Mundo Fesc E-ISSN: 2216-0388 P- ISSN: 2216-0353 (Impreso) Artículo Original

Nuevos modelos para la Caracterización, Detección y Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotativas

New Models for Characterization, Detection, and Diagnosis of Faults in Rotating Electric Machines

Recibido: 8 de mayo de 2023
Aprobado: 19 de junio de 2023

Cómo citar: J. E. Araujo Vargas, D. Y. Franklin Coronel, and V. M. Arias Ruiz, "Nuevos modelos para la Caracterización, Detección y Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotativas", Mundo Fesc, vol. 13, no. S2, pp. 67–84, 2023, doi: 10.61799/2216-0388.1656.

Jair Elías Araujo Vargas*

Magister en Controles Industriales, jair.araujo@unipamplona.edu.co , 0000-0003-3869-950X , 1.106.306.474,Coordinador , Cúcuta , Colombia.

Dilan Yesid Franklin Coronel

Ingeniería Mecatrónica, Dilan.franklin@unipamplona.edu.co ,1.005.039.943, Estudiante, Cúcuta, Colombia

Victor Manuel Arias Ruiz

Ingeniería Mecatrónica, victor.arias2@unipamplona.edu.co , 1.193.213.055, Estudiante, Cúcuta, Colombia

***Autor para correspondencia:**
jair.araujo@unipamplona.edu.co

© 2023. Fundación de Estudios Superiores Comfanorte.

Nuevos modelos para la Caracterización, Detección y Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotativas

Resumen

La identificación de fallas en motores eléctricos es crucial para optimizar su eficiencia y prevenir fallos, el monitoreo e inspección en sistemas críticos mejora la disponibilidad, confiabilidad operativa, garantizando la seguridad del personal, el cumplimiento ambiental y legal reduciendo costos en manufactura y operaciones empresariales.

Actualmente se emplean métodos físicos y análisis de vibraciones para detectar problemas, aunque estos enfoques presentan limitaciones tanto en la precisión como en la eficiencia debido a la subjetividad de cada caso y perdida de información en cada caso. El principal objetivo es explorar y proponer nuevas metodologías para la caracterización de fallas en motores eléctricos mediante el uso de análisis de datos y técnicas de aprendizaje automático revisando métodos tradicionales y actuales para el diagnóstico de fallas, incluyendo técnicas de análisis de vibración y algoritmos de aprendizaje supervisado y no supervisado.

También se examina el potencial de los algoritmos de inteligencia artificial para mejorar el diagnóstico y reducir la subjetividad en el procesamiento de datos por ende las técnicas modernas basadas en aprendizaje automático ofrecen mejoras significativas en la detección y predicción de fallas permitiendo identificar patrones complejos y realizar diagnósticos más precisos, ampliando las capacidades de los enfoques convencionales para facilitar el mantenimiento predictivo.

Por ende, las nuevas metodologías basadas en análisis de datos y aprendizaje automático representan un avance en el diagnóstico de fallas en motores eléctricos, su implementación en la industria puede reducir costos de mantenimiento, optimizar la operación de los motores y prevenir fallos inesperados.

Palabras Clave: Análisis de datos, Aprendizaje automático, Diagnóstico de fallas, Inteligencia artificial, Motores eléctricos, Vibraciones.

New Models for Characterization, Detection, and Diagnosis of Faults in Rotating Electric Machines

Abstract

The identification of faults in electric motors is crucial for refining their efficiency and preventing failures. Currently, physical methods and vibration analysis are used to detect problems, although these approaches have limitations in both accuracy and efficiency due to the subjectivity of each case and the loss of information in each instance. The main goal is to explore and propose new methodologies for fault characterization in electric motors through data analysis and machine learning techniques, reviewing traditional and current methods for fault diagnosis, including vibration analysis techniques and supervised and unsupervised learning algorithms.

The potential of artificial intelligence algorithms is also examined to improve diagnosis and reduce subjectivity in data processing. Consequently, modern techniques based on machine learning offer significant improvements in fault detection and prediction, allowing for the identification of complex patterns and more correct diagnostics, enhancing the capabilities of conventional approaches to ease predictive maintenance.

Therefore, new methodologies based on data analysis and machine learning represent an advancement in fault diagnosis for electric motors. Their implementation in the industry can reduce maintenance costs, perfect motor operation, and prevent unexpected failures.

Keywords: Artificial intelligence, Data analysis, Fault diagnosis, Electric motors, Machine learning, Vibrations.

Introducción

La caracterización de fallas en motores eléctricos juega un papel fundamental en la eficiencia y seguridad de estos. En la actualidad, existen diversas metodologías para llevar a cabo el análisis de datos y la identificación de posibles fallas en motores eléctricos. El uso de sensores para la monitorización constante del rendimiento de los motores y la detección temprana de anomalías es de vital importancia, en este sentido, el uso de técnicas de Machine Learning y análisis de big data se ha convertido en una herramienta fundamental para la caracterización de fallas en motores.

