

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS
PROYECTOS Y ACTIVIDADES DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN**

INFORME FINAL

Nombre del proyecto o actividad:

Diseño de experimentos para modelar las faltas de mayor incidencia en el estator de los motores trifásicos de inducción.

Departamento Académico responsable:

Escuela de Ingeniería Electromecánica

Asesor Oficial de Proyectos:

Máster Rolvin Salas Quesada

Investigador(a) responsable:

Ing. Osvaldo Guerrero Castro

Otros investigadores:

Ing. Luis Diego Murillo Soto

MARZO 2012

RECONOCIMIENTO

A la labor de la Comisión de Maestría (Ing. Ignacio Del Valle y Ing. Ana Lucía Morera) que ad honorem realizan un trabajo de aporte e incentivo a la investigación, que con sus observaciones, comentarios y aportes a las propuestas de investigación han contribuido a que la Escuela de Ingeniería Electromecánica incremente su participación en los proyectos de investigación.

Al trabajo del Director de la Escuela (Ing. Luis Gómez) por creer en esta iniciativa y dar su apoyo y respaldo incondicional a la labor de investigación de la escuela.

A los estudiantes del curso de Laboratorio de Máquinas del segundo semestre 2011 de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, por participar en actividades y trabajos que contribuyeron con este proyecto de investigación. Alberto Paniagua Barboza, Ricardo Castro Badilla, Freddy Arguedas Rocha, Yalitza Torres Pérez, Jesús Campos Agüero, Juan Carlos Arrieta F, Idalberto González A, Hector Rosales L, David Vaglio U, Gabriel Campos Z, Gilbert Camacho A, Daniel Vargas A, Emmanuel Jiménez, Alonso Cambroner, Andrés Cambroner, Alonso de la Vega, Francisco Quirós, Carlos Ocampo.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Descripción del problema	2
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo general.....	3
2.2	Objetivo específico	3
3	REVISIÓN LITERARIA	4
3.1	Definición de conceptos generales.....	4
3.2	Sistema:.....	4
3.3	Cómo se representan los sistemas.....	4
3.4	Modelos físicos	5
3.5	Tipos de modelos	6
3.6	¿Cómo de obtienen los modelos?	7
3.7	Modelos Térmicos en motores.....	8
3.8	Minería de datos	11
3.8.1	Introducción.....	11
3.8.2	Proceso de adquisición de conocimiento KDD.....	12
3.8.3	Etapas del procesos KDD	12
3.8.4	Técnicas de minería de datos	12
3.9	Desarrollo de experimentos.....	14
4	MATERIALES Y MÉTODOS (DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS).....	15
4.1	Características del cuarto de pruebas	15
4.1	Diseño mecánico y eléctrico	15
4.1.1	Instalación eléctrica.....	15
4.1.2	Montaje mecánico	16
4.2	Integración de la bancada	17
4.2.1	Selección de instrumentos	18
4.3	Instalación de los equipos (integración banco de pruebas)	18
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
5.1	Primer objetivo específico: Establecer los métodos matemáticos y estadísticos que permitan modelar las faltas.	21
5.1.1	Clasificación de los métodos empleados en el modelado de las faltas	21
5.1.2	Métodos matemáticos y estadísticos para obtener el modelado de las faltas.....	21
5.1.3	Métodos de detección de faltas mediante señales y modelos de sistemas FDI..	23
5.1.4	Detección de faltas por chequeo de límites.....	24
5.1.5	Métodos de detección de faltas basado en modelos	27
5.1.6	Métodos para diagnóstico mediante señales y modelos de sistemas.....	28
5.1.7	Diagnóstico empleando modelo de sistemas	29
5.1.8	Diagnóstico empleando modelo de señales.....	30

5.2	Segundo objetivo específico. Evaluar entre dos y cuatro métodos de obtención de modelado de faltas.....	31
5.2.1	Selección de las variables de entrada a utilizar en el modelado de las faltas.....	31
5.3	Tercer objetivo específico.....	37
5.3.1	Contar con un diseño de uno o varios experimentos que permitan la obtención de datos, para sus posteriores análisis y obtención del modelo o modelos del sistema de fallas	37
6	CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	49
7	APORTES Y ALCANCES.....	50
8	BIBLIOGRAFÍA.....	51
9	ANEXOS.....	53

RESUMEN

El presente documento tiene como objetivo principal diseñar experimentos para modelar las faltas de mayor incidencia en el estator de los motores trifásicos de inducción, en el cual se proponen cuatro experimentos, cuyos datos obtenidos permitirán conocer y evaluar los efectos sobre la temperatura interna de los devanados estáticos cuando el motor experimenta faltas a su funcionamiento tales como, roles dañados, funcionar sin ventilador, voltajes de línea mayor y menor que el voltaje de línea nominal y por último incrementos de la temperatura exterior cercana a los 50 °C.

Para el desarrollo de este proyecto, se presenta la descripción de los antecedentes de la problemática a resolver, una descripción de la revisión literaria más importante relacionada con la solución, los principales logros obtenidos, conclusiones y recomendaciones.

Adicionalmente se presenta los materiales, equipos y procedimiento empleado para construir la bancada de las pruebas, que permitan alcanzar los objetivos propuestos en cada experimento, y obtener los datos suficientes y que su posterior análisis permita encontrar el modelo matemático que describe el comportamiento a predecir, en este caso, la temperatura interna en los devanados del estator cuando el motor eléctrico opera con faltas

Finalmente se describen los objetivos, equipo, instrumentos, diagramas, procedimientos, normas de seguridad y demás información que permita realizar los cuatro experimentos propuestos, pero que además se logra la captura de datos en forma ordenada que faciliten posteriormente su análisis.

Palabras clave

Modelos térmicos

Técnicas de modelado

Detección de fallas en motores eléctricos

Diagnóstico de fallas en motores eléctricos

Lista de tablas

Tabla N° 1 Técnicas basadas en MCSA (Motor Current Signature Analysis).....	33
Tabla N° 2 Criterios de evaluación de los métodos para detectar fallas.....	34
Tabla N° 3. Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.	41
Tabla N° 4 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.	41
Tabla N° 5 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.	45
Tabla N° 6 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.	46
Tabla N° 7 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.Sin cobertor	47
Tabla N° 8 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.Sin cobertor y sin ventilador	48

Lista de figuras

Figura N° 1. Conceptos asociados al modelado de sistemas físicos.....	7
Figura N° 2. Modelo térmico de primer orden. Tomado de Zocholl 2005	9
Figura N° 3. Red térmica. Tomado de Kylande 1995	10
Figura N° 4. Diagrama de conexión eléctrica de la máquina.	16
Figura N° 5 Montaje mecánico necesario para el experimento.....	17
Figura N° 6. Ubicación de los puntos donde se ubican los sensores de temperatura.	18
Figura N° 7. Conexión del Fluke B43 para motor de conexión de delta	19
Figura N° 8. Medición de rpm con un tacómetro digital	19
Figura N° 9. Métodos de detección de faltas mediante el modelado del proceso o sistema. .	21
Figura N° 10. Clasificación funcional de los sistemas FDI. [Investigadores].....	22
Figura N° 11. Esquema de un sistema de detección de faltas mediante modelado de las señales.	23
Figura N° 12. Esquema de un sistema de detección de faltas, mediante el modelado del proceso o sistema.....	24
Figura N° 13. Esquema de un sistema que aplica ecuaciones de error.	27
Figura N° 14. Diagrama de estimación de estado	27
Figura N° 15. Métodos de diagnóstico de faltas mediante el modelado del proceso o sistema.	29
Figura N° 16. Esquema de un sistema para diagnóstico de faltas empleando modelo del proceso y modelo de señales.	30
Figura N° 17. Diagrama Ishikawa que representa la falla por sobrecarga (investigadores). ..	31
Figura N° 18 Placa de datos motor eléctrico Baldor	37
Figura N° 19 Medidor de energía marca Fluke	38
Figura N° 20 Fotografía de la conexión del autotransformador.	38
Figura N° 21 Conexión de un motor de inducción para un voltaje de 230 voltios trifásico.....	40
Figura N° 22 Conexión del fluke captura de datos.....	40
Figura N° 23 Conexión de un motor de inducción para un voltaje de 230 voltios trifásico.....	44

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En proyectos de investigación anteriores supervisados por la VIE se desarrollaron temáticas relacionadas con la búsqueda de las causas de las fallas más comunes en motores eléctricos, donde uno de los productos obtenidos fue una propuesta de guía metodológica para la detección de los causantes de falla [GueGo09], y que busca la prevención de las mismas (localizar y eliminar el origen o causa principal del problema), cuando el motor ha fallado “análisis post-mortem”.

Sin embargo, para construir un sistema o equipo que logre un diagnóstico en línea y que detecte problemas antes de la falla del motor, no es suficiente con los resultados que se han obtenido en las investigaciones anteriores [GueGo08] & [GueGo09]. Para lograr un sistema de detección y diagnóstico, es necesario contar con un modelo matemático de las condiciones de operación anormales (faltas o síntomas de falla). La intervención a tiempo de estas condiciones anormales evitará una falla catastrófica.

Los motores trifásicos de inducción, debido a su relativa sencillez, robustez y precio, justifican su uso en múltiples aplicaciones, lo que significa que la industria nacional es dependiente de estas máquinas. Sin embargo, en la mayoría de sus usos no siempre se conocen sus condiciones óptimas de operación, capacidades y limitaciones, y por ende, se provocan fallas prematuras (que se pueden prevenir, predecir y evitar) que alteran la continuidad del proceso productivo; la cual repercute directamente sobre la entrega, costo y tiempo del producto terminado; reduciendo la competitividad de las empresas, tanto a nivel nacional como internacional.

Por tal motivo, como resultado de este proyecto, se busca diseñar los experimentos que permitan modelar las fallas típicas de estos motores (condiciones normales y anormales), que logre la predicción (que podría ocurrir) y prevención (evitar que ocurra) de las mismas.

Al contar con modelos matemáticos o estadísticos, es posible lograr una aplicación práctica de los mismos, mediante sistemas expertos, cuyo objetivo sea contribuir con la detección y diagnóstico de las condiciones del motor eléctrico. Esta detección y diagnóstico requerirá de la medición de un conjunto de variables que determinen la condición de operación del motor eléctrico, pero además que sean fácilmente medibles y accesibles por el usuario o técnico que brinda mantenimiento.

Se han investigado distintos modelos matemáticos y estructuras de detección y diagnóstico que permiten construir este tipo de sistemas. A partir de los estudios realizados en [GueGo08] se estableció que los motores en Costa Rica presentan mayoritariamente problemas a nivel térmico, por tal razón se abocó en el estudio de modelos que permitan detectar y diagnosticar problemas a este nivel. Se han revisado distintos modelos entre ellos y los más destacados están el modelo de señales eléctricas MCSA empleando FFT y modelo de sistema usando resistencias térmicas Lumped, modelo térmicos de primer de orden, etc.

1.2 Descripción del problema

Actualmente, cuando un motor eléctrico falla en la industria, los encargados se enfocan en amortiguar la pérdida de productividad de la planta, por lo que se pide que el motor sea reparado y puesto a funcionar en el menor tiempo posible. Estas acciones correctivas de emergencia tienden a restar importancia al “análisis post-mortem” de la falla. Por lo que se pierde una valiosa oportunidad de mejora, ya que no se logra descubrir el conjunto de causantes de la falla y corregirlas.

Por otra parte, los modelos estáticos y dinámicos de los motores de inducción representan su funcionamiento en estado estable o transitorio, estos modelos permiten el análisis en operación contemplando las variables eléctricas y mecánicas, sin embargo, estos modelos no están orientados a detectar y diagnosticar las fallas de estas máquinas.

En sintonía con la problemática nacional, los modelos térmicos analizados en la revisión de literatura, no están orientados al desarrollo de sistemas de detección y diagnóstico de faltas. Por lo que, las faltas térmicas de mayor incidencia en el país, no poseen una representación matemática que permitan construir eventual mente un sistema de detección y diagnóstico.

La carencia de modelos precisos para detección y diagnóstico de las fallas de los motores eléctricos de inducción, que permitan indicar el punto óptimo y las condiciones mínimas requeridas que contribuya a una adecuada operación y que además prolongue la vida útil y tiempo de producción, impide diseñar un adecuado sistema automatizado del monitoreo y alarma de la condición del motor eléctrico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar un experimento que permita modelar las faltas de mayor incidencia en el estator de los motores trifásicos de inducción.

2.2 Objetivo específico

1. Establecer los métodos matemáticos y estadísticos que permitan modelar las faltas.
2. Evaluar entre dos y cuatro métodos de obtención de modelado de faltas.
3. Planear el diseño del experimento para la obtención del modelo

3 REVISIÓN LITERARIA

3.1 Definición de conceptos generales

La finalidad del proyecto de investigación radica en la identificación de las principales técnicas y métodos que permitan representar el comportamiento térmico de un motor eléctrico en operación mediante modelos. Es imprescindible realizar definiciones propias de esta temática, las cuales se desarrollan a continuación.

3.2 Sistema:

Es un objeto de muchas variables de diferentes tipos que interactúan y producen signos observables comúnmente llamadas salidas. Según el libro Análisis de Sistemas Lineales [RoSaYu02], Un sistema se define como: “*un ente organizado, resultante de la interconexión de elementos básicos, que según el juicio de un observador tiene una finalidad y carácter determinado*”.

El sistema puede ser afectado por estímulos externos, si estos son manipulados por el observador son llamadas señales de entrada, de lo contrario se conocen como disturbios o perturbaciones. Las señales de entrada son observables mediante la influencia que tienen en las señales de salida.

Estas señales representan variables del sistema, que pueden ser de dos tipos: determinísticas y estocásticas. Normalmente las primeras corresponden a las señales de entrada manipuladas por el observador y las segundas se asocian a las perturbaciones que suelen ser aleatorias.

La mayoría de los sistemas comparten las mismas características comunes, que incluyen:

- Abstracciones de la realidad.
- Los sistemas tienen una estructura que está definida por sus partes y su composición.
- Un sistema tiene un comportamiento, que implica entradas, proceso y salidas de material, información o energía.
- Varias partes de un sistema tienen sus propias funciones, así como las relaciones estructurales entre sí.

El comportamiento de los sistemas en el tiempo, depende de:

- Los elementos que lo forman y su interconexión, descritos mediante un modelo matemático.
- Los estímulos, entradas o excitaciones aplicados al sistema.
- La historia del sistema, condensada en un conjunto de condiciones iniciales.
- La variable independiente tiempo (cuando los elementos del sistema y/o la interconexión de ellos cambian a medida que el tiempo transcurre).

3.3 Cómo se representan los sistemas

El principal objeto de contar con una representación de un sistema es el poder predecir y analizar el comportamiento del sistema en el tiempo. Típicamente las relaciones se representan mediante una expresión matemática, pero podría ser también una tabla o gráfico.

Uno de los aspectos esenciales que interesa en ciencias aplicadas e ingeniería es la representación de sistemas mediante un modelo, que lo describa con suficiente detalle y permita analizar sus propiedades fundamentales.

Muchos sistemas pueden representarse por modelos lineales de razonable fidelidad; y existen poderosas herramientas para analizar y sintetizar este tipo de sistemas.

3.4 Modelos físicos

Un modelo es una representación aproximada de la realidad del sistema, y su grado de fidelidad depende de muchos factores, siendo uno de ellos el propósito del modelo.

En el análisis de sistemas, por lo general se parte de un modelo que describe al sistema, sin embargo cuanto no se cuenta con ello, es indispensable iniciar con la identificación del sistema que permite construir un modelo base que posteriormente se deberá perfeccionar y optimizar con diferentes técnicas.

Naturalmente existen diferentes formas de describir un sistema dado, dando lugar a diferentes modelos, según sea el aspecto del sistema que interesa describir con mayor énfasis. Además, no existe un único modelo para un sistema, ya que al modelar siempre existe alguna implicación implícita de la realidad, la cual, en la mayor parte de los casos, resulta demasiado compleja para describir todos sus aspectos.

De esta forma, una decisión fundamental a la hora de modelar un sistema es definir el objetivo del modelo, es decir, cuales son los aspectos esenciales que se quiere capturar.

La teoría y herramientas existentes para modelar de sistemas son muy diversas, y en ellas se combinan leyes de la física, la química, la termodinámica, además de teoría de señales, procesamiento de datos, matemáticas y herramientas numéricas. De hecho, un modelo generalmente no se obtiene de una sola vez, sino que se construye en **un proceso iterativo**, que considera la calidad de los resultados obtenidos con él en las diferentes etapas, por ejemplo, para hacer control sobre un sistema o predecir su comportamiento.

Es importante señalar que el objetivo esencial de un modelo es tener un mecanismo que permita predecir el comportamiento del sistema bajo condiciones de excitación distintas a las observadas.

En otras palabras el modelo es un mecanismo de inferencia y predicción.

Otra idea que aparece en la definición del problema es que la construcción del mejor modelo tiene asociado un criterio de calidad óptima.

