las mediciones obtenidas en el dominio del tiempo con las pinzas y analizadores de redes aplicando para ello la transformada rápida de Fourier (FFT) [5].

Cualquier tipo de operación o funcionamiento en condiciones anormales por efecto de armónicos [2], [14] pérdida de excentricidad del eje mecánico, daño en los rodamientos, fractura del rotor, transiente de cortocircuitos en los devanados del rotor o cualquier otro tipo de avería, pueden producir alteraciones en el entrehierro de la máquina. Por tanto, pueden producirse variaciones en la homogeneidad del campo magnético del entrehierro que ocasionan componentes espectrales en las corrientes del estator a frecuencias descritas por la ecuación $f_{bng} = f \pm kf_v$ [2] donde $k = 1, 2, 3, \dots$, es el número de armónico de las componentes de frecuencias características f_v , para cada tipo de defecto como daños en pista externa, pista interna y rodamientos.

Análisis de temperatura interna del motor: Las altas temperaturas internas en el motor causadas por el medio ambiente o por algún problema del motor mismo, es frecuentemente causa de falla de estas máquinas. Los motores deben funcionar en el rango del valor límite de elevación de temperatura en función del tipo o clase de aislamiento de sus devanados estáticos

y rotóricos para asegurar una vida útil adecuada de acuerdo con las estimaciones de los fabricantes. “Las normas NEMA indican que por cada 10°C que el motor opere sobre su valor límite de elevación de temperatura, la vida útil de su aislamiento se reduce a la mitad”[2].

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

El esquema general usado para llevar a cabo las mediciones que permitirán definir el mantenimiento predictivo, consiste en operar la bomba en estado estable por régimen permanente logrando con esto la transferencia del agua subterránea al tanque de 25 litros en cierta cantidad de tiempo que dependerá de los diámetros de las tuberías, las longitudes, los circuitos paralelos y la velocidad impuesta por la bomba misma.

Teniendo en cuenta lo anterior, el motor eléctrico que impulsa la bomba bajo estudio es una máquina eléctrica que cumple con los requerimientos y especificaciones técnicas de acuerdo con valores nominales de fábrica. Es decir, el alcance de la velocidad a plena carga estipulada se logra después de un tiempo de transición que permite a los campos magnéticos giratorios de dicha máquina establecerse en función de los cambios de la carga mecánica que corresponde a las fuerzas hidráulicas impuestas por los recorridos y trayectorias hidráulicas externas al grupo motor-bomba y propias de la bomba.

Este tiempo de estabilización permite hidrostáticamente balancear las presiones internas de la bomba [12], [13] obligatoriamente necesarias para desplazar el fluido internamente desde el tanque de almacenamiento subterráneo hasta el conjunto de tubería ubicadas en la descarga de la bomba cuyo objetivo final es modificar la carga mecánica del impulsor de la bomba reflejándolo en el rotor del motor con sus respectivos cambios térmicos y de par lo que implica consumos energéticos diferentes y exposición de los devanados de la máquina impulsora a diferentes valores de corriente y con sus respectivos niveles

de temperatura hasta alcanzar máximos establecidos por los fabricantes en relación con niveles de aislamiento y temperatura.

Al establecer estas características de operación, es necesario realizar mediciones de índole eléctrica que permiten identificar parámetros que influyen en el calentamiento del motor debido a que los voltajes de alimentación trifásicos presentan componentes de armónicos adicionalmente a la frecuencia fundamental (60 Hz) produciendo efectos de aumento de temperatura, de vibraciones mecánicas, inyección de armónicos en las ondas de voltaje y de corriente que las convierten en no sinusoidales puras y demás perturbaciones y transientes propias de este tipo de señales.

Para cuantificar la distorsión existente en una señal, es preciso definir parámetros que determinen su magnitud y contar con equipos de medición adecuados, que al aplicar las expresiones matemáticas necesarias para efectuar los cálculos relacionados con la distorsión armónica según estándares reconocidos, se pueden encontrar relaciones que permitirán “construir” herramientas con alguna técnica de inteligencia artificial haciendo énfasis en la eficiencia de la máquina que se estudia. A continuación se analizan algunas de estas expresiones que suponen la base del análisis de la eficiencia.

