

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

Ing. Osvaldo Guerrero Castro

Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica

oguerreiro@itcr.ac.cr

I. INTRODUCCIÓN

Este artículo está apoyado 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). Estudio que busca, conocer las principales fallas presentes en los motores trifásicos de inducción, cuyas potencias oscila entre 2 hp y 50 hp.

La metodología se apoya en la realización de visitas, entrevistas, recopilación de datos de fallas, conocer las instalaciones industriales donde operan estos equipos, entre otras actividades. Las empresas consultas se ubican en el Gran Área Metropolitana (San José, Heredia, Alajuela y Cartago), sector que alberga un alto porcentaje de las empresas industriales y que en su gran mayoría emplean a 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 recaban con entrevistas, cuestionarios y análisis de información aportado por los principales talleres de reparación de motores eléctricos de Costa Rica.

El desarrollo de este artículo, se fundamenta 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, con mayor énfasis en 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 idea principal que se expone, radica en la concientización del personal técnico y administrativo responsable o encargado de la adquisición, selección e instalación del equipo (contar con un ambiente de trabajo adecuado a su diseño).

Como punto de partida, se busca conocer, los criterios y aspectos que prevalecen en 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 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, contemplan al menos tres aspectos en la selección y compras de estos equipos.

Primeramente, se enuncia todos los aspectos que desglose el cuestionario aplicado a los ingenieros, algunos de ellos pueden influir directamente en la prevención de fallas, y son a los cuales se les da mayor interés, pero además se citan otros aspectos que los ingenieros consideraron importantes incluir en la selección de los motores, pero que no necesariamente repercuten directamente en la prevención de las fallas, los cuales no serán analizados en este artículo.

Posteriormente se describe cada uno de las variables técnicas a considerar 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.

II. DESARROLLO

En el análisis de los datos, aportados en el cuestionario aplicado a los ingenieros incorporados a los colegios profesionales respetivos, se desglosa en la tabla N1, 22 aspectos, a considerar.

Como primera columna se menciona la variable o aspecto que se debe considerar en la selección, en la segunda columna, el porcentaje de los ingenieros que consideran importante incluir ese aspecto para la compra o adquisición del equipo, y en la tercera columna, representa el porcentaje de los ingenieros que no lo considera o podría no conocerlo.

TABLA N1

ASPECTOS A CONSIDERAR EN LA SELECCIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS

Aspecto	SI 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.

A partir de la Tabla N1, se denota que los tres primeros aspectos, predomina 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.

Se hará breve mención de los aspectos técnicos más relevantes para la selección de los motores eléctricos, considerando otros elementos que pueden contribuir en la reducción de fallas en estos equipos.

A. Potencia del motor

Este dato puede indicarse tanto en unidades de Hp o kW, aspectos propios a la norma de fabricación (NEMA, IEC). Este valor, representa la potencia mecánica de salida, dato que se indica en la placa del motor¹ y corresponde un valor nominal [1].

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. El significado de nominal, representa el valor máximo que puede alcanzar el motor “operando a condiciones nominales”, lo cual significa que, al menos que el voltaje y frecuencia no sean los adecuados, puede no darse condiciones mínimas que garanticen la potencia nominal. Además debe recalcar que la potencia en el eje debe ser exigida por la carga (ventilador, bomba, etc), de lo contrario solo entrega lo que sea requerido o demandado.

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

$$P = \tau * \omega \quad (1) \quad \text{N1 [3].}$$

¹ En la publicación NEMA MG1, sección 10.38, establece que aspectos deben estar grabados en la placa de identificación de todo motor eléctrico.

Donde:

P: representa la potencia mecánica (W)

τ : torque en eje (N-m)

ω : velocidad mecánica (rad/s)

Para lograr que el motor opere a potencia nominal, implica por lo tanto, que la carga demandada le exige al motor el torque nominal, pero además que la velocidad mecánica sea la nominal, por ende, si estos factores no se cumplen, la potencia nominal no será alcanzada. Pero por el contrario, el motor puede estar operando a menor o mayor capacidad que la indicada.

Sin embargo, la condición crítica ocurre, cuando se supera los límites mínimos establecidos por esta máquina, logrando la condición de sobrecarga, la cual representa el 16% [5] de las fallas de estos motores.

Debe acotarse además que, ésta variable está íntimamente ligada con la eficiencia del motor, en el estándar NEMA MG10-2001 (R2007) [2], cita, “ *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*”², y a medida que el motor opere a plena carga o cercana a ella, presentará su mayor eficiencia (siempre respetando el voltaje y frecuencia nominal).