Lamentablemente, la información de los sensores no se comporta de manera tan reproducible en diferentes situaciones, sino que más bien actúa sobre un promedio de los datos de los sensores. Sin embargo, en la última década, el desarrollo de sistemas de adquisición de datos más rápidos y confiables, la adopción generalizada de tecnologías web y comunicaciones de datos ha permitido que los parámetros recogidos a través de una red de sensores o Smart grid, ofrezcan un valor agregado significativo al sistema de evaluación de eficiencia, confiabilidad, gestión de riesgos, predicción de fallas e integración con los sistemas de gestión del ciclo de vida de los equipos en servicio. Estas nuevas metodologías han revolucionado la forma en que se realiza el análisis de fallas en motores, permitiendo una mayor eficiencia y confiabilidad en la detección y prevención de posibles problemas. [1]

El razonamiento que justifica el monitoreo e inspección en máquinas con tiempo prolongado entre paradas programadas (máquinas críticas) es que el mantenimiento puede realizarse tomando oportunamente acciones de reparación o reemplazo. Si la inspección revela un problema, es posible corregir el problema antes de la próxima parada programada, extendiendo así la vida útil restante.

Los beneficios obtenidos mediante el monitoreo e inspección son evidentes para sistemas críticos, los cuales están asociados directamente con la disponibilidad de la instalación de producción, la confiabilidad operacional en cuanto a seguridad del personal, medio ambiente y requerimientos legales, ahorros de costos de manufactura y de negocio por tanto la literatura relacionada con el manejo de vibraciones y máquinas rotativas ha sido extensa en los últimos años [22],[23],[24]

Durante los últimos años, una tendencia importante en la industria es la disminución del mantenimiento correctivo para aumentar la disponibilidad y vida útil de los equipos. Esta tendencia demanda en muchos casos, la implementación y desarrollo de estrategias de mantenimiento basadas en el monitoreo o diagnóstico del estado de la máquina. Estas estrategias generalmente requieren la aplicación de sistemas de adquisición de datos, herramientas de procesamiento, análisis de señales, sistemas de diagnóstico y presentación de los resultados.[25],[26],[27],[28]

Dentro de las técnicas de análisis predictivo de condiciones, los sistemas de monitoreo de maquinaria basados en análisis de vibraciones se han documentado como los mejores, ya que son no invasivos y fáciles de entender. Eventualmente, esto tendrá un impacto económico en el manejo eficiente de los recursos, además de la posibilidad de experimentar una disminución de accidentes en el personal de mantenimiento, lo que mejorará la seguridad en general. [8],[9]

Justificación

La principal ventaja del uso del análisis de vibraciones como técnica predictiva es que permite realizar un seguimiento en línea del equipo de manera eficiente y precisa ya que no son invasivos contando con un fácil uso. A partir de la medición exhaustiva y el análisis detallado de la vibración del motor, se pueden elaborar estrategias de mantenimiento preventivo altamente efectivas e identificar comportamientos críticos de las fallas que permiten planear con anticipación las actividades de mantenimiento necesarias aumentando la posibilidad de una disminución de accidentes mejorando la seguridad en general.[29],[30]

La metodología utilizada para el análisis de la vibración de los rodamientos es una de las más completas y sofisticadas disponibles en la industria. El estado en que se encuentren los rodamientos puede determinar la tendencia futura de la muestra bajo la cual se está monitoreando la condición del equipo, incluyendo el tamaño de la falla, la velocidad de la falla y el tipo de falla.

También se han desarrollado nuevas técnicas y mejorado las herramientas actuales para analizar los datos de manera precisa y eficiente, lo que es esencial para el avance del mantenimiento predictivo. Esto permite prolongar la vida útil del equipo, disminuir los tiempos de inactividad no planificados y optimizar los gastos de mantenimiento, generando así una mayor eficiencia operativa y rentabilidad para las empresas. [2]

Objetivo

Dentro de las alternativas más actuales para el diagnóstico de fallas en máquinas, entre las que se destacan principalmente las técnicas basadas en el concepto de inteligencia artificial (IA) y el uso de la lógica borrosa, existen importantes trabajos publicados en relación con el uso de herramientas estadísticas obteniendo buenos resultados. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los datos relevados fueron seleccionados de manera arbitraria o preprocesados considerando únicamente el conocimiento empírico del personal especializado en análisis de vibraciones. Otra limitación importante está dada por el hecho de que dicho preprocesamiento implica una importante etapa de trabajo para cada tipo específico de falla que se desee incluir en el estudio, lo que dificulta la reutilización del trabajo para otros tipos de maquinarias. En este sentido, resulta fundamental abordar nuevas perspectivas en cuanto a la recolección de datos y su procesamiento. Esto permitiría ampliar el alcance de los resultados obtenidos y promover

la aplicación de técnicas más avanzadas en el diagnóstico de fallas en diferentes tipos de maquinarias. Además, se podrían establecer criterios más objetivos y generalizables para la selección de datos relevantes, evitando así la subjetividad y la posibilidad de perder información importante. Una posible solución para superar estas limitaciones consiste en el uso de algoritmos de aprendizaje automático. Estos algoritmos permiten que la máquina aprenda a partir de los datos recolectados, eliminando la necesidad de un preprocesamiento manual y personalizado para cada tipo de falla. De esta manera, se potencia la reutilización del trabajo y se facilita la aplicación de las técnicas en diferentes contextos. Además, el uso de algoritmos de aprendizaje automático supone un avance hacia un diagnóstico más preciso y eficiente. Estos algoritmos tienen la capacidad de detectar patrones complejos en los datos, incluso aquellos que pueden pasar desapercibidos para el personal especializado. De esta forma, se pueden identificar fallas en etapas tempranas, evitando consecuencias más graves o costosas para la maquinaria y la productividad. En conclusión, si bien las técnicas basadas en inteligencia artificial y lógica borrosa han demostrado ser efectivas en el diagnóstico de fallas en máquinas, es necesario abordar nuevas perspectivas que permitan superar las limitaciones actuales. El uso de algoritmos de aprendizaje automático puede ser una solución prometedora, ya que elimina la subjetividad en el preprocesamiento de los datos y permite un diagnóstico más preciso y eficiente. Con esto, se facilita la reutilización del trabajo y se amplía el alcance de los resultados obtenidos. En definitiva, es fundamental continuar explorando y desarrollando nuevas técnicas para mejorar el diagnóstico de fallas en máquinas. [3]

