

SOFTWARE DE DIAGNÓSTICO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

INDUCTION MOTORS DIAGNOSIS SOFTWARE

Omar D. Gallo

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional San Francisco
odgallo@gmail.com

Diego M. Ferreyra

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional San Francisco
dferreyra@sanfrancisco.utn.edu.ar

Alberto J. Díaz

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional San Francisco
albertojavierdiaz@gmail.com

Resumen

El objetivo de este trabajo es establecer los lineamientos básicos a considerar para el desarrollo de un software que determine las causas probables de las anomalías de un motor de inducción. En el desarrollo, se establecen los fundamentos para el ingreso de determinados datos y su devolución, procesamiento, importación y exportación, todo lo cual se necesitará para atender las prestaciones previstas. En los resultados se muestran, como ejemplos, algunas vistas sugeridas de la interfaz con el usuario. En las conclusiones, se resumen algunos imprevistos y las proyecciones de la propuesta.

Palabras clave: Motores de inducción, diagnóstico de motores, software de diagnóstico.

Abstract

The aim of this work is to provide the basic guidelines to be considered for the development of a software to establish the possible causes of anomalies in induction motors. In the main body of the article, fundamentals are established for the input, output, processing, import and export of certain data, all of them aspects which should be addressed for the expected features to be implemented. In the Results section, suggested user interface views are shown as examples. In the Conclusions section, some contingencies are detailed, as well as the scope for this proposal.

Keywords: Induction motors, motor diagnosis, diagnosis software

Introducción

El motor de inducción es un producto confiable y de bajo precio que actualmente tiene amplia aplicación, por lo que la mayoría de los procesos de producción y servicios industriales o domiciliarios dependen del buen funcionamiento de los motores de inducción empleados en ellos, entendiéndose como tal el cumplimiento riguroso de las especificaciones establecidas por el fabricante (Gómez Suárez, 2020: 87- 143), a saber:

- condiciones de consumo de la red eléctrica y rendimiento
- velocidad, refrigeración, protección y temperatura
- desempeño mecánico, vibraciones y ruidos
- condiciones ambientales y de mantenimiento mecánico básico

Algunas de estas especificaciones están contenidas brevemente en la placa de características, que se encuentra claramente visible en el cuerpo del motor, y otras se obtienen de publicaciones del fabricante, como la correcta instalación, control y mantenimiento de los motores comercializados, a los fines de asegurar el desempeño garantizado durante un largo período de tiempo (WEG, 2021).

Al producirse la falla de un motor –porque detiene su funcionamiento imprevistamente o deja de cumplir con las especificaciones mencionadas debido a causas internas (propias del motor) o externas (propias de la máquina accionada por él)–, la determinación certera de ella y su rápida solución se convierten entonces en premisas fundamentales para evitar generalmente cuantiosas pérdidas económicas o de otra índole.

El objetivo de este trabajo es establecer los requisitos básicos a considerar para el desarrollo de un software que determine las causas probables de las anomalías de un motor de un inducción.

Existen numerosas aplicaciones y bibliografía publicada al respecto (Jabbar y Yeo, 2020 ; Klaasse et al., 2018) y aquí solo se pretende proponer alternativas a lo que ya se conoce sobre el tema.

Desarrollo

Los requisitos de uso de este software se integrarán en tres bloques, destinados a los siguientes propósitos:

- a) Determinación de anomalías del motor in situ:* consiste en cumplir los objetivos a través de ingresos básicos de datos, como observaciones generales y pocas o ninguna medición mecánica o eléctrica.
- b) Determinación de anomalías del motor en el laboratorio:* cumple con sus objetivos mediante el ingreso de mediciones mecánicas, eléctricas, observaciones detalladas y otros datos.
- c) Determinación de anomalías del motor en el taller de reparaciones:* incluye ingresos de observaciones detalladas, y de mediciones mecánicas y eléctricas especializadas.

