

Prevención de las fallas de los motores trifásicos de inducción mediante una adecuada selección

Fecha de recepción: 12/03/2009

Fecha de aceptación: 20/06/2009

Osvaldo Guerrero Castro¹

Palabras clave

Motor eléctrico, fallas en motores eléctricos, selección de motores eléctricos, prevención de fallas.

Key words

Electrical motors, failures in electrical motors, electrical motors selections, prevention of faults.

Resumen

En este trabajo se expone los aspectos de mayor importancia a considerar en una adecuada selección de motores para prevenir las fallas, así como las repercusiones que puede tener tanto en la operación del equipo, como en la cantidad, frecuencia y tipo de falla de los motores trifásicos de inducción.

Primeramente, se expondrán los aspectos que prevalecen o se usan con mayor frecuencia en la selección de un motor trifásico de inducción y otros aspectos que se deben analizar con el cuidado

correspondiente y que no se consideran para prevenir las fallas de estos equipos.

No se pretende que este trabajo sea una guía en la selección de motores eléctricos, ya que existen otros aspectos a tomar en cuenta que no serán analizados, sin embargo, sirve de complemento, especialmente si se pretende prevenir las fallas de estos equipos desde su compra.

Abstract

This paper describes the most important aspects to consider in an appropriate selection to prevent failures and the impact in the operation of electrical motors, such as quantity, frequency and type of failures in three-phase induction motors.

First it will present issues that are prevalent or most commonly used in the selection of three-phase induction motors, and other aspects that must be analyzed with care and it is not considered, especially the prevention of failures of these machines.

It is not intended that this work is a guide in the selection of electric motors, because there are other aspects to take into account,

1. Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
Correo electrónico:(oguerreiro@itcr.ac.cr).

that will not be analyzed, however, if supplements, especially if objectives is to prevent these failures in the equipment from its purchase.

Introducción

Este artículo se basa en el estudio que se realiza en la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, proyecto inscrito en la Vicerrectoría de Investigación (VIE), el cual busca conocer las principales fallas de los motores trifásicos de inducción, cuyas potencias oscilan entre 2 hp y 50 hp.

La metodología consiste en llevar a cabo visitas, entrevistas, recopilar datos de fallas, conocer las instalaciones industriales donde operan estos equipos, entre otras actividades. Las empresas consultadas se ubican en la Gran Área Metropolitana (San José, Heredia, Alajuela y Cartago), sector que alberga un alto porcentaje de empresas industriales y que, en su gran mayoría, emplean los motores eléctricos como principal fuerza motriz. Los datos y observaciones incluidas en este documento son parte del producto aportado por este proyecto.

Otros datos se recogen con entrevistas, cuestionarios y análisis de información aportados por los principales talleres de reparación de motores eléctricos de Costa Rica.

Este artículo, se basa en los aspectos previos a la compra o adquisición del equipo y a la correcta aplicación (ubicación en el área de trabajo) del motor eléctrico, y se da un mayor énfasis a los aspectos que influyen directamente en la prevención de las fallas, se excluye las prácticas de mantenimiento preventivo y predictivo adecuadas para la conservación y correcto funcionamiento de este equipo una vez adquirido.

La principal propuesta radica en la concientización del personal técnico y administrativo responsable o encargado

de la adquisición, selección e instalación del equipo, es decir, que se cuente con un ambiente de trabajo adecuado a su diseño.

Como punto de partida, se busca conocer los criterios y aspectos que toman en cuenta los ingenieros responsables o partícipes de la compra de estos equipos. Para ello se recurre a una consulta, aplicada vía correo electrónico, a los ingenieros afiliados al CFIA (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos) pero, especialmente, a ingenieros eléctricos, mecánicos y de profesiones afines a la temática expuesta incorporados a los colegios respectivos: CITEC (Colegio de Ingenieros Tecnólogos) y CIEMI (Colegio de Ingenieros Eléctricos, Mecánicos e Industriales). Como resultado se obtiene que la mayoría de los ingenieros considera al menos tres aspectos para la selección y compra de estos equipos.

En la primera parte, se citan todos los aspectos que aportó el cuestionario aplicado a los ingenieros, algunos de los cuales pueden influir directamente en la prevención de fallas, y a los cuales se les da mayor atención, además, se citan otros aspectos que los ingenieros consideraron importantes incluir en la selección de los motores, pero que no necesariamente repercuten de forma directa en la prevención de las fallas, por lo que no serán analizados en este artículo.

Posteriormente, se describe cada una de las variables técnicas que se deben analizar en la selección y adquisición del equipo, así como el enfoque técnico de cada componente y su relación en la prevención de las fallas en estos equipos.

Desarrollo

El análisis de los datos aportados en el cuestionario aplicado a ingenieros incorporados a los colegios profesionales respectivos, se desglosa en el cuadro 1.

En la primera columna se menciona la variable o aspecto que se debe tomar

La principal propuesta radica en la concientización del personal técnico y administrativo responsable o encargado de la adquisición, selección e instalación del equipo, es decir, que se cuente con un ambiente de trabajo adecuado a su diseño.

Cuadro 1. Aspectos a considerar en la selección de los motores eléctricos trifásicos

Aspecto	Sí lo consideran	NO lo consideran
1. Potencia mecánica	98,6%	1,4%
2. Voltaje-frecuencia	90,0%	10,0%
3. Rpm	82,9%	17,1%
4. Ambiente de operación	32,9%	67,1%
5. Tipo de carcasa	30,0%	70,0%
6. Carcasa o marco	27,1%	72,9%
7. Eficiencia ^a	25,7%	74,3%
8. Uso de variador	21,4%	78,6%
9. Factor de servicio	21,4%	78,6%
10. Tipo de aislamiento	20,0%	80,0%
11. Tipo de carga ^a	18,6%	81,4%
12. Tipo de montaje	15,7%	84,3%
13. Tipo de servicio	11,4%	88,6%
14. Tipo de arranque ^a	11,4%	88,6%
15. Marca ^a	11,4%	88,6%
16. Corriente de línea ^a	11,4%	88,6%
17. Temperatura	10,0%	90,0%
18. Factor de potencia ^a	8,6%	91,4%
19. Costo ^a	5,7%	94,3%
20. Tipo-enfriamiento ^a	4,3%	95,7%
21. Conexiones ^a	4,3%	95,7%
22. Respaldo-técnico ^a	2,9%	97,1%
23. Tipo roles ^a	1,4%	98,6%
24. Ruido ^a	1,4%	98,6%
25. Altitud	1,4%	98,6%

^a Estos aspectos no se consideran relevantes en la prevención de fallas.

en cuenta en la selección; en la segunda columna, se presenta el porcentaje de los ingenieros que consideran importante incluir ese aspecto para la compra o adquisición del equipo; y en la tercera columna, se incluye el porcentaje de los ingenieros que no lo considera o podría no conocerlo.

