



SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

CONUEE
COMISIÓN NACIONAL PARA EL
USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA



International Copper
Association Mexico
Copper Alliance

GUÍA PARA LA REPARACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS



DR © 2019 PROCOBRE CENTRO MEXICANO DE PROMOCIÓN DEL COBRE, A.C.
PASEO DE FRANCIA No. 159 Piso 1, Lomas Verdes 3ª. Sección, C.P. 53125
Teléfono (55)1665-6562

Primera Edición

Con la colaboración especial y remunerada del Ing. Juan Rubén Zagal León y el Lic. Antonio Muñoz Trejo.

Reservados todos los derechos. Prohibida su reproducción total o parcial, no pudiendo ni reproducirse ni transmitirse por ningún medio procedimiento electrónico ni mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin autorización por escrito de PROCOBRE CENTRO MEXICANO DE PROMOCIÓN DEL COBRE, A.C.

Aviso Legal

Esta guía contiene texto, figuras y tablas e información sustancial del documento original. El Efecto de la Reparación / Rebobinado en la Eficiencia del Motor: Estudio de Rebobinado EASA / AEMT y Guía de Buenas Prácticas Para Conservar La Eficiencia del Motor (© EASA 2003) que han sido modificados y adaptados al mercado mexicano por los autores. EASA y AEMT no garantizan la información contenida en esta guía y se eximen de cualquier responsabilidad u obligación de cualquier tipo por cualquier pérdida o daño derivado por el uso de dicha información o por la confianza depositada en dicha información.

Todo el texto, las figuras y las tablas incluidas en el documento original Estudio de Rebobinado EASA / AEMT y Guía de Buenas Prácticas Para Conservar La Eficiencia del Motor está protegido por los derechos de autor y no pueden ser utilizados para ningún propósito, incluido el uso comercial, sin permiso de EASA (www.easa.com).

EASA ha autorizado expresamente a **PROCOBRE CENTRO MEXICANO DE PROMOCIÓN DEL COBRE, A.C.**, la **inclusión en la presente obra del material de su titularidad, respetando los créditos correspondientes.**

ÍNDICE DE CONTENIDO

	ANTECEDENTES	3
0.	OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN DE LA PRESENTE GUÍA	3
1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	TERMINOLOGÍA	5
3.	PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	7
4.	PROCESOS DE REPARACIÓN DEL MOTOR	17
	4.1 Inspección inicial	17
	4.2 Desensamble	18
	4.3 Remoción del antiguo bobinado y limpieza del núcleo	21
	4.4 Rebobinado del motor	24
	4.5 Reparaciones mecánicas que pueden afectar la eficiencia	30
	4.6 Ensamble del motor	30
	4.7 Consejos de reparación	31
5.	CONSIDERACIONES PARA REPARAR O REEMPLAZAR MOTORES ELÉCTRICOS	37
6.	VALORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA INFORMATIVOS	48
7.	SÍMBOLOS Y TÉRMINOS ABREVIADOS	49
8.	GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS	50
9.	BIBLIOGRAFÍA	51
10.	AGRADECIMIENTOS	52
11.	DIRECTORIO DE TALLERES PARTICIPANTES	53

ANTECEDENTES

En los últimos años, los costos de energía se han incrementado considerablemente en todo el mundo, siendo los motores eléctricos los equipos de mayor consumo de energía del sector industrial, ya que consumen dos tercios de toda la energía eléctrica utilizada en las aplicaciones industriales/comerciales en el mundo.

En México, anualmente se reparan alrededor de 1.8 millones de motores eléctricos, por lo que es fundamental que sean reparados con procedimientos y personal calificados para evitar que, durante este proceso, se degrade su nivel de eficiencia energética, tal como se presenta en esta guía.

Lo anterior ofrece a los centros de servicio que reparan motores un valor agregado a su negocio, al reparar con prácticas y certeza técnica de alto nivel de desempeño. Los clientes reciben un valor agregado al contratar servicios de este tipo, disminuyendo sus costos de operación por el ahorro energético obtenido y, a nivel global, mediante la profesionalización de este sector de reparación de motores, se contribuye con los compromisos ambientales de reducción de emisiones y en la implementación de acciones orientadas a lograr las metas de sostenibilidad donde el cobre tiene un rol crítico en la eficiencia energética de los motores reparados.

Los motores eléctricos representan alrededor del 65 % del consumo de energía eléctrica en el sector industrial. Esto representa un factor fundamental en costos de operación de las empresas, lo que ha provocado incrementar el nivel de conciencia para adquirir y operar en sus instalaciones motores eléctricos cada vez con mayor eficiencia energética.

El éxito de la economía circular de los motores eléctricos depende en gran medida de la eficiencia de los métodos utilizados en la reparación, por lo que se considera importante efectuar la reparación adecuadamente. Si se hace un esfuerzo para extender la vida útil de un motor eléctrico, se debe tener cuidado de al menos mantener el nivel de eficiencia existente y evitar comprometer su fiabilidad.

0. OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN DE LA PRESENTE GUÍA

La presente guía de reparación de motores eléctricos trifásicos tiene como objetivo proporcionar recomendaciones prácticas de reparación y rebobinado para aplicarse en el proceso de reparación de motores que se comercializan en México, mediante las cuales se mantenga o mejore la eficiencia energética y confiabilidad de operación de estos equipos.

1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de esta guía es la de proporcionar prácticas y consejos de reparación/bobinado que ayuden a los técnicos y a los bobinadores de los centros de servicios a conservar o mejorar la eficiencia, la confiabilidad y la calidad de los motores que se reparen para su comercialización.

En la vida real y dependiendo de la condición del motor, puede que no sea posible lograr estas metas y en algunos casos, la reparación es la “solución provisional” hasta que se pueda contar con el motor de repuesto adecuado.

Algunos de los procedimientos incluidos en esta guía, provienen directamente del estudio realizado por EASA/AEMT-Impacto de la reparación/bobinado sobre la

eficiencia del motor [2003]. Otros están basados en buenas prácticas industriales bien establecidas y en los hallazgos de un estudio anteriormente realizado por AEMT en motores de inducción pequeños/medianos [1998].

Los procedimientos de esta guía cubren todos los motores trifásicos de inducción bobinados en alambre redondo, y mucha de su información también aplica a motores con bobinas preformadas (solera).

Nota: Esta guía suministra la mayoría de los procedimientos específicos y las recomendaciones. Es posible que utilizando métodos alternativos se puedan lograr los mismos resultados, pero estos deberán ser verificados.