El usuario podrá elegir la ejecución de los bloques que le interesan y recibirá al final, si así lo requiere, una lista de verificación del motor que incluya el diagnóstico de todos sus componentes y de algunas posibles causas de falla externas, atendiendo a las recomendaciones y normalizaciones relacionadas (IEC 60034-1, 2017; WEG, 2021).

Además, el software deberá cumplir con los siguientes requisitos básicos de operatividad que redundarán en favor de su ágil uso, a saber:

- Sencilla comunicación con el usuario y rápida carga de datos
- Entrega de diagnósticos preliminares
- Flexibilidad de operación y facilidad de lectura de resultados
- Posibilidad de almacenar, recuperar y exportar los datos

Estará dirigido a motores trifásicos y monofásicos de baja tensión y potencias inferiores a 450 kW.

El lenguaje de programación aplicado será Python (Python SF, 2021, Guagliano, 2019.), debido a que es sencillo, accesible en la red, adaptable a los requerimientos de este trabajo y modificable por cualquier programador que tenga un mediano conocimiento del mismo.

Cuando el bloque de uso elegido por el usuario lo requiera, el software incluirá las siguientes etapas:

1) Ingreso de datos de placa: el usuario ingresará y confirmará los datos completos de la placa de características del motor de inducción, trifásico o monofásico, o los provistos en el folleto del fabricante.

La máquina deberá satisfacer, con ciertas desviaciones razonables preestablecidas, las siguientes magnitudes:

- Tensión y conexión de alimentación: cuando no se cumplen el motor no entregará su potencia
- Corriente nominal de línea: es proporcional a la potencia entregada. Ejemplo de un ingreso sencillo en Python:

```
In= float(input (Corriente nominal (A)? :)) # In: corriente de placa
```

- Potencia y velocidad en el eje, a carga nominal: puede que estos valores no estén disponibles, lo cual lleva a necesitar valores de marcha en vacío para un diagnóstico preliminar válido.

2) Ingreso de datos de desempeño in situ: se fijarán observaciones o mediciones básicas realizadas por el usuario en el lugar de trabajo del motor, y se devolverá un diagnóstico muy general.

3) *Ingreso de datos de ensayos*: si se cumplen las condiciones de tensión y conexión y se hacen pruebas en laboratorio, el usuario ingresará y comprobará los siguientes valores:

- Resistencia óhmica de los devanados: en el caso de trifásicos, la diferencia importante de la resistencia de fases indica defectos. Cuando existen otros elementos resistivos, como termistores, PT100 o resistencias calefactoras, la medición y comparación de su resistencia con valores normales probará su integridad.
- Prueba de aislantes: los valores de resistencia de aislación o resultados de tensión aplicada que no satisfacen, estarán indicando defectos en las aislaciones del devanado (UNE EN 60034-18-31, 2013):
- Arranque: cuando son muy distintos a los especificados, el motor puede tener defectos en la confección del bobinado, mecánicos en el entrehierro o excepcionalmente en el rotor.
- Estados de carga: si todos los valores anteriores son correctos, generalmente deberían cumplirse las condiciones de corriente, potencia y velocidad. De no ser así, podrían manifestarse anomalías relacionadas con la potencia entregada, la velocidad o el rotor (Cabanas et al, 1998: 173-218).
- Vacío: si los resultados de los estados de carga son admisibles, es altamente probable que las condiciones de vacío también lo sean. Sin embargo, si no se dispone de los datos de ensayos antes indicados, el valor de la corriente de vacío puede identificar defectos de bobinado o entrehierro.
- Sobretemperatura: cuando el ensayo de estabilización térmica a carga nominal arroja una temperatura que excede la clase térmica del aislante, dicha temperatura puede ser causa de defectos en el bobinado o ventilación deficiente.

Aparte, la verificación de la resistencia de termistores o PT100 en caliente permitirá averiguar, además del buen estado de estas protecciones, las temperaturas en las zonas que ellas abarcan.