2. En la publicación NEMA MG1, sección 10.38, establece qué aspectos deben estar grabados en la placa de identificación de todo motor eléctrico.

En el cuadro 1, se observa que los tres primeros aspectos predominan en la selección del motor:

- Potencia del motor (98.6%).
- Velocidad del Motor (90%).
- Voltaje y frecuencia (82,9%).

Se debe indicar que estos aspectos son vitales en la selección adecuada de los motores eléctricos, sin embargo, no pueden ser los únicos, especialmente si se pretende, a mediano y largo plazo, alcanzar la vida útil esperada de estos equipos para garantizar la máxima cantidad de horas de operación antes de su primera falla.

A continuación se hará una breve mención de los aspectos técnicos más relevantes para seleccionar los motores eléctricos, considerando otros elementos que pueden contribuir a la reducción de fallas en estos equipos.

Potencia del motor

Este dato puede indicarse tanto en unidades de Hp o kW, y son aspectos propios de la norma de fabricación (NEMA, IEC). Este valor representa la potencia mecánica de salida, dato que se indica en la placa del motor² y corresponde a un valor nominal [6].

La potencia de placa se define como la potencia nominal mecánica que debe o puede ser desarrollada por el motor eléctrico operando a voltaje y frecuencia nominal. Nominal quiere decir el valor máximo que puede alcanzar el motor “operando a condiciones nominales”, esto significa que, a menos que el voltaje y la frecuencia no sean los adecuados, pueden no darse condiciones mínimas que garanticen la potencia nominal. Además, es importante recalcar que la potencia en el eje debe ser exigida por la carga (ventilador, bomba, etc), de lo contrario,

solo entregaría lo que sea requerido o demandado.

La **potencia mecánica** desarrollada por el motor se obtiene del torque mecánico desarrollado (demandado por la carga) y de la velocidad mecánica de operación a la condición dada, según se observa en la Ecuación 1 [3].

$$P = \tau * \omega$$

Donde:

P: representa la potencia mecánica (W)

τ : torque en eje (N-m)

ω : velocidad mecánica (rad/s)

Para que el motor opere a potencia nominal, la carga demandada debe exigir al motor el torque nominal, y, además, que la velocidad mecánica sea la nominal, por ende, si estos factores no se cumplen, la potencia nominal no será alcanzada, sin embargo el motor puede operar con una capacidad menor o mayor de la indicada.

No obstante, la condición crítica ocurre cuando se supera los límites mínimos establecidos por esta máquina, lo que causa una condición de sobrecarga, la cual representa el 16% [5] de las fallas de estos motores.

Debe acotarse, además, que ésta variable está íntimamente ligada a la eficiencia del motor. En el estándar NEMA MG10-2001 (R2007) [2], se indica que “*La operación de un motor eléctrico fuera de las condiciones nominales de tensión y frecuencia puede disminuir la eficiencia y el factor de potencia, así como afectar negativamente a otras características de rendimiento*”, y a medida que el motor opere a plena carga o cercana a ella, presentará su mayor eficiencia (siempre que se respete el voltaje y la frecuencia nominal).

3. NEMA MG 10-2001, sección 1.3.2.

4. Refiérase a la Tabla 11, norma MG 1-2007.

Para contar con datos o variables técnicas que permitan conocer el porcentaje de carga del motor, se puede recurrir al estudio del modelo matemático de un motor de inducción [1], en el cual se tiende a emplear el valor del deslizamiento (s). En la Ecuación 2 nótese la estimación de la carga en el eje, siempre y cuando se opera en la curva de bajo deslizamiento, comprendida entre velocidad en vacío hasta velocidad a plena carga.

Ecuación 2

$$s(\%) = \frac{n_{sin} - n_{mec}}{n_{sin}} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

n_{sin} representa la velocidad sincrónica.

n_{mec} representa la velocidad mecánica.

Este valor representa la relación entre la velocidad sincrónica y velocidad mecánica. A partir de su valor, se puede estimar el porcentaje de carga al cual opera el motor.

En primer lugar, debe conocerse el valor de la velocidad sincrónica, cuyo dato se deduce a partir de la velocidad mecánica de placa (nominal).

Cuadro 2. Velocidad sincrónica, velocidad mecánica en función del número de polos

Polos	Velocidad mecánica*	Velocidad sincrónica
2	3500 rpm	3600 rpm
4	1750 rpm	1800 rpm
6	1100 rpm	1200 rpm

*La velocidad mecánica nominal varía de acuerdo con el diseño del rotor del motor, representado mediante el deslizamiento⁴.

Si un motor opera en condiciones nominales de voltaje y frecuencia, pero el valor de la velocidad mecánica (en una determinada condición) es menor o mayor que la nominal, se deduce que el torque que demanda por la carga no es nominal.

Se debe explicar que con el valor de la velocidad mecánica de placa y su respectiva sincrónica, se calcula el máximo deslizamiento al que debe operar el motor (respetando el voltaje y frecuencia nominal), y al comparar con el deslizamiento en vacío (mediante la velocidad mecánica en vacío) se puede obtener los porcentajes de carga desde cero hasta plena carga mediante interpolación (valores aproximados).

Se resume que, a pesar de conocer bien el concepto de potencia nominal, realmente este depende del torque o la fuerza de giro que la carga requiera (bomba, ventilador, compresor, etc), pero considerando la velocidad a la cual opera. Por ejemplo, cuando se hace uso de variadores, estos aspectos deben analizarse con detenimiento.

Si existen disparos frecuentes de las protecciones por sobrecarga térmica en el motor, y en especial si esta se debe a mayor corriente de operación (al descartar previamente otros aspectos que puedan provocar el disparo, como alta temperatura del medio, problemas de armónicos, fallo en la protección, etc.), se recomienda considerar si la sobrecarga que puede estar experimentando el motor se deba a modificaciones de alguna de estas variables.