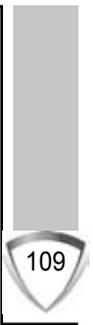
4.1. Factor de distorsión de armónicos de voltaje

Es un factor que relaciona el promedio cuadrado geométrico de las magnitudes de voltaje de cada componente mayor a la componente de la fundamental respecto al valor de la magnitud de la fundamental.

$$FD = \sqrt{\frac{\sum(V_{th})^2}{V_f^2}} \quad (1)$$

Donde:

FD: Es el factor de distorsión de armónicos de voltajes.



V_{th}: Es la i-ésima amplitud de los armónicos de voltaje.

V_f: Es la amplitud de la componente fundamental de voltaje.

Es decir, este factor pondera los valores de magnitudes de voltaje por encima de la frecuencia fundamental y establece el efecto de las frecuencias superiores en la onda de voltaje determinando un indicador de la perturbación presente en la red o circuito de alimentación. Los resultados obtenidos para la línea 2 del circuito alimentador del grupo motor-bomba se ilustran en la tabla 1.

Análisis de resultados de la medición de armó-

4.2. Corriente eficaz (RMS)

La corriente eficaz incorpora el aporte de cada magnitud de armónicos de corriente al valor RMS de la onda de corriente, de tal forma que la tendencia es el aumento de la misma.

$$I_{ef} = \sqrt{I_f^2 + I_{a3}^2 + I_{a5}^2 + I_{a7}^2 + \dots} \quad (2)$$

Los resultados obtenidos se ilustran en la tabla 2.

El valor obtenido de corriente eficaz refleja el aporte de los armónicos de corriente en esta

Tabla 1. FD_v calculado a partir de valores medidos del factor de distorsión de armónicos de voltaje

FACTOR DE DISTORSIÓN DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE			
MAGNITUD DE LA COMPONENTE FUNDAMENTAL V _f en VOLTIOS	ORDEN DEL ARMÓNICO	MAGNITUD DEL ARMÓNICO DE VOLTAJE V _{th} en VOLTIOS	V _{th} ²
A 60 Hz	1	225.5	50850.25
225.5	3	0.4	0.16
	5	1.5	2.25
	7	0.5	0.25
	9	0.4	0.16
	11	0.5	0.25
	13	0.4	0.16
	15	0.07	0.0049
FD=			1.000

nicos de voltajes en el cálculo del factor de distorsión de armónicos de voltaje: Las magnitudes de armónicos de voltaje hasta el armónico 15 no sobrepasan la unidad, razón por la cual el impacto de ellos en la onda de voltaje es mínimo.

Las frecuencias a las que se presentan estas magnitudes corresponde al orden de quince veces la fundamental, es decir, la contribución del incremento de la reactancia inductiva equivalente del estator del motor puede aumentar la magnitud de las corrientes de línea lo cual implica un aumento gradual de la temperatura de la máquina.

importante variable lo cual implica aumento de calentamiento en los conductores de alimentación de la máquina y las corrientes del estator son mayores que las establecidas por el fabricante de la máquina. Al medir con instrumentos convencionales no se tiene en cuenta los efectos de los armónicos y este calentamiento adicional se desprecia obteniéndose una posible sobrecarga por fuerza mecánica para llevar al motor a un punto de trabajo supuestamente adecuado.

4.3. Voltaje eficaz (RMS)

El voltaje eficaz incorpora el aporte de cada mag-

Tabla 2. Corriente eficaz calculada a partir de valores medidos de armónicos de corriente

CORRIENTE EFICAZ (RMS)			
MAGNITUD DE LA COMPONENTE FUNDAMENTAL I_f en AMPERIOS	ORDEN DEL ARMÓNICO	MAGNITUD DEL ARMÓNICO DE CORRIENTE I_a en AMPERIOS	I_a^2 en AMPERIOS
A 60 Hz	1	9.87	97.4169
9.87	3	0.07	0.0049
	5	0.58	0.3364
	7	0.22	0.0484
	9	0.02	0.0004
	11	0.05	0.0025
	13	0.03	0.0009
	15	0	0
I _{ef} =	13.972		

nitud de armónicos de voltaje al valor RMS de la onda de voltaje, de tal forma que la tendencia es el aumento del mismo.

$$V_{ef} = \sqrt{V_f^2 + V_{a3}^2 + V_{a5}^2 + V_{a7}^2 + \dots} \quad (3)$$

Los resultados obtenidos se ilustran en la tabla 3.