- Vibraciones y ruidos: cuando exceden los indicados por norma o por el fabricante, las razones suelen ser mayormente mecánicas, tales como daños en rodamientos, defectos en el entrehierro o en la refrigeración. No obstante, los valores inadmisibles de vibraciones y ruidos también suelen producirse por causas electromagnéticas, tales como incompatibilidades constructivas, entrehierro desperejo, circuito magnético saturado o presencia de armónicas indeseables (IEC 60034-14, 2003; IEC 60034-9, 2003; Cabanas et al, 1998: 131-166,)

4) *Ingreso de datos de inspecciones visuales*: se direccionarán e ingresarán las inspecciones visuales, a los fines de identificar las causas probables de anomalías, actuales o futuras, que no pueden determinarse por mediciones.

Entre otras, pueden citarse las siguientes comprobaciones:

- Estado del extremo del eje y la carcasa
- Estado de la caja de conexiones, los conductores de alimentación y terminales
- Estado del capuchón y del ventilador

Estos aspectos puramente mecánicos, que en algunos casos se relacionan con los resultados de las mediciones, pueden usarse para localizar o prever posibles roturas de eje, refrigeración deficiente, sobrecalentamientos localizados y fallas en la protección o la seguridad.

5) *Datos de la máquina accionada*: de ser posible se ingresarán y verificarán las características generales y eventualmente el régimen de trabajo de la máquina accionada por el motor.

Debido a que el motor de inducción adapta su funcionamiento a los requerimientos de la máquina que acciona, suele ser muy útil tener conocimiento del tipo y régimen de trabajo de ésta, como la cantidad de arranques horarios, los posibles bloqueos, las vibraciones, las características del ambiente donde se aloja o la regulación de velocidad. Estos datos pueden relacionarse con temperaturas excesivas, daños en los devanados o mecánicos.

6) *Datos históricos*: si están disponibles, el usuario ingresará datos históricos relacionados con la anomalía actual. Cuando un motor ha tenido una dilatada vida útil, el conocimiento sus aplicaciones y de las fallas que ha tenido resulta ser una herramienta de gran utilidad para determinar el origen de una anomalía actual o incluso prever una futura. Las modernas plantas industriales que aplican programas de mantenimiento preventivo suelen tener registros al respecto.

7) *Datos de reparaciones*: el usuario ingresará y comprobará las observaciones y mediciones especializadas de componentes mecánicos y arrollamientos realizadas en el taller de reparaciones.

8) *Procesamiento de datos*: consistirá en comparar los valores ingresados de placa o del fabricante, con los obtenidos en los ensayos, otras mediciones u observaciones. En caso de que los valores ingresados no figuren en placa (tales como rendimiento, vibraciones, sobretemperatura, ruidos, inspecciones visuales o registros históricos), el software realizará comparaciones o evaluaciones usando los datos de normalizaciones o recomendaciones, almacenados previamente. Un ejemplo simple de una comparación con Python es:

```
if Inn < In*1.10 and Inn > In*0.90: # Inn: corriente nominal de ensayo
    print ("Diagnóstico: normal. La corriente admisible varía entre", In*0.90, " A y", In*1.10,
          "A)
```

9) *Devolución, archivo y exportación de datos*: se mostrarán los resultados en pantalla, se almacenarán y eventualmente se exportarán, si así lo dispone el usuario.

Seguidamente se mostrarán algunos detalles de las respuestas de la aplicación pretendidas.

Resultados

Siguiendo el orden de los ítems del título anterior y a modo de ejemplos orientadores, se indicarán algunos de los resultados que se pretenden obtener de la interacción con este software, para el caso particular de un motor trifásico.