Debe mencionarse que un 1,4% de los ingenieros no considera importante la potencia y argumenta que esto solo se puede conocer al someterlo a la carga. Este aspecto es una llamada de atención, y debe servir para reflexionar sobre el tipo de formación que se brinda a los futuros ingenieros, asimismo, debe ser considerado por las instituciones responsables de la capacitación de los profesionales afines a la temática.

Velocidad mecánica

Al igual que el dato anterior, este valor se indica en la placa, la cual representa también un valor nominal, y se expresa en revoluciones por minuto (rpm). La velocidad de rotación del eje de un motor es también conocida como velocidad mecánica. Este valor puede compararse con la velocidad real (si recibe voltaje y frecuencia nominal) sólo en caso de ser iguales (opera a velocidad nominal), y afirmar que el motor opera a carga nominal (plena carga), por lo que se considera un motor en estado normal de operación, de lo contrario, una velocidad real menor que la nominal puede provocar una sobrecarga y viceversa.

Si un motor opera en condiciones nominales de voltaje y frecuencia, pero el valor de la velocidad mecánica (en una determinada condición) es menor o mayor que la nominal, se deduce que el torque que demanda por la carga no es nominal.

Se puede afirmar que la velocidad mecánica y el torque de carga son inversos (a mayor carga en el eje, menor velocidad mecánica y viceversa), siempre y cuando se trate de un motor de inducción de potencia constante⁵, a diferencia de un motor de torque constante⁶ y un motor de torque variable, que presentan otro comportamiento [6].

Para una aplicación dada, al analizar la velocidad de placa del motor como aspecto de selección, debe recordarse que no será a esta velocidad que gire necesariamente el eje, pues deben cumplirse las tres condiciones anteriores (voltaje, frecuencia y carga nominal).

Al considerar este aspecto, se deben tener claros las condiciones en que operará el motor para satisfacer las necesidades, pues de acuerdo con el tipo de aplicación

5. Los motores de potencia constante, el torque y la velocidad son inversos.

6. Un motor de torque constante permite girar a diferente velocidad y desarrolla el mismo torque de carga, pero la potencia aumenta con la velocidad (sección 7.4 de la norma NEMA MG 1-2007).

analizado, el motor debe girar a la velocidad de placa (o valor fijo), pero es posible que el torque que exige la carga no sea constante ni nominal, lo que implicaría recurrir a métodos de control de velocidad tradicionales o emplear métodos modernos (variador de frecuencia), lo cual requeriría un mayor análisis para considerar si el diseño de la máquina permite flexibilidad de velocidades⁷.

El 82,9% de los ingenieros considera que la velocidad es un factor importante al seleccionar los motores eléctricos, sin embargo, el 17,1% restante considera que la velocidad no es tan importante y que puede corregirse con un variador de frecuencia.

Uno de los ingenieros entrevistados explicó, a modo de ejemplo, por qué la velocidad ya no es un factor determinante. Comentó que, al comprar un motor trifásico de inducción (3500 rpm) que debía manipular una bomba centrífuga, el producto trasegado presentó inconvenientes de derrames de producto (salpicaduras), por lo cual, fue necesario consultar al fabricante de la bomba.

Como recomendación del fabricante, se sugirió operarla a 1800 rpm. El ingeniero a cargo decidió emplear una solución moderna mediante el uso de un variador de frecuencia, configurado para que opere al 50% de la frecuencia nominal, y de esta forma solucionar el problema.

Aunque este dispositivo posee otras funciones, actualmente su operación se limita a una reducción fija de la velocidad mecánica.

Se evidencia una mala selección del motor, ya que se debió adquirir un motor de 4 polos para alcanzar el mismo resultado. O bien, se justifica el uso del variador si también se configura para la optimización de la energía eléctrica mediante la regulación del caudal trasegado de acuerdo a la

demanda, pero lamentablemente este no es el caso.

En resumen, no solamente se cometió el error de seleccionar una velocidad inadecuada, sino que el costo de la instalación del equipo se incrementó. Aunado a ello, el uso del variador accionado a un motor con un aislamiento convencional puede provocar, con el tiempo, el deterioro prematuro del aislamiento, ya que, al girar el motor a menor velocidad, se reduce su enfriamiento. Para evitar el daño, se recomienda la reducción de potencia mecánica en busca de un menor consumo de corriente que, a su vez, genera una menor temperatura del devanado.

Voltaje y frecuencia

También son valores nominales o datos de placa. Se emplean como unidad de medida los voltios y los herz, respectivamente. El voltaje representa el valor de la tensión que debe recibir el motor según el diseño del fabricante; la frecuencia representa la frecuencia eléctrica de la fuente de alimentación del voltaje aplicado.

Al seleccionar un motor, se debe tener claridad que, aunque la placa permite (para algunos motores) operar en cierto rango, p.e. 208 V- 230 V, la mejor condición para operación se obtiene al mayor voltaje, por lo tanto, debe obtenerse un motor que opere al mismo voltaje disponible en la red donde será alimentado el equipo.

Si no se contempla este aspecto, es posible que al motor siempre se le exija las mismas capacidades de nominales, pero sin garantizarle las condiciones adecuadas. Esto significa que, se debe exigir mayor corriente para manejar la misma carga, o la velocidad de operación será menor que la esperada.

El voltaje y la frecuencia se relacionan directamente con el flujo magnético de la máquina, como se observa en la Ecuación 3 [1].

7. La norma NEMA MG 1-2007, sección 12.1 establece operar mínimo a 30 hz y máximo 90. Existen motores especiales para operar con variador.

Ecuación 3

$$\text{flujo } (\phi) \approx \frac{\text{Voltaje}}{\text{frecuencia}}$$

Como se puede deducir de la ecuación anterior, el flujo magnético depende directamente del voltaje aplicado; si se reduce en el voltaje, se da una reducción en el flujo magnético o, por el contrario, pequeñas reducciones de la frecuencia (para voltaje constante) provocan aumentos de flujo magnético.

Se aclara que, aunque pequeños cambios en el voltaje o la frecuencia pueden producir un flujo mayor que el nominal, y aunque el motor desarrolle mayor torque, también experimenta una mayor temperatura y, por ende, un deterioro prematuro del aislamiento de los devanados. Aunque la red de alimentación debe operar con la mayor estabilidad posible, la realidad presenta algunas diferencias. Debería considerarse un motor con factor de servicio (factor de sobrecarga) para solventar los posibles incrementos de flujo magnético que, aunque no dañan el motor a corto plazo, éste sí experimenta un deterioro prematuro, lo cual fomenta las fallas de estos equipos (bajo aislamiento puede provocar un corto interno de bobina, un corto a tierra, un corto a masa, etc.).