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 [3], en el cual se tiende a emplear el valor del deslizamiento (s), ver Ecuación (2) en 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.

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

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.

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

TABLA N2
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 dependiendo del diseño del rotor del motor, representado mediante el deslizamiento³.

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 (usando 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 emplea uso de variadores, estos aspectos deben ser bien analizados.

Si existen disparos frecuentes de las protecciones por sobrecarga térmica en el motor y en especial si está de debe a mayor corriente de operación (descartando 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. Aspecto que llama la atención, y debe servir para reflexionar en el tipo formación que se brinda a los futuros ingenieros, y ser considerado por las instituciones responsables de la capacitación de los profesionales afines a la temática.

B. Velocidad mecánica

² NEMA MG 10-2001, sección 1.3.2

³ Refiérase a la Tabla 11, norma MG 1-2007

Al igual que el dato anterior, este valor se indica en la placa, la cual representa también un valor nominal, se expresa en revoluciones por minuto (rpm). Se define como la velocidad de rotación del eje de un motor, también conocida con velocidad mecánica. Este valor permite compararse con la velocidad real (si recibe voltaje y frecuencia nominal), solo en caso de ser iguales (opera a velocidad nominal), y afirmar que el motor opera a carga nominal (plena carga), considerando un motor en estado normal de operación, de lo contrario, un velocidad real menor que la nominal, puede significar 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 demandado 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 constante⁴, a diferencia de un motor de torque constante⁵ y un motor de torque variable, que presentan otro comportamiento [1].

Para una aplicación dada, al analizar la velocidad de placa del motor, como aspecto de selección, debe recalcar, que este valor no será necesariamente a la que gire el eje, para ello, deben darse las tres condiciones anteriores (voltaje, frecuencia y carga nominal).

En la consideración de este aspecto, se debe estar claro en las condiciones que operará el motor para satisfacer las necesidades, si para el tipo de aplicación analizado, es indispensable que el motor gire a la velocidad de placa (o valor fijo), pero es posible que el torque demandado por la carga no sea constante ni nominal, necesariamente implicaría recurrir métodos de control de velocidad tradicionales o se emplear métodos modernos (variador de frecuencia), lo cual significa que se requiere un análisis mayor, para considerar si el diseño de la máquina, permite flexibilidad de velocidad⁶.

El 82.9% de los ingenieros considera que la velocidad es un factor importante en la selección de 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, amplió a modo de ejemplo, por qué la velocidad ya no es un factor determinante. Comentó que, para la compra de un motor trifásico de inducción (3500 rpm), que debía manipular una bomba centrífuga, el tipo de producto trasegado, presentó inconvenientes de derrames de producto (salpiques). Por ello, fue necesario consultar al fabricante de la bomba.

Como recomendación del fabricante de la bomba, 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 denota una mala selección del motor, ya que, lo que debió hacerse fue adquirir un motor de 4 polos, logrando 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, 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, y aunado a ello, si el uso del variador accionada a un motor con un aislamiento convencional, puede provocar con el tiempo, el deterioro prematuro del aislamiento, ya que, al girar el motor a la menor velocidad, se reduce su enfriamiento, y 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.

C. Voltaje y frecuencia

También son valores nominales o datos de placa, se emplea como unidad de medida Voltios y herz respectivamente. El voltaje representa el valor de la tensión que debe recibir el motor según el diseño del fabricante y 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 un rango, p.e. 208 V- 230 V, la mejor condición de operación se obtiene al mayor voltaje, por lo tanto, debe obtenerse un motor que opera al mismo voltaje disponible en la red donde será alimentado el equipo.

Si este aspecto no es considerado, es posible, que al motor siempre se le exige las mismas capacidades de nominales, aunque, no se le están garantizando las condiciones adecuadas. Esto implica que, puede exigirse mayor corriente para manejar la misma carga o la velocidad de operación será menor que la esperada.

⁴ Los motores de potencia constante, el torque y la velocidad son inversos.

⁵ Un motor de torque constante, permite girar a diferentes velocidades, desarrollando el mismo torque de carga, pero la potencia aumenta con la velocidad, sección 7.4 de la norma NEMA MG 1-2007.

⁶ 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.