1) Ingreso de datos de placa:

Se indica con el signo > la devolución del software en pantalla y con >> lo que ingresa el operador.

```
> DATOS DE PLACA DEL MOTOR
> Tipo o tamaño del motor?:
225 M >>
> Potencia nominal (kW)? :
45 >>
> Tensión de alimentación (V)? :
380 >>
> Conexión del motor (E/T/EE/TT)? :           # E: estrella; T: triángulo
T >>                                           # EE: doble estrella; TT: doble triángulo
> Velocidad nominal (min-1)? :
2960 >>
> Corriente nominal (A)? :
86 >>
> Clase de aislación (B/F/H/C)? :
F >>
> Confirma los datos ingresados (s: sí; n: no)?
s >>                                           # Posibilidad de corrección de datos
> Ingresar valores de ensayos (s/n) :
s >>                                           # Ingresar datos de ensayos
```

2) Ingreso de datos de desempeño in situ y devolución de diagnósticos:

```
> Arranque(0: no arranca, 1: ruidos rodamientos, 2: no acelera...) :           # Anomalía de arranque
0 >>
Diagnóstico: Anormal. Ausencia o baja tensión de alimentación. Conexión incorrecta. Devanado con defectos. Bloqueo mecánico.
```

3) Ingreso de datos de ensayos y devolución de diagnósticos:

```
> DATOS DE ARROLLAMIENTO
> Si no dispone de datos indique 0 :           # Flexibilidad en el ingreso de datos
> Temperatura del ambiente al inicio del ensayo (°C)? :           # Temperatura de medición de resistencias
19.5 >>
> Resistencias por fase en frío (Ω)? :           # Valor al inicio del ensayo
0.106 >>
0.106 >>
0.107 >>
> Diagnóstico: Resistencia normal para este motor           # Valores para comparar
> Diagnóstico: Diferencia normal. La diferencia promedio es menor a 0.01 Ω           # Comparación con datos almacenados
> Sobretemperatura del arrollamiento (K)? :
> 75.6
> Diagnóstico: Normal. La sobretemperatura admisible clase F es de 100 K

> PROTECCIONES INTERNAS DEL MOTOR
> Resistencias de termistores (Ω)? :
80 >>
85 >>
83 >>
> Diagnóstico: Admisibles. Un valor promedio común es de 100 Ω           # Valores para comparar y calcular

> VALORES DE ARRANQUE
> Ingresar datos de ensayo de arranque (s/n)? :
s >>
> Tensión aplicada en el arranque (V)? :
380 >>
> Corriente de arranque (A)? :
586 >>
> Diagnóstico: Normal. La corriente declarada es de 593 A
> Potencia de entrada en el arranque (W)? :
0 >>
> Momento de arranque (Nm)? :           # En caso de no disponer de un valor
264 >>
> Diagnóstico: Normal. El momento declarado es de 266 Nm
```

Se realiza el mismo proceso para el ingreso de datos de estados de carga y vacío. Cuando es admisible o corresponde, el software devuelve previamente los valores normales, a modo de guía para la carga, o el diagnóstico inmediatamente después de ingresado el valor. Ejemplo de valor incorrecto:

```

> VALORES DE ENTRADA Y SALIDA A CARGA NOMINAL
> ...
> Velocidad a potencia nominal (100% de carga, min-1)? :
2930 >>
> Velocidad estable (s/n)? :
n >>
> Diagnóstico: Anormal. La velocidad declarada es 2960 min-1 e inestable
> Posibles causas: Sobrecarga. Anormalidades en el rotor o entrehierro.

> VALORES DE VIBRACIONES
> Velocidad eje axial (mm/s):
10 >>
> Aceleración eje axial (g)? :
0.98
> Diagnóstico: Anormales. El valor admisible es 2.2 mm/s y 0.3 g
> Posibles causas: Desalineación del rotor. Roce mecánico

```

4) Ingreso de datos de inspecciones visuales y devolución de diagnósticos:

```

> INSPECCIONES VISUALES
> Limpieza del ventilador de refrigeración (0 a 5. 0: muy limpio; 5: muy sucio) ? :
5 >>
> Diagnóstico: Anormal. El ventilador debe estar medianamente limpio para evitar desequilibrios
importantes y circulación deficiente del aire.