En la determinación de un modelo existen tres elementos fundamentales:

- La selección de la clase de modelo. Por ejemplo, una ecuación diferencial de cierto orden.
- Definición experimento para la recolección de datos. Por ejemplo, aplicar una excitación de amplio espectro al sistema.
- Definición de criterios de optimización, que permite seleccionar uno de los miembros de la clase elegida en base a los datos experimentales. Por ejemplo, el minimizar la suma (o integral) de los errores cuadráticos.

Los métodos más robustos que se conocen para construir modelos son aquellos que usan un criterio de optimización cuadrática.

- En base a la entrada de la planta y la salida del modelo. Este enfoque es la base de los llamados métodos de error de predicción, reconocidos por su sigla inglesa PEM (prediction error methods).
- En base a la entrada del modelo, la que resulta de medir la entrada a la planta y a la salida del modelo. Esta elección genera los métodos conocidos de generación de errores en la variables
- En base a la entrada de la planta y la salida de la planta. Esta elección es la base del método clásico de estimación por errores cuadráticos. Es conocido por la sigla inglesa LSE (least squares errors). Ese el método más robusto y más usado.

3.5 Tipos de modelos

Las técnicas generales para modelar un sistema, generan modelos de ecuaciones y reglas de afirmaciones. Por facilidad en el diseño de sistemas expertos, los modelos empleados se enfocan mediante reglas, que es una forma de representar el conocimiento del Sistema Experto.

A partir del diagrama de la figura N° 1, los sistemas o procesos se pueden representar mediante modelos físicos, los cuales se agrupan en varios tipos de modelos.

Se encuentran los modelos determinísticos, los cuales mediante ecuaciones lineales, no lineales, variantes e invariantes en el tiempo, permiten representar de la mejor maneja el sistema, según corresponda, también se incluyen los estadísticos, que requieren de una base de datos del problema en estudio.

Deterministas

Lineales: se dice que un modelo es lineal si cumple con las propiedades de superposición y homogeneidad.

La propiedad de superposición encierra la idea que la salida del sistema se puede calcular separando los efectos de componentes del estado y/o componentes de la salida, y luego sumando (superponiendo) las respuestas a cada uno de esos componentes.

Por su parte, la idea de homogeneidad se expresa en la proporcionalidad en la entrada y/o el estado se propaga a la salida sin alteración.

No lineales: son los modelos que no presentan homogeneidad o/y proporcionalidad.

Invariantes en el tiempo: Un sistema es invariante en el tiempo cuando las propiedades del sistema no cambian en el tiempo. Se entiende un sistema invariante en el tiempo, cuando se retarda la entrada (y las condiciones iniciales) y la respuesta es la misma que antes, pero retardada en la misma cantidad.

En rigor, no existen los sistemas invariantes en el tiempo, excepto en su expresión matemática pura. Sin embargo, es frecuente que la variación que experimenta un sistema dado con el transcurso del tiempo sea tan lenta, que se considera despreciable para todo efecto práctico.

Otro aspecto a observar es que la invarianza en el tiempo (al igual que la linealidad) no es necesariamente una propiedad intrínseca de un sistema.

La propiedad de invarianza en el tiempo, en conjunto con la propiedad de linealidad, son las que permiten aplicar una serie de potentes herramientas de análisis, síntesis y diseño de sistemas.

Variantes en el tiempo: los parámetros del modelo experimentan variaciones con respecto al tiempo.

Cualitativos y estocásticos

Los modelos cualitativos y estocásticos, los cuales se basan en reglas que describen el comportamiento del sistema y probabilísticos, que a partir de un análisis estadístico, se determinan con la probabilidad de ocurrencia del evento.

3.6 ¿Cómo de obtienen los modelos?

Estos modelos se obtienen a partir de tres formas.

- Modelo analítico o teórico, que parte de los principios físicos básicos de la disciplina.
- Modelos experimentales, que mediante el diseño e implementación de un experimento, se logra encontrar la relación entre variables, que serán la representación del comportamiento del sistema.
- Inteligencia artificial, que emplea lógica difusa, redes neuronales, sistemas basado en reglas y sistemas híbridos que combinan los anteriores.

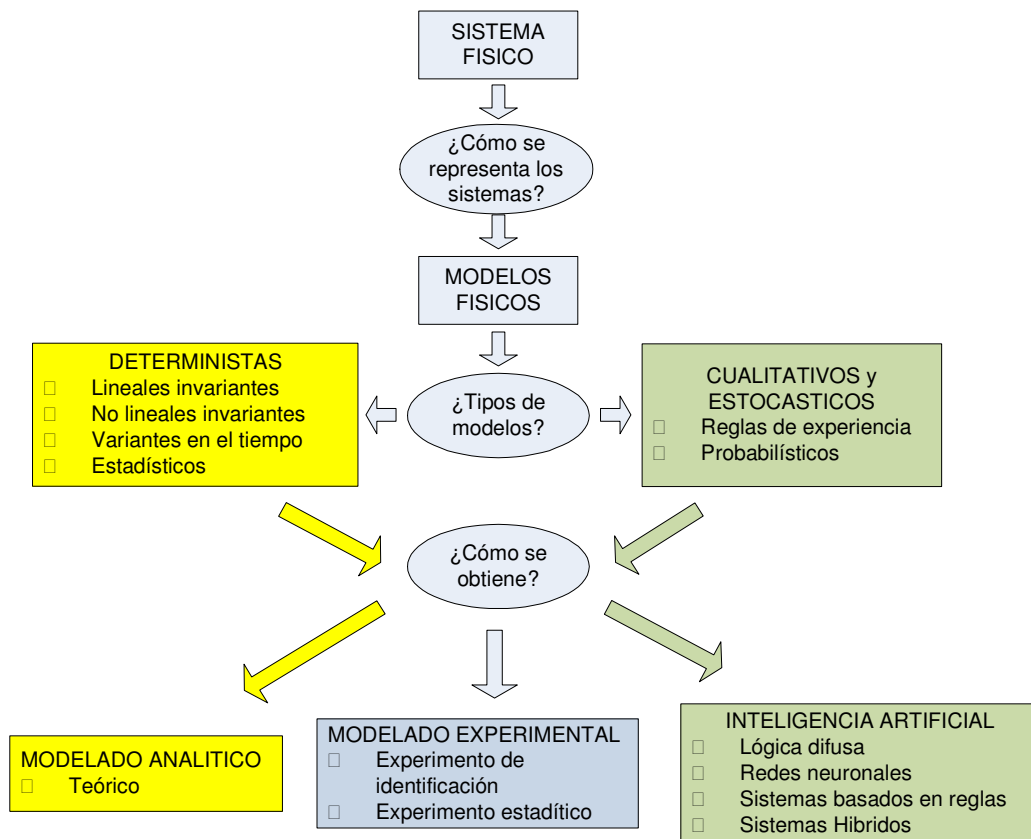


Figura N° 1. Conceptos asociados al modelado de sistemas físicos. Visio 2007. Investigadores

3.7 Modelos Térmicos en motores

El incremento de temperatura dentro de un motor de inducción es causado por la acumulación de calor en la máquina. El calor del motor es producto principalmente de sus pérdidas, estas pérdidas se pueden agrupar en dependientes de la corriente y las independientes [Chap 06].

Las pérdidas dependientes de la corriente son:

- Pérdidas en el cobre del estator.
- Pérdidas en el cobre del rotor.
- Pérdidas diversas.

Las pérdidas independientes de la corriente son:

- Pérdidas de núcleo, producto de la histéresis y corrientes parásitas.
- Pérdidas de fricción y vendaval.

Durante la conversión de energía eléctrica a mecánica en el motor de inducción, la energía perdida fluye en forma de calor y es disipada mediante la conducción, convección y radiación.

Por otra parte, los factores externos que afectan la temperatura de motor [EASA, 2004], son los siguientes:

- Sobrecarga mecánica, entendida como la demanda de más potencia mecánica superior a la nominal.
- Variaciones del voltaje de línea y desbalance de voltajes.
- Cambios en la temperatura ambiental.
- Pobre ventilación.
- Ciclo de trabajo de la carga.

De acuerdo con [Gao06] la estimación de las temperaturas internas del motor se puede realizar de las siguientes tres formas.

1. Mediante medición directa usando termocuplas, o termistores, o RTD's o cámaras infrarrojas.
2. Mediante la estimación de un modelo térmico.
3. Mediante la estimación de parámetros.

La medición directa de temperaturas [Venk05] ofrece una visión detallada de la temperatura de máquina, sin embargo la utilización de estas técnicas para la detección y diagnóstico de las faltas es poco factible para motores de pequeña y mediana potencia debido a las siguientes razones:

- La temperatura interna del motor no es uniforme, y varía de acuerdo al componente o zona interna del motor, por lo que es necesario colocar uno o varios puntos internos de medición para poder localizar las faltas. Además, si existe factores externos como desbalance de voltajes, existirán zonas del devanado más calientes que otras, habrá que colocar varios sensores.
- El monitoreo por sensores de temperatura no es aconsejable para medición de transientes térmicos rápidos.

- Los motores convencionales no poseen este tipo de sensores, por lo que la implementación de este esquema de monitoreo resulta poco práctico, dado que es un esquema intrusivo.

Por otra parte, los modelos térmicos de motores se dividen en tres líneas básicas de desarrollo, las cuales buscan determinar las temperaturas de forma no intrusiva.

- Modelos de curvas de sobre corriente
- Modelos térmicos de primer orden.
- Modelos por redes de resistencias térmicas.

La utilización de sobrecargas térmicas, ya sea por aleación eutéctica o bimetálico, se construyen para proteger el motor de sobrecarga. La curva de protección de estos dispositivos, modela la curva de sobre corriente, y esta es función inversa del cuadrado de la corriente y el tiempo. Esta curva de sobre corrientes se superpone a la curva de falla del motor, como la curva del dispositivo se adelanta, se protege al motor. La construcción e implementación de las curvas deben cumplir la normativa IEEE 620-1996 y la IEEE C37.96-2000, además en [Zoch01] muestra como se deducen y derivan las curvas de protección. Se dice que los elementos térmicos son dispositivos de protección con un modelo brusco y su funcionamiento depende de los adecuados procedimientos de selección. Además, no son aptos para detección y diagnóstico de faltas térmicas.

Los Modelos térmicos de primer orden son implementados comercialmente por los relés de estado sólido (ver figura N° 2). No es apto para la detección ni diagnóstico de motores, por cuanto realiza una estimación promedio de la temperatura interna de la máquina. Este es un modelo simple no apto para el diseño, pero si para la detección de la sobrecarga mecánica y el ciclo de operación. En [Zocholl, 2005] se realiza un estudio de las ecuaciones del modelo, su comportamiento ante cargas cíclicas, y sobrecarga.

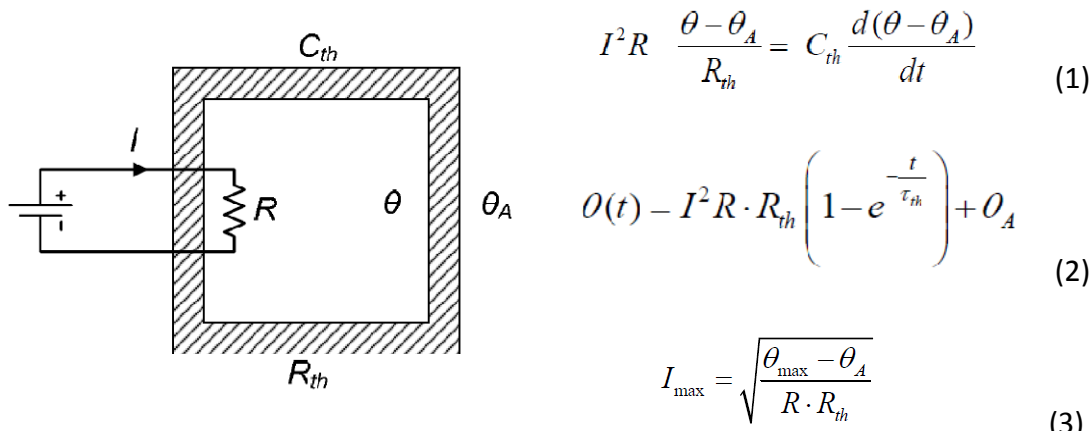
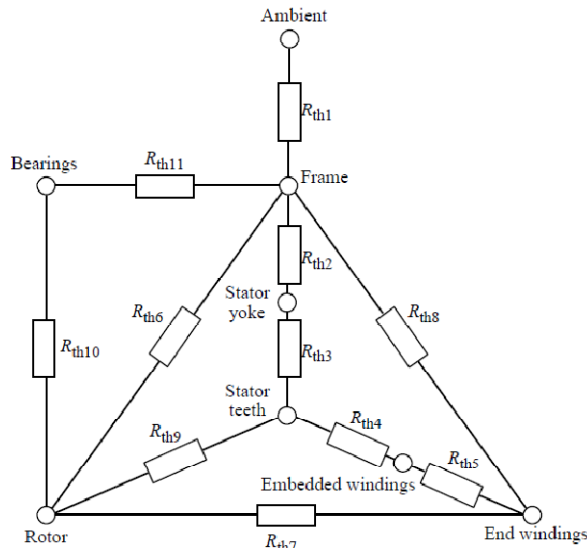


Figura N° 2. Modelo térmico de primer orden. Tomado de Zocholl 2005[Zoch05]

Figura N° 2. Modelo térmico de primer orden, donde I es corriente, R resistencia eléctrica en ohms, θ es temperatura interna, θ_A temperatura ambiente, R_{th} es la resistencia térmica del sistema, y C_{th} es la capacitancia térmica. La ecuación 1 muestra el modelo general, la ecuación 2 su solución, y la ecuación 3 despejando la corriente de la ecuación 2 y haciendo límite de $t \rightarrow \infty$, brinda la corriente máxima permitida que aporta la temperatura máxima.

Finalmente, las redes de resistencias térmicas son modelos topológicos (ver figura N° 3), donde el motor se descompone en resistencias térmicas unidas por nodos. Estos modelos son muy precisos dado que permite identificar la zona interna del motor con problemas, sin embargo la estimación de cada resistencia térmica genera complicaciones dado que se requieren conocer datos de materiales, formas geométricas, dimensionamiento y otros. En resumen, el modelo es difícil de obtener, dado que requiere la utilización de datos, que por lo general, sólo son conocidos por los diseñadores del motor. La segunda gran complicación para estimar las temperaturas internas a partir de este modelo, es que es necesario para un motor particular estimar sus pérdidas reales. Calcular las pérdidas de un motor que este en operación no es práctico, dado que es necesaria una serie de pruebas en laboratorio.



$$\mathbf{P} = \mathbf{G}\Theta \quad (4)$$

$$\Theta = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{P} \quad (5)$$

Figura N° 3. Red térmica. Tomado de Kylander 1995 [Kyla95]

Figura N° 3. Muestra una red térmica de 11 resistencias térmicas y 8 nodos modelada por [Kylande, 1995] para un motor trifásico de inducción. El sistema de ecuaciones de la red puede definirse como, la matriz de pérdidas \mathbf{P} , es igual a la matriz de conductancias térmicas \mathbf{G} por la matriz de temperaturas Θ . La ecuación 4 muestra el planteamiento del sistema de ecuaciones y ecuación 5 es la solución de la matriz de temperaturas.

El tercer grupo de modelos son los llamados modelos paramétricos, estos se basan en la obtención de la resistencia estática y rotórica del motor para el cálculo de la temperatura. De acuerdo al estándar IEEE 112-2004 la variación de la temperatura interna provoca variaciones de las resistencias estáticas y rotóricas del motor en la siguiente proporción:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k} \quad (6)$$

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (\theta_1 + k) - k \quad (7)$$

De la ecuación 6, R_1 representa la resistencia a la temperatura θ_1 usualmente medido a temperatura ambiente con motor apagado, y R_2 la resistencia a la temperatura θ_2 , k es el

coeficiente térmico del material. La ecuación 7 muestra el resultado de despejar la temperatura interna. La forma para estimar las respectivas resistencias utiliza dos esquemas, el primero es el cálculo de resistencias a partir de la aplicación de corriente directa (CD) al motor. El segundo esquema es a partir de la obtención del modelo de la máquina de inducción. La idea es que equipos en tiempo real y en línea realice los respectivos cálculos de los parámetros y luego la estimación de temperatura interna. Estos modelos no brindan la temperatura interna de en una zona específica del motor, más bien lo que hacen es un promedio de la temperaturas del estator y rotor.

3.8 Minería de datos

Las técnicas de minería de datos se usan para extraer el conocimiento que se encuentra de forma implícita en un conjunto de datos y su fin es construir modelos de conocimiento que reflejen las reglas de asociación entre variables para poder clasificar o predecir el valor futuro de una variable.

En el contexto del proyecto este tipo de técnicas será de gran utilidad pues se trabajará con un conjunto de variables que serán medidas por medio de experimentos lo cual genera una gran cantidad de datos los cuales deben ser analizados.