Se agrega además que, el voltaje y al frecuencia se relacionan directamente con el flujo magnético de la máquina, como se observa en la Ecuación 3 [3].

$$\text{flujo}(\phi) \approx \frac{\text{Voltaje}}{\text{frecuencia}} \quad (3)$$

Como se puede deducir de la ecuación anterior, el flujo magnético es directamente dependiente del voltaje aplicado, reducción en el voltaje, implica una reducción en el flujo magnético, o por el contrario, pequeños reducciones de la frecuencia (para voltaje constante), provoca aumentos de flujo magnético.

Se amplía que, aunque pequeños cambios en el voltaje o la frecuencia, pueden repercutir en una flujo mayor que el nominal y aunque el motor desarrolla mayor torque, también experimenta una mayor temperatura y por ende, una deterioro prematura del aislamiento de los devanados. Aunque, la red de alimentación, debe de operar con la mayor estabilidad posible, la realidad presenta algunas diferencias, estos cambios, debería de 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, si experimenta un deterioro prematuro, lo cual fomenta las fallas de estos equipos (bajo aislamiento puede provocar, corto interno de bobina, corto a tierra, corto a masa, etc).

El 84% considera que el voltaje es un factor importante en la selección del motor, 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 comúnmente son los factores o variables técnicas que se consideran en la selección de un motor eléctrico.

Los otros aspectos no mencionados hasta el momento mostrados en la Tabla N1 y que inciden directamente sobre las fallas de motores, se desarrollaran a continuación (los que no repercutan sobre las fallas no se analizaran).

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

D. 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 con la prevención de las fallas.

A partir del estudio realizado y las fallas observadas, al conocer las principales fallas en los motores eléctricos, se consideran los siguientes variables que repercuten o inciden directamente como causa probable en las fallas de motores.

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

A continuación se explica por qué estos item deben ser igual de importantes, y como se observó en la Tabla N1 no mayor del 33% los considera relevantes.

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. No implica, que por ello, que todos los motores se seleccionen para las condiciones críticas, pero si, al menos, ser considerados concientemente antes de ser descartados del todo, o por lo menos tener la noción de la influencia para la aplicación dada.

E. 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 sino el diseño no es el adecuado para soportar las condiciones adversas a su operación.

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, y el fabricante permite el funcionamiento del motor de acuerdo a su diseño.

Si estos aspectos no se analizan, o se exceden las condiciones de su diseño, puede permitir un daño prematuro a sus componentes. O bien, estas variables pueden desconocerse, o no controlarse los límites máximos permitidos por el fabricante, generan una causa directa de falla [5].

De la tabla 1, se desprende que el 32.9% considera importante considerar las condiciones externas a las cuales se somete el motor a la hora de seleccionar el equipo.

A continuación, se describe estos cuatro aspectos, como lo son, temperatura de trabajo, tipo o clase de aislamiento, tipo o grado de encerramiento (protección al medio) y altura sobre nivel de mar.

1. La temperatura de trabajo (AMBIENT)

Es la temperatura ambiente máxima (°C) a la cual el motor puede desarrollar su potencia nominal sin peligro.

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 cita *“El valor de la temperatura ambiente máxima será de 40° C, a menos que se especifique otra cosa”* [1].

Si la temperatura ambiente es mayor que la señalada, todo el sistema de enfriamiento se afecta, evidenciado 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 con temperaturas superiores a su diseño. Refiérase a la Norma MG 1-12.58.1, que indica la corrección del porcentaje de carga recomendado por cambios de temperatura.

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

El deterioro prematuro del aislamiento puede contribuir en las zonas de concentración de esfuerzos, a la formación de cortocircuito entre las espiras del estator; considerada como 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, y que posteriormente generan mayor degradación del mismo. Además cuando se cortocircuita una espira o grupo de espiras la corriente que circula debido a la fuerza electromotriz generada sólo será limitada por la impedancia de ellas y contribuirá con el cortocircuito paulatino entre espiras vecinas que pueden ocasionar daños irreversibles [9]. Por esta razón, estas fallas incipientes deben ser detectadas a tiempo, para evitar una catástrofe mayor en los devanados de la máquina [7]. 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 la falla eléctrica, ya que, debe considerarse la temperatura final a la cual opera devanado del motor, y conocer si el tipo de aislamiento puede soportar ese valor, aunado con la temperatura que genera la corriente circulante que podría no ser la nominal, lo cual puede darse el incremento correspondiente sin el deterioro de sus componentes, claro está, esto es circunstancial y en la medida de lo posible, siempre debe prevenirse estas 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 en 50 ° C de temperatura ambiente, podría darse que el motor posea un factor de servicio de 1.15%, y trabajar a la carga nominal, o bien, si el factor de servicio es 1, reducir la potencia nominal en un 90%.

