

Desarrollo de sistemas expertos en tiempo real para la detección y diagnóstico de faltas en motores trifásicos de inducción

Fecha de recepción: 21/09/2010

Fecha de aceptación: 05/10/2010

Luis Diego Murillo Soto¹
Osvaldo Guerrero Castro²

Palabras clave

Motor eléctrico, faltas, fallas, detección, diagnóstico, sistemas expertos, sistema administrador de faltas.

Resumen

El presente trabajo muestra las etapas y arquitectura para el desarrollo de sistemas expertos (SE), orientados a detectar y diagnosticar las condiciones anormales de diseño en que opera el motor, estas condiciones fuera de rango son conocidas como faltas. Las faltas pueden evidenciarse al comparar el valor de diseño de alguna variable y la medición real en el punto de operación.

Comercialmente existen sistemas en línea que permiten monitorear un conjunto de variables, pero requiere de una persona experta en el tema, que establezca las variables a medir y la frecuencia de medición. Posteriormente se requiere el análisis de los datos y las recomendaciones generales de los posibles causantes del problema, así como las respectivas acciones correctivas por parte del experto.

El anterior sistema de monitoreo y diagnóstico está limitado principalmente por: existencia del equipo de monitoreo, contar con un experto que realice el diagnóstico, y sus respectivos costos.

El diseño e implementación de un sistema experto que automatice la captura e interpretación de los datos, permitirá lograr una solución económica a las limitantes planteadas.

Key words

Electrical motors, faults, failure, diagnosis, detection, expert systems.

Abstract

This paper shows the steps for the development and architecture of expert systems, designed to detect and diagnose abnormal conditions of induction motor, these conditions are out of range are known as faults. The faults may be evident when comparing the design value of some variable, and the actual measurement at the point operation.

1. Ingeniero en Mantenimiento Industrial. Profesor adjunto. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: lmurillo@itrc.ac.cr
2. Especialista en Gestión Energética. Profesor en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: aguerrero@itrc.ac.cr

Commercially, there are online systems that allow monitoring of a set of variables, but requires an expert in the field, setting the variables to be measured and the frequency of measurement. Subsequently, requires data analysis and general recommendations of the possible causes of the problem and the respective corrective actions by the expert.

The design and implementation of an expert system of monitoring and diagnosis, is mainly limited by: the existence of equipment, the existence of an expert to perform the diagnosis, and operating costs. Therefore, an expert system that automates the capture and interpretation of data, will achieve an economical solution to the constraints posed.

Introducción

En la actualidad se ha investigado cómo desarrollar sistemas automáticos capaces de monitorear una máquina, con la habilidad de capturar datos en línea, aplicar métodos matemáticos y estadísticos para determinar la evidencia de síntomas de una falta específica, indicar la gravedad y localización probable; que brinde las acciones correctivas a seguir para eliminar el síntoma. Además debe ser capaz de reconfigurar el punto de operación de la máquina, que permita soportar las nuevas exigencias de operación. A un sistema con estas características es conocido como Sistema Administrador de Faltas en tiempo real [2], conocido por siglas en ingles SAF.

Los SAF son un paso evolutivo del mantenimiento basado en la condición (mantenimiento predictivo). El mantenimiento basado en la condición, usualmente presenta dos esquemas generales, en línea y fuera de línea.

Una técnica fuera de línea, por ejemplo, análisis de lubricantes, pueden revelar partículas metálicas anormales, lo que evidencia un mayor desgaste de las piezas.

En este caso, el diagnóstico se realiza con el equipo fuera de operación.

A diferencia de una técnica en línea, que permite la detección y diagnóstico con el equipo (motor eléctrico) en funcionamiento y con el equipo en operación (producción), como por ejemplo, el análisis de vibraciones, el cual se inicia con la captura de datos (señales) mediante el colector, los cuales se procesan y representan las señales en forma de espectro (gráfico de amplitud versus frecuencia, el cual indica el nivel de vibración mecánica en un punto específico y que frecuencia ocurre. Posterior, se realiza el análisis de los espectros mediante un analizador de vibraciones (software), el cual debe interpretar un experto, buscando como resultado evidencias de anomalías en la operación del motor eléctrico, comparando el nivel normal de operación con el valor real medido. Este tipo de técnica, es en línea, pero no en tiempo real, ya que la captura de datos y el análisis de la información se ejecutan en momentos distintos.