2. TERMINOLOGÍA

Los términos utilizados en esta guía para la descripción de los motores horizontales y verticales son los más comúnmente encontrados en los documentos de EASA,

AEMT, NEMA, IEC e IEEE. Estos términos se encuentran resaltados con **negrita** en las **figuras 1 y 2**, y debajo de cada uno de ellos existen algunos nombres alternativos.

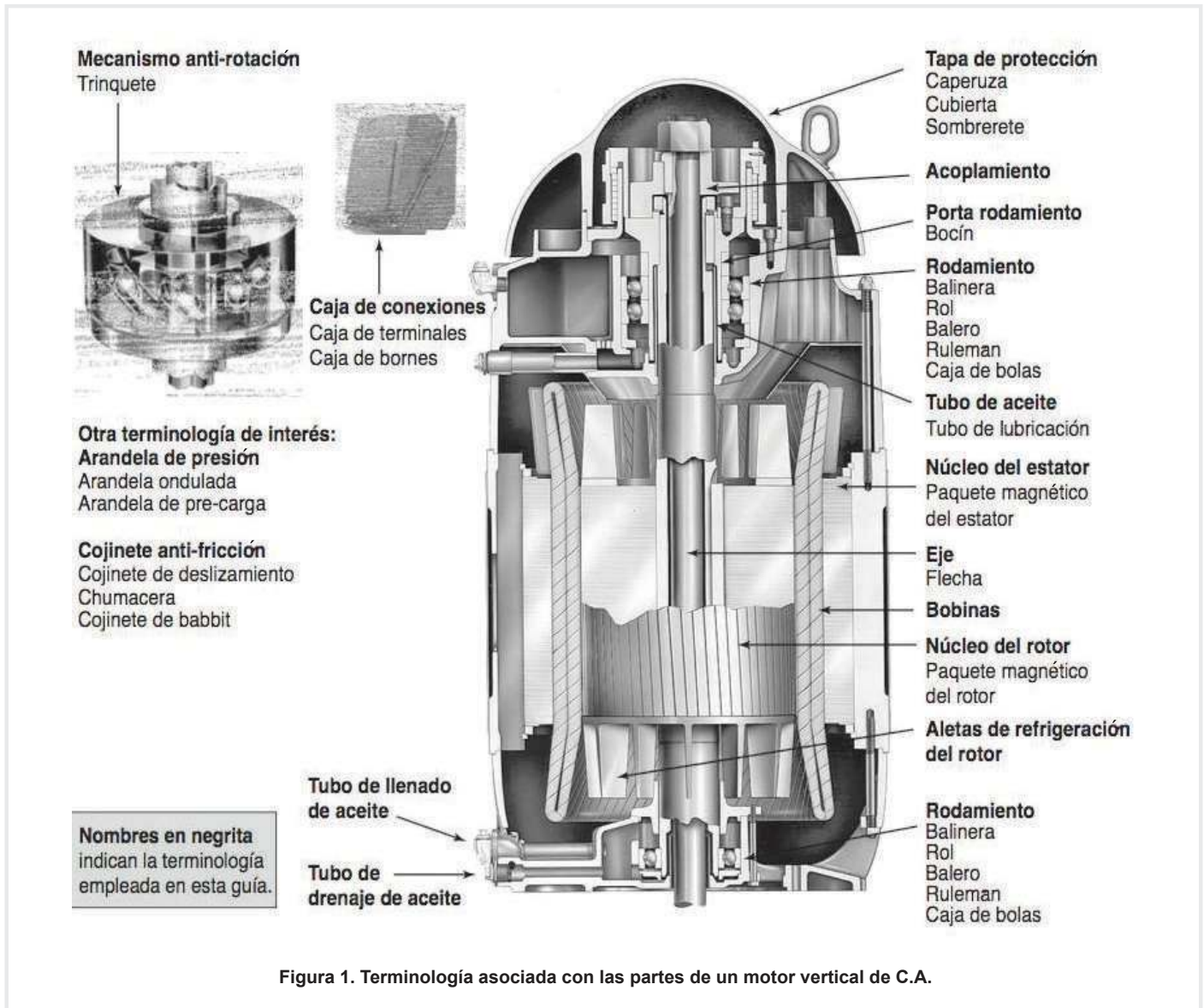


Figura © EASA

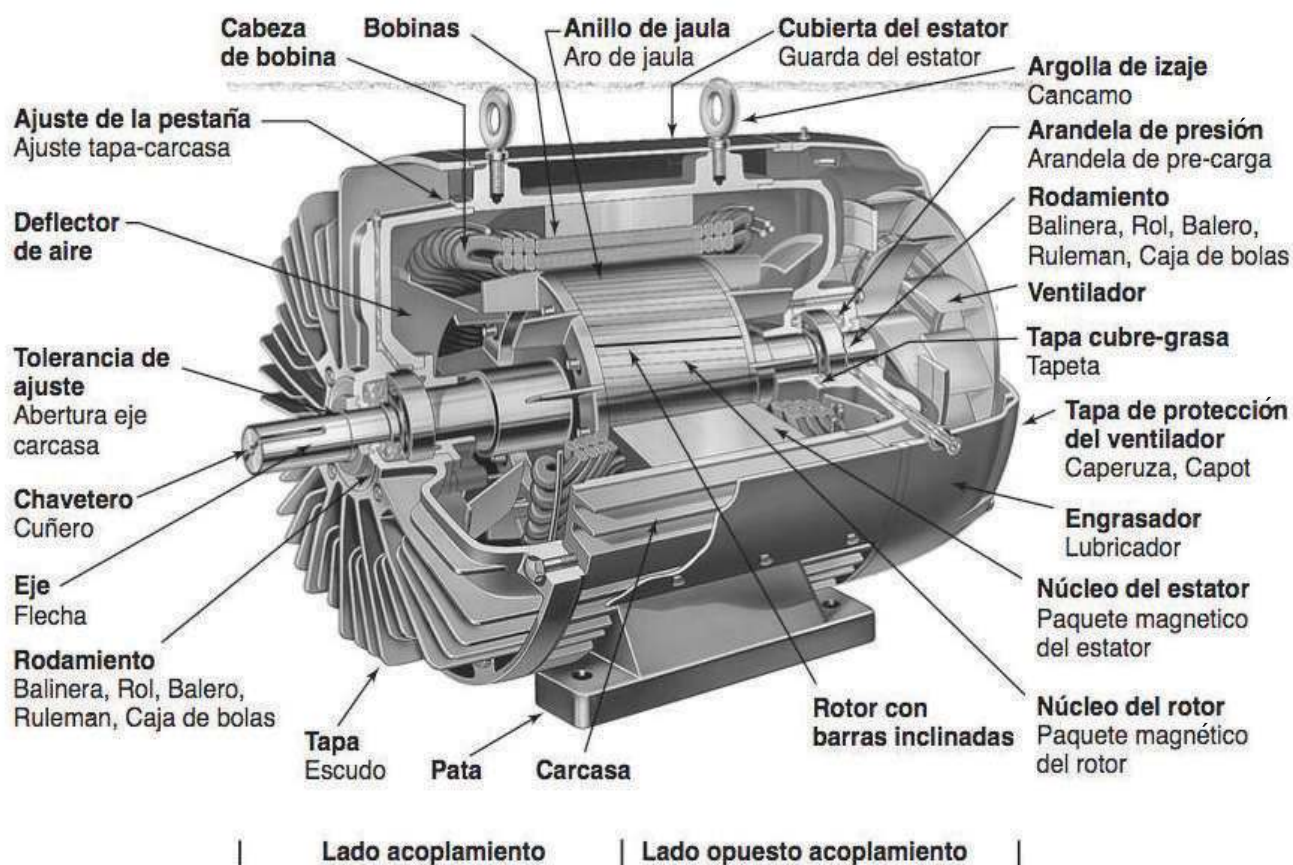


Figura 2. Terminología asociada con las partes de un motor horizontal de C.A.

Figura © EASA

ADVERTENCIA

Motores que Trabajan en Atmósferas Peligrosas

Algunos de los elementos de esta Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor, particularmente aquellos relacionados con los cambios realizados en los bobinados, no aplican a motores que trabajan en atmósferas peligrosas a prueba de explosión. No utilice esta guía para esta clase de motores (p. ej. UL, CSA, EExd, Eexe).

3. PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

En un motor de inducción existen cinco tipos de pérdidas:

- Pérdidas en el núcleo del estator y del rotor
- Pérdidas I^2R del estator
- Pérdidas I^2R del rotor
- Pérdidas por fricción y ventilación
- Pérdidas adicionales con carga

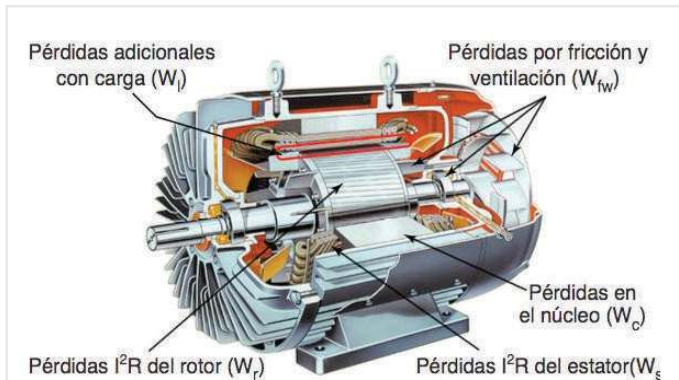


Figura 3. Pérdidas en las diferentes partes del motor.

Figura © EASA

Considerando que el motor trabaja a una frecuencia fija, las pérdidas por fricción, ventilación y en el núcleo no cambian de forma significativa con la carga. Las pérdidas I^2R y las pérdidas adicionales con carga aumentan significativamente cuando la carga se eleva.

Ambas pérdidas, las del núcleo y las I^2R (y particularmente las del rotor) pueden ser más altas cuando el motor es alimentado con un inversor o variador de frecuencia.