2. Utilizar un motor de diseño especial.

Además se puede mitigar el efecto, empleando rodamientos y grasas especiales que mejoren el sistema de aislamiento.

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

A diferencia del caso 2, donde las mejoras recaen en el diseño del motor, ya sea, incrementando el 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 [1], 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”*⁷.

A pesar de que la temperatura externa o de la 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 la tabla 1.

2. 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 la tabla 3, se detalla la clasificación del aislamiento empleado en los conductores. Consultando a dos talleres de reparación de motores⁸ en Costa Rica, indicaron que las clases F y H son las de mayor aplicación en los motores modernos y de mayor uso empleados en la reparación de motores, tanto en su fabricación, como reparación. Las clases A y B están presentes en su mayoría para los motores fabricados antes de 1970, y especialmente el tipo A, que se considera obsoleto, aunque, es normal encontrar en la industria costarricense motores eléctricos con la Clase A de aislamiento que todavía estén en operación.

⁷ Para mayores detalle refiérase a la sección 9.19.1

⁸ Estos talleres son ampliamente conocidos en las empresas industriales de Costa Rica.

TABLA N3
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

La temperatura que se indica en la columna central de la tabla N2, corresponde a la suma de la temperatura ambiente (40 °C) más el incremento permitido (valor de diseño). Por el ejemplo, Clase F, solo permite un incremento de ciento quince grados centígrados ($155^{\circ}\text{C}-40^{\circ}\text{C}=115^{\circ}\text{C}$), aunque la temperatura ambiente sea de 40°C o menor.

Existe una regla aproximada, llamada, regla de Montsinger, conocida como la ley de los 10 °C, lo que 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 [4].

Por esta razón, es tan importante mantener la temperatura de los devanados o someter al barniz a temperaturas inferiores, y para iniciar la prevención, se debe considerar evidentemente 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, dificultando su enfriamiento.

Estos valores indican la máxima temperatura que puede 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 con la temperatura externa (carcasa) y sumando de 15-20° 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 tal manera que permite un registro o historial de su comportamiento.

Es importante denotar que el 20% de los ingenieros considera relevante conocer el tipo de aislamiento de la máquina 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.

3. Tipo de protección al medio (ENCL)

Para los motores fabricados en la norma NEMA⁹, se definen:

- **ODP** (Open Drip Proof): Un 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 [1].
- **TE** (totally enclosed): Es un motor totalmente cerrado para impedir el libre intercambio de aire entre el interior y el exterior, pero no lo suficientemente cerrado para impedir que sea impermeable al aire [1]¹⁰.
- **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 las partes del motor¹¹.
- **TENV** (Totally Enclosed Non Ventilated): un motor totalmente cerrado que no está equipado para refrigerarse por medios externos adjuntado a sus partes¹².
- **TEFCCG** (totally enclosed fan-cooled guarded motor): Motor totalmente cerrado enfriado con ventilador, donde todas las aberturas poseen acceso directo al ventilador, solo 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 $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro¹³.

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, para condiciones muy húmedas (mucho lavado u otro) y contaminantes (polvo, virutas, desecho del proceso).

La clase de protección representa las características del envoltorio, donde al menos, se pueda o indica que:

- Proteger a las personas contra peligro de tocar directamente partes móviles o que estén en contacto con tensiones de baja tensión, denominado protección contra contactos directos.

⁹ Los motores fabricados con norma IEC (Europea), se emplea las siglas IP, para indicar el grado de protección al medio, entre mayor sea, más protegido está.

¹⁰ Refiérase a la norma NEMA MG 1-1.26.

¹¹ Ver norma NEMA MG 1-1.26.2.

¹² Norma NEMA MG 1-1.26.1

¹³ Para mayores detalles MG 1-1.26.3

- Proteger a la máquina contra la entrada de objetos extraños, líquidos o sólidos desde el medio ambiente exterior.
- Proteger la máquina contra choques mecánicos, aspecto que se omite en la mayoría de los casos.

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

El costo de un motor cerrado, es mayor, sin embargo, si se considera como inversión de mediano plazo, y considerando 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, solo importan y distribuyen actualmente motores cerrados (sellados), aspecto que puede contribuir con la prevención forzada de fallas, sin embargo, existen 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 lo define como el tipo de carcasa que se debe seleccionar del motor para prevenir la protección del medio de operación del equipo.