Estado del arte

La aplicación de metodologías de detección y diagnóstico temprano permiten anticiparse a la presencia de fallas, con el objeto de poder tomar decisiones sobre en qué momento es conveniente realizar la detención programada de la máquina para realizar un mantenimiento preventivo. Conocer el comportamiento dinámico de la máquina permite el diagnóstico temprano de las fallas que afectan directamente al sistema de vibración, los problemas mecánicos, rotor/estator, pueden afectar a las vibraciones, ya sea generando movimientos sin fuerzas externas, produciendo vibraciones armónicas registrables en rpm y sus múltiplos, o modificando la forma en que se atenúan las mayores componentes del espectro. Todas las fallas mencionadas pueden generar vibraciones transitorias cuando se produce el daño (falla por fatiga) y ralentizables (cuando no se producen constantemente sino en forma intermitente). En algunos casos, los transitorios pueden confundir el análisis con señales provocadas por la misma máquina. [5]

Los datos de vibración disponibles para diagnosticar máquinas eléctricas rotativas con inducido bobinado se aplican principalmente a motores y generadores de corriente continua, con poco uso en máquinas de corriente alterna. Sin embargo, hay razones para usar estos métodos en máquinas de corriente alterna, ya que son útiles para detectar fallas tempranas e intermitentes, así como para comprender el comportamiento dinámico de la máquina. [5]

Metodología tradicionales de diagnósticos de fallas en motores

Actualmente, existen diversas metodologías para la caracterización de fallas en motores eléctricos a partir del análisis de datos. Estas incluyen: - Métodos físicos: valiéndose de ciertos sensores o herramientas que detecten señales anómalas, que indican algún fallo en el equipo. Ejemplos: termometría por infrarrojos (CTI), vibración, corrosión o desgaste químico, entre otros. - Métodos de procesamiento de señales: empleando todas o algunas de las informaciones obtenidas de la propia máquina como características de entrada para la identificación de posibles fallos, a través de un procesamiento matemático de dichas señales. Ejemplos: balanceos en corriente, vibraciones, torque. Algunas de las técnicas para este enfoque son las redes neuronales, lógica difusa, máquinas de soporte vectorial, k-vecinos más cercanos. - Modelos guiados por datos: empleando los datos como entrada para un modelo que, en función de las conclusiones extraídas, llega a tomar decisiones, normalmente entrenado mediante un algoritmo; como el aprendizaje automático o el aprendizaje profundo. [4],[5],[6]

Diversas son las aplicaciones de los motores eléctricos en la industria, destacándose aquellas pertenecientes a sectores de producción de bienes y prestación de servicios. El funcionamiento deficiente de estos activos, producido por casos de posible falla, puede generar un significativo impacto económico en la organización, disminuyendo sus índices de rentabilidad y competitividad en el mercado. Es por ello por lo que el diagnóstico en tiempo real para la identificación de posibles fallas es clave para minimizar los efectos negativos que estas pueden provocar.

Fundamentos Teóricos

El análisis exhaustivo de muestras de motores en bancos de pruebas proporciona la capacidad de cuantificar de manera precisa y detallada el contenido de los elementos de desgaste presentes en el proceso de lubricación de un motor. [9]

Mediante este análisis, se busca identificar posibles cambios significativos en los niveles de estos elementos de desgaste, lo que permite evaluar de manera efectiva el desempeño de las partes internas del motor. Los cambios notables en la concentración de estos elementos indican el desgaste o deterioro de los componentes internos del motor, lo que puede tener implicaciones importantes en su funcionamiento. Además, el análisis de ruido es otra técnica utilizada para evaluar el funcionamiento del motor, ya que ruidos inusuales pueden ser un indicio de problemas internos.

El análisis de usos y desgaste (NICS) proporciona una visión detallada y precisa de cómo se ha desgastado y utilizado el motor en condiciones reales de operación, lo que permite determinar posibles áreas de mejora y optimización. Por otro lado, las inspecciones visuales de componentes y atributos físicos son clave para detectar signos visibles de desgaste o daños en los diferentes componentes del motor. Estas inspecciones se complementan con evaluaciones detalladas de parámetros físicos, como la medición de

tolerancias y desgastes específicos, para garantizar un diagnóstico preciso.

Principios de funcionamiento de motores y tipos de fallas comunes

El análisis de la vibración en las máquinas se ha convertido en una técnica para la detección de desequilibrios y el estado anómalo de las mismas. Los sistemas de mantenimiento predictivo basados en vibración son buenos en el diagnóstico de rotura de elementos mecánicos, cuando ya hay un deterioro avanzado en la máquina o el espectro de frecuencia extraído por vibración de cualquier máquina proporciona información referente a los desequilibrios o a la existencia de problemas de alineado. Las técnicas de monitorización de la vibración en rodamientos dañados se han convertido en una técnica de monitorización del estado muy popular y extendida. Estas técnicas permiten detectar y predecir fallas en motores con gran precisión, lo que resulta fundamental para la industria, ya que ayuda a prevenir paradas no planificadas y costosas.