3.8.1 Introducción

En las últimas décadas las nuevas tecnologías han facilitado la recolección y almacenamiento de grandes cantidad de datos científicos: instrumentos como los sensores (ej. termocuplas) son capaces de recolectar miles de datos y los modelos computacionales (ej. Modelo térmico) generan de manera artificial gran cantidad de información, esto hace que la velocidad con la que se generan los datos sea muy superior a la velocidad con la que se analizan. Con el fin de analizar y extraer el conocimiento que subyace de forma implícita en estas bases de datos, se recurre a técnicas de exploración de datos.

La minería de datos (MD) es parte de una proceso completo conocida como Knowledge Discovery in Databases (KDD, por sus siglas en inglés) que tiene como objetivo descubrir el conocimiento almacenado en una base de datos. La KDD involucra muchas áreas de investigación como: aprendizaje computacional, reconocimiento de patrones, bases de datos, estadística, inteligencia artificial, adquisición de conocimiento y visualización de datos.

Por otro lado, la MD agrupa un conjunto de técnicas que permiten extraer patrones de información (implícitos, no triviales, desconocidos y potencialmente útiles) a partir de grandes cantidades de datos. Muchas de estas técnicas se conocen desde hace bastante tiempo ([Goru11], [Bozd04], [Dall00]), pero recientemente han tomado importancia debido a varias razones:

- **Abundancia de datos:** que provienen de mediciones y/o recopilación automática, registros digitales, modelos computacionales, etc.
- **Potencial computacional:** el software y hardware necesarios para procesar grandes cantidades de datos están disponibles. Cada vez el hardware es más poderoso, el ancho de banda se incrementa y los medios de almacenamiento se abaratan lo que hace posible procesar y almacenar grandes volúmenes de datos. Se desarrollan

sistemas paralelos los cuales son una excelente alternativa para la exploración de datos a gran escala ([Quin03], [Kirk10]).

- **Técnicas para la exploración de datos:** existe una gran cantidad de técnicas [Dall00], [Goru11] que permiten realizar una exploración adecuada de los datos con el propósito de generar un modelo de conocimiento.

3.8.2 Proceso de adquisición de conocimiento KDD

La minería de datos (MD) es parte de un proceso completo conocida como Knowledge Discovery in Databases (KDD, por sus siglas en inglés) que tiene como objetivo descubrir el conocimiento almacenado en una base de datos. La KDD involucra muchas áreas de investigación como: aprendizaje computacional, reconocimiento de patrones, bases de datos, estadística, inteligencia artificial, adquisición de conocimiento y visualización de datos.

3.8.3 Etapas del proceso KDD

En general el proceso de extraer la información implícita de un conjunto de datos requiere de tres etapas:

- **Pre-procesamiento de los datos:** operaciones de transformación para llevar los datos al formato deseada.
- **Minería de datos:** Seleccionar y aplicar la o las técnica de minería de datos que serán usadas para extraer la información y generar un modelo.
- **Pos-procesamiento de los datos:** validación del modelo comprobando que las conclusiones que arroja son válidas y satisfactorias.

3.8.4 Técnicas de minería de datos

Las técnicas de minería de datos están basadas en un conjunto de herramientas importantes originadas en inteligencia artificial, la estadística, la teoría de información, el aprendizaje de máquinas, el razonamiento con incertidumbre (conjuntos borrosos), el reconocimiento de patrones o visualización.

- **Árboles de decisión:** son métodos de clasificación que visualmente tiene la forma de un árbol. Describe una serie de reglas que permiten predecir la pertenencia de un individuo a una clase, tomando en cuenta para esto, los valores de sus atributos. Ejemplos: algoritmo ID3 y C4.5.
- **Análisis multivariado:** son técnicas de exploración de datos específicamente diseñado para descubrir los patrones ocultos en datos multidimensionales, incluyendo, entre otras: el análisis factorial (FA), análisis de componentes principales (PCA), análisis canónico (CA), análisis discriminante (DA) y análisis de la correspondencias (AC).
- **Regresión lineal múltiple:** en este método se utilizan varias variables independientes para predecir, mediante mínimos cuadrados, una variable dependiente. Si las variables independientes son ortogonales, entonces el problema se reduce a un conjunto de regresiones univariadas. Cuando las variables independientes estas correlacionadas, su importancia es estimada mediante el coeficiente parcial de

correlación. Un problema importante surge cuando una de las variables independientes puede ser predicha a partir de las otras variables debido a que los cálculos requeridos por el método ya no pueden realizarse. Esto se llama multicolinealidad.

- **Regresión parcial de mínimos cuadrados:** este método enfrenta el problema de multicolinealidad calculando vectores latentes (similar a los componentes de la técnica de análisis de componentes principales), los cuales explican tanto las variables independientes como las dependientes. Esta técnica tan versátil es utilizada cuando la meta es predecir más de una variable dependiente. Combina características tanto de Análisis de Componentes Principales como de Análisis de Regresión Lineal Múltiple.
- **Regresión de componentes principales:** en esta técnica, se realiza primero Análisis de Componentes Principales con las variables independientes, y los puntos de las unidades son entonces utilizadas como predictores.
- **Análisis de redundancias:** es una técnica de lineal múltiple que primero se analizan las variables dependientes mediante Análisis de Componentes Principales y los puntos de las unidades son entonces utilizadas como las variables dependientes en una serie de Análisis de Regresión Lineal Múltiple, donde las variables independientes originales son entonces utilizadas como predictores (un procedimiento inverso a la Regresión de componentes principales).
- **Conjuntos aproximados:** es una técnica propuesta por Zdzislaw Pawlak, a inicios de los 80, en un intento de abordar matemáticamente el concepto de vaguedad, su propósito principal es el proceso de transformación automatizada de los datos en conocimiento. De este modo podemos ver un conjunto aproximado como una aproximación matemática al conocimiento imperfecto.
- **Agrupamiento:** son técnicas que intentan descubrir semejanzas entre los objetos para reducir el espacio de objetos a un conjunto de los atributos más importante. Dentro los métodos más frecuentemente utilizados para agrupar están la técnica k-means y el método de vecindad más próxima (k-nearest).
- **Redes neuronales:** son modelos de predicción no lineal que aprenden como detectar un patrón a partir de un proceso de entrenamiento que utiliza un conjunto de datos que describen lo que se quiere encontrar.
- **Algoritmos evolutivos:** son métodos adaptativos que se pueden aplicar a la solución de problemas de búsqueda y optimización. Incluye técnicas búsqueda tabú, recocido simulado (simulated annealing), algoritmos genéticos. Estos últimos son muy usado en problemas de optimización global, su fundamento es el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan de acuerdo a los principios de selección natural y supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin. De manera análoga, los algoritmos genéticos son capaces de ir creando soluciones para unos problemas dados las cuales van evolucionando hacia soluciones óptimos.

3.9 Desarrollo de experimentos

Se entiende por experimento al cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias variables. El experimento permite, aumentar el conocimiento sobre un determinado fenómeno. Por unidad experimental, se entiende como los objetos o piezas utilizados para generar datos representativos del experimento.

En los experimentos intervienen: factores controlables, los factores no controlables, los niveles de variables, las variables de respuesta o efectos del sistema, así como fuentes de error. Las variables de respuesta se entienden como el conjunto de variables de salida por las cuales se aprecia el efecto de la manipulación de las variables controlables. Las variables controlables son características del proceso que se pueden fijar en un valor o nivel dado. Los niveles de las variables manipuladas, representan el conjunto posible de valores que dicha variable controlada puede tomar. Las variables no controlables, son variables que no se puede manipular, y que tienen efecto sobre el sistema en estudio. Adicionalmente, en el proceso del experimento, los investigadores pueden alterar los datos de muchas formas, a estas alteraciones de los resultados se les conoce con el nombre de error experimental. Si la fuente del error de los datos no se puede explicar, se le llama error aleatorio.

El diseño de un experimento se puede dividir en las siguientes etapas:

- a. Delimitar el problema y objeto en estudio.
- b. Plantear el objetivo del experimento.
- c. Elegir las variables de respuesta que será medida y verificar que su medición es confiable.
- d. Determinar los factores que deben estudiarse, de acuerdo a la influencia sobre la respuesta.
- e. Seleccionar los niveles de cada factor, así como las combinaciones deseadas.
- f. Plantear el trabajo experimental, es decir forma de manipular las variables, repeticiones, etc.
- g. Planear las actividades de control de datos, así como determinar las fuentes de invalidez del experimento.
- h. Realizar el experimento.
- i. Analizar datos.
- j. Interpretación de datos.
- k. Conclusiones.

De acuerdo a [Guti08], los cinco aspectos que influyen en el diseño de un experimento son:

1. El objetivo del experimento.
2. Número de factores (variables) a estudiar.
3. Número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa estudiar, relación entre variables de respuesta y variables manipuladas.
5. Costos del experimento traducidos en tiempo y precisión deseada.

4 MATERIALES Y MÉTODOS (DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS)

A continuación se describe los materiales empleados para construir la bancada de pruebas, así como los equipos necesarios para la realización de los cuatro experimentos propuestos. Se hace mención del diseño mecánico y eléctrico requerido para el montaje e integración de la bancada de pruebas. Así como la selección de los instrumentos y los cuidados que se deben tener a la hora del montaje y de la toma de datos.

4.1 Características del cuarto de pruebas

Dimensiones y materiales: como mínimo 3 metros largo, 2 metros de ancho y 2,5 metros de alto. Con paredes de concreto y puerta de metal

Acceso: se debe ubicar en la primera planta o contar con acceso en elevador para facilitar el transporte de motores.

Seguridad: contar con extintor y normativa en caso de incendio u otro código de seguridad

Requerimientos eléctricos: sistema trifásico de 230 voltios, 60 hz, 25 amperios., con un contactor electromagnético que accione motores de al menos 10 hp.

Requerimientos ambientales: debe ser ventilado y con temperatura ambiente menor a 40 °C.

Instalación electromecánica

Ubicación sensores del motor

4.1 Diseño mecánico y eléctrico

Para la realización de los experimentos anteriores se debe contar con una bancada de pruebas que permite el correcto funcionamiento y la captura de datos. A continuación se detallan los elementos mínimos requeridos, tanto eléctricos, mecánicos y otros que garanticen las condiciones de prueba controladas. Se excluyen los equipos de medición propios de cada experimento.

4.1.1 Instalación eléctrica

- Para la instalación correcta del motor eléctrico se recomienda el uso de contactores de la categoría AC-3 según EN 60947-4-1.
- Aplicar normativa del NEC para la instalación del sistema eléctrico. Ver figura N° 4.
- Para evitar interferencias en los sistemas de control, es preferible que el cableado de potencia no se comparta con el cable de control en un solo tubo o ducto.
- Para conseguir una mejor puesta a tierra se recomienda una conexión a través de la carcasa.
- Para la protección contra cortocircuitos y sobre-calentamiento (sobrecarga) se emplea la instalación de disyuntores termomagnéticos que protejan el motor de condiciones de fuerte estrés. Este tipo de protección al igual que la anterior debe ser seleccionada dependiendo de distintos factores entre los que se encuentran la carga y las condiciones de la máquina.
- No se recomienda sobrepasar la altura máxima de instalación de 1000 m sobre el nivel del mar, de lo contrario se aplica una reducción de los valores de funcionamiento de la potencia mecánica que se le exige al motor [Fra08].
- Al momento de la conexión coloque correctamente los enlaces entre bornes, apriete las conexiones de puesta a tierra.

- Antes de poner en marcha el motor, verifique el buen montaje de la tapas protectoras, además es importante asegurarse que los sistemas de protección se encuentren ajustados a la corriente nominal de la máquina.
- Una vez en marcha se debe vigilar el buen funcionamiento del motor, que no exista sobrecarga, fluctuaciones de velocidad, ruido, etc.

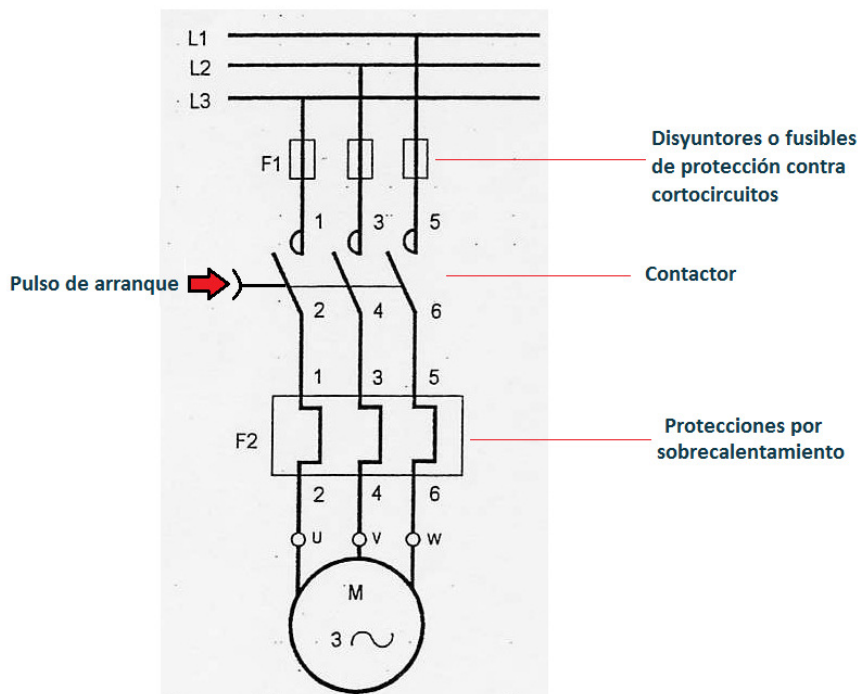


Figura N° 4. Diagrama de conexión eléctrica de la máquina.

4.1.2 Montaje mecánico

Para el montaje correcto del motor se dan las siguientes recomendaciones:

- Al momento de la conexión es fundamental tener en cuenta los datos de la placa que brindan características, información técnica, conexiones y condiciones de funcionamiento de la máquina. El lugar de trabajo debe ser capaz de cumplir estas condiciones. correspondientes al voltaje, capacidad de corriente que requiere el motor comparado con el calibre, disyuntor y sistemas eléctrico, etc.
- Según las especificaciones del fabricante el motor debe encontrarse en una temperatura ambiente entre -20°C y no mayor a 40°C , además se debe verificar que no existan vapores, aceite, polvo o algún agente que pueda perjudicar el correcto funcionamiento de la máquina.
- Limpiar el eje de anticorrosivos, impurezas o similares, se debe tener en cuenta que la grasa que cubre los rodamientos pierde propiedades en periodos de almacenamiento superiores a 1 año.
- Montaje mecánica se debe realizar según se observa en la figura N° 5.

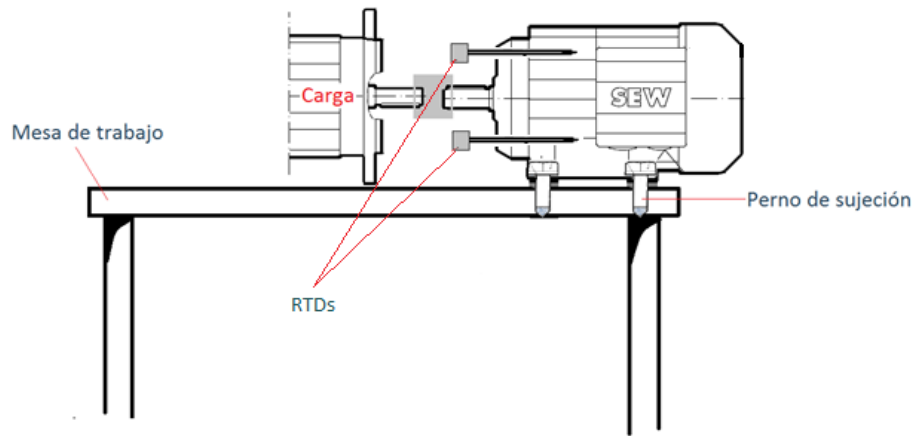


Figura N° 5 Montaje mecánico necesario para el experimento

4.2 Integración de la bancada

Se van a realizar las pruebas a un motor de inducción trifásico a temperatura ambiente en un espacio cerrado, las cuales consisten en medir diferentes variables que se afectan como consecuencia de la falla en rodamientos, enfocadas específicamente en la variación de temperatura y el estrés térmico generado. La falla será inducida para simular un caso común de estrés mecánico, que en la realidad representa una falla de alto porcentaje de ocurrencia a nivel nacional.

Estas pruebas se van a realizar con el motor a plena carga (aproximadamente 100% de la capacidad del mismo). Lo anterior, debido a que se quiere conocer la variación de temperatura que pueda provocar la falla inducida con una carga específica (para simular las condiciones reales de un motor industrial que trabaje a plena carga) antes y después de la falla en los roles, de modo que sea posible evaluar y comparar ambas situaciones experimentales.

La principal variable que se requiere medir es el cambio de temperatura en el devanado estático del motor, asumiendo una falla en los roles del mismo. Lo anterior, se plantea medir por medio de RTDs (ver figura N° 6) que se van a introducir entre la carcasa y el devanado estático del motor, de modo que sea posible registrar la temperatura de manera precisa y aprovechándose del alto grado de sensibilidad que presentan los mismos (incluso mayor al de las termocuplas). De esta manera se propone hacer 3 agujeros por medio de un taladrado en la superficie de la carcasa del motor, del tamaño suficiente para que puedan ser introducidos los elementos de medición de temperatura (RTD) y procurando afectar lo menos posible al motor. Se propone incluir 3 RTD con el propósito de mejorar la exactitud del experimento.