De igual forma que la corriente eficaz, el valor obtenido de voltaje eficaz refleja el aporte de los armónicos en esta variable lo cual implica aumento de cada tensión de línea a línea de calentamiento

en los conductores de alimentación de la máquina y las corrientes del estator son mayores que las establecidas por el fabricante de la máquina. Al medir con instrumentos convencionales no se tiene en cuenta los efectos de los armónicos presentándose aumento de las corrientes de línea lo cual implica una posible sobrecarga por fuerza mecánica para llevar al motor a un punto de trabajo supuestamente adecuado [7].

El factor de servicio permite amortiguar este incremento de fuerza mecánica a expensas de un incremento de temperatura que puede superar los valores máximos de incremento de la misma en los devanados del estator con sus respectivas

Tabla 3. Voltaje eficaz calculado a partir de valores medidos de armónicos de voltaje

VOLTAJE EFICAZ (RMS)			
MAGNITUD DE LA COMPONENTE FUNDAMENTAL V_f en AMPERIOS	ORDEN DEL ARMÓNICO	MAGNITUD DEL ARMÓNICO DE VOLTAJE V_a en VOLTIOS	V_a^2
A 60 Hz	1	225.5	50850.25
225.5	3	0.4	0.16
	5	1.5	2.25
	7	0.5	0.25
	9	0.4	0.16
	11	0.5	0.25
	13	0.4	0.16
	15	0.07	0.0049
V _{ef} =	318.9102		



implicaciones de pérdida de aislamiento y perturbaciones asociadas.

4.4. Cofactor de distorsión de corriente (Cd)

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y su valor eficaz o RMS. Su valor se ubica entre 0% y 100%.

Con una distorsión baja, Cd cambia notoriamente, por eso se recomienda su uso cuando se desea conocer el contenido armónico de una señal.

$$Cd = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{RMS}} \times 100\% \quad (4)$$

Para las mediciones efectuadas se obtuvieron los resultados de la tabla 4.

El porcentaje de presencia de armónicos a partir del orden 3 en relación con el valor RMS de la corriente es del 10,15% lo que implica un aporte poco significativo de los armónicos impares sobre la fundamental. Sin embargo, este indicador no es confiable absolutamente ya que el THD de corriente indica un valor de 6,35% que supera lo establecido en el estándar 519 de la IEEE.

4.5. Distorsión de demanda total

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga.

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Según la IEEE 519 este parámetro se calcula con la siguiente ecuación: (5)

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{LOADm\acute{a}x}} \times 100\%$$

Donde:

I_h : Magnitud de la armónica individual

h : Orden armónico

I_L : Demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede estimarse.

Los valores medidos para la aplicación de la ecuación 5 se ilustran en la tabla 5.

Para este parámetro se utiliza el valor de demanda máxima de la corriente fundamental ya que al variar la carga del motor varían las corrientes de línea del estator lo que permite obtener poten-

Tabla 4. Cdi calculado a partir de la medición de armónicos de corriente

COFACTOR DE DISTORSIÓN DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE			
MAGNITUD DE LA COMPONENTE FUNDAMENTAL I_{RMS} en AMPERIOS	ORDEN DEL ARMÓNICO	MAGNITUD DEL ARMÓNICO DE CORRIENTE I_h en AMPERIOS	V_h^2
A 60 Hz	1	9.87	97.4169
9.87	3	0.07	0.0049
	5	0.58	0.3364
	7	0.22	0.0484
	11	0.02	0.0004
	9	0.05	0.0025
	13	0.03	0.0009
	15	0	0
Cd (%)=			10.1521



cias de mayor valor y es necesario evaluar el impacto y los efectos de los armónicos en relación con el incremento de la potencia demandada aun con cambios de potencia hidráulica que no sean significativos e impuestos por el usuario.

Según el resultado obtenido, este porcentaje indica que el incremento de carga hidráulica no afecta los armónicos presentes y viceversa [8].