El 84% considera que el voltaje es un factor importante en la selección del motor, pero el restante considera que esto se puede corregir con la instalación de otros equipos (más costo), aspecto que no favorece la optimización de los recursos, componente importante en ingeniería.

Estos tres aspectos son los factores o variables técnicas que comúnmente se consideran en la selección de un motor eléctrico.

Los otros aspectos no mencionados hasta el momento, incluídos en el Cuadro 1, y que inciden directamente sobre las fallas de motores, se expondrán a continuación (los que no repercutan sobre las fallas no se analizarán).

Cabe decir que solo el 40% de los ingenieros consultados, o menos, los consideran aspectos de importancia en la selección de los motores eléctricos.

Otros aspectos a considerar

A continuación se hará mención de otros aspectos que no siempre cuentan con la importancia necesaria al momento de la selección de un motor eléctrico, pero que inciden en la prevención de las fallas.

Gracias al estudio realizado se conocieron las principales fallas en los motores eléctricos y, a partir de esta información, se establecieron cuáles son las variables que repercuten o inciden de forma directa en las fallas de motores.

Los aspectos que se analizarán son: el ambiente de operación, el tipo de carcasa o envoltura, la carcasa (FRAME), el uso de variador de frecuencia, el factor de servicio, el tipo de aislamiento, el montaje, el tipo de servicio, la temperatura ambiente y la altitud.

Por lo observado en las industrias visitadas, los diez aspectos anteriores deben ser igual de importantes que la potencia, voltaje y velocidad en la selección del motor, aunque en el Cuadro 1 menos del 33% los considera relevantes. Esto no implica que todos los motores se seleccionen para condiciones críticas, pero por lo menos estos factores deben ser considerados concientemente antes de ser descartados del todo, o al menos se debe tener la noción de su influencia en la aplicación dada.

Ambiente de operación

El ambiente de operación contempla todos los aspectos del medio externo al cual se somete el motor eléctrico y las características del diseño del motor que lo protege, los cuales pueden tener un efecto desfavorable en la máquina si el diseño no es el adecuado para soportar las condiciones adversas a su operación.

Gracias al estudio realizado se conocieron las principales fallas en los motores eléctricos y, a partir de esta información, se establecieron cuáles son las variables que repercuten o inciden de forma directa en las fallas de motores.

En la selección del motor, se deben analizar, al menos, cuatro datos de placa del motor, los cuales están íntimamente ligados a las condiciones externas de trabajo, asimismo el fabricante debe indicar el funcionamiento del motor de acuerdo a su diseño.

Si estos aspectos no se analizan, o se exceden las condiciones de su diseño, es posible que se dé un daño prematuro a sus componentes. Si estas variables se desconocen, o no se controlan los límites máximos permitidos por el fabricante, se generan una causa directa de falla [5].

Del Cuadro 1, se desprende que el 32,9% estima importante considerar las condiciones externas a las cuales se somete el motor a la hora de seleccionar el equipo.

A continuación, se describen estos cuatro aspectos, a saber: temperatura de trabajo, tipo o clase de aislamiento, tipo o grado de encerramiento (protección al medio) y altura sobre nivel del mar.

La temperatura de trabajo (AMBIENT)

Es la temperatura ambiente máxima (°C) a la cual el motor puede desarrollar su potencia nominal sin peligro. Es la temperatura del aire circundante que entra en contacto con los componentes calientes del aparato [1].

En la norma NEMA MG 1-2007, sección 7.8, se indica que *“El valor de la temperatura ambiente máxima será de 40 °C, a menos que se especifique otra cosa”* [6].

Si la temperatura ambiente es mayor a la señalada, todo el sistema de enfriamiento se afecta. Esto se puede observar en el barniz que cubre el conductor eléctrico, el cual permite aislar los hilos de alambre de cada bobina, ya que las propiedades del mismo se deterioran a temperaturas superiores a su diseño. Refierase a la Norma GM 1-12.58.1, en donde se indica la corrección

del porcentaje de carga recomendado por cambios de temperatura.

Es por ello que si el motor se ubica en un ambiente de trabajo a temperaturas altas, por ejemplo, el cuarto de calderas, los hornos, etc., en donde se superen los 40 °C (motores estándar), se debe reducir la potencia de salida del motor para evitar daños prematuros en el sistema de aislamiento, es decir, se debe operar a una corriente menor a su diseño.

El deterioro prematuro del aislamiento puede contribuir, en las zonas de concentración de esfuerzos, a la formación de un cortocircuito entre las espiras del estator; esto se considera una de las principales causas de falla en los motores de inducción [5], debido a que en el arranque y parada de este tipo de máquinas se pueden generar sobretensiones transitorias que posteriormente generan mayor degradación. Además, cuando se da un cortocircuito en una espira o grupo de espiras, la corriente que circula debido a la fuerza electromotriz generada, sólo será limitada por la impedancia entre espiras vecinas, lo que puede ocasionar daños irreversibles [7]. Por esta razón, estas fallas incipientes deben ser detectadas a tiempo, para evitar una catástrofe mayor en los devanados de la máquina [9]. Estas observaciones se logran con la aplicación del análisis espectral del flujo axial de dispersión [8].

El solo hecho de operar a una temperatura mayor de lo nominal, no ocasiona, directamente, una falla eléctrica, ya que debe considerarse la temperatura final a la cual opera el devanado del motor y conocer si el tipo de aislamiento puede soportar ese valor, aunado a la temperatura que genera la corriente circulante que podría no ser la nominal. Esto puede producir el incremento correspondiente sin el deterioro de sus componentes, no obstante, esto es circunstancial, por lo tanto, en la medida de lo posible, siempre deben prevenirse las condiciones desfavorables para la máquina.

El aumento de temperatura producido en el motor debe ser compensado por:

1. La reducción de la carga y, por consiguiente, las pérdidas por calor del motor. Si el motor posee una temperatura nominal de 40 °C y este opera a 50 °C de temperatura ambiente, podría darse que el motor posea un factor de servicio de 1,15% y que trabaje a la carga nominal, o bien, si el factor de servicio es 1, se puede reducir la potencia nominal en un 90%.
2. Utilizar un motor de diseño especial.