A partir de los datos de temperatura medidos antes y después del fallo de los roles, se pretende conformar una base de datos que demuestre el comportamiento del motor analizado con respecto a la variación de temperatura a lo largo del tiempo.

La medición de la temperatura del motor con carga, se va a realizar con respecto al tiempo de trabajo del motor en al menos 5 ocasiones, tomando el valor de temperatura desde el primer minuto al arranque del motor y, a partir de este, tabular mediciones consecutivas a los 5, 10, 15 y 20 minutos siguientes. Los valores obtenidos corresponderían a la temperatura del estator, de modo que será posible tabular y graficar los resultados obtenidos y generar el análisis de resultados correspondiente a la variación de temperatura interna del motor. Cabe

recaltar que las mediciones serán empleadas para demostrar, mediante curvas, el comportamiento a lo largo del tiempo como producto del estrés térmico descrito en el experimento.

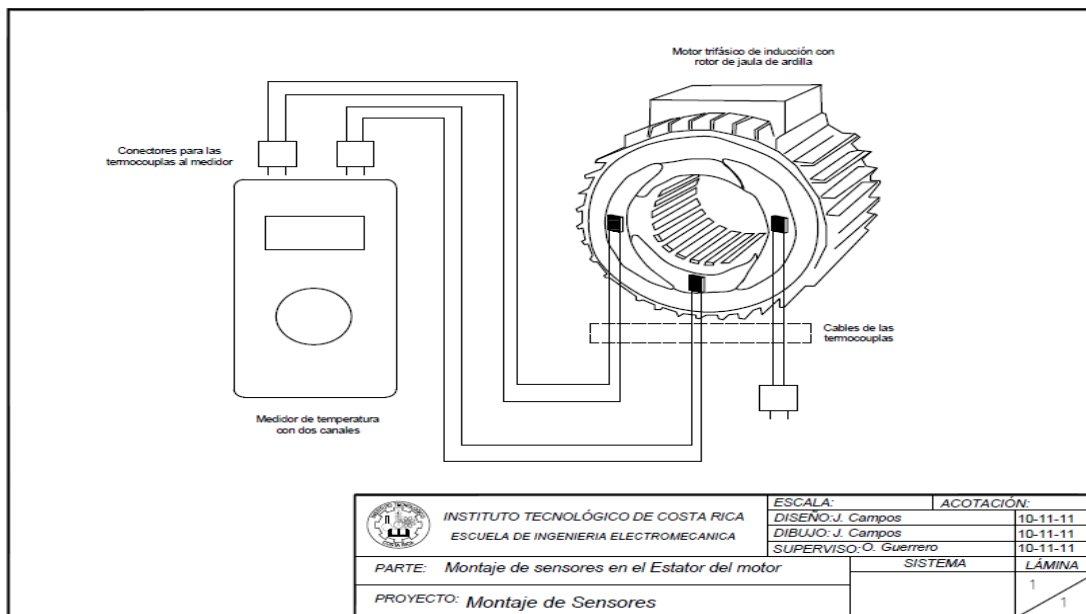


Figura N° 6. Ubicación de los puntos donde se ubican los sensores de temperatura. Autocad. Jesús campos.

4.2.1 Selección de instrumentos

4.3 Instalación de los equipos (integración banco de pruebas)

- **Fluke B43:** Se va a utilizar para medir las diferentes variables eléctricas (voltaje, corriente, frecuencia, factor de potencia, potencia de entrada, etc) que se influyen en la temperatura del devanado estatórico.

Criterios de selección:

Se recomienda este instrumento debido a que se tiene a disposición en el taller de la escuela para utilizarlo. Además el fluke es un instrumento de gran precisión en la medición de las variables eléctricas.

Montaje:

El fluke tiene extensiones y cables de medición, que en este caso se colocan en la caja de bornes del motor y van dispuestas según la figura N° 5 para medir las diferentes variables, es decir, se va a utilizar el medidor de gancho en la línea 1 y los cables de prueba del fluke (incluyendo el común) conectados entre las líneas 1 y 3, para obtener las variable requeridas con conexión delta del motor.

Cuidados:

Tener especial cuidado con conectar las extensiones del fluke en las terminales adecuadas del motor, ya que de lo contrario se puede dañar el equipo. La conexión del motor es en delta, por lo tanto hay que tomar en cuenta que el fluke se debe conectar en las líneas adecuadas, de acuerdo a este tipo de conexión, según la figura N° 7.

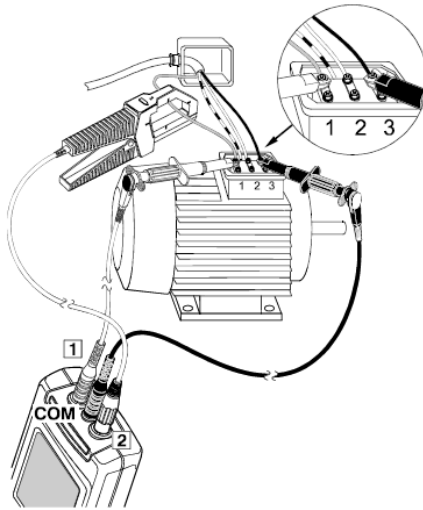


Figura N° 7. Conexión del Fluke B43 para motor de conexión de delta. Página www.fluke.com

- **Tacómetro digital:** Se va a utilizar para medir la velocidad mecánica del motor, se mide en el eje del motor y sus unidades son en rpm y rad/s.



Figura N° 8. Medición de rpm con un tacómetro digital. Canon. Investigadores.

Criterio de selección:

Se escogió el tacómetro, ya que se ocupa medir la velocidad mecánica del motor y este instrumento se encuentra a disposición en el taller de la escuela.

Montaje:

La medición de la velocidad se realiza en el eje del motor, colocando el instrumento de forma perpendicular según figura N° 8 (la lectura se indica en rpm).

Cuidados:

Asegurar que el aparato se acople de manera perpendicular al eje y logre un contacto fijo para evitar accidentes.

RTD's (proviene del inglés resistance temperature detector)

Criterio de selección:

Se escogieron los RTD's debido a que presentan mayor eficiencia que la termocupla, es decir mayor sensibilidad, para medir la temperatura de la resistencia en el interior del motor, la cual es una relación más lineal que en cualquier otro aparato.

Se escogió según el rango de temperatura que soporta y para el rango de valores de resistencia para el que fue diseñado, además el margen de temperatura se adecua al diseño del experimento, y proporciona las medidas del mismo con mayor exactitud y repetividad.

También se toma en cuenta la facilidad de obtención del aparato y soporte técnico de la empresa Elvatrón, la cual recomendó utilizar un RTD de ½ NPT, ya que, es la que se emplea en estos casos.

Montaje:

Los RTD's van dispuestos entre la carcasa y el estator, mediante dos agujeros realizados en la parte externa de la carcasa. Estos se colocan y se mantienen fijos a presión, asegurándose que la punta sensible (RTD bulb) se encuentre en contacto con la superficie del embobinado estático para asegurar una correcta medición. En la parte externa del RDT se cuenta con un display que muestra los datos de temperatura de cada medición, el mismo viene integrado en la unidad. Ver figura N° 6.

Cuidados:

Escoger el RTD de acuerdo al rango de temperatura adecuado para el experimento, además se debe tener en cuenta la longitud y el diámetro del mismo, para lograr acoplarlo a la carcasa del motor, de manera que no se desprenda del mismo durante el experimento.

Para el desarrollo del experimento que se requiere variaciones de temperatura externa se necesita adicionalmente material para construir una caja de aislamiento del cuarto de pruebas para lograr un control de temperatura.

- 3 laminas de fibra de vidrio
- 1 Lamina de plywood de 2"

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos del proyecto se desglosan por cada objetivo:

5.1 Primer objetivo específico: Establecer los métodos matemáticos y estadísticos que permitan modelar las faltas.

5.1.1 Clasificación de los métodos empleados en el modelado de las faltas

En la revisión de literatura se hace mención de los métodos y técnicas empleados en la representación de los modelos físicos mediante modelos matemáticos, además se describen las distintas formas de obtenerlos, mediante modelos analíticos, modelos experimentales e inteligencia artificial (figura N°1). También se debe definir el objetivo del modelo, ya que, existen técnicas para la detección de problemas o causantes de fallas y las técnicas para el diagnóstico de fallas.

Las técnicas y métodos para detección de faltas tienen como prioridad determinar aquellas condiciones anormales en las que está operando el motor eléctrico, el modelo consiste en un grupo de variables donde se indican los valores máximos y mínimos permitidos, donde se establecen las condiciones adecuadas de funcionamiento de la máquina, y dependiendo del rango en que opere por encima del valor permitido, indicar una alarma color amarilla que representa un estado de alerta y alarma color rojo, un estado de desconexión del equipo.

Las técnicas y métodos para el diagnóstico de faltas, busca localizar el punto donde se origina el problema, determinar la gravedad y generar medidas correctivas que eviten producir una falla catastrófica en el sistema que lo excluyan de la producción.

5.1.2 Métodos matemáticos y estadísticos para obtener el modelado de las faltas

Los métodos para el modelado de las faltas en motores eléctricos se clasifican en:

- Métodos para la detección de faltas. Ver figura N° 9.
- Métodos para el diagnóstico de faltas. Ver figura N°15.

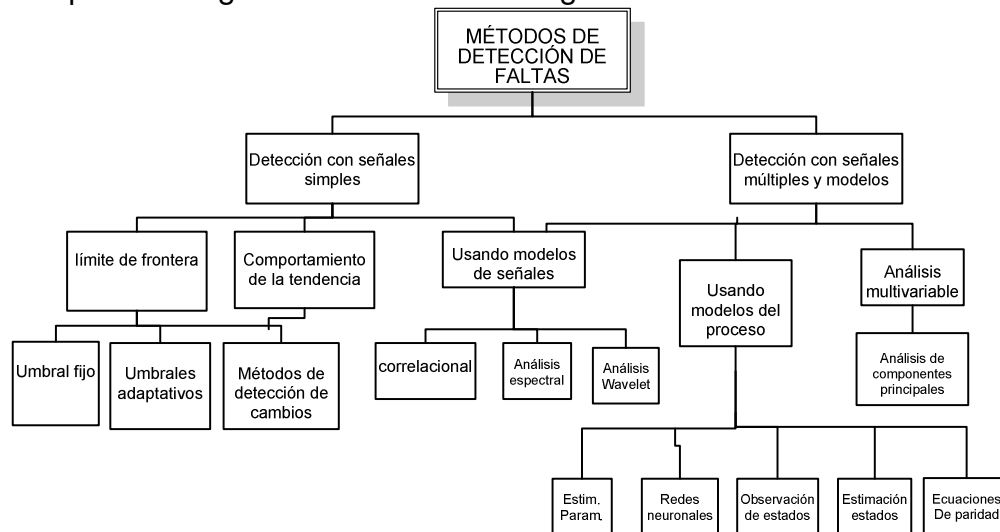


Figura N° 9. Métodos de detección de faltas mediante el modelado del proceso o sistema. Visio 2007. Investigadores

En la figura N°9, se observa el conjunto de métodos empleados para la detección de faltas, los cuales se agrupan en dos, según se indicó anteriormente. Existen técnicas propias para cada grupo, sin embargo existen técnicas usando modelo de señales que se emplean para señales simples y también para señales múltiples.

Los sistemas que emplean estos modelos se conocen con el nombre de:

- Sistemas para la detección y aislamiento de faltas (FDI).
- Sistemas para la detección y diagnóstico de faltas (FDD).

En la figura N° 10, se indica la clasificación de estos sistemas de acuerdo a su funcionalidad. En la base se ubica los sistemas para detectar faltas, esto implica identificar la presencia de alguna anomalía en el equipo y proceso, en este nivel se desconoce la ubicación del problema o componente afectado ni las posibles causas. A modo de ejemplo, consiste en analizar y seleccionar un valor de referencia (operación normal), monitorear el dato con sensores y establecer una alarma cuando el valor real supera el dato de referencia.

El segundo nivel correspondiente al aislamiento, representa además de la detección del problema, la ubicación del componente que experimenta la anomalía.

El tercer nivel, contempla los dos niveles anteriores, pero además debe indicar las posibles causas del problema, las consecuencias de mantenerse la anomalía, así como las acciones correctivas para eliminar o reducir los efectos de las faltas.

El último nivel, incluye todos los anteriores, y busca localizar las condiciones anormales en el menor tiempo posible (la prioridad es reducir el tiempo de respuesta), lo que significa que se detecte el problema mucho antes de causar cualquier daño leve a los componentes del equipo. Se debe diseñar correctamente las etapas anteriores para evitar alarmar recurrentes de las posibles faltas presentes y que realmente no afectaran al sistema a mediano y largo plazo.



Figura N° 10. Clasificación funcional de los sistemas FDI. Visio 2007. Investigadores

La selección de los métodos y técnicas depende del nivel del sistema a desarrollar (según figura N°10). Debe analizarse el problema a resolver y seleccionar las características de la solución a implementar, además el costo, complejidad, tiempo y especialización del equipo a utilizar, ya que, la implementar de la solución depende significativamente del nivel a desarrollar.

5.1.3 Métodos de detección de faltas mediante señales y modelos de sistemas FDI

La detección en forma temprana, permite realizar maniobras de mantenimiento autónomas o manuales para suprimir los causantes de las faltas.

Los métodos empleados para la detección de las faltas se dividen en dos grupos, ver figura N° 9:

- Métodos mediante modelado de señales: se necesita primeramente conocer el patrón de la señal en operación normal, que será la referencia para detectar anomalías en el proceso. Ver figura N°11 en la cual se representa la arquitectura de un sistema de detección de faltas mediante el modelo o caracterización de la señal.

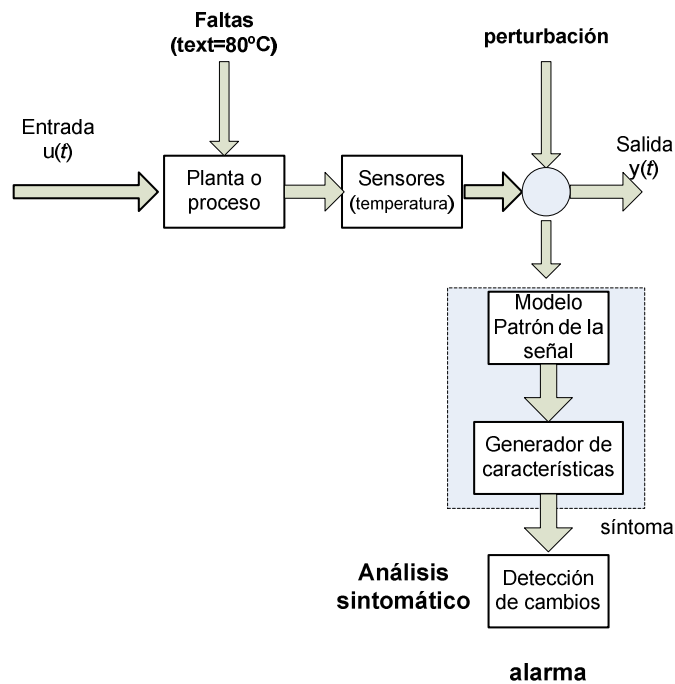


Figura N° 11. Esquema de un sistema de detección de faltas mediante modelado de las señales. Visio 2007. Investigadores.

- Métodos mediante modelado de procesos y señales múltiples: se requiere obtener un modelo del proceso o sistema para integrar todas las señales en un conjunto. Para el modelo del proceso se emplean distintos métodos y técnicas. En la figura N°12 se observa un esquema de un sistema de detección de faltas empleando modelos de procesos o señales múltiples.

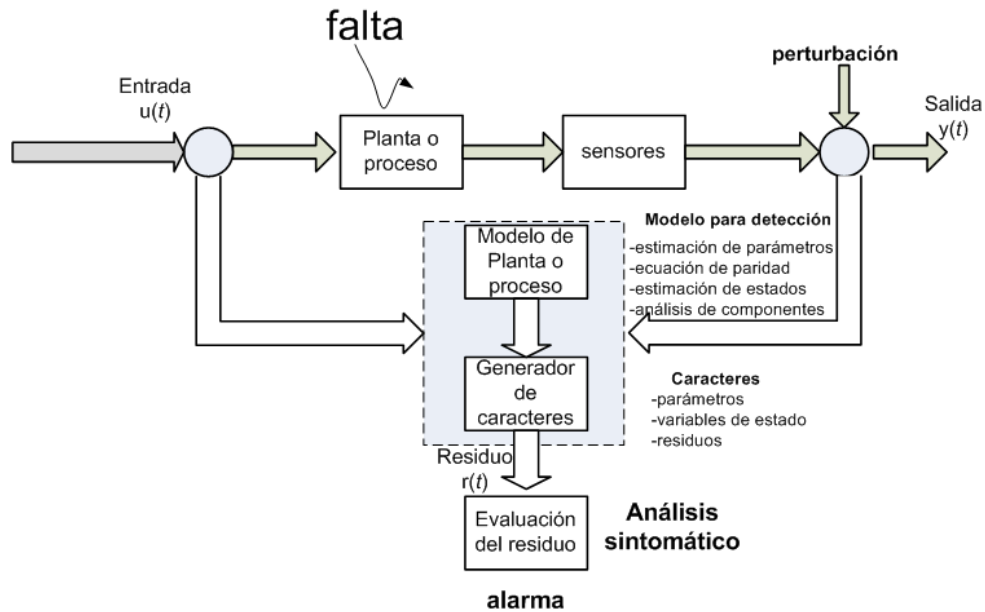


Figura N° 12. Esquema de un sistema de detección de faltas, mediante el modelado del proceso o sistema. Visio 2007. Investigadores.