Los pasos de diagnóstico y detección de faltas descritas anteriormente se pueden automatizar y simplificar para el usuario mediante un SAF, que monitoree la máquina en todo momento y brinden acciones pertinentes para corregir faltas incipientes, lo cual mejorará la confiabilidad, disponibilidad y la mantenibilidad de los equipos que posean este tipo de sistemas, el cual sería equivalente a contar con un experto en línea y tiempo real que indica el estado de operación del equipo.

Sin embargo, el desarrollo de este paquete científico-tecnológico (SAF) no es una tarea trivial, pues se requiere de conocimientos interdisciplinarios para la elaboración de cada módulo del sistema, así como conocimiento experto de máquina (sistema) en estudio.

El presente artículo explora las etapas para desarrollar un SAF y propone la arquitectura, usando como base la

estructura de sistemas expertos empleando la inteligencia artificial (IA). Por lo que el artículo en la sección primera, brinda una serie de definiciones y conceptos generales, iniciando con un síntoma, una falta, una falla, tipos de faltas, y otros. La sección dos, muestra la estructura genérica de un sistema experto. La tercera sección muestra la estructura general de un sistema para la administración de faltas, así como una descripción de los distintos módulos y sub-módulos principales.

Conceptos y definiciones generales

Las siguientes definiciones son el resultado del comité SAFEPROCESS de la Federación Internacional de Control Automático (IFAC), ellas se pueden encontrar en las referencias [2,3,4]. A continuación se presentan los conceptos:

- Falta: desviación no permitida de al menos una característica de los parámetros de operación del sistema en condiciones nominales.
- Falla: interrupción permanente del sistema de desempeñar sus funciones bajo las condiciones nominales de operación.
- Mal funcionamiento: fenómeno intermitente irregular del sistema a cumplir su función.
- Síntoma: cambios observables y cuantificables del comportamiento normal.
- Detección de la falta: determinar una falla presente en un sistema y el momento en que ocurre. Se desconoce dónde se localiza.
- Aislamiento de la falta: determinar el tipo de falta, localización y su tiempo de detección.
- Identificación de la falta: determina el tamaño y el comportamiento de la falta en el tiempo.
- Diagnóstico de la falta: determinar el tipo, tamaño, localización y tiempo de ocurrencia de la falta detectada., a la detección de falta en el inicio de sus síntomas se conoce como predicción.

- Monitoreo: determinar las posibles condiciones del sistema físico en tiempo real, grabando información, reconociendo e indicando anomalías del comportamiento.
- Supervisión: monitoreo de un sistema físico y realizar acciones apropiadas para mantener la operación en caso de faltas.

Sistemas expertos

De acuerdo con [1], los Sistemas Expertos SE son: “un sistema informático (hardware y software) que simula a los expertos humanos en un área de especialización dada”. Usualmente los SE son aplicaciones informáticas que buscan una solución a un problema específico, para el cual se requiere de un base de conocimiento propia a cada disciplina. Esta base de conocimiento se adquiere a partir del razonamiento de expertos en el tema y a la experiencia de ingenieros y/o personal técnico relacionado con la problemática a resolver.

Los SE pueden clasificarse en determinísticos y estocásticos, de acuerdo a los métodos en que se obtiene el conocimiento. Los primeros son conocidos como sistemas basados en reglas, ya que, usan un mecanismo de razonamiento lógico. Los estocásticos, emplean la probabilidad como herramienta para reducir la incertidumbre, y se conocen como sistemas expertos probabilísticos y emplean como estrategia la inferencia probabilística. A modo general, para la construcción de un SE, requiere definir dos insumos fundamentales que son aportados por los expertos en el tema:

1. La forma de adquisición del nuevo conocimiento. Se responde a la pregunta: ¿Cómo se debe plantear el conocimiento?
2. La forma de realizar el aprendizaje. ¿Qué se debe aprender?

Ambos insumos, tienen la misma finalidad de establecer nuevos conocimientos relacionados al problema en cuestión.