```

5) Datos de la máquina accionada: el programa deberá relacionar los diagnósticos obtenidos en los pasos anteriores, con las posibles anomalías propias de la máquina accionada.

```

> DATOS DE LA MÁQUINA ACCIONADA
> Ingresar datos de la máquina accionada (s / n)? :
s >>
> Tipo de máquina accionada
> 0 Bomba de agua
> 1 Cinta transportadora
> ...
> n Ventilador
> Indique el número de orden de la máquina accionada.
1>>
> Posibles anomalías de una cinta transportadora. cinta muy cargada, bloqueo mecánico, defecto en
caja reductora.

```

6) Datos históricos: los datos históricos fidedignos del motor pueden obtenerse cuando el usuario del motor utiliza programas de mantenimiento predictivo. Algunos de ellos pueden ser:

```

> DATOS HISTÓRICOS
> El motor estuvo en el depósito (s / n)? :
s >>
> Cuánto tiempo estuvo en el depósito (cantidad de meses)? :
24 >>
Posibles anomalías: rodamientos con defectos, bobinado con humedad.

```

Una vez concluida la carga de datos, el software podrá devolver una lista que incluya los datos ingresados, los admisibles y el diagnóstico. Sin correspondencia de causas y efectos, la siguiente es un ejemplo de lista:

```

> DATOS DE PLACA DEL MOTOR
> Marca      Código Tipo   kW     V      Conex  min-1  A      IP
> xxx       xxx    225M   45     380    T      2960   86     55
>
> DATOS INGRESADOS          INGRESO          ADMISIBLE          DIAGNÓSTICO
> Arranca                   No                Si                  --                Bloqueo mecánico externo
> Resistencia por fase      0.106            0.08-0.15         Ω                 Admisible
> Sobretemperatura bobinado 75.6             100                K                 Admisible
> Momento de arranque       264              266                Nm                 Admisible
> Velocidad nominal         2930             2950-2970         min-1             Inadmisible. Rotor con defectos
> Velocidad constante       No                Si                  --                Rotor con defectos

```

Conclusiones

Este trabajo abordó solamente algunos lineamientos básicos del proyecto. A medida que el software se diseñe, desarrolle y pruebe, seguramente surgirán otros múltiples requerimientos y diferentes resultados a los esperados, que se tratarán y/o salvarán en su momento. Se espera que esta propuesta sea una apropiada referencia para la elaboración de una aplicación que pueda ser utilizada con soltura y practicidad en la industria, el laboratorio o el taller de reparaciones; que pueda ser adaptada, modificada y actualizada, según las necesidades de cada usuario y que genere iniciativas de nuevos desarrollos en Python, aplicados a otro tipo de máquinas eléctricas.