4.6. Distorsión armónica total de corriente (THDi)

Es la relación entre el contenido armónico de la

4.7. Distorsión armónica total de voltaje (THDv)

Es la relación entre el contenido armónico de la señal de voltaje y la primera armónica o fundamental. La ecuación 7 ilustra el cálculo de este importante parámetro.

$$THD_{Vh} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_f} \quad (7)$$

Tabla 5. TDDi calculado a partir de la medición de armónicos de corriente

DISTORSIÓN DE DEMANDA TOTAL DE CORRIENTE			
MAGNITUD DE LA CORRIENTE DE CARGA MÁXIMA $I_{LOAD\ máx}$ en AMPERIOS	ORDEN DEL ARMÓNICO	MAGNITUD DEL ARMÓNICO DE CORRIENTE I_h en AMPERIOS	I_h^2
A 60 Hz	1	9.87	97.4169
13.39	3	0.07	0.0049
	5	0.58	0.3364
	7	0.22	0.0484
	9	0.02	0.0004
	11	0.05	0.0025
	13	0.03	0.0009
	15	0	0
TDD (%)=			0.3498

señal de corriente y la primera armónica o fundamental.

Es el parámetro de medición de distorsión más conocido y utilizado siendo recomendable en la medición de distorsión en parámetros individuales como corriente y voltaje (I y V). La ecuación 6 establece las relaciones en mención.

$$THD_{Ih} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (6)$$

Los valores medidos para la aplicación de la ecuación 6 se ilustran en la tabla 6.

V_h : Magnitud de la componente armónica individual

h : Orden armónico

V_f : Voltaje nominal fundamental del sistema

Los valores medidos para la aplicación de la ecuación 7 se ilustran en la tabla 7.

Según el estándar IEEE 519 de 1992, el valor calculado de THD de corriente supera los valores de referencia. Sin embargo, este mismo no implica un incremento bastante significativo en relación con los porcentajes de THD individuales siendo el mayor el correspondiente al armónico 5 con una tendencia a disminuir a partir del armónico 15 con magnitudes aproximadas a cero amperios para el orden 17, 19 y 20.



Tabla 6. THDi calculado a partir de la medición de armónicos de corriente

DISTORSIÓN DE DEMANDA TOTAL DE CORRIENTE			
MAGNITUD DE LA COMPONENTE FUNDAMENTAL I_L en AMPERIOS	ORDEN DEL ARMÓNICO	MAGNITUD DEL ARMÓNICO DE CORRIENTE I_h en AMPERIOS	I_h^2
A 60 Hz	1	9.87	97.4169
9.87	3	0.07	0.0049
	5	0.58	0.3364
	7	0.22	0.0484
	9	0.02	0.0004
	11	0.05	0.0025
	13	0.03	0.0009
	15	0	0
THD _{lh} =			6.3555

Para los anteriores análisis y comparaciones se anexa la tabla 8 que especifica los límites de distorsión de voltaje permitidos por la IEEE 519 de 1992.

un tratamiento de variables, valores medidos y respuestas que no pueden ser fácilmente determinables con instrumentos de medida debido a su alta no linealidad [6], [9].

5. APLICACIÓN DE REDES NEURONALES PARA EL ANÁLISIS DE CORRIENTE, POTENCIAS Y ARMÓNICOS

Además permite crear una curva en el tiempo con iteraciones sucesivas [10] en función de los pesos de cada neurona, las capas de entrada, intermedia y la salida. Con esta estructura es posible establecer patrones de comportamiento que pueden ser aprendidos y con esto diseñar un procedimiento para comparar valores medidos

Las redes neuronales permiten determinar valores de referencias acordes con el entrenamiento que se obtiene de los procesos que requieren

Tabla 7. Cálculo de THDv a partir de la medición de armónicos de voltaje

DISTORSIÓN TOTAL DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE			
MAGNITUD DE LA COMPONENTE FUNDAMENTAL V_f en VOLTIOS	ORDEN DEL ARMÓNICO	MAGNITUD DEL ARMÓNICO DE VOLTAJE V_h en VOLTIOS	V_h^2
A 60 Hz	1	225.5	50850.25
225.5	3	0.4	0.16
	5	1.5	2.25
	7	0.5	0.25
	9	0.4	0.16
	11	0.5	0.25
	13	0.4	0.16
	15	0.07	0.0049
THD _{Vh} =			0.7975