Además, se puede mitigar el efecto por medio de rodamientos y la aplicación de grasas especiales que mejoren el sistema de aislamiento.

Para el caso 1, mencionado anteriormente, se trabajará apoyados en el factor de servicio o la reducción de la carga de los datos de placa.

Por otro lado, en el caso 2, las mejoras recaen en el diseño del motor, ya sea mediante el incremento del tamaño de la carcasa, de manera que permita mayor disipación del calor, o bien a partir de motores contra explosión que permitan trabajar a temperaturas mayores que los motores estándar.

En la norma NEMA MG 1 [6], se cita que *“La temperatura de los devanados puede*

*ser medida empleando el método de la Resistencia excepto, en motores de 15 ho o menores, para los cuales la temperatura puede ser medida mediante el método de termocupla”*⁸.

A pesar de que la temperatura externa o la del trabajo de la máquina se debe considerar como parte del ambiente de operación, el 10% de los encuestados lo considera como un aspecto que debe analizarse por separado, según se muestra en el cuadro 1.

La clase de aislamiento (INSULATION CLASS)

Se indica la clase de materiales de aislamiento utilizados en el devanado del estator. Son sustancias aislantes que cubren el cobre del conductor y que son sometidas a pruebas para determinar su duración al exponerlas a temperaturas predeterminadas.

En el cuadro 3, se detalla la clasificación del aislamiento empleado en los conductores. Al consultar a dos talleres de reparación de motores⁹ en Costa Rica, se indicó que las clases F y H son las de mayor aplicación en los motores modernos y de mayor uso en la fabricación y reparación de motores. Las clases A y B están presentes en la mayoría de motores fabricados antes de 1970, especialmente el tipo A, que se considera obsoleto, aunque es normal encontrar en la industria costarricense motores eléctricos con el aislamiento de Clase A todavía en operación.

La temperatura que se indica en la columna central del cuadro 3, corresponde a la suma de la temperatura ambiente (40 °C) más el incremento permitido (valor de diseño). Por ejemplo, la Clase F sólo permite un incremento de ciento quince grados centígrados (155°C-40°C=**115°C**), aunque la temperatura ambiente sea de 40°C o menor.

Cuadro 3. Tipos de aislamiento.

Tipo de aislamiento	temperatura máximo	Incremento Máximo
Clase A	105 °C	65 °C
Clase E	120 °C	80 °C
Clase B	130 °C	90 °C
Clase F	155 °C	115 °C
Clase H	180 °C	140 °C
Clase N	200 °C	160 °C

8. Para mayores detalle refiérase a la sección 9.19.1.

9. Estos talleres son ampliamente conocidos en las empresas industriales de Costa Rica.

Existe una regla aproximada, llamada regla de Montsinger, conocida como la ley de los 10 °C, lo cual significa que, por cada diez grados que se supere la temperatura de diseño de la clase de aislamiento, éste se degrada un 50%, y viceversa [3].

Por esta razón, es tan importante mantener la temperatura de los devanados o someter al barniz a temperaturas inferiores, pero, para iniciar la prevención, se debe considerar la temperatura del ambiente, ya que no solo podría exigir que el motor supere la temperatura de los 115 °C (para la clase F), sino que limita la capacidad de intercambio de calor con el medio, lo cual dificulta su enfriamiento.

Estos valores indican la máxima temperatura que pueden soportar los conductores del estator sin deteriorar el sistema de aislamiento. Como regla práctica de campo, la temperatura interior del motor (punto más caliente) se puede aproximar a la temperatura externa (carcasa) y sumar de 15 a 20 °C (dato aproximado empírico). Este valor permite conocer si el barniz del conductor de los devanados se encuentra expuesto a una temperatura mayor según su diseño. Para un dato más exacto, se aconseja emplear una termocupla en su interior, de manera que permita crear un registro o historial de su comportamiento.

Es importante indicar que el 20% de los ingenieros considera relevante conocer el tipo de aislamiento de la máquina que se va a comprar, lo cual refleja que el 80% desconoce la importancia de este aspecto, o bien, tiene poco interés en identificar los límites de operación de los equipos.

Tipo de protección al medio (ENCL)

Para los motores fabricados en la norma NEMA¹⁰, se definen:

- **ODP** (Open Drip Proof): motor abierto que posee aberturas para la ventilación, construidas de tal forma que el éxito de la operación no se interfiere con gotas de líquido a partículas sólidas que entren al recinto con un ángulo de 0 a 15 grados con la vertical [6].
- **TE** (Totally Enclosed): un motor totalmente cerrado que impide el libre intercambio de aire entre el interior y el exterior, pero no lo suficientemente cerrado para impedir que sea impermeable al aire [6]¹¹.
- **TEFC** (Totally Enclosed Fan Cooled): motor totalmente cerrado enfriado con ventilador, equipado para la refrigeración exterior, por medio de un ventilador integrado al motor, pero externo a sus partes¹².
- **TENV** (Totally Enclosed Non Ventilated): motor totalmente cerrado que no está equipado para refrigerarse por medios externos adjuntados a sus partes¹³.
- **TEFCG** (Totally Enclosed Fan-Cooled Guarded Motor): motor totalmente cerrado enfriado con ventilador, donde todas las aberturas poseen acceso directo al ventilador, sólo limitado por el tamaño, diseño estructural o por las parrillas, a fin de evitar el contacto accidental con el ventilador. Estas aberturas no permiten el paso de elementos mayores a ¾ de pulgada de diámetro¹⁴.

El diseño de la carcasa, representado mediante los códigos anteriores, permiten conocer el grado de protección al cual puede estar sometido el motor, por ejemplo, en condiciones muy húmedas

Es importante indicar que el 20% de los ingenieros considera relevante conocer el tipo de aislamiento de la máquina que se va a comprar, lo cual refleja que el 80% desconoce la importancia de este aspecto, o bien, tiene poco interés en identificar los límites de operación de los equipos.

10. En los motores fabricados con norma IEC (Europea) se emplean las siglas IP, para indicar el grado de protección al medio, entre mayor sea, más protegido está.
11. Refiérase a la norma NEMA MG 1-1.26.
12. Ver norma NEMA MG 1-1.26.2.
13. Norma NEMA MG 1-1.26.1.
14. Para mayores detalles MG 1-1.26.3.

(mucho lavado u otro) y contaminantes (polvo, virutas, desecho del proceso).