En muchos casos, durante la reparación las pérdidas pueden llegar a reducirse cuando los procedimientos usados utilizan buenas prácticas.

La **figura 4** ilustra la variación de las pérdidas con carga, de un motor de inducción de 4 polos estándar.

La **Tabla 1** ilustra la distribución del promedio de las pérdidas de los motores probados en un estudio sobre bobinados realizado por EASA/AEMT.

Pérdidas en el núcleo (hierro)

Las pérdidas en el núcleo pueden aumentar si se aplica excesiva presión al núcleo del estator (p. ej. al instalar una nueva carcasa que tenga un diámetro interior muy pequeño). Estas pérdidas también pueden incrementarse debido al daño del aislamiento inter-laminar (la capa muy pequeña de aislamiento existente entre las láminas de los núcleos del estator o del rotor). Esto puede ser producido si el núcleo del estator es quemado a una temperatura muy alta (Ver también la Nota Técnica 16 de EASA *Guidelines for maintaining motor efficiency during rebuilding*. Ver 9.6).

Los siguientes factores afectan la calidad de las láminas del núcleo:

- Rigidez del núcleo y del diente y la capacidad de mantener su forma. (Se debe mantener la forma geométrica original del núcleo).
- Daños causados por la falla.
- Calidad del aislamiento inter-laminar (barniz de recubrimiento de las láminas).
- Daños ocasionados durante el quemado en el horno.
- Daños producidos durante la remoción del bobinado.
- Pulido y limado excesivos en cualquiera de sus zonas.

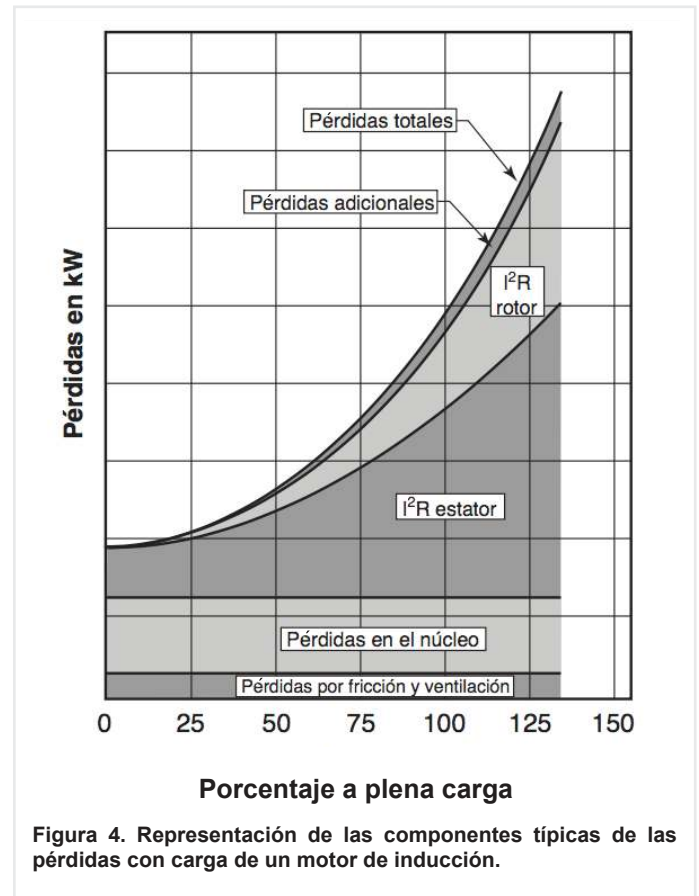


Figura 4. Representación de las componentes típicas de las pérdidas con carga de un motor de inducción.