Tabla 8. Límites de distorsión de armónicos de voltaje según la IEEE 519 de 1992

LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN VOLTAJE EN % DEL VOLTAJE NOMINAL		
NIVEL DE TENSIÓN EN LA ACOMETIDA (VN)	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL	DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL THD VN
Vn < 69 kV	3,0%	5,0%
69 kV < Vn < 161 kV	1,5%	2,5%
Vn > 161 kV	1,0%	1,5%

con un objetivo en porcentajes y unidades de las variables logrando disparar alarmas, señalización de eventos y predicción [11], entre otros.

Con las pruebas y mediciones realizadas preliminarmente con un grupo motor-bomba monofásico con una potencia de 1HP a 220 V se obtuvieron los resultados que a continuación se describen: Algoritmo de análisis de variable con redes neuronales en Matlab: Se midieron las variables de caudal, corriente, presión y factor de potencia de la alimentación del motor de la bomba. Los vectores y el algoritmo se presentan a continuación:

$I=[0.45 \ 0.56 \ 0.75 \ 0.94 \ 1.12 \ 1.25 \ 1.39 \ 1.49 \ 1.65 \ 1.76 \ 2.10 \ 2.34 \ 2.45 \ 2.54 \ 2.63 \ 2.76 \ 2.81 \ 2.97 \ 3.19 \ 3.24 \ 3.33 \ 3.42 \ 3.50 \ 3.57 \ 3.63 \ 3.69 \ 3.72 \ 3.79 \ 3.85 \ 3.89];$

$I_p=[0.4200 \ 0.5100 \ 0.7800 \ 0.9900 \ 1.1100 \ 1.2200 \ 1.5800 \ 1.9800 \ 1.2300 \ 1.1100 \ 2.4600 \ 2.2300 \ 2.5600 \ 2.8900 \ 2.9000 \ 2.1500 \ 2.6700 \ 2.8900 \ 3.1000 \ 3.0400 \ 3.1300 \ 3.1200 \ 3.3400 \ 3.1700 \ 3.1300 \ 3.5900 \ 3.3400]$

$p=[133.57 \ 181.12 \ 277.23 \ 311.45 \ 356.41 \ 385.13 \ 444.23 \ 467.25 \ 478.9 \ 534.82 \ 543.65 \ 556.62 \ 598.4 \ 613.56 \ 624.45 \ 643.43 \ 687.34 \ 701.2 \ 723.45 \ 733.47 \ 783.1 \ 801.23 \ 813.2 \ 823.8 \ 856.78 \ 899.20 \ 934.23 \ 945.70 \ 956.2 \ 967.78];$

$P_p=[136.57 \ 185.56 \ 279.56 \ 341.45 \ 376.47 \ 395.13 \ 464.23 \ 478.25 \ 490.9 \ 556.82 \ 567.65 \ 558.62 \ 599.4 \ 623.56$

$628.45 \ 667.43 \ 688.00 \ 711.2 \ 733.45 \ 732.47 \ 773.1 \ 811.23 \ 814.2 \ 833.8 \ 855.78 \ 889.20 \ 935.23 \ 915.70 \ 958.2 \ 967.78];$

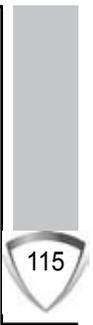
$Q=[231.35 \ 313.71 \ 467.58 \ 498.32 \ 541.20 \ 569.78 \ 640.35 \ 639.2 \ 638.53 \ 676.81 \ 670.15 \ 650.76 \ 699.61 \ 698.40 \ 710.80 \ 712.92 \ 721.02 \ 695.47 \ 697.30 \ 706.96 \ 711.78 \ 685.18 \ 673.84 \ 682.62 \ 687.38 \ 697.86 \ 700.67 \ 660.10 \ 642.57 \ 650.35];$