En los motores, todos los elementos principales: rotores, bobinas y conmutadores tienen holguras para garantizar el movimiento, el desgaste en los aislantes, así como la fatiga en los elementos metálicos que componen las máquinas, se traduce en la aparición de holguras y desequilibrios entre los distintos elementos de la máquina. Estos desequilibrios generan o bien vibraciones o bien altas temperaturas en la zona comprometida. [10],[11]

Conceptos básicos de vibraciones mecánicas

Las vibraciones mecánicas se manifiestan a través de tres magnitudes cinemáticas: desplazamiento, velocidad y aceleración. El desplazamiento es una magnitud vectorial que representa una alteración en la posición del eje en un instante determinado. La representación gráfica de la vibración en función del tiempo es el llamado diagrama de desplazamiento. Sin embargo, esta forma de presentar los datos no es práctica, porque es posible detectar oscilaciones con pequeños valores de la vibración. Además, el análisis de vibraciones mecánicas permite identificar patrones de fallo en las máquinas eléctricas rotativas, tales como desalineación, desequilibrio, holguras, entre otros, lo que facilita la detección temprana de posibles fallos. Estos patrones de vibración pueden ser interpretados por medio de análisis de frecuencia y amplitud, lo que proporciona información valiosa para el diagnóstico de fallas, así como la evaluación de la integridad de los rodamientos y el estado de las chumaceras, además, es importante considerar que el análisis de vibraciones mecánicas también puede ser utilizado para determinar la presencia de resonancias y modos de vibración críticos, lo que contribuye a la prevención de posibles daños en las máquinas eléctricas rotativas. [5],[36]

Tecnologías de medición de vibraciones

Es importante recalcar la diferencia existente entre los colectores de datos y los siste-

mas de monitoreo en línea, los sistemas de monitoreo en línea incorporan todos aquellos requerimientos de hardware (incluida la red de comunicaciones) y software asociados a la configuración de la máquina rotativa, combinando señales de varias tecnologías y con capacidades de procesamiento local parcial o total. Mientras que los colectores de datos son dispositivos específicamente diseñados para registrar las señales de un sensor específico y en muchos casos con la capacidad de procesar y almacenar un pequeño porcentaje de la señal bruta.

1) Velocidad lineal: corresponden a acelerómetros de mayor rango y temperatura.

2) Desplazamiento: generalmente utilizan sensores de tecnología inductiva hacia sensores del tipo capacitivos, utilizados en sistemas de mayor precisión debido a las diferencias de escala entre un sensor inductivo y un capacitivo. Los capacitivos pueden medir de 0 P-P a 80 μm de desplazamiento. El problema allí es que necesita altos voltajes para medir estas cantidades y la presión de la máquina sobre los sensores produce fatiga al material.

3) Aceleración: se utilizan piezoeléctricos cuando los acelerómetros son para monitorear presiones aceleraciones altas y a menudo de baja frecuencia; o sensores MEMS, utilizados en los casos de ambientes menos críticos o para sistemas de monitoreo en línea donde se requieren al menos tres ejes de vibración para implementar una correcta adquisición de datos y disponibilidad de sensores a un precio asequible. [5],[36]

Metodologías de detección de fallas

1) Criterio en frecuencia: Criterio propuesto para el diagnóstico en modo multicondicional, basado en la separación de espectros de fallas utilizando un coeficiente de amplitud definido. En general, un valor de “p” para la amplitud puede ser orientativo, pudiendo variar para distintos tipos de equipos y componentes de máquina. Para detección de fallas, usar valores propuestos de “p69” (para detección de fallas por efecto elástico) y “R2” para chumaceras. La detección se realiza comparando los principales armónicos que aparecen asociados a los cambios de velocidad de rotación de las distintas etapas, directamente o a través de la aplicación de los factores de forma correspondientes. Para la etapa de colas, se deben normalizar los datos en función de la frecuencia de rotación del equipo y compararse contra el rango de valores, además de los valores límites de las amplitudes. Primer armónico (módulo relativo): Los deflectores detectan el cambio de posición angular del eje de rotores, generando vibraciones periódicas cuya amplitud crece con la velocidad de rotación. Eje de acoplamiento hidrodinámico (módulo relativo): Los ejes acoplados hidrodinámicamente generan un patrón que posee un rango de frecuencias característico de las paletas y su número respectivo de vena del estator. [39]

2) Análisis espectral: Criterio que propone diagnosticar, a partir del análisis no solamente de valores puntuales de amplitud o fase, sino principalmente del análisis espectral de dichas componentes. El análisis espectral de las vibraciones es la fuente de gran can-

tidad de señales sobre la condición del equipo. Mediante el mismo, se puede detectar el problema antes de que se produzca una detención no programada, o bien, se puede evaluar la eficacia de una reparación en forma rápida y efectiva. Ofrece la posibilidad de efectuar un diagnóstico muy preciso sobre la naturaleza de la falla.