Por un lado, la adquisición del nuevo conocimiento, es un conjunto de estrategias, que permiten actualizar la base de conocimiento con hechos futuros, de tal forma que el sistema pueda a partir de datos, deducir tendencias y asociarlas a nuevos fenómenos, ver figura N°1. Por otro lado, el aprendizaje, permite que los SE “aprendan” del problema, mediante el procesamiento y memorización de la información obtenida con las nuevas situaciones.

El resultado de los procesos anteriores, alimentan un subproceso llamado control de coherencia. Este subproceso establece mecanismos para validar el nuevo conocimiento adquirido e incorporado a la base de conocimiento existente. El resultado del control de coherencia es la base de conocimiento validado.

La base de conocimiento consiste en un conjunto de reglas comprensibles basado en hechos derivados de la situación en cuestión. El motor de inferencia utiliza la información de la base de conocimiento para analizar datos brutos adquiridos de algún proceso físico o fenómeno y así poder tomar acciones pertinentes. A continuación se ilustra las partes básicas de un sistema experto genérico.

¿Cuándo usar un sistema de este tipo?

El diseño e implementación de los SE requieren del conocimiento de varias disciplinas, además de un conjunto de elementos propios de la solución al problema dado, esto representa un alto costo. Sin embargo, el mantenimiento y su permanente uso permiten recuperar la inversión a mediano plazo, por ello se requiere un análisis de costo-beneficio en cada caso. Debe considerarse y evaluarse otros aspectos como el tiempo de respuesta (detección temprana de la falta), precisión y fiabilidad, además del tiempo de recuperación de la inversión. Los SE generalmente se recomiendan para las siguientes situaciones:

1. Cumplir la función de consultor, lo cual significa que el SE permite orientar al personal con poca experiencia para resolver problemas que requieren de un experto, dado que este es un recurso escaso o de un alto costo para la empresa.
2. Permite la unión de conocimiento de varios expertos, logrando una solución integral a un problema específico.
3. Se aumenta el tiempo de respuesta para las preguntas y soluciones.
4. Con el cómputo moderno, se aumenta la capacidad de procesamiento de

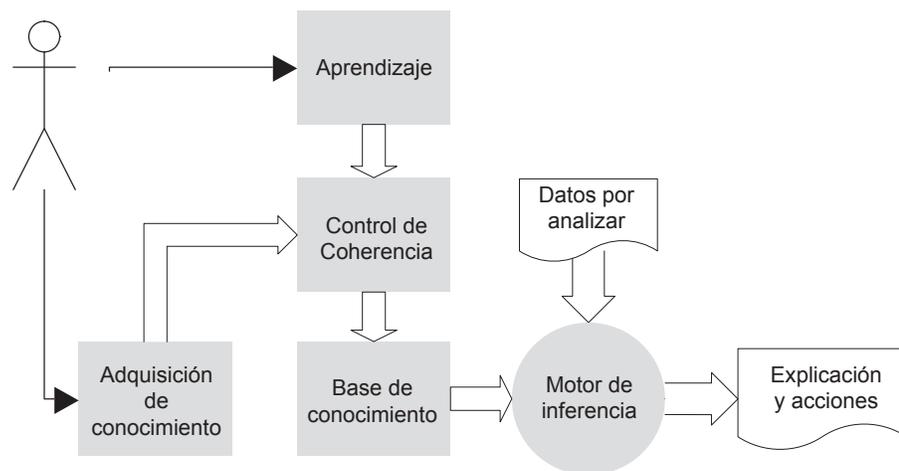


Figura 1. Esquema genérico de sistema experto. Investigadores.

la información, ayudando a resolver problemas de mayor complejidad que podría no ser resuelto por un ser humano en un tiempo razonable.

5. Para las tareas rutinarias y monótonas, apoyado en un análisis costo-beneficio viable.

6. Cuando la solución está sujeta a códigos variables o se requiere de un auto aprendizaje para adecuarse a las naturaleza del problema.

Sistema supervisor y administrador de faltas de motores de inducción

Los sistemas supervisores y administradores de faltas pretenden diagnosticar los síntomas que evidencian anomalías en el motor, es decir determinar el tipo de falta, su gravedad, localización, tiempo corto de respuesta y brindar acciones automáticas para prevenir una falla catastrófica en la máquina eléctrica. Además, el sistema brinda al personal

técnico, acciones correctivas que eliminan el causante de la falta. La figura 2, muestra el esquema de un sistema supervisor de faltas construido a partir del paradigma de sistemas expertos. A continuación se explicará el funcionamiento de cada componente del sistema de supervisión y administración de faltas.