Los métodos de detección de faltas agrupados en detección con señales simples, se desglosan en límite de frontera, comportamiento de la tendencia y usando modelos de señales. Los dos primeros emplean técnicas por umbral fijo, umbral adaptativo y métodos de detección de umbrales de cambio.

5.1.4 Detección de faltas por chequeo de límites

Es el método más simple para la detección de faltas. Consisten en el monitoreo de una variable de proceso, que cuando la señal supera valores absolutos o relativos previamente establecidos, o el cambio de tendencias de la señal monitoreada es mayor a un rango de tolerancia también previamente establecido, se está ante la presencia de la falta.

Existen varias técnicas para determinar los umbrales:

- Límites absolutos
- Verificación de tendencias
- Umbrales binarios
- Umbrales difusos
- Umbrales adaptables

Límites absolutos

El chequeo por límites absolutos consiste simplemente en establecer dos valores mínimo y máximo. Si la señal del proceso supera estos valores se dispara una alarma. Por ejemplo, una señal de temperatura.

$$Y_{min} < Y(t) < Y_{max}$$

Por otro lado, la verificación de tendencias, lo que busca es establecer una media del cambio, para esto se calcula la primera derivada de la señal.

$$\dot{Y}_{min} < \dot{Y}(t) < \dot{Y}_{max}$$

Si pequeños cambios de tendencia son seleccionados, las alarmas pueden ser detectadas en forma más temprana que por chequeo de límites.

Chequeo por tendencias

El chequeo por tendencia es usado en el análisis de vibraciones, presión de aceites en máquinas. Se puede establecer una combinación entre ambos métodos. El cuidado de esto, es hacer dependiente el umbral absoluto de la tendencia.

Umbrales binarios

Los umbrales binarios consisten en pruebas estadísticas al conjunto de datos monitoreados. De esta forma se tienen dos grupos básicos de técnicas:

- Estimación de la varianza y el promedio.
 - Observación estadística
 - Estimación de varianza y promedio.
- Pruebas estadísticas para la detección del cambio.
 - Prueba de hipótesis
 - Prueba de cantidades
 - Detección de cambios en el promedio: t-test
 - Detección de cambios en el promedio: Run-Sum
 - Detección de cambios en la varianza: f-test
 - Prueba de Radio de verosimilitud para saltos en la detección

Las variable monitoreadas $Y(t)$ la mayoría de la veces son variables estocásticas, con una función de densidad probabilística definida $p(Y)$, por lo que su promedio y varianza son:

$$\mu_0 = E\{Y(t)\}; \sigma_0^2 = E\{[Y(t) - \mu]^2\}$$

Si el promedio y la desviación estándar antes del cambio producto de la falta es descrito como μ_0 y σ_0 después de la ocurrencia de la falta cambia a otros valores μ_1 y σ_1 . Asumiendo distribuciones de probabilidad normal de $Y(t)$, los siguientes cambios son distinguibles:

1. El promedio después de la falta es $\mu_1 = \mu_0 + \Delta\mu$, las desviaciones estándar son iguales.
2. Los promedio son iguales, pero la desviación estándar es $\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma$.
3. Que cambie tanto el promedio como la desviación estándar.

Los umbrales para este tipo de experimento se establecen como, $\Delta\text{Umbral} = k\sigma$, donde k es mayor a 2. Sin embargo para cuando los cambios a detectar son menores a una desviación estándar, hay que utilizar test estadísticos.

Observación Estadística

Para esta técnica se asume que la señal estocástica, se comporta como una variable aleatoria con función de densidad $p(Y)$. Es decir la función de densidad no varía con el tiempo, de esta forma se calcula la $p(Y)$ para una señal en condiciones de operación normal. La existencia de una falta se detecta cuando la probabilidad del dato medido, se encuentre fuera de la primera o segunda desviación estándar. Para utilizar esta técnica se saca una muestra off-line se analiza y se calcula la desviación estándar y el promedio de los datos. Luego On-line cada dato muestreados se revisa contra el patrón, para ver si esta mas-menos la primera o segunda desviación.

Estimación de varianza y promedio.

Para la estimación del promedio y la varianza, se sume que el comportamiento de la señal es ergódica. El promedio temporal de los valores y sus desviaciones estándar temporal se asumen como si fueran la media y la desviación estadística. Para esto se utiliza un cálculo recursivo de la media.

$$\hat{\mu}_Y = \hat{\mu}_Y(k-1) + \frac{1}{k} [Y(k) - \hat{\mu}_Y(k-1)] \quad (1 \leq k \leq N)$$

La desviación estándar requiere de un cálculo similar.

Pruebas estadísticas para la detección del cambio, por lo general se asumen distribución normal de los datos.

Pruebas de hipótesis

La hipótesis nula H_0 significa la no presencia de una falta, mientras que el cambio en la hipótesis H_1 , H_2 , H_3 , etc, significa la presencia de una falta. Se establecen entonces valores de significancia alfa α . Valores normales de α es de 0.05 o 0.01 usualmente. Para esta prueba se asume que el comportamiento de los datos posee distribución normal... Si no lo es, utilice pruebas no paramétricas entre ellas la prueba F.

EL cambio en la hipotesis, es decir la existencia de la falta se da cuando:

$$H1: \hat{\mu}_0 \leq \mu_{\frac{\alpha}{2}} \text{ y } \hat{\mu}_0 \geq \mu_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

La prueba de cantidades, permite determinar la cantidad de muestras que se requieren tomar para poder determinar la existencia de una falta. Se requiere que los datos tengan distribución normal

La prueba de detección de cambio en el promedio con T-test, asume que el promedio que se tiene antes del cambio, es observado con N muestras. Después del cambio, el promedio de Y es calculado con N_1 muestras. La prueba clásica, consiste en comprar los valores de muestras y promedios. Se asume que los datos tienen un comportamiento de distribución normal.

La prueba *Run-Sum* proviene del control estadístico de la calidad, y las gráficas de control. Asume que los datos tienen comportamiento de distribución normal. La prueba run-sum utiliza la suma acumulativa (CUSUM). Si la variable observada se sale de la banda $\mu_0 - 2\sigma < Y < \mu_0 + 2\sigma$ el puntaje asignado es $sc_j=2$. La prueba *Rum-Sum* es la suma de esos puntajes, cuando el puntaje sumado excede un cierto valor, se está ante la presencia de una falta o síntoma.

Prueba de varianza F-Test: asume distribución normal de los datos, se calcula la desviación de los datos medidos entre la desviación de los datos de una muestra. Esta prueba no se recomienda para la detección de cambios rápidos en sistemas de detección de tiempo real.

Prueba de radio de verosimilitud para saltos de detección: asume que datos estadísticos. Es el índice de dos distribuciones de probabilidad normal. $\theta(Y) = p_y(Y/H1)/p_y(Y/H0)$ la falta ocurre cuando $\theta(Y) > \theta_{th}$ H_1 es más probable, Si $\theta(Y) < \theta_{th}$, los datos son más similares H_0 .

Umbrales difusos

Umbrales difusos son una aproximación más realista que la detección de cambios. La variación de $Y(t)$ se puede describir como un conjunto difuso.

Chequeo de Verosimilitud.

El establecimiento de verosimilitud se basa en que los datos medidos y sus umbrales son convincentes, creíbles, lógicos y compatibles con otros datos medidos. Los chequeos son un conjunto de regla IF-THEN y es el primer paso para construir un modelo de detección de

faltas. Cada umbral dentro del IF puede ser tratado con alguna técnica de detección del cambio, o tendencia, o prueba estadística.

5.1.5 Métodos de detección de faltas basado en modelos

La detección se basa en modelos de señales y modelos de procesos.

5.1.5.1 FDI usando estimación paramétrica

Los parámetros del proceso se conocen poco o no se conocen con precisión. Los cuales se determinan usando la estimación paramétrica si la estructura básica del modelo se conoce, midiendo las señales de entrada y salida.

a. Métodos para las ecuaciones del error.

Para el mejoramiento de las propiedades numéricas se emplean algoritmos que permitan filtrar la señal de las perturbaciones y ruidos, logrando una mejora estimación. Se recomienda el algoritmo raíz-cuadrática, semejante al Filtro de Kalman. Logrando minimizar la diferencia entre la estimación y la medición. Ver figura N°13, donde se muestra un esquema de bloques que representa la arquitectura de un sistema para la estimación del error.

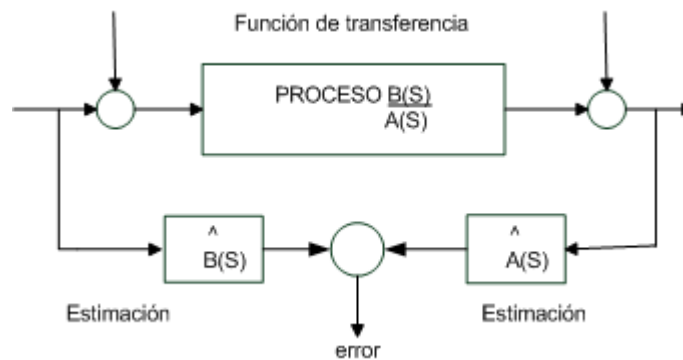


Figura N° 13. Esquema de un sistema que aplica ecuaciones de error. Visio 2007. Investigadores.

b. Métodos para obtener el error de salida

Mediante la comparación de las señales de salida del proceso y del modelo es posible obtener y generar las características del error (parámetros, residuos, variables de estado). Ver figura N°14 de un diagrama de estimación de estado.

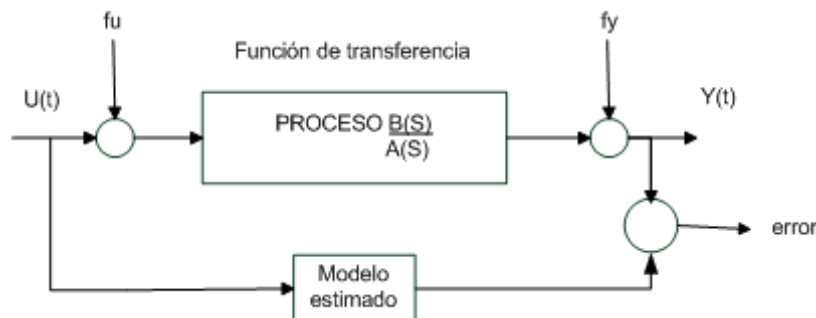


Figura N° 14. Diagrama de estimación de estado. Visio 2007. Investigadores.

5.1.5.2 FDI empleando estimación de estado

Se emplean para procesos multivariados. Asumiendo la estructura y todos los parámetros son bien conocidos.

Los observadores de estado son usados en la reconstrucción de variables de estado no medibles basados en la medición de entradas y salidas.

Requiere de múltiples salidas. Se aplica filtro de kalman para señales estocásticas obtenidas de observadores.

Los cambios en el residuo dependen de los cambios en los parámetros así como los cambios de las entradas y variables de estado.

Se conocen los siguientes métodos de detección de faltas.

- Dedicados a observadores para procesos de múltiples salidas:
- Observadores, excitados por una salida.
- Filtro kalman excitado por todas las salidas.
- Banco de observadores, excitado por simples salidas.
- Banco de observadores, excitado por todas las salidas.
- Banco de observadores, excitado por todas las salidas excepto una.
- Filtros para detección de faltas

5.1.5.3 FDI, mediante ecuaciones de paridad

Estos métodos requieren que se conozcan tanto la estructura, como los principales parámetros que inciden sobre la ecuación que modela el comportamiento o señal analizada. Se indican dos ecuaciones, la primera es generada por estimación paramétrica y la segunda por medio de la estimación de la ecuación del error, la comparación de ambas genera como resultado un residuo, el cual deberá ser analizado y clasificado, para posteriormente evaluar su impacto y sus respectivas acciones proactivas.

5.1.6 Métodos para diagnóstico mediante señales y modelos de sistemas.

El diagnóstico de una falta consiste en determinar el tipo, tamaño y lugar de la falta. Para realizar esto es necesario construir un motor de clasificación o un motor de inferencia de información de síntomas. Cada uno de estos motores, reciben en su entrada los síntomas de alarma generados con alguno de los dos esquemas de detección de faltas, luego estos síntomas son procesados mediante alguna técnica de computación suave (soft computing) dentro de las cuales se incluyen redes neuronales, sistemas difusos, sistemas expertos, algoritmos evolutivos entre otros, para posteriormente con la información generada dar su respectiva alarma.

Los síntomas de alarma son usualmente de dos tipos, analíticos o heurísticos, es decir, los síntomas deben ser traducidos de forma tal que los humanos puedan analizarlos e interpretarlos, esto ocurre mediante la interpretación numérica de una variable o la interpretación lingüística.

El núcleo del diagnóstico consiste en el desarrollo del motor para el procesamiento del síntomas, existen dos tipos los motores basados en métodos de clasificación tales como: reconocimiento de patrones, clasificadores geométricos, clasificadores estadísticos, métodos de inteligencia artificial como clasificadores difuso o clasificadores neuronales. Por otro lado,

los motores basados en métodos de inferencia de información, provienen de área de razonamiento binario, donde destacan la lógica de predicados. La otra rama de conocimiento proviene de las teorías del razonamiento de la aproximación, en esta rama se destaca la lógica difusa y las redes neuronales. La figura N° 15, resume el árbol de conocimiento para la construcción de motores de diagnóstico de faltas.

Todos los métodos empleados para el diagnóstico de las faltas tienen a agrupar en dos:

- Métodos de Clasificación.
 - Sin conocimiento estructural de la relación entre los síntomas y las faltas.
- Métodos de inferencia.
 - Con conocimiento estructural de las relaciones entre síntomas y faltas.

A continuación se muestra un esquema de la clasificación de los métodos y técnicas empleados. Ver figura N° 15.

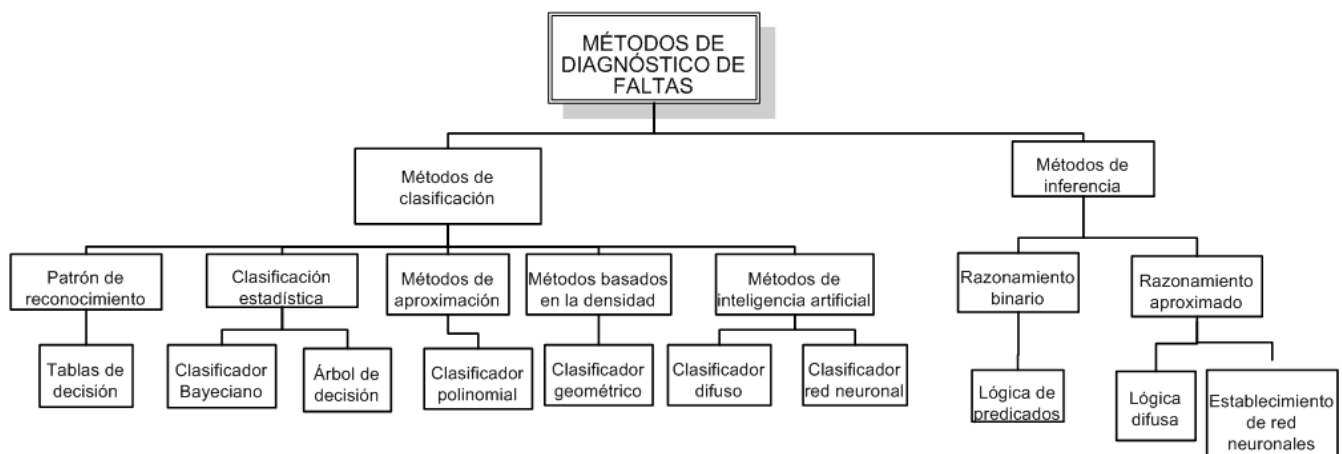


Figura N° 15. *Métodos de diagnóstico de faltas mediante el modelado del proceso o sistema. Visio 2007. Investigadores.*

La figura N° 15 muestra un esquema del sistema empleado para el diagnóstico de faltas en motores eléctricos. Según se observa, la primera línea indica el flujo de las señales de entrada hasta llegar a las señales de salida. Se inicia con el sistema a monitorear (motor eléctrico), que recibe señales de entrada representada como $u(t)$ tales como voltaje, frecuencia, además un conjunto de señales de salida que se indican como $y(t)$, por ejemplo la temperatura interna en el devanado del estator. Estas señales de entrada y salida se capturan con los sensores correspondientes, y a su vez estas mismas deben ingresarse al modelo matemático del motor.