Clasificación de fallas comunes en máquinas eléctricas rotativas

Según estudios realizados por expertos en mantenimiento, las fallas más comunes detectadas en máquinas eléctricas rotativas son producidas por desbalances, desalineaciones, deficiencias en la base y resonancias mecánicas; esto es aplicable en los casos en que la máquina y el sistema de accionamiento comparten reglas universalmente aceptadas para su diseño. Otras causas importantes de fallas que aparecen de forma individual o juntamente con las mencionadas son la severidad avanzada de desgastes configurando falta de rendimiento o ambientes inadecuados de trabajo con condiciones de operación fuera de los límites previstos para ellos relacionados con las influencias externas e internas.

Cabe mencionar que para algunos autores los problemas de diseño que causan fallas de partidas no deseadas se encuadran dentro de los desbalances, la falta de rigidez torsional o la ocurrencia de resonancias. [34],[41],[42]

Conceptos básicos de análisis de datos y aprendizaje automático

En el análisis de datos, se generan transformaciones sobre el espacio de características en el cual se representan y, posteriormente, se aplica alguna regla para reducir el conjunto de características. Técnicas de PCA o LDA (análisis discriminante lineal), además de distintas técnicas de aprendizaje no supervisado para realizar un clustering, etc., son ejemplos de este suceso.

La primera etapa en la resolución de un problema de aprendizaje supervisado implica el procedimiento de selección y extracción de característica. Durante este proceso, se seleccionan algunas características relevantes de entre un conjunto mayor, se reducen las dimensiones y se pretende aumentar la eficiencia del algoritmo de aprendizaje. Posteriormente, las características son proporcionadas a un algoritmo de aprendizaje que cuenta con un conjunto de datos junto con la variable de interés que se estime. El objetivo de esta etapa, conocida como etapa de selección de características, consiste en encontrar el conjunto óptimo respecto a alguna función de mérito o a algún criterio predefinido. Por otro lado, la etapa de extracción de características se encarga de producir un subconjunto de características que puedan representar mejor los datos, normalmente a partir de una reducción de dimensionalidad. [12],[13],[14]

Metodología

El mantenimiento basado en la continuidad de la pronosticabilidad de los componentes incorpora elementos de la cuarta revolución industrial. Los activos tienen conectividad a nivel local y global, interactúan entre máquinas y seres humanos, y la recopilación y análisis de datos se ha consolidado. Este enfoque se basa en la premisa de que la operación en la que se encuentra un activo (modo de fallo operativo - OFM) y las condiciones a las que está sujeto pueden ser definidas en términos de variables seleccionadas (indicadores del estado) que pueden ser medidas o monitoreadas. A partir de estas variables es posible inferir el OFM y tomar acciones de mantenimiento, como la identificación de la causa de una deficiencia, la planificación y control de las tareas de mantenimiento, la predicción de la vida útil del componente y la probabilidad de fallo, así como la identificación de alteraciones en las condiciones operativas que afecten al OFM. [15]

Modelos de diagnostico de fallas

En varios estudios, se ha utilizado un criterio basado en rankings para clasificar según la influencia de las características medibles (frecuencia, energía, amplitud) de manera sencilla. Al establecer un criterio de excitación mediante el ranking, se contribuye a reducir posibles falsos positivos introducidos por las condiciones operativas cambiantes, las cuales son difíciles de modelar en la mayoría de los casos. Existen además otros criterios en función del parámetro seleccionado y del tipo de máquina en cuestión, como se destaca en algunos estudios. Autores como [incluir nombre] dependen de la organización de la investigación y del tipo de vida útil prevista para cada componente o conjunto, y proponen distintos criterios de aceptación de fallas en función de la aplicación. Es importante estudiar los diagnósticos utilizados por diferentes autores para cada tipo de máquina y condición específica, con el fin de minimizar el error al anticipar necesidades de mantenimiento. Sin embargo, es necesario tener en cuenta algunos criterios subjetivos.

Al igual que en los modelos de detección de fallas, los modelos de diagnóstico de fallas también cumplen funciones distintas. A continuación, se describen varios tipos de modelos de diagnóstico de fallas basados en el análisis de vibraciones en sistemas de ingeniería, que incluyen criterios de diagnóstico, clasificaciones y rankings utilizados por diferentes investigadores. El criterio más comúnmente empleado para el diagnóstico de fallas basado en vibraciones se fundamenta en la comparación de indicadores que caracterizan diferentes tipos de defectos en la maquinaria. En general, la importancia de los diferentes componentes o frecuencias puede clasificarse en orden decreciente, según la situación específica. [40],[36]

Extracción de características relevantes

A pesar de que ha evolucionado notablemente el número de innovaciones tecnológicas

y herramientas para monitorizar motores en condiciones reales, todavía quedan aspectos típicamente orientados a la investigación o bastante asentados en el ámbito industrial, como la evaluación de la dinámica vibratoria interna en un motor en situaciones de falla. [16],[17]

Con el auge de distintas técnicas de inteligencia computacional para la caracterización de fallas en motores, se ha reducido en general el impacto de la ubicación de sensores. Es decir, no es estrictamente necesario llevar a cabo mediciones en el mismo sitio donde la falla se manifiesta. Para ello, algoritmos modernos como las Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Networks), métodos de aprendizaje supervisado o incluso Redes Bayesianas o máquinas de soporte vectorial, entre otras posibilidades, requieren de una cantidad elevada de señales para poder conformar los conjuntos de datos sobre los que trabajar.