La clase de protección representa las características del envolvente, donde al menos se indique que:

- protege a las personas contra el peligro de tocar directamente partes móviles o que estén en contacto con tensiones de baja tensión, esto se denomina protección contra contactos directos;
- protege la máquina contra la entrada de objetos extraños, líquidos o sólidos desde el medio ambiente exterior;
- protege la máquina contra choques mecánicos, factor que se omite en la mayoría de los casos.

En algunas empresas en Costa Rica, especialmente el sector alimenticio [5], que por su proceso se requiere de limpieza y lavado constante, se aconseja emplear motores eléctricos washdown (lavables) que son una sub categoría de los TEFC, especialmente en zonas de proceso productivo que presenten condiciones de mucha humedad y contaminación.

El costo de un motor cerrado es mayor, sin embargo, si se considera como una inversión a mediano plazo, y se toma en cuenta el efecto de menor incidencia de falla por humedad o bajo aislamiento, es posible permitir la recuperación de la inversión.

Algunas empresas distribuidoras de marcas de motores reconocidas, para el caso de Costa Rica, sólo importan y distribuyen hoy en día motores cerrados (sellados), lo cual puede contribuir con la prevención forzada de fallas; sin embargo, se da la compra de sistemas o equipos que incluyen motores eléctricos, los cuales podrían no estar diseñados o seleccionados correctamente para las condiciones en las que operan en la industria nacional.

El 30% de los ingenieros define al motor cerrado como el tipo de carcasa que se debe seleccionar para proteger al equipo del medio en donde opera.

Altura sobre el nivel del mar

Sólo si la ubicación de la instalación del equipo es superior a los 1000 metros sobre el nivel del mar (msnm), se debe considerar este aspecto.

En el efecto de enfriamiento mediante la refrigeración, el aire está en función de su densidad. La presión atmosférica y la densidad del aire se reducen a altitudes mayores a los 1000 msnm, lo que provoca que la disipación de calor del motor se reduzca, y que, por ende, la máquina se caliente más. Como guía general, por cada 100 metros por encima de los 1000 metros, la temperatura aumenta¹⁵ 1% [3].

Para mantener el calentamiento del motor dentro de límites seguros a causa de altitudes mayores a los 1000 msnm, existen varias alternativas.

Si se cuenta con un motor estándar pueden aplicarse las siguientes medidas:

- Que opere a menor carga o emplee un factor de servicio de 1,15 o superior, lo que permite operar el motor cerca a 2700 msnm (9000 pies).
- Que el motor funcione a menor temperatura ambiente de diseño (40 °C), lo cual permite que el motor funcione a 2000 msnm cuando la temperatura ambiente máxima es 30 °C o a 3000 msnm cuando la temperatura no excede los 20 °C [6].

Para altitudes mayores, se recomienda emplear un motor diseñado para tal efecto (p.e. mejor ventilación).

Aunque la máquina opere con menos corriente, la temperatura puede ser igual o mayor de la esperada por la reducción en la eficiencia del sistema de ventilación,

15. Se asume que las demás variables de operación del motor se mantienen constantes (voltaje, corriente, etc.).

ocasionada por la reducción de la densidad del aire.

Aunque el factor de corrección (reducción) debe aplicarse directamente a la temperatura máxima (incremento) que soporta el tipo de aislamiento, con el tipo de aislamiento F por cada 500 metros por encima de los 1000 metros, se debe reducir en un 5% la temperatura de 115 °C registrada, al ser el máximo incremento que esta clase permite [3].

Es importante denotar que el 98,6% de los ingenieros no considera este factor importante para la selección de los motores o, peor aun, desconocen que tenga alguna relación.

Carcasa (FRAME)

Se define como el estándar en la designación del tamaño del armazón o carcasa, cuyas dimensiones pueden proporcionarse en milímetros o pulgadas, dependiendo de la norma (IEC, NEMA).

Aunque, en aspectos generales, este dato no posee mucha relación con la prevención de fallas, existe un pequeño detalle a considerar.

Los motores con sufijos TS en el número de FRAME, son motores de eje corto, para los cuales se recomienda acoplar la carga directamente al eje, ya que el diseño de rodamiento del lado de la carga es de bolas; aunque permite la carga radial y la axial, no se recomienda, pues los valores de carga axial son mínimos.

Para estos casos, la carga se debe acoplar directamente. Si por el tipo de aplicación la carga se acopla por medios indirectos (polea, cadena, etc), el rodamiento delantero del lado de la carga deberá soportar un mayor desgaste y esfuerzo axial, por lo que se deberá cambiar el diseño de rodamiento, de lo contrario no se alcanzará la vida útil esperada.

A modo de ejemplo, el FRAME 284 T, presenta un largo de eje de 11,7 cm (4,62")

a diferencia del FRAME 284 TS cuya dimensión del eje es de 8,25 cm (3,25").

El 27% de los ingenieros consultados considera el marco (FRAME) como aspecto importante en la selección del motor, especialmente por las dimensiones de los hoyos destinados al montaje del mismo, ya que cuando se reemplaza el motor se busca contar con el mismo FRAME que permita emplear la base de montaje anterior.

Tipo de montaje

Al igual que el caso previo, en el Frame se incluye el sufijo V o H, el cual indica la posición del motor; por ejemplo, en el caso del montaje vertical, el rodamiento opuesto a la carga debe soportar el mayor esfuerzo axial, en cambio, el rodamiento cercano a la carga, solo se diseña para mantener la alineación del eje y rotor con el estator.

En ambos casos estos aspectos están relacionados con las fallas mecánicas, producto de daños prematuros en rodamientos y no considerados en la selección del mismo.

Solo el 15,7% de los ingenieros lo considera como factor importante para la selección del motor.

Factor de servicio

Los factores de servicio más comunes son de 1,0 a 1,15. Un factor de servicio de 1,0, por lo general, no se indica en la placa del motor (solo cuando es diferente de uno), lo cual significa que no debe demandarse al motor mayor potencia que la nominal si se quiere evitar un daño por sobrecarga.

Cuando un motor de inducción funciona con un servicio de factor superior a 1,0, puede tener una eficiencia, un factor de potencia y una velocidad diferentes de los de carga nominal. El torque máximo, torque y corriente de arranque pueden no tener cambios. Aunque el motor opere continuamente, no se recomienda emplear permanentemente el factor de servicio, para evitar la menor esperanza de vida

en comparación con las condiciones nominales [6]¹⁶.