Figura © EASA

**TABLA 1. PROMEDIO DE LAS PÉRDIDAS EN LOS MOTORES
PROBADOS EN EL ESTUDIO REALIZADO POR EASA/AEMT**

Pérdidas	Promedio 2 polos	Promedio 4 polos	Factores de diseño que afectan las pérdidas
En el núcleo (W_c)	19%	21%	Acero eléctrico, entrehierro, saturación, frecuencia de red, condición del aislamiento inter-laminar
Fricción y ventilación (W_{fw})	25%	10%	Eficiencia del ventilador, lubricación, rodamientos, sellos
I^2R estator (W_s)	26%	34%	Sección/calibre del alambre, longitud media de la espira, disipación de calor
I^2R rotor (W_r)	19%	21%	Sección y material de las barras y anillos
Adicionales con carga (W_i)	11%	14%	Proceso de fabricación, diseño de la ranura, entrehierro, estado de las superficies del entrehierro y de las láminas del núcleo

Tabla © EASA

Proceso de quemado

Durante este proceso, es esencial realizar un control preciso de la temperatura de quemado, ya que, si se utilizan temperaturas bajas -inferiores a 360 °C- es posible que el aislamiento del antiguo bobinado no pueda quemarse completamente. En este caso será necesario aplicar más fuerza para remover las bobinas y el aislamiento de las ranuras, lo que podría dañar el núcleo (p. ej. dientes separados o sueltos) e incrementar las pérdidas adicionales con carga.

No obstante, realizar el quemado a más de 400 °C aumenta el riesgo de daño en el aislamiento inter-laminar, lo que puede incrementar las pérdidas en el núcleo, especialmente si el aislamiento de las láminas es del tipo orgánico o de otra clase que sea susceptible a las altas temperaturas de quemado. No es conveniente realizar el quemado de núcleos aplicando flama directa, sobre todo en núcleos fabricados con algunos de los otros procesos de aislamiento inter-laminar (p. ej. coloración por vapor de óxido, unos a base de agua y algunos barnices orgánicos) y sea necesario tomar precauciones extremas.

Durante el estudio realizado por EASA/AEMT, todos los resultados óptimos fueron logrados utilizando temperaturas de quemado de 370 °C. Estas temperaturas fueron medidas en la zona del diente del núcleo del estator.

Nota: Una forma práctica de verificar si aumentaron las pérdidas en el núcleo, es realizar la prueba toroidal y, si se incrementa la temperatura en un punto en más de 10 °C, debe considerarse la reparación de la zona afectada.

Precauciones al situar los motores dentro del horno de quemado

No se deben amontonar los estatores unos encima de los otros, ya que la temperatura de los que están en la parte superior puede incrementarse debido al efecto del quemado de los estatores que se encuentran debajo. No se deben situar los estatores con los diámetros del núcleo en posición vertical; esto es especialmente crítico para las carcasas de aluminio.

Pérdidas en el núcleo

Debido a la gran variedad de aceros magnéticos existentes, no es posible establecer reglas estrictas para la aceptación de las pérdidas en el núcleo. No obstante, la medición de las pérdidas antes y después del quemado remoción y limpieza, determinará si existen incrementos significativos en las pérdidas. Se debe considerar reemplazar el motor si sus pérdidas en el núcleo aumentan en más de un 20 %.

En casos especiales, hay que considerar realizar el re-apilado o reemplazo de las láminas.

En el proceso de reparación de motores eléctricos, a fin de verificar el comportamiento del nivel de eficiencia energética antes y después de ser reparados, es necesario aplicar la prueba toroidal (Core Loss Tester) al estator. En un caso práctico se pudo observar que, a través de una adecuada reparación, se logró reducir las pérdidas de 0.96 a 0.92 Watts/lb (2.112 a 2.024 Watts/kg) en el núcleo del estator.

Consideraciones para los aceros eléctricos

La capacidad para mantener la eficiencia o para minimizar cualquier pérdida de la misma está relacionada con la calidad de las láminas y de la cantidad de núcleo apilado en el estator.

Los fabricantes de motores utilizan una gran variedad de aceros eléctricos y es difícil generalizar sus características. Las consideraciones más comunes incluyen:

- Completamente procesados vs. aceros semi procesados.
- Carbono vs. acero al silicio.
- Orientación del grano. Los motores de inducción utilizan acero eléctrico de grano no orientado.
- Rango de pérdidas por histéresis y corrientes parásitas desde 1.5 a 6 Watts/lb (3.3 a 13.2 Watts/kg).
- Rango del espesor desde 0.4 a 0.9 mm (0.014" a 0.035").
- Rango del aislamiento inter-laminar de los materiales que va desde C-0 hasta C-5.

Consideraciones especiales para los aceros eléctricos

- Los aceros semi procesados se consideran buenos candidatos para ser quemados en el horno.
- La temperatura de quemado segura depende de la clase del aislamiento inter-laminar.
- Esta discusión se complica debido a las diferencias existentes entre los diferentes aceros normalizados a nivel mundial, pero la clave se encuentra en la clase del aislamiento inter-laminar. Si se tienen dudas acerca de ella, lo más seguro es contactar con el fabricante. También es importante recordar que:
- Las láminas con dientes estrechos o sin soporte son susceptibles a sufrir distorsión en el diente.
- Cuando la eficiencia sea el factor más importante, es posible que los núcleos con láminas muy dañadas o con muchos puntos calientes no se consideren como buenos candidatos para ser bobinados.
- Para más información, ver una discusión previa en "Proceso de Quemado" en el Apéndice 4: Aceros Eléctricos.