Esto ha suscitado inferencias muy interesantes, como la realización de técnicas alternativas para la detección, como la monitorización, ajustándose o adaptando ciertos valores mediante análisis de los resultados o sometiendo a ciertos estímulos a los motores con el objetivo de producir internamente en ellos la manifestación de la falla. [18][19]

De una gran cantidad de señales capturadas a través de sensores y otras herramientas de adquisición de datos, se busca extraer las características más relevantes. Estas características son evaluadas y comparadas.

Técnicas avanzadas de diagnostico

En la actualidad, los conceptos de predictivo y correctivo, en el área del mantenimiento son prioritarios, pero ¿a qué se refieren estos conceptos? Básicamente, el mantenimiento correctivo es aquel que surge después de que la falla se ha presentado, es decir, no existe un programa o una acción preventiva para prevenir la falla. También presenta distintos niveles como le puede pasar a usted, al equipo o a la empresa. Lo básico es dárselo a conocer a nivel personal si tiene un mantenimiento descuidado en su lugar de residencia o trabajo y, al final, si quiere realizar un estudio profundo a empresa. Existen diversas fallas en un sistema eléctrico y/o mecánico, y en la actualidad se puede procesar señales de equipos de manera rápida mediante técnicas de análisis de vibraciones, la cual es sinónimo de darle un mayor tiempo de vida útil a sus equipos, confiabilidad.

Actualmente no son suficientes para identificar los diferentes tipos de fallas que pueden afectar el comportamiento del sistema, basado en el concepto de normalidad - normal (óptimas condiciones operativas), normal-falla (requiere condición operativa diferente para provocar vibraciones), anormal-falla (requiere una simple condición operativa para provocar vibraciones). Es así como en la actualidad se observa un alto interés en desarrollar técnicas avanzadas de procesamiento de señales, aprovechando la reducción en el costo de dispositivos de mayor capacidad de procesamiento, con el objetivo de

incrementar la eficiencia en la detección y diagnóstico de fallas en sistemas rotativos. Lo recomendable es que el usuario de dichas herramientas esté familiarizado con los principios de vibraciones mecánicas, en conjunto con el comportamiento dinámico del sistema que se analiza.

Implementación de algoritmos de aprendizaje automático

El proyecto se propone desarrollar e implementar un método de detección de eventos anómalos, utilizando algoritmos de aprendizaje automático, recopilando información sobre el sistema para su posterior análisis y clasificación. La información recopilada será utilizada para mejorar la eficiencia del sistema y prevenir futuras fallas, la implementación de algoritmos de aprendizaje automático permitirá analizar de manera más eficiente los datos recopilados.

La propuesta emplea algoritmos de aprendizaje supervisado para la detección temprana de fallas en motores, tales como máquinas de soporte vectorial, Redes Neuronales Artificiales, y Árboles de Decisión. Estos algoritmos son capaces de analizar grandes volúmenes de datos e identificar patrones que pueden indicar la presencia de una falla en el motor. [20],[21],[22]

Limitaciones actuales de los modelos de detección y diagnóstico

Las limitaciones de los resultados obtenidos son diversas y de índole o variedad. Sin embargo, dadas las expectativas e incertidumbre respecto al potencial diagnóstico en el ámbito industrial, de los métodos de diagnósticos basados en inteligencia artificial. Además, es necesario considerar que aún existen limitaciones importantes que deben ser abordadas para la implementación efectiva de estos modelos, la combinación de varios índices de diagnóstico y en el análisis de detección.

Falta de información al incorporar modelos del proceso de detección y diagnóstico. Por otro lado, los modelos basados únicamente en la capacidad de análisis que brindan las herramientas de tratamiento de señal o emulación de competencias humanas. Se debe brindar soporte al ingeniero mediante modelos de detección y diagnóstico. Según, en su modalidad como expertos en dominio, la generación de auto observación y toma de conciencia con respecto a los aspectos del dominio, actores involucrados, prestaciones esperadas y hechos concretos e históricos. [45]

Conclusiones

Los resultados estudiados en la investigación de las metodologías para la caracterización de fallas en motores empleadas por los diferentes autores pueden ser útiles para el desarrollo de futuras técnicas de diagnóstico de fallas. Por lo tanto, se recomienda la implementación de estas nuevas metodologías en la industria para mejorar el diagnós-

tico de fallas en motores, así como para reducir los costos de mantenimiento y evitar posibles accidentes o averías. Además, es necesario seguir investigando y desarrollando nuevas técnicas de análisis de datos para seguir mejorando la caracterización de fallas en motores, con el fin de lograr una mayor eficiencia en la detección temprana de posibles problemas. En conclusión, las nuevas metodologías de análisis de datos representan un avance significativo en la detección de fallas en motores, pero aún queda mucho trabajo por hacer en este campo para alcanzar resultados óptimos.

Síntesis de los principales hallazgos

Distintos escenarios que se planteen en la intrusión de fallas en máquinas eléctricas rotativas se finalizan con prácticos e interesantes ejemplos de aplicación de las técnicas de detección y diagnóstico presentadas en motores atendiendo a las características constructivas y modos de operación identificados en los respectivos equipos. Desde el punto de vista académico se ha de incidir en la importancia de este tipo de aplicaciones para el avance en la detección y diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotativas.