En las aplicaciones que requieren una sobrecarga de la capacidad, se recomienda utilizar un rango mayor de potencia, pero se debe tener cuidado de no exceder la temperatura máxima diseñada para la clase del sistema de aislamiento.

Con uno de 1,15 (o cualquiera mayor de 1,0), el motor puede trabajar hasta una potencia igual a la nominal multiplicada por el factor de servicio, sin que ocurran daños al sistema de aislamiento, siempre y cuando el exceso de carga no sea constante y la temperatura de los devanados no sea superada.

Sin embargo, debe tenerse presente que el funcionamiento continuo dentro del intervalo del factor de servicio hará que se reduzca la duración esperada del sistema de aislamiento, lo que causaría el deterioro prematuro de sus componentes.

Al citar el factor de servicio, se indica que el fabricante asegura que el tipo de aislamiento permite, por cierto tiempo, un exceso de carga de potencia según la placa y que este aumento de temperatura (por un corto tiempo) se consideró en su diseño, por lo que no debería provocar deterioro anormal.

Se recomienda usar el factor de servicio cuando el tipo de carga mecánica puede presentar intermitencias propias del proceso, lo cual genera esfuerzos diversos en la máquina, o bien cuando la asignación de la potencia mecánica se ha estimado de forma equivocada y, por ende, se permite este factor de error. También se usa para corregir problemas de altitud, de mayor temperatura externa, etc.

El factor de servicio presenta relación directa con el tipo de servicio. Si es de tipo continuo, el factor de servicio se puede aplicar permanentemente o de forma

continua con su respectivo incremento de corriente de línea, sin embargo, no se recomienda, al igual que el uso pesado o intermitente, el cual permite que el motor se someta a excesos de carga por periodos cortos. Este aspecto se explica a continuación.

El factor de servicio, es un componente que el 21,4% considera en la selección del motor eléctrico. Aunque se asume como un factor de seguridad (someterse a mayores cargas), no siempre se tiene claro realmente en qué se fundamenta el fabricante para garantizar o permitir mayor carga en el motor sin que se dañe.

Tipo de servicio

Este aspecto representa el ciclo de trabajo de un motor, en el que se describe el tiempo energizado/apagado del motor y las variaciones de carga con respecto al tiempo para cualquier aplicación.

En la definición de potencia nominal, se señala que “el valor de la potencia asignada que señala libremente el fabricante en función de la clase de servicio a que se destine la máquina sin que se produzcan calentamientos inadmisibles para la vida de los aislantes [6]”.

El ciclo de aplicaciones pueden dividirse en tres clasificaciones [6]:

- Continuo:

Es un servicio que requiere que la operación demandada sea con carga constante para un tiempo indefinido, cuando el motor opera las 24 horas.

Esta es la clasificación más común y representa aproximadamente el 90% de las aplicaciones de motor [6].

- Intermitente:

Es cuando la carga exige ciclos o intervalos que alternan con y sin carga, estos valores de tiempos de la máquina

16. Norma NEMA MG 1-14.37

detenida y en funcionamiento deben estar claramente definidos.

Al seleccionar un motor para estas aplicaciones, se debe confirmar que los caballos de fuerza coincidan con los requisitos en virtud de la condición de carga.

- Variación de carga:

En la norma MG 10-2001 (R2007), se establece que existen aplicaciones donde la carga presenta ciclos de operación que no indican periodicidad, como también, periodos donde la máquina está detenida.

Para este tipo de casos, pueden existir periodos de picos de carga que deben ser considerados mediante el establecimiento de una carga de operación.

La norma NEMA MG 10-2001 establece la cantidad de arranques por hora y el tiempo mínimo entre cada arranque según el número de polos y la potencia, según se muestra en el cuadro 4.

Cabe indicar que exceder estos límites representa un comportamiento de sobrecarga térmica, ya que el calor generado por los constantes arranques requiere de tiempos mínimos de enfriamiento, además de ellos, en el cuadro 4, también se incluye la inercia de la carga, factor determinante en el tiempo que tarde el motor en alcanzar su velocidad régimen.

Estos aspectos rara vez son considerados a la hora de operar esta máquina. Además se debe indicar que, si el motor requiere un trabajo mayor al indicado, debería solicitarse un motor especial para estas condiciones. También se puede pensar en el diseño, pero para ello se recomienda analizar la pérdida de eficiencia por operar con una carga menor.

Del cuadro anterior, se entiende claramente el concepto A y C, sin embargo, el punto B debe ampliarse con mayor detalle. Aunque el punto A establece el máximo número de arranques por hora, el punto B considera la inercia presente en el tipo de carga¹⁸, la cual se especifica mediante wk^2 .

A modo de ejemplo, si se utiliza un motor de 25 hp, 4 polos, con una wk^2 de 50, se necesita confirmar si la cantidad de arranque por hora indicada en la tabla es menor o mayor según la inercia.

De acuerdo con el cuadro A= 8,8 y B= 122. En el nuevo calculo de arranques por hora se obtiene:

$$\text{Arranque/hora} = \frac{122}{50} = 2,44$$

Esto significa que el valor de 8 arranques por hora no será el indicado, ya que, por la inercia del tipo de carga, se recomienda menos de 2 veces por hora.

Cuadro 4. Arranques e intervalos permitidos

HP	2 polos			4 polos		
	A	B	C	A	B	C
2	11,5	2,4	77	23	11	39
10	6,2	11	92	12,5	51	46
20	4,8	21	110	9,6	99	55
25	4,4	26	115	8,8	122	58
30	4,1	31	120	8,2	144	60
50	3,4	49	14	6,8	232	72

Donde:

A = máximo número de arranques por hora.

B = máximo producto de arranque por hora por tipo de carga (WK^2).¹⁷

C = tiempo en segundo mínimo entre cada arranque.

17. En la norma NEMA MG 10-2007 sección 1.8.

18. El valor correspondiente a cada carga se enlista en MG 1-1998, 12.54.

Aunque el valor de wk^2 se especifica en las normas NEMA MG 1, sección 12- 20, no siempre es tan fácil clasificar el tipo de carga, sin embargo, sí debe aclararse que el valor de A corresponde al máximo para ciertas condiciones, pero que si la inercia de la carga somete al motor a un mayor esfuerzo, debe reducirse aún más el número de arranques por hora.

Este aspecto sólo es considerado por el 11,4% de los ingenieros consultados.