5.1.7 Diagnóstico empleando modelo de sistemas

La comparación entre la señal de salida real (monitoreada) y la señal que se obtiene del modelo, permite generar un residuo (generador de caracteres) cuando existe alguna anomalía. Posteriormente este residuo debe evaluarse (evaluación de residuos) para determinar la presencia de un síntoma. De existir un residuo que exceda los valores normales, se realiza una calificación del síntoma o una inferencia del mismo. Esta sección del esquema contempla el diagnóstico de faltas empleado modelos de sistemas. Ver figura N°16.

5.1.8 Diagnóstico empleando modelo de señales

Posteriormente, la otra forma de lograr el diagnóstico es comparando la señal de salida con un modelo patrón de la señal. Esto implica que se debe caracterizar primero la señal de salida en estado normal, y luego comparar con la señal real, si entre ambas existe una diferencia (generador de caracteres), debe también evaluarse mediante la detección de cambios, el cual permite clasificar el síntoma o inferir el mismo.

Cuando se experimenta un cambio normal en las señales de entrada, deben también modificarse las señales de salida, tanto los sensores como la predicción de este cambio debe reflejarse en el sistema. Por lo tanto el módulo de generador de caracteres no detecta ninguna anomalía. Ver figura N°16.

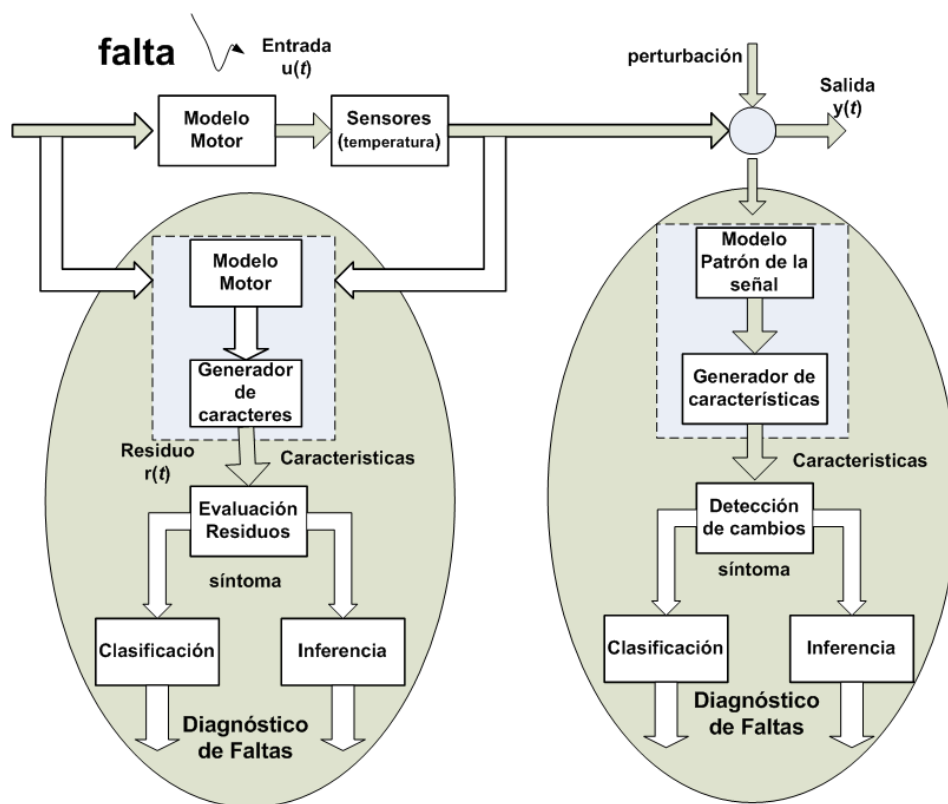


Figura N° 16. Esquema de un sistema para diagnóstico de faltas empleando modelo del proceso y modelo de señales. Visio 2007. Investigadores.

5.2 Segundo objetivo específico. Evaluar entre dos y cuatro métodos de obtención de modelado de faltas.

5.2.1 Selección de las variables de entrada a utilizar en el modelado de las faltas.

La selección de las variables de entrada en el proceso de modelado, depende de la falta que se desea modelar y de la falla que esta provoca. Se ha discutido sobre las distintas variables a utilizar en el modelado de una falta. Se requiere por cada posible falla del sistema, realizar un análisis para determinar el conjunto de faltas para cada categoría (detonante, contribuyente y subyacente), información [ToKI04].

A partir del estudio de Guerrero y Gómez [GueGo08], los investigadores establecieron que las faltas contribuyentes en los motores trifásicos de inducción son las que ofrecen la mejor estrategia de modelado.

En la figura N° 17 se muestra un diagrama Ishikawa que representa la falla por sobrecarga en el estator de un motor trifásico de inducción. En la cual se denotan tanto las faltas subyacentes, contribuyentes y detonantes.

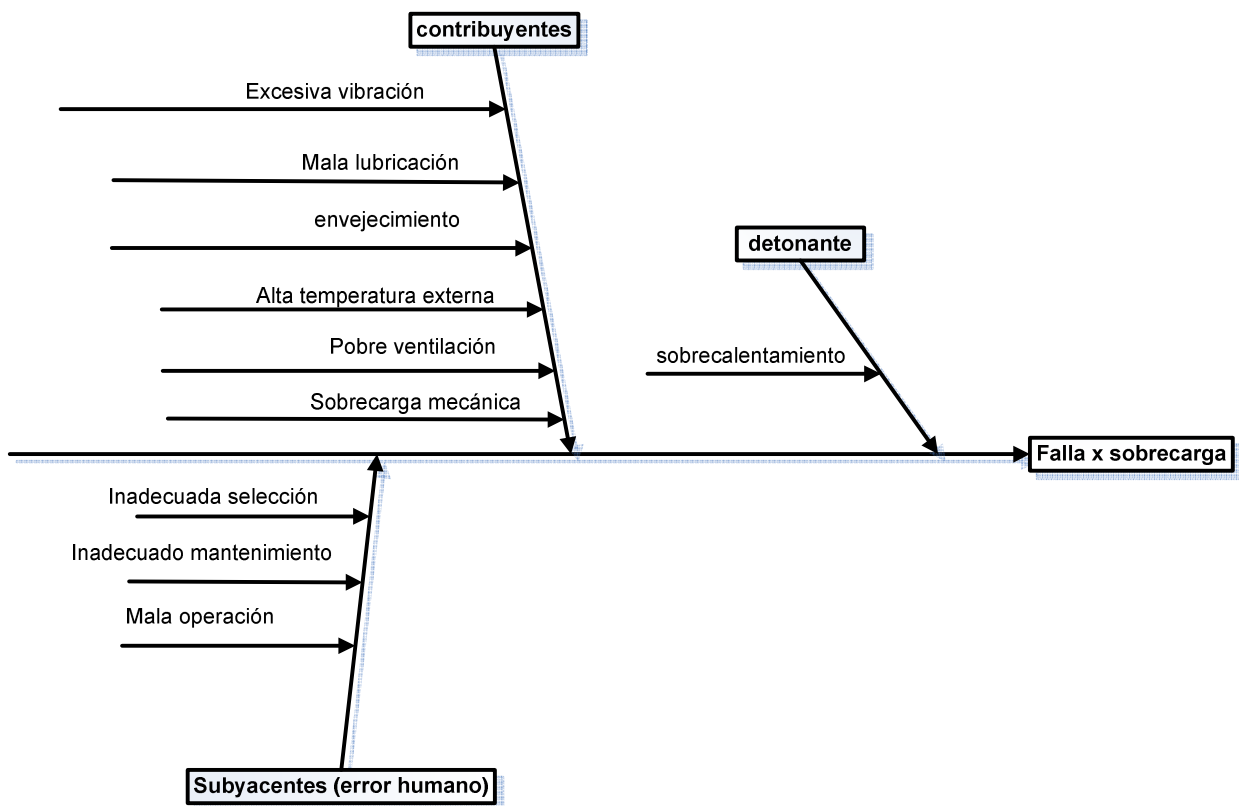


Figura N° 17. Diagrama Ishikawa que representa la falla por sobrecarga. Visio 2007. Investigadores.

La falla más común en motores trifásicos de inducción en Costa Rica es la sobrecarga en el estator, por lo que se está proponiendo utilizar la temperatura interna del devanado del motor

como la variable de salida del modelo. Al utilizar la temperatura, se puede determinar el grado de degradación del material aislante, ya que, es proporcional al incremento de temperatura. Se pretende realizar una serie de experimentos para determinar el modelo de temperatura para un motor particular.

Se desea construir un modelo de temperatura T° (temperatura interna del devanado estático) en función del voltaje de línea VL , temperatura exterior (T_{ext}), falla en el sistema de ventilación y falla en el rodamiento. En el objetivo N° 3 se detallan los experimentos que permitirán obtener la estas relaciones.

- $T_{in} = f(T_{ext})$; relación entre la temperatura interior y la temperatura exterior del devanado.
- $T_{in} = f(\text{rodamientos})$; relación entre la temperatura interior y el efecto de un rodamiento dañado.
- $T_{in} = f(VL)$; relación entre la temperatura interior y voltajes de línea mayor/menor que el 10% del voltaje nominal.
- $T_{in} = f(\text{ventilación})$; relación entre la temperatura interior y faltas del sistema de ventilación.

Comercialmente los equipos utilizados para la detección de faltas emplean los modelos de señales, a diferencia de los prototipos académicos propuestos en este proyecto (modelo lumped), los cuales utilizan el modelado del sistema o proceso para la detección.

El análisis de las características de la corriente del motor, conocida por sus siglas en inglés MSCA (*Motor Current Signature Analysis*), emplean distintas técnicas matemáticas para transformar la corriente en un espacio dado (la FFT utiliza el espectro de la frecuencia), en donde las características son comparadas con patrones conocidos de funcionamiento la señal transformada. A continuación se describen las técnicas que están contempladas en el MSCA.

Tabla N° 1 Técnicas basadas en MCSA (Motor Current Signature Analysis)

Técnicas Basadas en MCSA	Medidas requeridas	Permite diagnosticar	Ventajas	Desventajas
FFT Transformada Rápida de Fourier	Una corriente del estator.	<ul style="list-style-type: none"> Fallo de barra del rotor. Leve fallo en bobinado Excentricidad en el entrehierro. Fallas del Cojinete. Fallas tipo de carga conectada eje-engranajes 	<ul style="list-style-type: none"> Adecuado para las condiciones de carga alta. Fácil de implementar. 	<ul style="list-style-type: none"> Recuperar la información del tiempo. No es eficaz en la condición de carga ligera.
STFT Transforma de Fourier de corto tiempo	Una corriente del estator.	<ul style="list-style-type: none"> Falla barra del rotor. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta velocidad Adecuado para diferentes condiciones de carga 	<ul style="list-style-type: none"> Se debe ajustar el análisis de la señal en la pantalla (rango). Se debe conocer el rango de frecuencia donde se manifiesta la falla. Pobre resolución en frecuencia (poco espectro).
Transformada de Gabor	Una corriente del estator	<ul style="list-style-type: none"> Leve falla del bobinado. 	<ul style="list-style-type: none"> Buena resolución de frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> Velocidad Moderada
Transformada de Wavelet	Una corriente del estator	<ul style="list-style-type: none"> Falla del eje quebrado en el rotor. Leve falla del bobinado. 	<ul style="list-style-type: none"> Apto para variar la carga y las condiciones de carga ligera 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere conocimientos
Distribución de Wigner-Ville	Una corriente del estator.	<ul style="list-style-type: none"> Fallo del Cojinete. 	<ul style="list-style-type: none"> Buena resolución de frecuencia. Alta velocidad 	<ul style="list-style-type: none"> Afecta mucho la interferencia térmica.
Vector de Park	Tres corrientes en el estator.	<ul style="list-style-type: none"> Leves fallas del bobinado. Falla Cojinete. 	<ul style="list-style-type: none"> Fácil de diagnosticar la falla. 	<ul style="list-style-type: none"> No es efectivo para las fallas de carga y falla de la barra del rotor.

Se realizó una evaluación entre métodos que usan las concepciones de análisis de señales (MSCA) y el modelado de los sistemas (Modelo térmico Lumped). Se ejecutó una comparación directa entre métodos, de acuerdo a los rubros que se exponen en la tabla N°2, con base al análisis de las evidencias comerciales (equipos y manuales), revisión literaria científica, y experiencias prácticas de los investigadores. La idea de los rubros de evaluación, es dar argumentos prácticos, técnicos, metodológicos, que permitan comparar dos métodos con bases teóricas distintas.

Tabla N° 2 Criterios de evaluación de los métodos para detectar fallas

	MSCA	Modelo térmico Lumped
1.Cantidad de fallas que detecta*	1-sobrecarga eléctrica 2-corto circuito	1.sobrecarga-mecánica 2.sobrecarga-vent 3.sobrecarga-aplic
2.Requerimientos técnico*	alto	alto
3.Complejidad de implementación*	alto	alto
4.Tiempo de respuesta*	alto	bajo
5. Localización*	medio	alto
6.Gravedad de la falta que detecta**	bajo	bajo
7. Implementar técnicas de diagnóstico**	alta	alta
8.Técnica implementada equipos comerciales**	alto	baja
9. Investigación teórica desarrollada**	alta	baja

*Apoyado en la revisión en literatura (ver bibliografía).

**A partir del análisis de la literatura en conjunto con el criterio de los investigadores

Cantidad de faltas entre métodos

Se han evaluado en detalle la técnica MSCA a partir de revisión bibliográfica, dicha técnica detecta problemas de rodamientos, excentricidades, cortos circuitos y sobrecarga eléctrica. La forma en que se realiza la detección consiste en obtener el espectro de frecuencias de las corrientes consumidas. Incrementos de energía en bandas de frecuencias específicas, están asociadas a faltas determinadas. Esta técnica ha sido ampliamente estudiada y se conoce las bandas de frecuencias asociadas a faltas particulares.

En cuanto al modelo térmico por resistencias térmicas (lumped), este modelo se propone como mecanismo para determinar las temperaturas internas de los motores de inducción. La literatura no aplica este modelo a detección de faltas, sin embargo como parte de la evaluación, se determinó que el modelo puede ser aplicado para la detección de faltas asociadas a sobrecargas mecánicas (roles con fricción), sobrecarga por ventilación, sobrecargas por aplicación (Ciclo de operación del motor), estableciendo adecuadamente los límites de operación, como se aprecia en la revisión literaria existen varias técnicas.

Requerimiento Técnico

Para ambas técnicas la necesidad de contar con hardware y software especializado para análisis de datos es alto. Como ventaja se observó que el equipo para la captura de datos puede ser el mismo para ambos esquemas de detección de faltas.

Para análisis de MSCA es necesario desarrollar los algoritmos para la obtención del espectro de frecuencias, su análisis, así como las reglas de disparo para las alarmas. Para el modelo térmico, el cálculo de las resistencias térmicas para cada motor, es una labor compleja ya que se requiere información muy detallada de las características constructivas del motor tales como, dimensiones, materiales, aislamientos, configuraciones físicas, etc.

Complejidad de Implementación

La utilización de modelos de resistencias térmicas para la detección de faltas, presenta una alta complejidad debido a que: a) estos modelos no se ha propuesto para detectar faltas, por lo que hay que caracterizar cada falta, indicando zona y límites aceptables dentro del motor. b) los modelos térmicos lumped requieren calcular las resistencias térmicas del sistema y sus pérdidas, esto con la finalidad de predecir las temperaturas internas de la máquina y su ubicación. Estos son modelos particulares del motor, por lo que para analizar otro motor habría que realizar todo el procedimiento de obtención y calculo de resistencias y pérdidas.

Para ambos proyectos la integración del hardware como el software, resulta en actividades que deben planearse con cuidado. Integrar hardware y software de distintos desarrolladores, resultará en desafíos para los investigadores que decidan investigar ambas métodos.

Tiempo de respuesta.

La rapidez con que se puede detectar una falta utilizando la técnica MSCA es de varios órdenes superior a las técnicas que se pueden desarrollar de los modelos de resistencias térmicas, esto debido a la naturaleza de ambos fenómenos físicos. En este sentido la repuesta lenta de un modelo térmico, puede verse como una desventaja frente a modelos basados en MSCA. Sin embargo hay que recordar que las faltas que se detectan no necesariamente son las mismas, y hay que complementar los métodos para detectar la mayor cantidad de faltas.

Localización.

La ubicación de donde está ocurriendo la falta, pareciera según revisión literaria que es más precisa en el modelo térmico de resistencias, esto por cuanto es un modelo topológico del motor, por tanto esta intrínseco su estructura y por tanto modela las áreas de afectación del motor. Por otro, lado las técnicas MSCA, pueden decir a groso modo la zona afectada con una falta particular.