4. Altura sobre el nivel del mar

Solo 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.

El efecto del enfriamiento mediante la refrigeración el aire está en función de su densidad. La presión atmosférica y la densidad del aire se reducen con altitudes mayores a los 1000 msnm, provocando que la disipación de calor del motor se reduzca, por ende, la máquina opera más caliente. Como una guía general, por cada 100 metros por encima de los 1000 metros, la temperatura aumenta¹⁴ 1% [6].

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

Si se cuenta con un motor estándar puede darse los siguientes casos:

- Operar a menor carga o emplear un factor de servicio de 1.15 o superior, lo que permite operar el motor cercano a los 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 de 20° C [6].

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

Aunque la máquina opere a una menor corriente, la temperatura puede ser igual o mayor de la esperada, por la reducción en la eficiencia del sistema de ventilación, ocasionado por la reducción de la densidad del aire.

Aunque realmente, el factor de corrección (reducción) debe aplicarse directamente a la temperatura máxima (incremento) que soporta el tipo de aislamiento. La clase 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 como el máximo incremento que esta clase permite [4].

Es importante denotar que el 98.6% de los ingenieros no considera este factor como importante en la selección de los motores, o peor aun, desconocen que tenga alguna relación.

F. 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.

Se comentará sobre aquellos aspectos contemplados en el Frame, que si no se consideran en la selección del motor eléctrico, puede generar una causa de falla mecánica.

Para motores con sufijos TS en el número de FRAME, representa motores de eje corto, para el cual, se recomienda acoplar la carga directamente al eje, ya que, el diseño del rodamiento del lado de la carga es de bolas, aunque permite carga radial y axial, no es lo recomendado, 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 mayor desgaste, y esfuerzo axial, por lo tanto, se deberá cambiar el diseño de rodamiento, de lo contrario no se alcanzará la vida útil esperada.

¹⁴ Se asume que las demás variables de operación del motor se mantienen constantes (voltaje, corriente, etc)

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, y cuando se reemplaza el motor, se busca contar con el mismo FRAME que permita emplear la base de montaje anterior.

G. Tipo de montaje.

Al igual que el caso anterior, en el Frame, se establece el sufijo V o H, el cual indica la posición del motor, por ejemplo, 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.

Para los casos anteriores, ambos son, aspectos 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.

H. 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), significa que no debe demandarse al motor mayor potencia que la nominal, si se quiere evitar daño por sobrecarga.

Cuando un motor de inducción funciona con un servicio de factor superior a 1.0, puede tener eficiencia, factor de potencia y velocidad diferentes de los de carga nominal. El torque máximo, torque y corriente de arranque pueden no tener cambios a pesar de que el motor opere continuamente, no se recomienda emplear permanentemente el factor de servicio de factor, para evitar la menor esperanza de vida en comparación con las condiciones nominales [1]¹⁵.

En las aplicaciones que requieren una sobrecarga de la capacidad, la utilización de un rango mayor de potencia se recomienda, 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 hacerse 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. Causando 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) fue considerado en su diseño, y por lo tanto no debe 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 en los casos anteriores 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 continuo, con su respectivo incremento de corriente de línea, sin embargo no se recomienda. Al igual que, uso pesado o intermitente, en el cual permite que el motor se someta a excesos de carga por periodos cortos, aspecto que a continuación se explica.

El factor de servicio, es un componente usado por el 21,4% como aspecto a considerar 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 que se fundamenta el fabricante para garantizar o permitir mayor carga en el motor sin que se dañe.

I. Tipo de servicio

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

Retomando la definición de potencia nominal, se cita, "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 los aislantes [4]".

Ciclo de aplicaciones pueden dividirse en tres clasificaciones [6]:

¹⁵ Norma NEMA MG 1-14.37

- 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:

Representa cuando la carga exige ciclos o intervalos que alternar con y sin carga, estos valores de los tiempos de la máquina detenida y de funcionamiento deben estar claramente definidos.

Al seleccionar un motor de estas aplicaciones, debe asegurarse 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 presentan periodicidad, como también, periodos donde la máquina está detenida.

Para este tipo de casos, puedes 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 la tabla 4.

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

TABLA N4
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)¹⁶

C= tiempo en segundo mínimo entre cada arranque.

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 de solicitarse un motor especial para estas condiciones, también se puede pensar en sobre diseño, pero para ello, se recomienda analizar la pérdida de eficiencia, por operar a menor que la plena carga.