Pérdidas I^2R del devanado del estator

A menudo, en un motor las pérdidas I^2R del estator son las componentes más altas de las pérdidas totales. En los motores con potencias mayores o iguales a 45 hp (30 kW), probados en el estudio de bobinado realizado por EASA/AEMT, el promedio de las pérdidas I^2R fue del 30 % de las pérdidas totales (rango de 22-46 %).

Por consiguiente, cualquier cosa que afecte las pérdidas I^2R del estator puede llevar a causar un gran impacto sobre la eficiencia del motor reparado/rebobinado.

Las pérdidas I^2R del estator pueden ser reducidas

incrementando la sección/calibre de los alambres del bobinado o recortando la longitud media de las espiras (LME). Las pérdidas I^2R pueden incrementarse al realizar cambios en el bobinado, aunque algunas de estas modificaciones también pueden reducirlas (p. ej. aumento de la sección/calibre del alambre de los bobinados; es recomendable mantener la sección transversal del área del devanado del motor).

La **Tabla 3** contiene los resultados de un estudio realizado anteriormente por EASA, y muestra el impacto sobre la eficiencia debido al cambio del 10 % de la longitud de las cabezas del bobinado (cerca del 5 % en la LME) en motores estándar TEFC (IP 54). Siempre que sea posible, una reducción de la LME reduce las pérdidas I^2R del estator y ayuda a conservar o mejorar la eficiencia nominal del motor. Debido a esto, queda claro que la longitud de las cabezas y la LME son críticas para la eficiencia del motor.

Longitud Media de la Espira (LME)

Si se permite que la LME aumente, las pérdidas I^2R del estator serán más altas y, por consiguiente, la eficiencia del motor disminuirá. Al contrario, cuando sea posible reducir la LME, las pérdidas I^2R del estator serán menores, conservando e incluso mejorando la eficiencia. El objetivo es reducir al mínimo la longitud de la parte recta de la bobina (la que se inserta en la ranura), evitando que durante la ejecución del bobinado se produzcan esfuerzos mecánicos al alojar las bobinas dentro de la ranura. Independientemente de la forma de la bobina, tiene que asegurarse que las cabezas del bobinado no sean más largas que las originales.

Hay que evitar reducir mucho la LME. Hacerlo, podría dificultar el bobinado o incluso que este fuese imposible de realizar. Además, esto también podría afectar al sistema de enfriamiento del motor causando, en casos extremos, que la temperatura del bobinado se incremente.

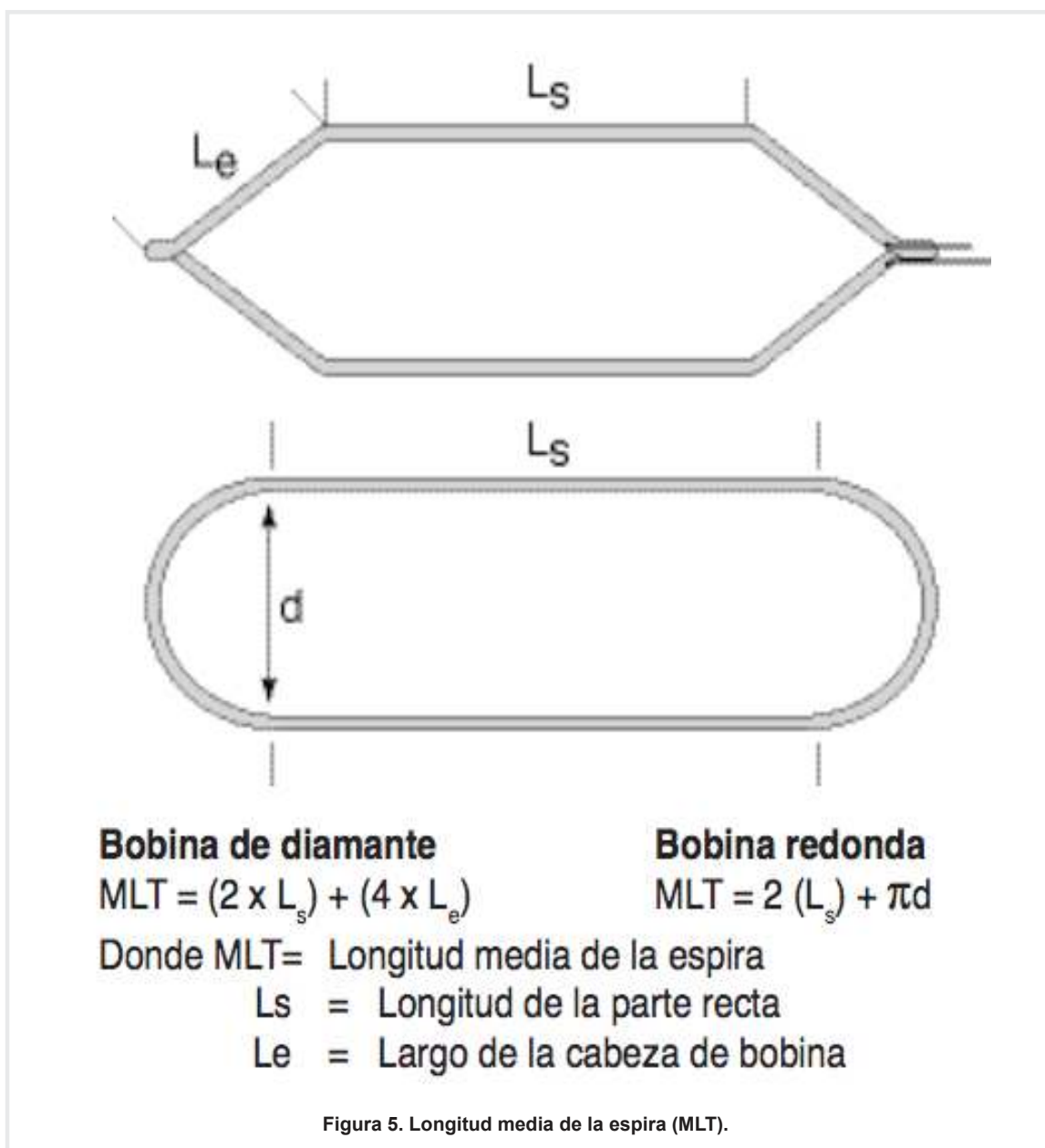


Figura © EASA

Pérdidas en el rotor

Las pérdidas en el rotor aumentarán si el flujo se reduce como resultado de un cambio en el bobinado del estator o en la sección/espesor de los anillos de la jaula. Las pérdidas también pueden elevarse como consecuencia de un cambio/daño en las barras de la jaula del rotor. Realizar un corte fino en el rotor también afecta las pérdidas del rotor.