Gravedad de la falta que detecta

Se considera que con ambos métodos es factible el desarrollo de un sistema para medir el grado de deterioro de una zona o componente. Sin embargo, determinar los criterios o umbrales que definen la gravedad de una falta, para ambos casos requerirá investigación adicional ya que la literera plantea solamente grados binarios, es decir hay o no falta, y no su grado de deterioro.

Implementar técnicas de diagnóstico

Con el recurso humano disponible en el ITCR, y por entrevista a otros investigadores de las Escuelas de Matemática e Ingeniería en Computación, es factible el desarrollo de un sistema informático que a partir de síntomas que presenta el motor producto de ambos métodos (MSCA y LUMPED), se pueda obtener un diagnostico de la falta que afecta el motor.

Técnica implementada equipos comerciales.

Los equipos comerciales ON-LINE que indican la condición de fenómenos anómalos en el motor, tales Power Sighth y el Explorer 4000, utilizan el análisis del espectro de corrientes MSCA, sin embargo no brindan un adecuado diagnóstico del motor, por lo que es necesario la presencia de un experto para poder interpretar los distintos espectros. Se podría decir que los equipos comerciales implementan MSCA, pero no tienen software para brindar adecuados diagnósticos.

Por otra parte para los modelos de resistencias térmicas (LUMPED), no se encontraron equipos comerciales que usen dichos modelos, por lo que se abre una ventana para el desarrollo de equipos con estas técnicas.

Investigación teórica desarrollada

Los mayores esfuerzos de investigación en los métodos llamados MSCA han permitido caracterizar las faltas de componentes específicos en motores eléctricos, esto ayuda a la aparición de equipos comerciales que usan dichas técnica. Sin embargo, si se desea desarrollar equipos de diagnóstico para faltas que no son detectadas por MSCA, y a la vez aportar al desarrollo teórico, los modelos térmicos con su incipiente investigación ofrece a los investigadores ventajas y oportunidades.

5.3 Tercer objetivo específico

5.3.1 Contar con un diseño de uno o varios experimentos que permitan la obtención de datos, para sus posteriores análisis y obtención del modelo o modelos del sistema de fallas

Como se ha mencionado en las secciones anteriores 5.2.2, se han propuesto cuatro experimentos para obtener el modelo o modelos del sistema (motor eléctrico) que permita realizar la detección de faltas y prevenir el motor que falle por sobrecarga, apoyado en los proyectos de investigación anteriores sobre las fallas y causas más comunes en Costa Rica.

A continuación se detallan los cuatro experimentos propuestos:

- Efecto de la temperatura interna de los devanados del estator cuando presenta fallas en rodamientos.
- Efecto de la temperatura interna de los devanados del estator cuando opera a voltajes de líneas mayores y menores que el voltaje nominal.
- Efecto de la temperatura interna de los devanados del estator cuando se incrementa la temperatura ambiente.
- Efecto de la temperatura interna de los devanados del estator cuando presenta falla en el sistema de ventilación.

Para el desarrollo de cada uno de los experimentos existen equipos comunes que se emplearan en los cuatro experimentos, por lo tanto se citan y describen a continuación, posteriormente en el procedimiento de cada experimento se detalla cuales equipos e instrumentos se emplearan.

Equipo e instrumentos.

- Motor eléctrico a utilizar y datos de placa del motor.

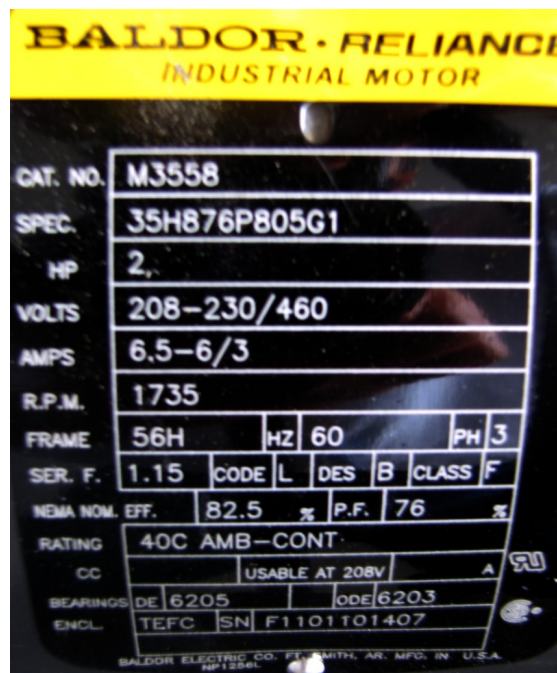


Figura N° 18 Placa de datos motor eléctrico Baldor. Canon. Investigadores.

- Medidor de energía (Fluke B43).



Figura N° 19 Medidor de energía marca Fluke. Página www.Fluke.com

- Tacómetro digital.
- RTD's (RTD connection head with hardware, spring loaded).
- Fuente trifásica de 25 amperios, 230 Voltios.
- cables de conexión.
- amperímetro.
- Dinamómetro hasta motores de 10 hp.
- Autotransformador.

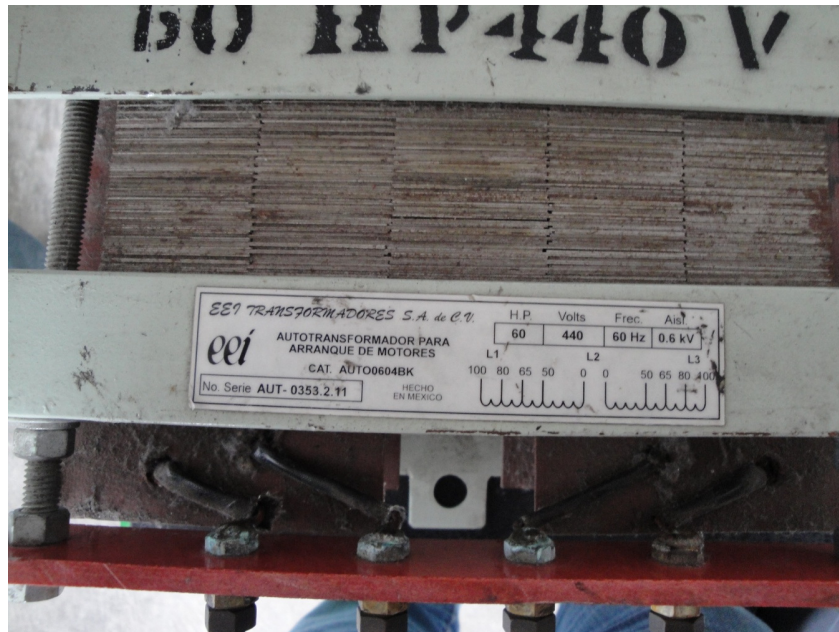


Figura N° 20 Fotografía de la conexión del autotransformador. Canon. Investigadores.

- 4 Ventiladores de PC
- 2 Resistencias para termo ducha
- 1 Potenciómetro
- 1 Fuente de DC (110VAC-12VDC)

Cuidados a considerar para el montaje y realización del experimento

- Aplicar la normativa de seguridad definida en la Escuela de Ingeniería Electromecánica al momento de realizar el experimento.
- Durante el funcionamiento, así como después del mismo, los motores poseen partes energizadas y en movimiento, esto puede provocar que sus superficies se encuentren calientes por lo que se debe tener precaución.
- Se debe conocer la ubicación de extinguidores, disyuntores y botiquín de primeros auxilios en caso de cualquier accidente. Además se debe seguir el protocolo en caso de alguna emergencia.
- La conexión, puesta en marcha, mantenimiento y reparación son acciones que deben ser realizadas por profesionales calificados apoyados en normativas y recomendaciones del fabricante.
- Antes de la puesta en marcha de la máquina se debe realizar una inspección visual en busca de daños ocasionados por el transporte o instalación del motor (cuando corresponda).
- Emplear vestimenta adecuada y zapatos cerrados durante el experimento.

5.3.1.1 Objetivo del experimento N° 1

Determinar el efecto de los roles dañados sobre la temperatura interna del devanado estático de un motor trifásico de inducción.

Descripción

En este experimento se provoca una falla (falla inducida), al extraer la grasa del rodamiento logrando incrementar la fricción interna del mismo, las demás variables se mantiene a condición normal, tales como temperatura exterior, voltaje, frecuencia, sistema de ventilación. Primeramente se debe conocer el comportamiento de la temperatura en estado normal (sin alterar ninguna variable o condición del motor). Posteriormente se somete al motor a operar a distintos niveles de carga en el eje pero con la falla inducida, y evaluar las distintas curvas de incremento de temperatura con el tiempo, y determinar si la pendiente de cambio se mantiene o es mayor que la condición normal.

Si los resultados obtenidos presentan un cambio significativo, es posible establecer límites de operación que se consideren normales, y por encima de estos valores indicar alarmas o condiciones de precaución por incrementos de temperatura en los devanados del motor.

Al implementar los distintos experimentos, se generan un conjunto de datos, que al aplicarle minería de datos, es posible obtener y establecer modelos de señal y modelos del objeto de estudio (motor eléctrico) desde el punto de vista térmico. De tal manera que se logra una detección temprana al evaluar el comportamiento real con la característica de la señal en estado normal de operación.

Procedimiento para caracterizar la señal en estado normal

1. Realizar una inspección visual de la estación de trabajo equipo y materiales. En caso de encontrar algún problema reportar al responsable del experimento.
2. Verificar las medidas de seguridad básicas necesarias para la realización del experimento y ubicar extinguidores y salidas del edificio.
3. Realizar o verificar que las conexiones del motor están según lo indica la figura N° 21.

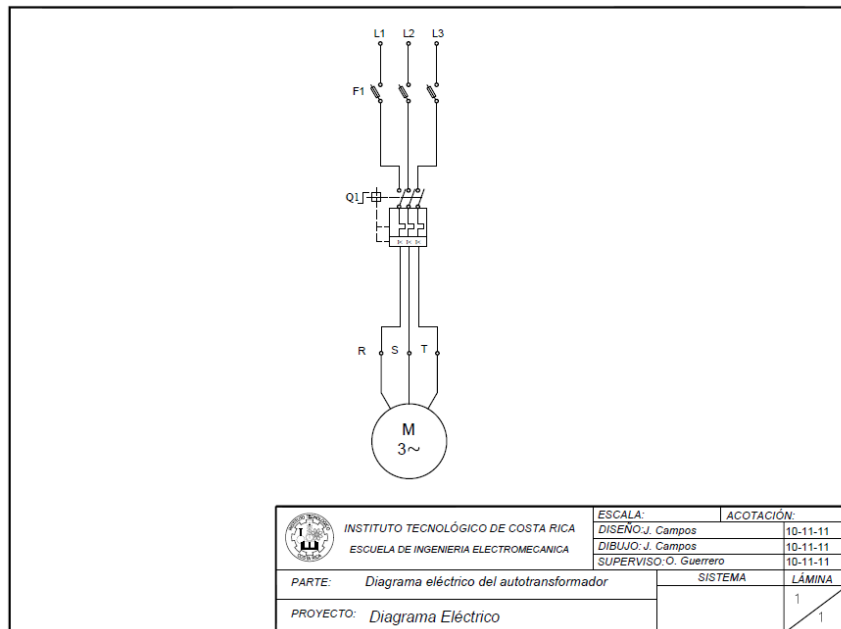


Figura N° 21 Conexión de un motor de inducción para un voltaje de 230 voltios trifásico. Autocad. Jesús Campos.

4. Verificar que los instrumentos de medición estén conectados (rtd, voltímetro, amperímetro, fluke, etc), de lo contrario proceda con la conexión de acuerdo al instrumento y el valor eléctrico a medir.
5. Para la conexión del fluke guiarse con la figura N° 22.
6. Permitir al profesor o encargado del experimento revisar las conexiones del circuito antes de energizar del sistema.

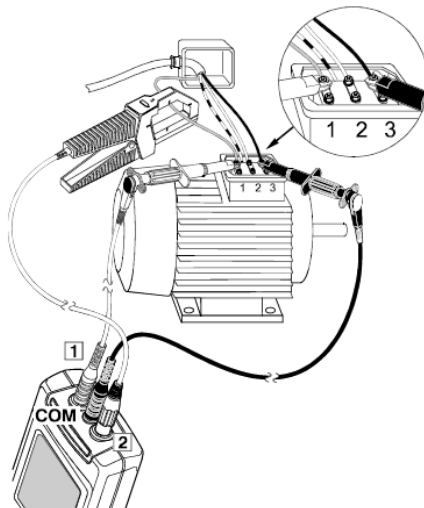


Figura N° 22 Conexión del fluke captura de datos. Página www.fluke.com

7. Proceder a energizar el motor accionando el botón de arranque del control respectivo (botonera).
8. Posteriormente tomar mediciones de corriente, voltaje, potencia, velocidad mecánica y la temperatura en los devanados estáticos de la máquina empezando desde el vacío y anotarlos en la tabla respectiva (tabla N°3).
9. Realizar mediciones cada cinco minutos hasta alcanzar una hora, o los cambios de temperatura no superen los 3 grados por medición.
10. Desenergizar el sistema y esperar el tiempo suficiente (al menos 2 horas) para que la temperatura interna en el devanado adquiere el valor del punto 9.
11. Repetir el punto anterior (10) pero aumentando la carga del motor hasta el 50% y detener las mediciones hasta que se estabilice la lectura de temperatura.
12. Repetir el punto 11 y 12 pero empleando un 75% de carga y luego el 100% carga.

Antes de fallo de roles.

Tabla N° 3. Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.

Tiempo (min)	Corriente (A)	Potencia (KW)	Velocidad mecánica (rpm)	Voltaje (V)	Torque (Nm)	Temperatura (°C)
0						
1						
5						

Procedimiento para caracterizar la señal con una falta inducida

13. A partir del daño inducido en los rodamientos del motor (falta específica aplicada con anterioridad), nuevamente se repiten los pasos 1 hasta el 13 para obtener los datos en las mediciones realizadas anteriormente y anotar en la tabla N° 4.

VARIABLES A MEDIR

Después de fallo de roles.

Tabla N° 4 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.

Tiempo (min)	Corriente (A)	Potencia (KW)	Velocidad mecánica (rpm)	Voltaje (V)	Torque (Nm)	Temperatura (°C)
1						
5						

Análisis de datos

Se recomienda emplear un software que permite establecer el comportamiento de la temperatura interna del motor a distintas condiciones, además de identificar la ecuación que se adapte mejor al comportamiento descrito, esto permitirá contar con un modelo matemático que describa el comportamiento físico de la temperatura del devanado ante distintas faltas inducidas.

Se recomienda el uso del SPSS , Excel y Matlab, los cuales están disponibles y con licencia en el ITCR.

5.3.1.2 Objetivo del experimento N° 2

Determinar el efecto en la temperatura interna del devanado estático de un motor trifásico de inducción al estar en funcionamiento con voltaje menor y mayor al 10% del voltaje nominal.

Descripción

Para la realización de este experimento se dispone de los datos de temperatura interna del devanado estático cuando el motor no tiene ninguna falta inducida (obtenidos del experimento N° 1).

Posteriormente se debe repetir el procedimiento cuando el motor presenta una falta inducida, para este caso, el motor estará funcionando con 210 Voltios y con 267 Voltios de línea, los cuales representan valores menores y mayores que 230 Voltios que corresponde al voltaje nominal. Estos voltajes se logran empleando un autotransformador.

Las demás variables se mantienen a condición normal, tales como temperatura exterior, rodamiento en buen estado, frecuencia, sistema de ventilación.

Luego se somete al motor a operar a distintos niveles de carga en el eje pero con la falla inducida, y evaluar las distintas curvas de incremento de temperatura con el tiempo, y determinar si la pendiente de cambio se mantiene o es mayor que la condición normal.

Si los resultados obtenidos presentan un cambio significativo, es posible establecer límites de operación que se consideren normales, y por encima de estos valores indicar alarmas o condiciones de precaución por incrementos de temperatura en los devanados del motor.

Al aplicar los distintos experimentos se puede establecer modelos de señal y modelos del objeto de estudio (motor eléctrico) desde el punto de vista térmico al variar el voltaje de alimentación. De tal manera que se logra una detección temprana al evaluar el comportamiento real con la característica de la señal en estado normal de operación.

Procedimiento para caracterizar la señal con una falta inducida

1. Realizar una inspección visual de la estación de trabajo equipo y materiales. En caso de encontrar algún problema reportar al responsable del experimento.
2. Verificar las medidas de seguridad básicas necesarias para la realización del experimento y ubicar extinguidores y salidas del edificio.
3. Realizar o verificar que las conexiones del motor están según lo indica la figura N° 23.