De la tabla anterior, se entiende claramente el concepto A y C, sin embargo, el punto B, debe ampliar 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 carga¹⁷, la cual se especifica mediante wk^2 .

A modo de ejemplo, si 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 esta inercia.

Según la tabla A= 8.8 y B= 122.

En el nuevo calcula 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 no mayor de 2 veces por hora.

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, si 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 de reducirse a un más el número de arranques por hora.

Este aspecto solo es considerado por el 11.4% de los ingenieros consultados.

¹⁶ En la norma NEMA MG 10-2007 sección 1.8

¹⁷ El valor correspondiente a cada carga se enlista en MG 1-1998, 12.54.

J. Uso de variador de frecuencia

Debido al desarrollo tecnológico de estos equipos y especialmente a la gran variedad de ventajas que ofrecen y aunado con 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 y especialmente cuando se trata de manejo de velocidad.

A pesar de las bondades que se citan de estos dispositivos se debe recalcar, que 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 diseños especiales para variador, también los motores estándar¹⁸ pueden operar con estos equipos.

Las normas Nema MG 1, sección 12, establece varias consideraciones, para esta caso, se hará mención especialmente 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 logrando que la relación volts/herz (ecuación 3) se mantenga constante. Para frecuencias aproximadamente menores a 30 herz, es posible que se requiere mayores incrementos de voltaje, excepto en los casos donde la aplicación no requiere un alto torque, especialmente para 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, con incrementos de frecuencia existirán reducciones de flujo, ya que, el voltaje se debe mantener constante. Por ende, el torque se reduce con la reducción de volts por herz.

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

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

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

Para esta condición se recomienda, reducirse la torque de carga, instalar ventilación forzada exterior o bien a 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 garantizar el rango de velocidades por encima de la velocidad base durante el 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, determinar si el tipo de grasa y rodamientos operan correctamente a altas velocidades.

• **Destrucción de bobinados:** Cuando el variador y motor operan a distancias mayores a 15-20 metros entre ellos, se puede generar transitorios de voltaje, con el tiempo se evidencia la degradando los bobinados

Se recomienda el empleo de filtros de armónicos, sin embargo estos protegen a la red. Para el motor, debería de emplearse un aislamiento especial o cable especial llamado inverter duty. Los cuales son diseños desarrollados para optimizar la operación del motor a 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 tomarlo en cuenta para seleccionar un motor eléctrico.

III. CONCLUSIONES

Aunque en la norma NEMA MG 10-2007, se establece que existen muchos factores que se deben de considerar a la hora de seleccionar un motor eléctrico, que repercuten en la instalación, operación y mantenimiento. Dentro de los cuales se establece que al menos se deben considerar la fuente de energía, el rango de potencia, velocidad, ciclo de trabajo, tipo de motor y encapsulado. La mayoría de los ingenieros solo consideran tres aspectos. Lo cual

¹⁸ Debe entenderse, cualquier motor eléctrico que no indique inverter duty (uso especial para variador).

evidencia dos situaciones, desconocimiento técnico de las variables a incluir en una adecuada selección o bien, 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 repercusión que representa cada aspecto técnico involucrado en la selección del motor eléctrico.

IV. BIBLIOGRAFÍA

Estándares:

- [1]. Information Guide for General Purpose Industrial AC Small and Medium Squirrel-Cage Induction Motor Standards, NEMA Standards MG 1-2007.
- [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).

Libros:

- [3]. S. CHAPMAN. "*Máquinas eléctricas*" Ed. McGraw-Hill, México 2000, p. 380.
- [4]. J. Frailes. "*Máquinas Eléctricas*". Editorial Mc Graw Hill, sexta edición, España 2008, p. 110.

Reportes técnicos:

- [5]. Gómez, Luis y Guerrero, Osvaldo. "Estudio de Fallas de Motores Trifásicos de Inducción". Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 2008.
- [6]. GE Industrial Systems. AC Motor Selection and. Application Guide.
- [7]. Villada, Fernando, Valencia, Diego A., Muñoz, Nicolás. Diagnóstico del aislamiento estatórico en motores de inducción mediante la medición del flujo axial de dispersión. Revista Facultad de Ingeniería N.º 32. pp. 102-113. Diciembre, 2004.
- [8]. Valencia, D. y Muñoz, N. 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. Agosto, 2003.
- [9]. D. Parra, G. Ocampo. Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatórica, Tesis de grado Universidad de Antioquia. Medellín. Enero de 2005. pp. 119-145.