$Q_p=[232.35 \ 311.71 \ 465.58 \ 497.32 \ 531.20 \ 567.78 \ 639.35 \ 637.2 \ 635.53 \ 673.81 \ 672.15 \ 653.76 \ 693.61 \ 697.40 \ 712.80 \ 714.92 \ 722.02 \ 698.47 \ 694.30 \ 703.96 \ 713.78 \ 686.18 \ 672.84 \ 672.62 \ 677.38 \ 687.86 \ 701.67 \ 665.10 \ 632.57 \ 652.35];$

$\cos fi=[0.5 \ 0.5 \ 0.51 \ 0.53 \ 0.55 \ 0.56 \ 0.57 \ 0.59 \ 0.6 \ 0.62 \ 0.63 \ 0.65 \ 0.65 \ 0.66 \ 0.66 \ 0.67 \ 0.69 \ 0.71 \ 0.72 \ 0.72 \ 0.74 \ 0.76 \ 0.77 \ 0.77 \ 0.78 \ 0.79 \ 0.8 \ 0.82 \ 0.83 \ 0.83];$

$\cos fip=[0.48 \ 0.49 \ 0.52 \ 0.54 \ 0.51 \ 0.54 \ 0.56 \ 0.58 \ 0.59 \ 0.60 \ 0.61 \ 0.64 \ 0.60 \ 0.64 \ 0.65 \ 0.69 \ 0.67 \ 0.74 \ 0.72 \ 0.73 \ 0.71 \ 0.74 \ 0.77 \ 0.78 \ 0.70 \ 0.71 \ 0.81 \ 0.81 \ 0.82 \ 0.81];$

$cau=[3.62 \ 6.78 \ 7.67 \ 9.56 \ 11.23 \ 13.23 \ 13.89 \ 14.67 \ 16.57 \ 17.23 \ 18.89 \ 19.45 \ 20.45 \ 22.34 \ 23.45 \ 24.67 \ 26.78 \ 27.45 \ 28.56 \ 29.45 \ 31.23 \ 32.45 \ 33.89 \ 34.56 \ 36.45 \ 37.67 \ 38.56 \ 39.23 \ 40.56$



```
41.23]
caup=[3.32 6.58 7.63 9.56 10.23
11.23 14.89 15.67 16.57 19.23 19.89
16.45 12.45 24.34 22.45 27.67 21.78
29.45 21.56 26.45 33.23 35.45 32.89
37.56 39.45 35.67 33.56 41.56 42.23
43.68]
```

```
pre= [81 79 76 75 74.2 73.5 73.1 72.3
70.45 69.1 67.34 66.2 64.46 62.78
61.6 60.2 58.8 57.4 56.6 55.2 54.6
52.78 51.5 50.2 48.45 47.23 46.55
45.3 44.98 42.78]
```

```
prep=[82.0 69.0 66.0 85.0 64.2 83.5
33.1 52.3 60.45 67.1 65.34 64.2 62.46
61.78 63.6 69.2 56.8 54.4 52.6 51.2
58.6 59.78 51.5 58.2 38.45 57.23
56.55 55.3 34.98 82.78]
```

ALGORITMO DE REDES NEURONALES.

```
net = newff([min(cau)
max(cau);min(pre) max(pre)],[3 2
1],{'tansig' 'tansig' 'purelin'})
net.trainParam.show = 50;
net.trainParam.lr = 0.05;
net.trainParam.lr_inc = 1.05;
net.trainParam.epochs = 3000;
net.trainParam.goal = 10e-7;
[net,tr]=train(net,p,t);
```

```
predi = sim(net,p);
```

```
%codigo de programacion de la red
neuronal
net = newff([min(cau)
max(cau);min(pre) max(pre)],[3 2
1],{'tansig' 'tansig' 'purelin'});
logsig
```

```
net = newff([min(cau)
max(cau);min(pre) max(pre)],[3 2
1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'});
[net,tr]=train(net,in,red2in)
[Y,Pf,Af,E,perf] =
sim(net,in2,[],[],I)
```

```
net.trainParam.epochs = 50;
net.trainParam.goal = 0.01;
```

Al establecer las redes neuronales un patrón de comportamiento de acuerdo con los valores y/o cantidades típicas de funcionamiento de la máquina bajo cierto entrenamiento que es necesario realizar por un periodo de tiempo representativo, es posible trazar una curva de vida con base en las referencias dadas por el fabricante y en las mediciones de las variables anteriormente mencionadas. Por tanto, la red neuronal permitirá generar alarmas que indicarán periodos de funcionamiento acorde con lo establecido por el fabricante y los rangos de operación del proceso bajo estudio.