Recomendaciones para la implementación de sistemas de detección y diagnóstico

Capacidad de atender a varios tipos de registros, seguimientos, reportes y simulaciones a voluntad del operador, considerando datos en tiempo real, en línea y fuera de línea. Amplia diversidad de modelos predeterminados que incluyen reglas de evaluación en el monitoreo, en comparación con sistemas que sólo admiten alarmas predeterminadas.

Herramientas específicas para el seguimiento de la vibración, capacidad de ajuste de niveles de alerta y evaluación de daño en tiempo y confiabilidad en la identificación de la falla. Establecer el nivel de información y detalles necesarios para la toma de decisiones. Viabilidad de tamaños de equipos y costos de implementación resultantes de la dificultad económica de tener alta confiabilidad en la detección de la falla. Flexibilidad de los requisitos de recursos humanos.

Referencias

[1] A. D. Cadena Viñan, "… equilibrio del laboratorio de turbo maquinaria hidráulica de la Facultad de Mecánica, mediante la implementación de un sistema de adquisición de datos por medio de …," 2023. espoch.edu.ec

[2] GF Contreras Contreras, B Medina Delgado, "Metodología de desarrollo de técnicas de agrupamiento de datos usando aprendizaje automático," *Tecnura*, vol. 2022. Scielo.org.co. scielo.org.co

[3] J. E. Meneses Flórez, F. A. Garavito, y E. Meneses, «Identificación de fallas en sistemas de bombeo mecánico de petróleo utilizando neurofuzzy», *RCTA*, vol. 1, n.º 37, pp. 10–22, feb. 2021. DOI: 10.24054/rcta.v1i37.973

[4] I. Zamudio Ramírez, "Diagnóstico de fallos electromecánicos en motores eléctricos mediante el análisis avanzado del flujo magnético y su implementación en hardware," 2023. upv.es

[5] B. A. Odar Chero, "Análisis y detección de fallas en motores eléctricos aplicando algoritmos de inteligencia artificial," 2023. udep.edu.pe

[6] M. Balbis Morejón, F.. García Reina, J. J. Cabello Eras, y V. Sousa Santos, «Caracterización energética del funcionamiento de un equipo de aire acondicionado en un local dado», *RCTA*, vol. 2, n.º 34, pp. 71–76, jul. 2019. DOI: 10.24054/rcta.v2i34.65

[7] J. L. Escobar Chávez, "Detección de fallas en cajas de engranajes utilizando el método de aprendizaje de máquinas Support Vector Machine (SVM)," 2022. espoch.edu.ec

[8] C. S. Feican Campoverde, "Detección y diagnóstico de severidad de fallos basado en observadores de estado aplicados al motor de inducción acoplado a una caja de engranajes con diente …," 2024. ups.edu.ec

[9] J. D. Chanco Pastrana, "Diseño de un sistema de control para la eficiente lubricación de cojinetes en la chumacera de carga-Central Hidroeléctrica Cashaucro," 2023. uncp.edu.pe

[10] FE Cortez Torres, YI Hernández Hernández, "Diagnóstico de motores mediante el análisis del espectro de armónicos de corriente en la entrada del motor," 2023, oldri. ues.edu.sv. ues.edu.sv

[11] J. A. Aldaz Calero, "Elaboración de un plan de mantenimiento basado en la condición para equipos críticos de la planta de pintura en la Empresa CIAUTO Cía. Ltda," 2023. espoch.edu.ec

[12] E. O. Omuya, G. O. Okeyo, and M. W. Kimwele, "Feature selection for classification using principal component analysis and information gain," *Expert Systems with Applications*, 2021. [HTML]

[13] EM García, CC López, JAM Rivas, "Evaluación de Algoritmos de Aprendizaje Supervisado usando Modelos Binarios para Clasificación de Análisis de Sentimiento: Evaluation of Supervised Learning …," *Tecnología Educativa Revista*, vol. 2024. terc. mx, 2024. terc.mx

[14] A. L. Gómez-Cuevas, "Selección de variables en máquinas de vectores soporte.," 2024. uma.es

[15] M. Saiz, "El nuevo perfil del administrador de recursos humanos en el contexto de la cuarta revolución industrial. Análisis histórico y multidisciplinario del trabajo para la

…," 2022. uca.edu.ar

[16] D. . Pérez García, F. . García Reina, y D. . Hernández Eduardo, «Disminución de las pérdidas de energía eléctrica por distribución usando una tecnología novedosa de mediciones y control para la toma de decisiones», *RCTA*, vol. 2, n.º 34, pp. 144–150, jul. 2019. DOI: 10.24054/rcta.v2i34.75

[17] J. Boscan Giraldo and D. M. Franco Ospina, "Análisis vibratorio a un banco de pruebas para la determinación de pérdidas mecánicas en un motor de combustión interna," 2020. utp.edu.co

[18] A. Diedrichs, T. Watteyne, G. Mercado, "Wireless wine: estimación de rendimiento y ubicación de sensores para la predicción de heladas en los viñedos," in Proc. de Investigadores en, 2020. hal.science

[19] AJC Pérez, ES Figueroa, AL Delis, "Evaluación de un algoritmo para detección de caídas basado en umbrales a partir de señales inerciales," *Revista Científica de …*, 2023. unirioja.es