Nota: Para mantener la medida del entrehierro original y evitar aumentar la corriente de magnetización del motor se recomienda no rectificar el núcleo del rotor.

Pérdidas por fricción y ventilación

Las pérdidas por fricción y ventilación pueden elevarse debido a:

- Utilizar ajustes errados o con mucha interferencia para los rodamientos.
- Ensamble de retenes (sellos) adicionales o emplear los incorrectos, pérdida de la lubricación de los retenes (sellos), o daños en la superficie del eje (labios de los retenes) o en la superficie de las tapas (cara de los retenes).
- Instalación de un ventilador de recambio inadecuado.
- Excesiva lubricación de los rodamientos.

También es importante mantener los ductos de aire despejados (p. ej. los ductos o canales de la carcasa o del núcleo por los que pasa el aire de enfriamiento, libres de capas de barniz). Los ductos o canales que estén parcial o totalmente obstruidos pueden reducir la fricción o ventilación; no obstante, el efecto de reducir la refrigeración del motor incrementará mucho más las pérdidas, particularmente las I^2R . Esto puede ocasionar fallas en corto tiempo, así como reducir la eficiencia de operación del motor.

TABLA 2. PÉRDIDAS POR INCREMENTO DE LA TEMPERATURA EN COBRE.

I (Amps)	R (ohms)	T (°C)	Pérdidas (I^2R) (kW)
150	0.1440	25	3.240
150	0.1555	45	3.499
150	0.1670	65	3.758
150	0.1786	85	4.019
150	0.1440	105	3.240
150	0.2016	125	4.536
150	0.2131	145	4.795

Fuente: Elaboración propia

Impacto debido a un engrase excesivo

Numerosos estudios han detectado que utilizar mucha grasa para lubricar los rodamientos puede incrementar las pérdidas por fricción (Ver las **figuras 6, 7 y 8**). Durante el estudio de bobinado realizado por EASA/AEMT, se utilizó demasiada grasa para lubricar los rodamientos de dos de los motores del Grupo A, que habían sido bobinados y no se realizó ningún otro cambio en la lubricación del resto de los motores probados. Como era de esperarse, la fricción de los rodamientos de los motores que habían sido lubricados en exceso, aumentó y su eficiencia cayó entre 0.3 y 0.5 %. La **figura 9** ilustra el descenso de las pérdidas en el tiempo de uno de los motores de 60 hp (45 kW), probados en el estudio realizado por EASA/AEMT.

Nota: En motores de 3600 rpm (2 polos) es más severo el daño por un exceso de lubricación de los rodamientos.

TABLA 3. EFECTO DE LOS CAMBIOS EN LA LONGITUD DE LAS CABEZAS DEL BOBINADO EN MOTORES ESTÁNDAR TEFC/IP 54, 460 V

HP/kW	Polos	Longitud de las cabezas	Eficiencia a plena carga (%)	Pérdidas totales (vatios)	Cambio en las pérdidas totales (%)
50/37	4	10% más corta	93.1	2746	-2.8
		Nominal	93.0	2825	
		10% más larga	92.8	2911	3.0
100/75	4	10% más corta	94.9	4020	-2.6
		Nominal	94.8	4129	
		10% más larga	94.6	4243	2.8
200/150	4	10% más corta	95.6	6921	-2.5
		Nominal	95.5	7099	
		10% más larga	95.3	7278	2.5
50/37	2	10% más corta	92.7	2935	-2.9
		Nominal	92.5	3024	
		10% más larga	92.3	3122	3.2
100/75	2	10% más corta	93.9	4881	-3.3
		Nominal	93.7	5047	
		10% más larga	93.5	5212	3.3
200/150	2	10% más corta	95.1	7697	-2.3
		Nominal	95.0	7875	
		10% más larga	94.9	8075	2.5

Tabla © EASA

Pérdidas adicionales con carga

Las pérdidas adicionales con carga se encuentran generalmente entre el 10 y el 20 % de las pérdidas totales del motor. La fuente principal de estas son los flujos producidos por los armónicos de alta frecuencia que ocurren cerca de las superficies del entrehierro, entre los núcleos del estator y del rotor. Estas pérdidas son causadas por la interacción magnética entre el estator y los dientes del rotor.

Las pérdidas adicionales con carga pueden aumentar si las superficies del entrehierro de las láminas del núcleo se encuentran deterioradas o rayadas entre sí (p. ej. por daño mecánico, excesivo pulido o esmerilado, etc.). Las pérdidas adicionales también aumentan cuando el entrehierro no es uniforme (p. ej. estator y rotor que no están concéntricos) o si el núcleo del rotor está desplazado axialmente en relación con el estator (p. ej. si se instala un rotor de repuesto equivocado).

Análisis de las pérdidas adicionales

En el estudio de bobinado realizado por EASA/AEMT, las pérdidas adicionales de los motores del Grupo A se incrementaron significativamente, como producto de los daños mecánicos causados al núcleo del estator durante la remoción del aislamiento y los alambres del antiguo bobinado (p. ej. dientes deformados o sueltos, lo que a su vez provocó el incremento de las pérdidas zigzag o pérdidas por pulsación (Ver la **figura 10**).

Durante el quemado de los motores del Grupo A, se utilizó una temperatura de 350 °C, la cual resultó ser muy baja para deshacer completamente los aislamientos de los bobinados. Como consecuencia de esto, fue necesario aplicar fuerza excesiva y realizar trabajos adicionales para dismantelar y limpiar los bobinados. Todo esto provocó daño mecánico en las láminas del núcleo del estator lo que incrementó las pérdidas adicionales con carga de los motores.

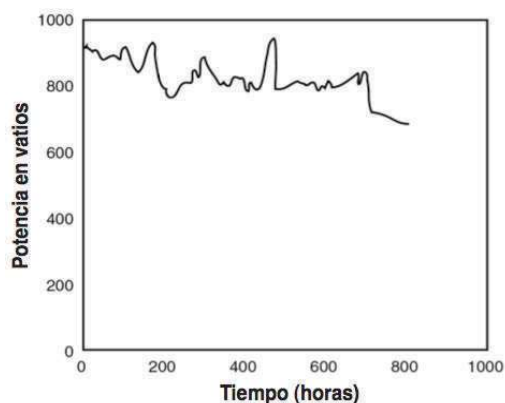


Figura 6. Con el tiempo, el exceso de grasa es expulsado fuera de los rodamientos y las pérdidas por fricción se reducen. Suministrado por Emerson Motor Co.