Modelado del motor de inducción

Primeramente se debe tener claridad sobre qué sistema o proceso se desea modelar, para qué y cómo se obtiene su modelo.

Para conocer el proceso o sistema a modelar se necesita de una base de conocimiento del tema en estudio, como también la problemática a resolver. En este caso, se requiere de un modelo que permita la detección y diagnóstico de las faltas o síntomas presentes en las condiciones de operación del motor.

Estos síntomas deben identificarse mediante variables de entrada y salida del

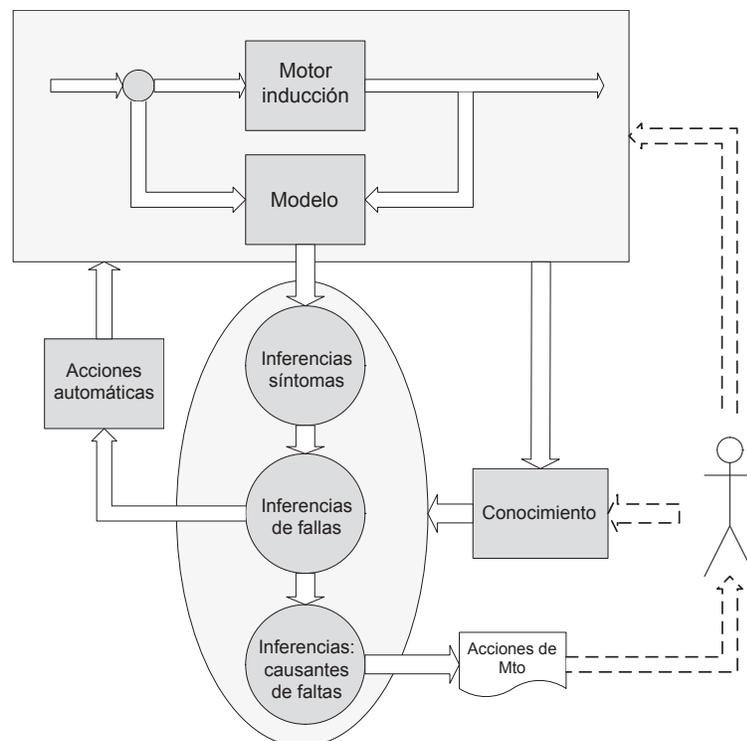


Figura 2. Esquema de un sistema de supervisión y administrador de faltas, diseñado a partir del paradigma de sistemas expertos.

sistema, además que estén relacionados con señales que evidencien posibles causantes de las fallas de estos equipos.

La base de conocimiento parte de una clasificación general de las variables que serán analizadas. Como se indica en [6], las faltas se pueden clasificar de distintas maneras, tales como:

- Faltas internas, como lo son inadecuada lubricación, calentamiento anormal, falta de mantenimiento.
- Faltas externas, tales como contaminación del ambiente, humedad, temperatura ambiente, radiación electromagnética, químicos corrosivos.

En la figura 3 se muestra un diagrama Ishikawa, o diagrama causa-efecto, que representa la principal falla de los motores trifásicos de inducción en Costa Rica [7], conocida como Sobrecarga. Además se indican las causas que originaron falla, las cuales se clasifican como: faltas iniciadoras o subyacentes, faltas contribuyentes y faltas detonantes [6].

Recordando para qué se requiere el modelo, corresponde indicar que el modelo debe identificar las variables que permitan

detectar y diagnosticar los problemas de forma temprana, para lograr prevenir y/o evitar la falla catastrófica del motor. Según [6] algunos ejemplos de faltas subyacentes son: inapropiada operación, inadecuada protección, componentes inadecuados, tareas básicas del mantenimiento (no realizadas o incompletas), inadecuada selección de componentes (la aplicación es incompatible con el diseño del dispositivo), inadecuada reparación del motor (no acatar los estándares del fabricante recomienda o materiales inadecuados). etc. Las faltas contribuyentes pueden ser alta temperatura ambiente (mayor a 40° C), humedad, frecuencia y voltaje anormal, pobre ventilación, alta vibración, armónicos, etc. Y las faltas detonantes pueden ser: sobrecarga mecánica, transiente de voltaje, motor trabado, etc.