Para el caso de estudio del grupo motor-bomba trifásico es necesario operar estas máquinas por periodo de tiempo superior a dos horas de trabajo para establecer el tiempo de operación y llevar a cabo una cantidad de mediciones significativas para aportar suficiente información a las redes neuronales de acuerdo con el nivel de predicción que se establezca.

Las variables eléctricas, mecánicas y termodinámicas a medir son: THDi, THDv, corrientes de línea, voltajes de línea, temperatura interna, temperatura superficial, caudal, presión, frecuencia eléctrica de alimentación, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y potencia aparente.

5.1. Medición de temperatura del motor que impulsa la bomba centrífuga

La medición de la temperatura del motor que impulsa la bomba es indispensable para establecer las características de funcionamiento de la máquina bajo estudio en especial el efecto de los armónicos de la alimentación del motor. Para ello, se realizó la medición de las temperaturas superficiales del motor utilizando una cámara termográfica marca FLUKE Ti25 ilustrando a continuación los resultados obtenidos. Con base en esta información es posible realizar un procesamiento de la imagen obteniendo resultados como valores promedios, curvas de perfil de temperatura y demás aspectos derivados del análisis.



La imagen de la figura 2 a) ilustra puntos calientes de temperaturas que deben ser analizados con base en la temperatura medida con termocuplas o sensores con el fin de establecer niveles o desviaciones para tener en cuenta la emisividad del material y características de temperatura superficial y las temperaturas internas de la máquina.

La imagen de la figura 2 b) ilustra mayor cantidad de puntos calientes de temperaturas que deben ser analizados con base en la temperatura medida con termocuplas o sensores con el fin de establecer relaciones de aumento y decremento en función de las características de temperatura de la máquina para determinar los efectos de la misma y su relación con los armónicos de corriente y de voltaje.

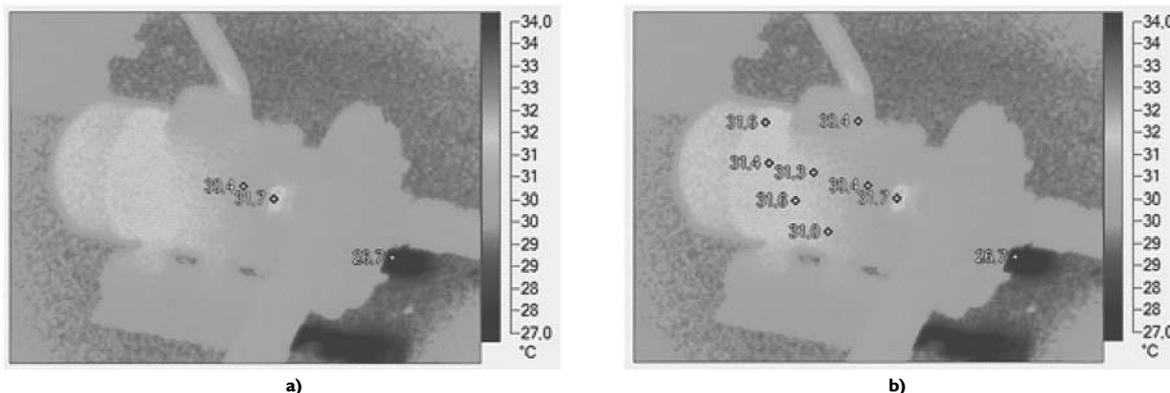
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJO A DESARROLLAR A CORTO Y MEDIANO PLAZO

1. Las mediciones de armónicos de corriente y voltaje del circuito alimentador del grupo motor-bomba deben realizarse en condiciones de estado estable estableciendo tiempos de operación de trabajo a plena carga de acuerdo con el trabajo mecánico relacionado con la carga hidráulica a bombear. Se recomienda un periodo mínimo de dos horas a intervalos de 15 minutos para la medición de armónicos de

corriente, de voltaje, THDi, THDv, factor de potencia, potencia aparente, activa, reactiva y demás variables eléctricas que permitan los instrumentos de mediciones. De igual forma es recomendable medir transientes de mayor impacto como interrupciones abruptas de voltaje, flicker y todas aquellas que puedan captarse con instrumentos y analizadores de redes modernos [15].