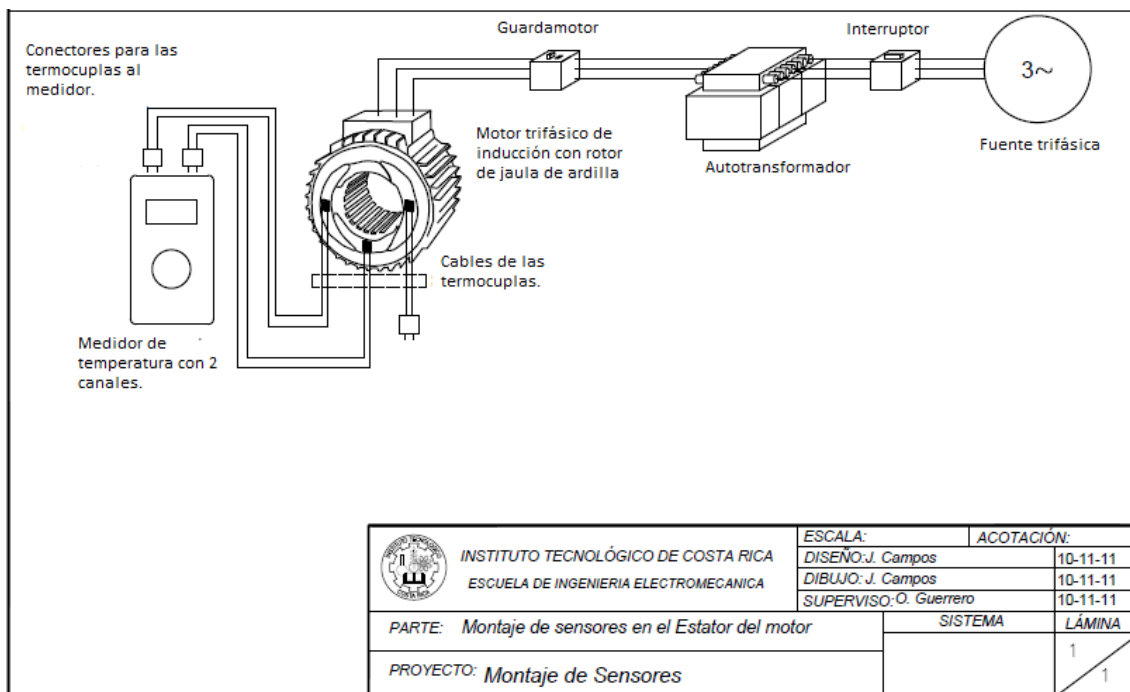


Figura N° 23 Conexión de un motor de inducción para un voltaje de 230 voltios trifásico. Autocad. Jesús Campos.

4. Verificar que los instrumentos de medición estén conectados (rtd, voltímetro, amperímetro, fluke, etc), de lo contrario proceda con la conexión de acuerdo al instrumento y el valor eléctrico a medir.
5. Para la conexión del fluke guiarse con la figura N° 22.
6. Permitir al profesor o encargado del experimento revisar las conexiones del circuito antes de energizar del sistema.
7. Proceder a energizar el motor accionando el botón de arranque del control respectivo (botonera).
8. Posteriormente tomar mediciones de corriente, voltaje, potencia, velocidad mecánica y la temperatura en los devanados estáticos de la máquina iniciando sin carga y anotarlos en la tabla respectiva (tabla N°5).
9. Realizar mediciones cada cinco minutos hasta alcanzar una hora, o hasta que los cambios de temperatura no superen los 3 grados por medición (tendencia al equilibrio térmico).
10. Desenergizar el sistema y esperar el tiempo suficiente (al menos 2 horas) para que la temperatura interna en el devanado adquiere el valor del punto 8.
11. Repetir el punto anterior (8 y 10) pero aumentando la carga del motor hasta el 50% y detener las mediciones hasta que se estabilice la lectura de temperatura.
12. Repetir el punto 11 y 12 pero empleando un 75% de carga y luego el 100% carga.

Tabla N° 5 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.

Tiempo (min)	Corriente (A)	Potencia (KW)	Velocidad mecánica (rpm)	Voltaje (V)	Torque (Nm)	Temperatura (°C)
0						
1						
5						

5.3.1.3 Objetivo del experimento N° 3

Determinar el efecto en la temperatura interna del devanado estático de un motor trifásico de inducción cuando se incrementa la temperatura externa a 50 °C.

Descripción

Se debe realizar el montaje de los equipos e instrumentos para la captura de datos según se detalla en el procedimiento, para este caso, las variables de voltaje y frecuencia se mantendrán constantes (dependiendo de la red de alimentación), se harán variaciones en la carga en el eje (50%, 75%, 100%) pero sin exceder la corriente nominal, la única falta inducida es la temperatura exterior donde estará funcionando el motor, para este caso se trabajará con 50 °C. Este incremento de temperatura se logra mediante la aplicación de resistencias de externas y cercanas a la carcasa del motor, y ubicado en una caja que facilite el control de temperatura.

Luego se somete al motor a operar a distintos niveles de carga en el eje pero con la falla inducida, y evaluar las distintas curvas de incremento de temperatura con el tiempo, y determinar si la pendiente de cambio se mantiene o es mayor que la condición normal.

Para este caso, la temperatura interna del devanado estático no debe superar los 100° C, esto para evitar daños irreversibles en el motor eléctrico.

Procedimiento para caracterizar la señal con una falta inducida

1. Realizar una inspección visual de la estación de trabajo equipo y materiales. En caso de encontrar algún problema reportar al responsable del experimento.
2. Verificar las medidas de seguridad básicas necesarias para la realización del experimento y ubicar extinguidores y salidas del edificio.
3. Verificar que los instrumentos de medición estén conectados (rtd, voltímetro, amperímetro, fluke, etc), de lo contrario proceda con la conexión de acuerdo al instrumento y el valor eléctrico a medir.
4. Para la conexión del fluke guiarse con la figura N° 22.
5. Mediante los abanicos y resistencias externas incrementar la temperatura exterior hasta alcanzar los 50 °C.

6. Permitir al profesor o encargado del experimento revisar las conexiones del circuito antes de energizar del sistema.
7. Proceder a energizar el motor accionando el botón de arranque del control respectivo (botonera).
8. Posteriormente tomar mediciones de corriente, voltaje, potencia, velocidad mecánica y la temperatura en los devanados estáticos de la máquina iniciando sin carga y anotarlos en la tabla respectiva (tabla N°6).

Tabla N° 6 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor.

Tiempo (min)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (KW)	Velocidad mecánica (rpm)	Torque (Nm)	Temperatura Interna (°C)	Temperatura Externa (°C)
0							
1							
5							

9. Realizar mediciones cada cinco minutos hasta alcanzar una hora, o hasta que los cambios de temperatura no superen los 3 grados por medición (tendencia al equilibrio térmico), o bien la temperatura interna en el devanado alcance 100 °C.
10. Desenergizar el sistema y esperar el tiempo suficiente (al menos 2 horas) para que la temperatura interna en el devanado adquiere el valor del punto 8.
11. Repetir el punto anterior (8,9 y 10) pero aumentando la carga del motor hasta el 50% y detener las mediciones hasta que se establezca la lectura de temperatura.
12. Repetir el punto 10 y 11 pero empleando un 75% de carga y luego el 100% carga.

5.3.1.4 Objetivo del experimento N° 4

Determinar experimentalmente la variación de la temperatura interna de los devanados estáticos debido a una falla por ventilación

Descripción

Para el desarrollo de este experimento se someterá al motor a operar sin el cobertor del ventilador, durante algún tiempo según se detalla en el procedimiento, y luego sin cobertor y sin ventilador.

Lo que se pretende es determinar el efecto en la temperatura interna a causa de un inadecuado sistema de ventilación. A pesar de que la carga en el eje, el voltaje, la velocidad y la corriente operan en rangos normales, cuanto efecto negativo presenta un daño, pérdida, inadecuado funcionamiento del sistema de enfriamiento.

Procedimiento para caracterizar la señal con una falta inducida

1. Realizar una inspección visual de la estación de trabajo equipo y materiales. En caso de encontrar algún problema reportar al responsable del experimento.
2. Verificar las medidas de seguridad básicas necesarias para la realización del experimento y ubicar extinguidores y salidas del edificio.
3. Verificar que los instrumentos de medición estén conectados (rtd, voltímetro, amperímetro, fluke, etc), de lo contrario proceda con la conexión de acuerdo al instrumento y el valor eléctrico a medir.
4. Para la conexión del fluke guiarse con la figura N° 22.
5. Permitir al profesor o encargado del experimento revisar las conexiones del circuito antes de energizar del sistema.
6. Desconectar el cobertor del ventilador para provocar la falta inducida.
7. Proceder a energizar el motor accionando el botón de arranque del control respectivo (botonera).
8. Posteriormente tomar mediciones de corriente, voltaje, potencia, velocidad mecánica y la temperatura en los devanados estáticos de la máquina iniciando sin carga y anotarlos en la tabla respectiva (tabla N°7).

Tabla N° 7 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor. Sin cobertor

Tiempo (min)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (KW)	Velocidad mecánica (rpm)	Torque (Nm)	Temperatura Interna (°C)
0						
1						
5						

9. Realizar mediciones cada cinco minutos hasta alcanzar una hora, o hasta que los cambios de temperatura no superen los 3 grados por medición (tendencia al equilibrio térmico).
10. Desenergizar el sistema y esperar el tiempo suficiente (al menos 2 horas) para que la temperatura interna en el devanado adquiere el valor del punto 8.
11. Repetir el punto anterior (8,9 y 10) pero aumentando la carga del motor hasta el 50% y detener las mediciones hasta que se estabilice la lectura de temperatura.
12. Repetir el punto 10 y 11 pero empleando un 75% de carga y luego el 100% carga.
13. Repetir los puntos 7, 8, 9, 10, 11 y 12 pero operando el motor sin cobertor y sin ventilador. Anotar los datos en la tabla N°8.

Tabla N° 8 Datos experimentales de corriente, potencia de entrada, velocidad de giro, voltaje, torque y temperatura para motor. Sin cobertor y sin ventilador

Tiempo (min)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (KW)	Velocidad mecánica (rpm)	Torque (Nm)	Temperatura Interna (°C)
0						
1						
5						

6 CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

- Existen dos categorías de métodos matemáticos para la obtención de modelos de sistemas o procesos los cuales son métodos para detectar y métodos para diagnosticar las faltas en los motores eléctricos.
- Se evaluaron los métodos matemáticos que emplean el análisis de la corriente (MCSA) y los métodos matemáticos a partir de modelos térmicos, ambos permitan lograr el modelo de las faltas.
- Se proponen realizar cuatro experimentos para obtener los modelos térmicos que permitan lograr la detección de las faltas del motor eléctrico.
- Se recomienda emplear métodos matemáticos para la detección que involucren tanto técnicas de MCSA como modelos térmicos, al combinarse se logra ampliar el porcentaje de fallas en los motores eléctricos en Costa Rica.
- Se recomienda continuar con esta línea de investigación que permitan alcanzar modelos matemáticos que ayuden a detectar faltas en cualquier equipo electromecánico.

7 APORTES Y ALCANCES

Al contar con los experimentos diseñados, es posible obtener un conjunto de datos que permitan caracterizar el comportamiento de la temperatura interna del devanado estatutico de un motor trifásico, cuando este es sometido a condiciones anormales de funcionamiento. La caracterización de los datos permite obtener modelos de comportamiento para eventualmente detectar y diagnosticar el motor. A partir de estos modelos es posible crear un sistema experto que permite detectar las faltas en los motores eléctricos y potencialmente las acciones correctivas para evitar las fallas futuros.

El diseño de experimentos obtenido en este proyecto es la base de un proyecto (SEMAT) actualmente aprobado por la VIE cuyo objetivo principal es el desarrollo de sistemas expertos para la detección y diagnóstico de faltas en estos equipos.

Los resultados parciales fueron expuestos en CONCAPAN 2010, congreso que organiza la IEEE, cuyo título de la ponencia aprobada fue “Desarrollo de sistemas expertos en tiempo real para la detección y diagnóstico de faltas en motores trifásicos de inducción”, además fue publicado en la revista de Tecnología en Marcha, volumen 23, periodo julio-setiembre 2011.

Actualmente se presentará la ponencia en el X Congreso de Ingeniería en Mantenimiento a realizarse en Costa Rica del 31 de mayo al 1 de junio del 2012, cuya nombre de la ponencia es “Detección de faltas en motores eléctricos mediante el monitoreo de la temperatura sin emplear termografía”

8 BIBLIOGRAFÍA

- [ArKoUn05] Arkan. M, Kostic-Perovic. D , Unsworth. P. J, “Modelling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics”, *Electric Power Systems Research, Elsevier*, Vol 75, 2005, pp 57–66.
- [Bozd04] Bozdogan, Hamparsum (Editor). *Statistical Data Mining and Knowledge Discovery ations*. Chapman \& Hall. Florida. 2004.
- [CaHaKI98] Cash M. Alex, Habetler Thomas G, Kliman Gerald B, “Insulation failure prediction in induction machines using line-neutral voltages”, *IEEE transactions on industry applications*, vol. 34, No. 6, november/December, 1998, pp1234-123.
- [Chap 06] Chapman, S. *Máquinas Eléctricas* (4 ed.). Mexico: McGraw Hill, 2006.
- [ChHoWa08] Chaoa. K. H, Hob. S. H, Wang. M. H, “Modeling and fault diagnosis of a photovoltaic system”, *Electric Power Systems Research, Elsevier*, Vol 78, No 1, Enero 2008, pp 97–105.
- [Dall00] Dallas, Johnson. *Métodos Multivariados Aplicados al Análisis de Datos*. International Thomson Editores. México. 2000.
- [EASA 04] EASA . *Root Cause Failure Analysis*.USA. 2004
- [Fra08] Fraile, Jesus. *Máquinas Eléctricas*. Editorial Mc Graw Hill. Sexta Edición. España 2008.
- [Gao06] Gao, Zhi. *Sensor less stator winding temperature estimation for induction machines*. Doctoral Philosophy Thesis. School of Electrical and Computer Engineering. Georgia Institute of Technology. 2006.
- [Goru11] Gorunescu, Florin. *Data Mining: Concepts, Models and Techniques*. Springer-Verlag. Berlin. 2011.
- [GueGo08] Guerrero. O, Gómez, L. “Estudio de Fallas de Motores Trifásicos de Inducción”. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2008.
- [GueGo09] Guerrero, O. Gómez, L. “Propuesta metodológica para reducción de fallas en Motores Trifásicos de Inducción”. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2009.
- [Guti08] Gutierrez, Humberto; De la Vara, Román. *Análisis y Diseño de experimentos*. Segunda Edición, Mc Graw Hill, México 2008.
- [HuBaAn09] Hurdle. E. E, Bartlett. L. M, Andrews. J. D, “Fault diagnostics of dynamic system operation using a fault tree based method”, *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier, Vol 94, No 9, Setiembre 2009, pp 1371-1380.
- [Iser06] Iserman.Rolf, *Fault Diagnosis System*, Spring-Verlag, Berlin: 2006.

- [JiMuDu07] Jiménez. G, Muños. A, Duarte. M, “Fault detection in induction motors using Hilbert and Wavelet transforms”, *Electrical Engineering*, Vol 89, 2007,pp 205–220.
- [Kirk10] Kirk, David B.; Hwu, Wen-mei W. *Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach*. 1 edition. Morgan Kaufmann, 2010.
- [Kyla95] Kylander, Gunnar. *Thermal modeling of small cage induction motors*. Doctoral Philosophy Thesis. School of Electrical and Computer Engineering. Chalmers University of Technology. 1995.
- [OzKi08] Ozgonenela. O, kilic. E, “Modeling and real-time fault identification in transformers”, *Journal of the Franklin Institute*, Elsevier, Vol 345, 2008, pp 205–225.
- [PaUpLo01] Patton, RJ,Uppal FJ, Lopez CJ, “Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems: a survey”. *European Journal of Control*, N° 7, página 2-3, Julio 2001.
- [Quin03] Quinn, Michael. *Parallel Programming in C with MPI and OpenMP*. 1 edition. McGraw-Hill, 2003.
- [RoSaYu02] Ricardo A. Rojas, Mario E. Salgado, Juan I. Yuz. **Análisis de Sistemas Lineales**. Departamento de Electrónica Universidad Técnica Federico Santa Marta, Marzo 2002, Valparaíso, CHILE.
- [SiBo06] Simeu. Z, Bouredji. Z, “Monitoring and predictive maintenance: Modeling and analyse of fault latency” *Computers in Industry*, Elsevier, Vol 57, No 6, Agosto 2006, pp 504–515.
- [SiFaPa02] Simani Silvio, Fantuzzi Cesare, Ron Patton, *Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques*, Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [ToKI04] Toliyat. Hamid, Kliman. Gerald, *Hanbook of Electric Motors*. 2 ed, CRC Press: Florida, USA. 2004.
- [Wang08] Wang. G, “Fault identification and classification of rolling element bearing based on time-varying autoregressive spectrum” *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, Vol 22, No 4, Mayo 2008, pp 934–947.
- [Venk05] Venkataraman, B. et al. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection. *IEEE, Protective Relay Engineers Annual Conference, 2005*.
- [ZhSh08] 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.
- [Zoch01] Zocholl, Stanley E. Using thermal limit curves to define thermal models of induction motors. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA. USA. 2001.
- [Zoch05] Zocholl, Stanley E. Comparing motor thermal models. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA. USA. 2005.