A partir del diagrama anterior (figura N° 3), las faltas evolucionan de izquierda a derecha, lo que significa que, inicialmente se deben evitar las faltas subyacentes, las cuales son aquellas condiciones relacionadas con la instalación, mantenimiento y operación del equipo que no cumplen con la normativa requerida. Estas deben evitarse desde el diseño y

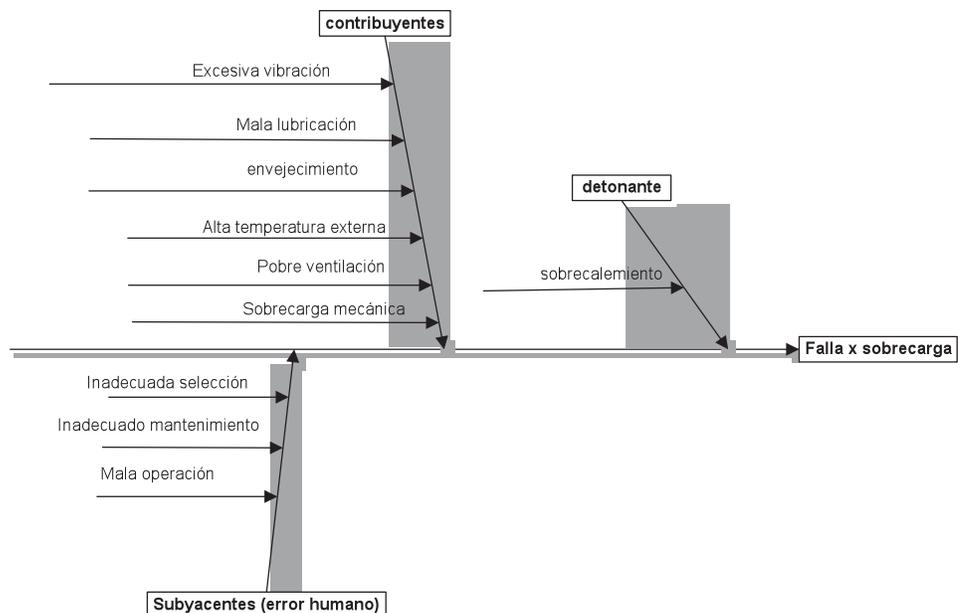


Figura 3. Diagrama Ishikawa de la falla sobrecarga. Investigadores.

montaje mismo, mediante la selección adecuada del motor para que el diseño sea compatible con el ambiente normal de operación.

Las faltas contribuyentes son aquellas que permiten incrementar el deterioro prematuro de los componentes del equipo, generando mayor vulnerabilidad del equipo a factores ocasionales (transiente de voltaje). Para la construcción y diseño del modelo del motor, se debe analizar las faltas contribuyentes y registrar para cada falta transformar una variable o señal física en una magnitud eléctrica o mecánica. De esta manera, se puede ingresar este dato como una variable de entrada al modelo.

Las faltas detonantes se caracterizan por desencadenar el problema y provocar la falla catastrófica o funcional.

Para la detección de faltas de un sistema se emplean un conjunto de técnicas, agrupadas en dos métodos [2]:

- 1- Detección con señales simples.
- 2- Detección con señales múltiples y modelos.

Cada una de las técnicas posee un conjunto de ventajas y desventajas, las cuales depende principalmente del sistema en estudio.

Para este artículo, se basa en el diagnóstico y detección de faltas empleando modelos de las faltas en el motor trifásico de inducción. Como primer paso de debe encontrar la representación el proceso o equipo mediante modelos óptimos de la realidad. Ver figura N° 4, donde se representa un esquema general sobre el sistema y el modelado.

Recordando para qué se requiere el modelo, corresponde indicar que el modelo debe identificar las variables que permitan detectar y diagnosticar los problemas de forma temprana, para lograr prevenir y/o evitar la falla catastrófica del motor. Según [6] algunos ejemplos de faltas subyacentes son: inapropiada operación, inadecuada

protección, componentes inadecuados, tareas básicas del mantenimiento (no realizadas o incompletas), inadecuada selección de componentes (la aplicación es incompatible con el diseño del dispositivo), inadecuada reparación del motor (no acatar los estándares del fabricante recomienda o materiales inadecuados). Las faltas contribuyentes pueden ser alta temperatura ambiente (mayor a 40° C), humedad, frecuencia y voltaje anormal, pobre ventilación, alta vibración, armónicos, etc. Y las faltas detonantes pueden ser: sobrecarga mecánica, transiente de voltaje, motor trabado, etc.