Uso de variador de frecuencia

El desarrollo tecnológico de estos equipos y, especialmente, la gran variedad de ventajas que ofrecen, aunado a los menores precios disponibles en el mercado, hacen que los variadores de frecuencia cada vez sean un componente esencial en la operación de un motor eléctrico, más aún cuando se trata de manejo de velocidad.

A pesar de las bondades de estos dispositivos, se debe recalcar que hay un desconocimiento parcial o total sobre los efectos que tiene este elemento sobre el funcionamiento y desempeño del motor eléctrico, ya que existen condiciones que favorecen las causas de fallas.

Aunque existen motores con diseños especiales para variador, también los motores estándar¹⁹ pueden operar con estos equipos.

Las normas Nema MG 1, sección 12, establecen varias consideraciones. Para este caso, se hará especial mención del torque de carga.

- *Torque del motor durante la operación por debajo de la velocidad base:* para desarrollar el torque constante cuando el motor opera por debajo de su velocidad base, se debe mantener el flujo constante mediante la variación del voltaje de entrada, con el fin de que la relación volts/herz (Ecuación 3) se mantenga constante. Para frecuencias aproximadamente menores a 30 herz,

es posible que se requiera de mayores incrementos de voltaje, excepto en los casos donde la aplicación no requiere un alto torque, especialmente en sistemas de bajo costo (bajas potencias).

- *Torque variable a velocidades reducidas:* para motores de inducción que operan con aplicaciones que requieren ajustes de velocidad puede reducirse el enfriamiento como resultado de la reducción de ventilación (menor velocidad) y el efecto de las pérdidas adicionales introducidas por los armónicos de la fuente de alimentación.
- *Torque del motor durante la operación por encima de la velocidad base:* el voltaje aplicado al motor queda limitado al voltaje de placa, por ende, al darse incrementos de frecuencia existirán reducciones de flujo, ya que el voltaje se debe mantener constante. Por lo tanto el torque se reduce con la reducción de volts por herz.

Con motores de uso general son capaces de mantener el torque constante por encima de su velocidad base hasta los 90 herz.

Al trabajar con un variador de frecuencia, los principales problemas del uso de motores convencionales quedan claros:

- *Problemas a bajas velocidades:* por lo antes descrito, la autoventilación puede ser insuficiente con el régimen permanente a velocidades inferiores a la base, si se desea mantener el par nominal.

Para esta condición se recomienda reducir el torque de carga, instalar ventilación forzada exterior o bien sobredimensionar el motor. En la práctica, el factor térmico suele ser el que limita la potencia de utilización del motor.

- *Problemas a altas velocidades:* el fabricante del motor no suele

Aunque existen motores con diseños especiales para variador, también los motores estándar pueden operar con estos equipos.

19. Debe entenderse, cualquier motor eléctrico que no indique invertir duty (uso especial para variador).

En la norma NEMA MG 10-2007 se establece que existen muchos factores que se deben considerar a la hora de seleccionar un motor eléctrico, pues repercuten en la instalación, la operación y el mantenimiento.

garantizar el rango de velocidades por encima de la velocidad base, durante la que mantiene la potencia constante, aunque la autoventilación puede ser mayor, existe una caída muy rápida de la potencia a medida que aumenta la velocidad de giro, debido a la potencia mecánica absorbida por el propio ventilador. También las pérdidas magnéticas en el entrehierro aumentan notablemente con la frecuencia, además de los problemas por lubricación que pueden presentarse.

Se recomienda reducir la carga, sobrediseñar el motor y determinar si el tipo de grasa y rodamientos operan correctamente a altas velocidades.

- *Destrucción de bobinados:* Cuando el variador y el motor operan a distancias mayores a 15-20 metros entre ellos, se pueden generar transitorios de voltaje, lo que causa, con el tiempo la degradación de los bobinados.

Se recomienda el empleo de filtros de armónicos, sin embargo, estos protegen la red. Para el motor, debería emplearse un aislamiento especial o cable especial llamado inverter duty. Estos diseños se desarrollan para optimizar la operación del motor ante los cambios de frecuencia para lograr los ajustes en la velocidad de operación.

A pesar de los aspectos citados anteriormente y que deben ser considerados en la selección del motor que requiere operar con estos dispositivos, solo el 21,4% considera importante tomarlos en cuenta para seleccionar un motor eléctrico.

Conclusiones

En la norma NEMA MG 10-2007 se establece que existen muchos factores que se deben considerar a la hora de seleccionar un motor eléctrico, pues repercuten en la instalación, la operación y el mantenimiento. La norma dicta que al menos se debe considerar la fuente de energía, el rango de la potencia, la

velocidad, el ciclo de trabajo, el tipo de motor y encapsulado. Sin embargo, la mayoría de los ingenieros solo consideran tres aspectos, lo cual evidencia dos situaciones: desconocimiento técnico de las variables a incluir en una adecuada selección y el poco interés en el proceso de selección, especialmente si se relaciona con la prevención de las fallas.

No es suficiente identificar los datos de placa y conocer su definición, además se debe ampliar cada detalle, así como conocer las repercusiones que representa cada aspecto técnico involucrado en la selección del motor eléctrico.

Bibliografía

- [1] Chapman, S. (2000). *Máquinas eléctricas*. México D.F.: McGraw-Hill.
- [2] Energy Management Guide For Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel-Cage Polyphase Induction Motors, NEMA Standards Publication MG 10-2001 (R2007).
- [3] Frailes, J. (2008). *Máquinas Eléctricas*. España: Mc Graw Hill.
- [4] GE Industrial Systems. *AC Motor Selection and Application Guide*.
- [5] Gómez, L. y Guerrero, O. (2008). *Estudio de Fallas de Motores Trifásicos de Inducción*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- [6] Information Guide for General Purpose Industrial AC Small and Medium Squirrel-Cage Induction Motor Standards, NEMA Standards MG 1-2007.
- [7] Parra, D. y Ocampo, G. (2005). *Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatística*, Tesis de grado Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- [8] Valencia, D. y Muñoz, N. (2003). El flujo axial de dispersión como indicador del estado del aislamiento de los devanados de los motores de inducción. Monografía para optar al título de Ingeniero Electricista. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- [9] Villada, F., Valencia, D., Muñoz, N. (2004). Diagnóstico del aislamiento estatístico en motores de inducción mediante la medición del flujo axial de dispersión. *Revista Facultad de Ingeniería*. 32, 102-113.