2. El entrenamiento de redes neuronales requiere de mediciones por más de cuatro meses para determinar el patrón de comportamiento de los parámetros del motor y de la bomba. De estas mediciones depende establecer un modelo muy aproximado al sistema completo para realizar comparaciones con la simulación del motor y sus características y parámetros de funcionamiento.
3. Las imágenes térmicas permiten conocer los valores de temperaturas en puntos calientes de zonas sensibles y de alta incidencia del comportamiento térmico del motor, razón por la cual requiere de un procesamiento de imágenes y a partir de esto relacionarla con las temperaturas promedio y sus influencias con los parámetros de armónicos y demás.
4. El análisis interrelacional permitirá determinar un modelo que arroje como resultado final las indicaciones de cuándo debe hacerse el mantenimiento de la máquina sin esperar a que la misma presente alguna falla.

Figura 2. Imagen térmica del motor bajo estudio



BIBLIOGRAFÍA

CABALLERO, Hugo C. y HUERTA, José I. Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo de condición para motores de inducción. *Revista Ingeniería Universidad de los Andes*. Colombia.

CARVAJAL, Francisco Antonio et al. Diagnóstico en línea y fuera de línea de motores de inducción de baja, mediana y alta tensión. *Artículos técnicos boletín iie*. Marzo 2009.

FERNÁNDEZ CABANAS, Manés y GARCÍA MELERO, Manuel (2000). *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. España: Marcombo.

FILIPPETTI, F.; FRANCESCHINI, G.; TASSONI, C.; VAS, P. (2000). A fuzzy logic approach to on-line induction motor diagnostics based on stator current monitoring, in: Proceedings of Stockholm.

GAO, X. Z.; OVASKA, S. J. (2005). "Soft computing methods in motor fault diagnosis". Institute of Intelligent Power Electronics, Helsinki University of Technology.

GUILLEMIN, Pierre (1996). "Fuzzy Logic Applied to Motor Control". *IEEE transactions on industry applications*, Vol. 32, No. 1.

HSU, John. "Field Test of Motor Efficiency and Load Changes through Air-Gap Torque". Oak Ridge, Tennessee 3783 1-7280. *IEEE transactions on energy conversion*, Vol. 10, No. 3, September 1995.

HSU, J. S. y SORENSON, P. L. (1995). "Field assessment of induction motor efficiency through air-gap torque". Oak Ridge national Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

HUANG, Chich-Yi et al. (1999). Robust Control of Induction Motor with A Neural-Network Load Torque Estimator and A Neural-Network Identification. *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 46, No. 5.

ILOTT, P. W.; GRIFFITHS, A. J. (1996). "Development of a pumping system decision support tool based on artificial intelligence". Tools with Artificial Intelligence. Proceedings Eighth IEEE International Conference on Volume, Issue. pp. 260-266.

MOON, C.; CHO, B. "Design of fuzzy control system for chemical injection system retrofit using neural network model in thermal power plant". Publicado en *Neural Networks for Identification, Control, Robotics, and Signal/Image Processin*. International Workshop on Volume, Issue, 21-23. pp. 263-269. 1996.

NEJJARI, H. y BENBOUZID, M.E.H. (1999). Application of Fuzzy Logic to Induction Motors Condition Monitoring. University of Picardie. France.

SAÏD NAÏT SAÏD, Mohamed et al. "Detection of Broken Bars in Induction Motors Using an Extended Kalman Filter for Rotor Resistance Sensorless Estimation". *IEEE transactions on energy conversion*, Vol. 15, No. 1, March 2000.

WEN-GUANG, Li (1997). An Experimental Study on the Performance of Centrifugal Oil Pump. *Fluid Machinery* 25 2. pp. 3-10.

WONG, Kit Po. "Artificial intelligence and neural network applications in power systems". IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, December 1993, Hong Kong.