A partir del diagrama anterior (figura N° 3), las faltas evolucionan de izquierda a derecha, lo que significa que, inicialmente se deben evitar las faltas subyacentes, las cuales son aquellas condiciones relacionadas con la instalación, mantenimiento y operación del equipo que no cumplen con la normativa requerida. Estas deben evitarse desde el diseño y montaje mismo, mediante la selección adecuada del motor para que el diseño sea compatible con el ambiente normal de operación.

Las faltas contribuyentes son aquellas que permiten incrementar el deterioro prematuro de los componentes del equipo, generando mayor vulnerabilidad del equipo a factores ocasionales (transiente de voltaje). Para la construcción y diseño del modelo del motor, se debe analizar las faltas contribuyentes y registrar para cada falta transformar una variable o señal física en una magnitud eléctrica o mecánica. De esta manera, se puede ingresar este dato como una variable de entrada al modelo.

Las faltas detonantes se caracterizan por desencadenar el problema y provocar la falla catastrófica o funcional.

Para la detección de faltas de un sistema se emplean un conjunto de técnicas, agrupadas en dos métodos [2]:

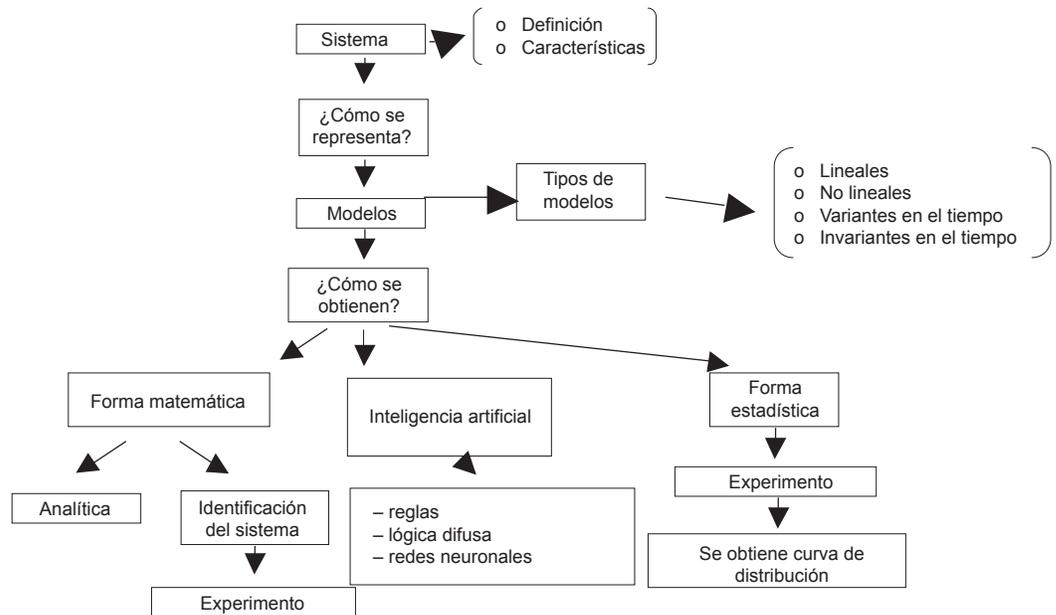


Figura 4. Áreas de investigación para la obtención de modelos.

- 1- Detección con señales simples.
- 2- Detección con señales múltiples y modelos.

Cada una de las técnicas posee un conjunto de ventajas y desventajas, las cuales depende principalmente del sistema en estudio.

Para este artículo, se base en el diagnóstico y detección de faltas empleando modelos de las faltas en el motor trifásico de inducción.

Como primer paso de debe encontrar la representación el proceso o equipo mediante modelos óptimos de la realidad. Ver figura N° 4, donde se representa un esquema general sobre el sistema y el modelado.