Bibliografía

- Fernandez Cabanas et al (1998). *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Marcombo, Barcelona. Disponible en: [https://books.google.com/books?id=X3p4bZfoqgEC&printsec=frontcover&dq=Fernandez+Cabanas+et+al+\(1998\).+T%C3%A9cnicas+para+el+mantenimiento++y+diagn%C3%B3stico+de+m%C3%A1quinas+el%C3%A9ctricas+rotativas.&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi3_Zrdt7ryAhW9ppUCHVUzBMYQ6AEwAHoECAUQAQg](https://books.google.com/books?id=X3p4bZfoqgEC&printsec=frontcover&dq=Fernandez+Cabanas+et+al+(1998).+T%C3%A9cnicas+para+el+mantenimiento++y+diagn%C3%B3stico+de+m%C3%A1quinas+el%C3%A9ctricas+rotativas.&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi3_Zrdt7ryAhW9ppUCHVUzBMYQ6AEwAHoECAUQAQg)
- Gómez Suárez, I. (2020). *Mantenimiento electromecánico de motores eléctricos*. Paraninfo, Madrid. Pags 87-143. Disponible en: [https://books.google.com.ar/books?id=ypzODwAAQBAJ&pg=PR4&dq=G%C3%B3mez+Su%C3%A1rez,+I.+\(2020\).+Mantenimiento+electromec%C3%A1nico+de+motores+el%C3%A9ctricos&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjArpPxuLryAhVxq5UCHTxoDFUQ6AEwAHoECAgQAQg](https://books.google.com.ar/books?id=ypzODwAAQBAJ&pg=PR4&dq=G%C3%B3mez+Su%C3%A1rez,+I.+(2020).+Mantenimiento+electromec%C3%A1nico+de+motores+el%C3%A9ctricos&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjArpPxuLryAhVxq5UCHTxoDFUQ6AEwAHoECAgQAQg)
- Guagliano, C. (2019). *Programación en Python. Vol I*. Six Ediciones, Buenos Aires. Disponible en: [https://books.google.com.ar/books?id=Cd2sDwAAQBAJ&pg=PA3&dq=Guagliano,+C.+\(2019\).+Programaci%C3%B3n+en+Python.+Vol+I.&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjHzoHBubryAhXdrpUCHcRkCz4Q6AEwAHoECAsQAQg](https://books.google.com.ar/books?id=Cd2sDwAAQBAJ&pg=PA3&dq=Guagliano,+C.+(2019).+Programaci%C3%B3n+en+Python.+Vol+I.&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjHzoHBubryAhXdrpUCHcRkCz4Q6AEwAHoECAsQAQg)
- Jabbar, M.A.; Yeo, S.W. (2000). "A new architecture of design software for electric motors". *2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings. Navigating to a New Era (Cat. No.00TH8492)*, 2000, pp. 360-364 vol.1.. Disponible en: <http://portal.bibliotecas.utn.edu.ar/proxy/https://ieeexplore.ieee.org/document/849730>
- Klaasse, S.; Kwintenberg, G.; Barosan, I. (2018). "Development of a functional safety software layer for the control of an electric in-wheel motor based powertrain". *2018 IEEE International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C)*, 2018, pp. 144-147. Disponible en: <http://portal.bibliotecas.utn.edu.ar/proxy/https://ieeexplore.ieee.org/document/8432198>
- Norma IEC 60034-1 (2017). Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance
- Norma IEC 60034-9 (2003). Rotating Electrical Machines – Part 9: Noise limits
- Norma IEC 60034-14 (2003). Rotating Electrical Machines – Part 14: mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm an higher. Measurement, evaluation an limits of vibration.
- Norma UNE EN 60034-18-31, 2013. Máquinas Electricas rotativas. Parte 18-31. Evaluación funcional de los sistemas de aislamiento.
- Python Software Foundation. (2021). "Documentation". Disponible en: <<https://www.python.org/>>
- WEG. (2021). "Motor Modular IE2 110 kW 4P 280S/M 3F 200/346/400/690//230/400 V 50 Hz IC411 - TEFC – B. Curva de par y corriente x rotación". Brasil. Disponible en: <<https://www.weg.net/catalog/weg/ES/es/Motores-El%C3%A9ctricos/Motores-para-Aplicaci%C3%B3n-Industrial/Motor-Modular/Motor-Modular-%28Hierro-Gris%29/Motor-Modular-IE2-110-kW-4P-280S-M-3F-200-346-400-690-230-400-V-50-Hz-IC411---TEFC---B3T/p/12411261>>
- WEG (2021). "Motores electricos de inducción trifásicos de baja y alta tensión. Manual de instalación, operación y mantenimiento". Disponible en: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/haf/h33/WEG-motor-de-induccion-trifasico-de-alta-y-baja-tension-rotor-de-anillos-11171348-manual-espanol-dc.pdf>