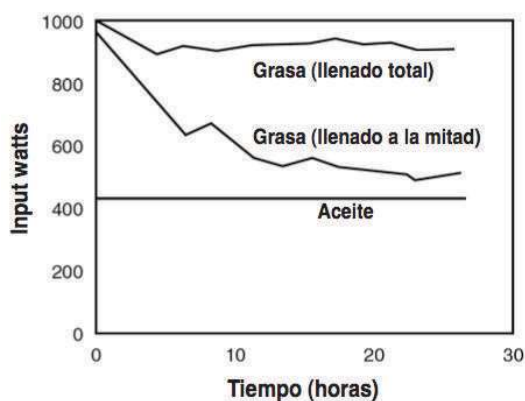


Figura 7. Un llenado apropiado de grasa (a la mitad) permite una reducción en las pérdidas, a medida que los rodamientos "se asientan en el rodaje" acercándose al nivel del aceite de lubricación. Suministrado por Emerson Motor Co.

Figura © EASA

Figura © EASA

En este mismo estudio, la temperatura de quemado de los motores de los Grupos B, C y D, se incrementó hasta 360-370 °C. Como resultado, el aislamiento de los bobinados de deshizo de una forma más completa, haciendo más fácil la remoción de las bobinas y la limpieza de las ranuras. Dado que durante este proceso los dientes de las láminas del núcleo del estator no sufrieron daños, las pérdidas adicionales con carga de los motores no aumentaron.

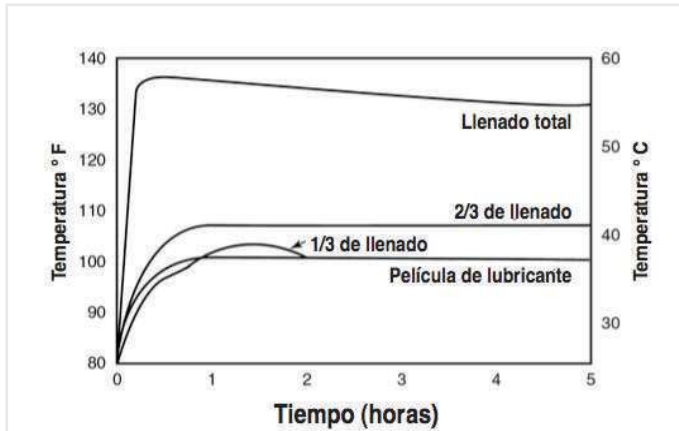


Figura 8. Como se muestra aquí, independientemente del llenado de grasa, puede que los rodajes de corta duración no sean adecuados para reducir las pérdidas en los rodamientos. Tomado de "Fundamentos de Lubricación" de Mobil Oil Corp.

Figura © EASA

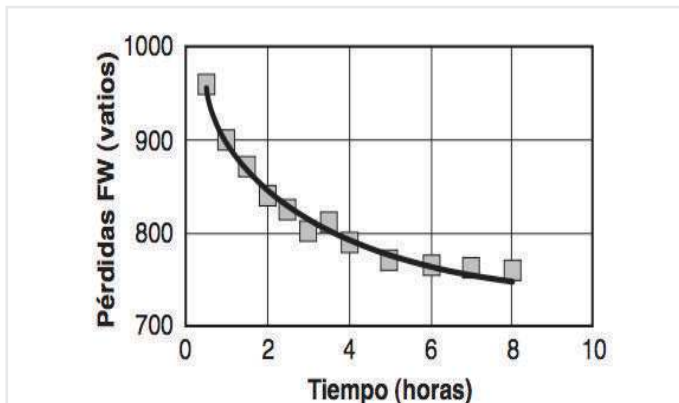


Figura 9. Reducción de las pérdidas por fricción y ventilación durante el rodaje inicial de un motor de 45 KW (60 hp) engrasado de forma apropiada, probado en el estudio de bobinado realizado por EASA/AEMT.

Figura © EASA

Resumen de los factores que pueden incrementar las pérdidas del motor

En el estudio realizado por EASA/AEMT, la comparación de los resultados de las pruebas realizadas antes y después del bobinado, determinó que los cambios más significativos se produjeron tanto en las pérdidas en el núcleo como en las pérdidas adicionales con carga.

Como ya se dijo anteriormente, el cambio en las pérdidas adicionales con carga de los motores del Grupo A, en parte fue ocasionado por el daño causado a los dientes del estator durante la remoción de las bobinas que no habían sido quemadas completamente. (Esta parte de las pérdidas adicionales con carga son las pérdidas por pulsación ocasionadas por los cambios de la inducción magnética en el entrehierro).

Debido a lo anterior, para el quemado de los motores de los Grupos B, C y D se elevó la temperatura de quemado de 350 °C hasta 360 a 370 °C. Como resultado, las pérdidas adicionales con carga en estos tres Grupos bajaron significativamente.

A continuación, se describen los factores que pueden afectar los diferentes componentes de las pérdidas de los motores de inducción:

- Pérdidas en el núcleo del estator:

- Cambios en la densidad de flujo
- Excesiva presión radial o axial sobre el núcleo
- Calentamiento excesivo durante el quemado (p. ej. daño del aislamiento inter-laminar)
- Daño mecánico del núcleo (p. ej. dientes con láminas deformadas, sueltas o esmeriladas)

- Pérdidas I^2R del estator:

- Aumento de la LME de las bobinas (p. ej. cabezas de bobina muy largas)
- Reducción de la sección/calibre de los alambres del bobinado
- Algunos cambios realizados en la configuración del bobinado del estator

- Pérdidas del rotor:

- Cambios en la sección/espesor de los anillos de la jaula
- Cambios/daños en el rotor
- Mecanizado del rotor
- Cambios en la densidad de flujo

- Pérdidas por fricción y ventilación debidas a los cambios realizados en:

- Rodamientos
- Retenes (sellos)
- Lubricación
- Ventilador
- Ductos/Canales de aire
- Temperatura de operación

- Pérdidas adicionales con carga

- Daños en las superficies de los entrehierros
- Entrehierro no uniforme (p. ej. rotor excéntrico con respecto al diámetro interior del estator)
- Cambios en el entrehierro
- Daños en las láminas externas del núcleo