A partir de la programación del conjunto de reglas del modelo, se comparan las señales reales del motor con la información obtenida del modelo, que genera como resultado parámetros, variables de estado o residuos (diferencias entre señales), esto permitirá producir un conjunto de síntomas, los cuales se deberán clasificar en la inferencia de faltas. Por ejemplo, se

registra una tendencia de la temperatura interna del devanado mayor al 10%, (todas las variables de entrada permanecen contrastes), esto permite suponer una falta o anomalía en las condiciones propias de operación del equipo. En esta etapa solo se detecta el problema.

Inferencias de faltas

Este módulo recibe los datos proporcionados por el sistema de inferencias de síntomas, y también las señales reales del motor, o datos proporcionados por el usuario. Los síntomas se clasifican en un conjunto de faltas, por ejemplo clasificarlo como estrés térmico. También este módulo debe enviar acciones automáticas al sistema de control del motor para detenerlo en caso de evidenciarse una anomalía que puede ocasionar una falla en poco tiempo. O bien, direccionar la información a la siguiente etapa.

Inferencia de causantes de las faltas

Considerando la información que proporciona la inferencia de la falta, se agrupa el conjunto de las posibles causantes de faltas, las cuales deben descartarse o considerarse con la información

proveniente del sistema real y la que proporciona el usuario. Para ello existe una metodología que brinda una guía para localizar las causas de falla [8], y si la información programada en este módulo no es suficiente para determinar la causa, el usuario debe intervenir para proporcionar una nueva base de conocimiento que permite la flexibilidad para que el sistema experto pueda aprender con las situaciones futuras y que eran desconocidas.

Al conocer las causas de las faltas, se emite un informe de las acciones correctivas por realizar para eliminar la causa del problema, lo cual permitirá prevenir la manifestación de la falla y, por lo tanto, la no producción.

Conocimiento para los motores de inferencia

Es importante recalcar que los sistemas expertos poseen una base de conocimiento, sin embargo se debe contar con la flexibilidad de adquirir nuevo conocimiento generado por las situaciones futuras y desconocidas para la condición en particular en que opera el equipo. Para ello se requiere también el monitoreo constante de señales previamente seleccionadas que faciliten la interpretación y el diagnóstico de los problemas.

Del esquema mostrado en la figura N° 2, se puede agrupar en las etapas de detección y en el diagnóstico de las faltas. La detección de faltas inicia con el procesamiento de la información generada por el sistema y que procesa el motor de inferencia de síntomas, y que continúa con el motor de inferencia de faltas, ya que, los síntomas generados permiten determinar una falta presente en un sistema y el momento en que ocurre, aunque se desconoce su localización, sin embargo, dependiendo de la severidad del problema detectado, se ejecuta un diagnóstico temprano, ya que, se ejecutan acciones automáticas para la prevención.

En el caso del diagnóstico, en el cual se determina el tipo, tamaño, localización y tiempo de ocurrencia de la falta, así como las acciones de mantenimiento, este proceso se realiza en el motor de inferencia de causantes de faltas.

Conclusiones

Del artículo presenta una propuesta de la arquitectura que debe utilizarse para la detección y diagnóstico de faltas en motores trifásicos de inducción a partir de sistemas expertos.

Bibliografía

- [1] Castillo, E; Gutiérrez, J.M.; Hadi, H.S. *Expert Systems and Probabilistic Network Models (Monographs in Computer Science)*. Springer; (December 13, 1996).
- [2]. Isermann, Rolf. *Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- [3] R.J. Patton, P. Frank and R. Clark (1989) *Fault Diagnosis in Dynamic Systems. Theory and applications*. Control Engineering Series, Prentice Hall (A new edition in 2000).
- [4] Simani Silvio, Fantuzzi Cesare, Ron Patton, *Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques*. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [5] Zhengdao. Z, Shousong. H. *A new method for fault prediction of model unknown nonlinear system*. Journal of the Franklin Institute, Vol 345, No 2, Marzo 2008, Pag 136–153.
- [6] Hamid A. Toliyat, G. B. Kliman (2004) *Handbook of electric motors*. Taylor & Francis Group. USA.
- [7] Gómez, Luis y Guerrero, Osvaldo (2008) *Estudio de Fallas de Motores Trifásicos de Inducción*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- [8] Gómez, Luis y Guerrero, Osvaldo (2009) *Metodología para la reducción de fallas en motores trifásicos de inducción*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.