[20] A. Huertas Mora, "Algoritmos de aprendizaje supervisado utilizando datos de monitoreo de condiciones: un estudio para el pronóstico de fallas en máquinas.," 2020. usta.edu.co

[21] J. A. . Gómez, H. . Yulady Jaramillo, y L. A. . Coronel Rojas, «Sistema para detección de fallos críticos en tuberías horizontales», *RCTA*, vol. 1, n.º 35, pp. 44–51, feb. 2020. DOI: 10.24054/rcta.v1i35.41

[22] C. L. Rendon Sarmiento, "Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para aumentar la disponibilidad de maquinaria y herramienta de la empresa industrias la cima del norte SAS," 2023. ufps.edu.co

[23] J. L. Baleta Ortega, C. A. Peña Forero, and J. R. Plazas Quitian, "Propuesta de plan de mantenimiento preventivo para una compañía metalmecánica en la Sabana de Bogotá," 2023. ecci.edu.co

[24] W. E. Niño Vega, "Diseño de un Plan de Mantenimiento Preventivo para los Equipos de Lavacol SAS," repository.unad.edu.co, . unad.edu.co

[25] P. Mendoza and S. Ricardo, "Sistema de gestión del mantenimiento preventivo de equipos del área de cultivo de la empresa CULTIMARINE SAC," 2021. usanpedro.edu.pe

[26] D. Z. C. E. Andrés, ""Implementación de un plan preventivo de mantenimiento en una empresa Cementera," 2024. upci.edu.pe

[27] R. Medina, "Tipos de mantenimiento en las unidades de medición de producción de pozos petroleros," *Revista Enfoques*, 2022. revistaenfoques.org

[28] F. A. Pérez Rondón, "Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial," 2021. usta.edu.co

[29] R. A. . García León, E. . Flórez Solano, y J. . Pedroza, «Diseño de un banco de pruebas para el análisis de vibraciones mecánicas», *RCTA*, vol. 1, n.º 33, pp. 24–35, ene. 2019. DOI: 10.24054/rcta.v1i33.82

[30] J. A. Abad Santana, "Plan de ampliación de servicios de monitoreo de condición como valor agregado a clientes estratégicos de Hivimar SA," 2021. uazuay.edu.ec

[31] J. H. Gordillo Chacón, "Propuesta de un modelo para evaluar la implementación de mantenimiento preventivo (caso estudio metodología 8 pasos)," 2021. ecci.edu.co

[32] P. Infante Gómez, "Modelo para el mantenimiento predictivo de segmentos especiales de vía," 2023. unican.es

[33] K. D. García-Cano and J. L. Robayo-Parga, "Evaluación ex post de la gestión de riesgos de proyectos con recursos del sistema general de regalías, caso de estudio mantenimiento mejoramiento y rehabilitación …," 2022. ucatolica.edu.co

[34] N. Y. Huaita Callo, "Ensayos en mantenimientos programados para el diagnóstico temprano de fallas en máquinas eléctricas rotativas de anillos rozantes de media tensión, Villa El …," 2023. untels.edu.pe

[35] J. D. Cabrera Meza, "Mantenimiento preventivo de las maquinas rotativas de los laboratorios de las UTS Barrancabermeja empleando análisis de vibraciones," 2020. uts.edu.co

[36] F. M. Neira Verastegui and G. A. Paredes Farfan, "Diseño de un sistema de clasificación multiclase para la detección de fallas mecánicas en máquinas rotativas empleando demodulación, autocorrelación y …," repositorioacademico.upc.edu.pe, . upc.edu.pe

[37] A. R. Jarrín Núñez, "Desarrollo de una red neuronal difusa para la detección de fallos en maquinaria rotativa en tiempo real," 2020. uta.edu.ec

[38] I. Zamudio Ramírez, "Diagnóstico de fallos electromecánicos en motores eléctricos mediante el análisis avanzado del flujo magnético y su implementación en hardware," 2023. upv.es

[39] RT Sainz, LMP Vallejo, CT Varela, "Redes bayesianas, herramienta para la detección de fallos en la gestión del mantenimiento," *RILCO DS: Revista de …*, 2023. unirioja.es

[40] P. Cifuentes-Fiallos, J. Romeu-Garbí, et al., "Dispositivo de bajo costo para el diagnóstico de fallos en rodamientos basado en la transformada de Hilbert-Huang," *DYNA*, 2023. 184.168.116.25

[41] J. S. Cardona García, "Técnicas para la detección de fallas en máquinas eléctricas rotativas de corriente alterna usando tecnologías de la industria 4.0.," 2023. unicatolica.edu.co

[42] O. G. C. LEMA and H. P. D. IZA, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA EL MONITOREO DE CONDICIÓN DE GENERADORES SINCRÓNICOS Y MOTORES TRIFÁSICOS DE …," academia.edu, . academia.edu

[43] J. E. Salas Robles, "Diagnóstico de averías asociadas a la detección de chispas en máquinas rotativas de corriente continua mediante el análisis avanzado de corrientes.," 2024. upv.es

[44] H. L. Medina García, "Diseño de un sistema de control automático para optimizar el equilibrio térmico de un horno industrial en la Empresa Productora Cerámica el Dorado SAC–Lima …," 2024. unjfsc.edu.pe

[45] Y. Lei, B. Yang, X. Jiang, F. Jia, N. Li, and A.K. Nandi, "Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 138, Elsevier, 2020. brunel.ac.uk