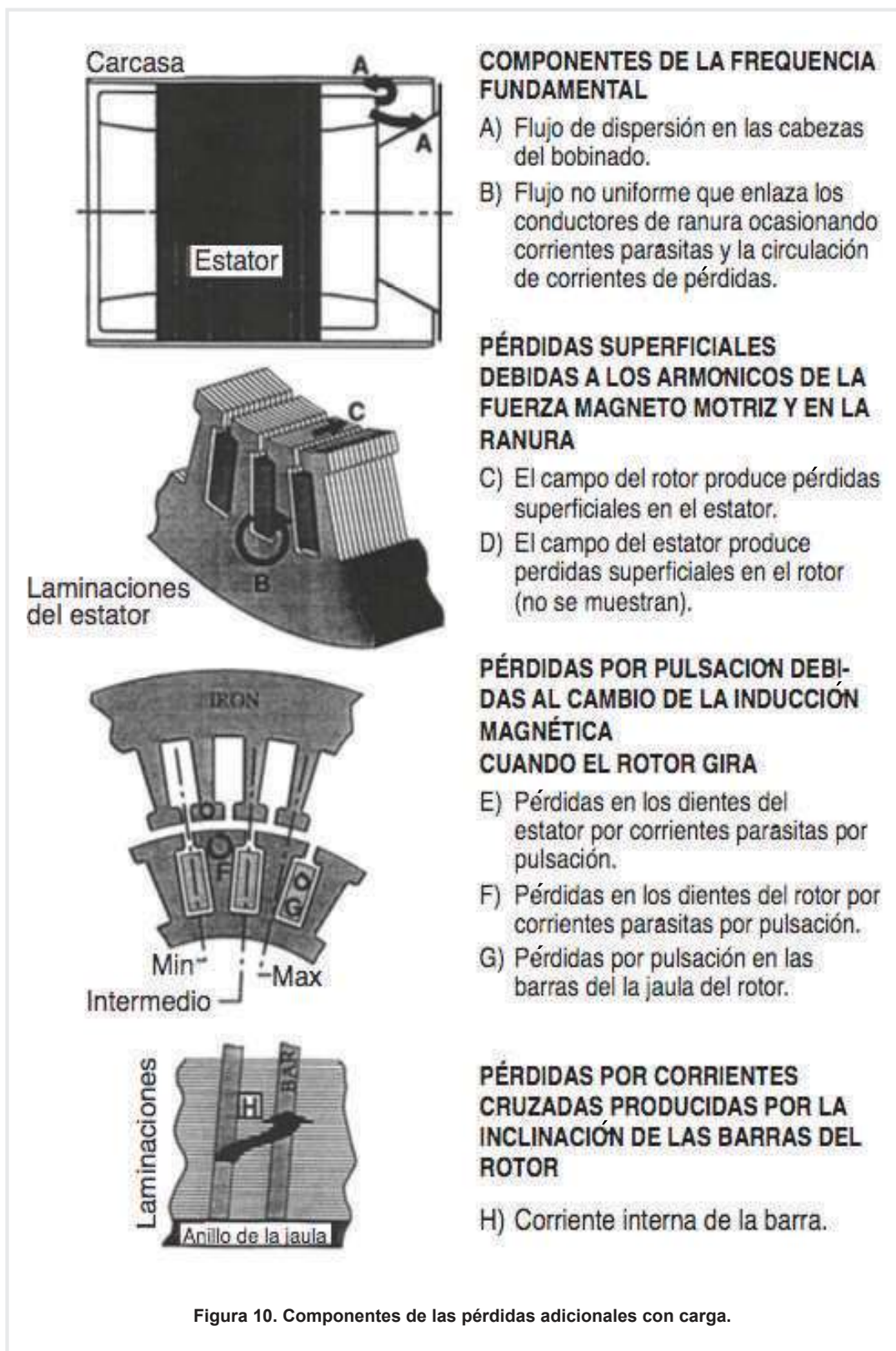


Figura © EASA

Figura 11. Hoja de datos para bobinados originales polifasicos de C.A.

HP/kW	RPM	Polos	Fabricante/Marca	
Ranuras		Tipo		Volts
Bobinas		Modelo		Amperes
Grupos		Estilo		Fases
Espiras/Vueltas		Dispositivos auxiliares	Eficiencia	Hz
Sección/calibre del alambre		Longitud del cable de salida:	No. de cables de salida:	Tamaño constructivo de armazón
Cantidad de alambres		Elevación de temperatura °C	Ciclo de trabajo	Temperatura ambiente °C
Paso: 1 -		No. serie		Clase de aislamiento
Conexión		Tipo abierto/ cerrado		Factor de servicio
Puentes		Esquema de la bobina	Densidades: CMA A/mm ² Entrehierro Diente Yugo/Corona	
Largo del núcleo				
Diámetro interior del núcleo				
Yugo/corona				
Fondo de ranura				
Ancho del diente				
Peso del alambre				
Orden de trabajo				
Cliente				
Trabaja con variador				

Tabla © EASA

Figura 12. Hoja de datos para bobinados originales trifásicos de C.A.

Características del Bobinado de C.A.

				Cliente:		
Marca:						
No. de Serie:		Modelo:		Tipo abierto/cerrado:		
HP/kW	V		A	RPM		
Datos	Estator Existente	Rotor Nuevo	Verificado por	PRUEBAS ANTES DEL BARNIZADO		
Tipo de bobinado				RESISTENCIA DE AISLAMIENTO A TIERRA		
Longitud de la cabeza de bobina en lado conexiones						
Longitud de la cabeza de bobina en lado opuesto a conexiones						
Largo del núcleo				RESISTENCIA ÓHMICA POR FASE		
Diámetro interior del núcleo						
No. de ranuras						
No. ranuras/polo/fase				HIPOT A TIERRA		
Paso						
No. grupos				HIPOT ENTRE FASES		
No. bobinas/grupo						
No. de circuitos en paralelo						
Conexiones				EQUILIBRIO DE FASES		
Alambres en paralelo				VOLTS: Y/A :		
Espiras/bobina						
Sección/calibre del alambre				Amperes	Amperes	Amperes
Profundidad de ranura				PRUEBA DE POLARIDAD		
Ancho del diente						
Largo del yugo/corona				OTRAS PRUEBAS		
Peso de la bobina						
Clase de aislamiento						
Sección/calibre del cable						
ESQUEMA Y OTROS DETALLES				DATOS TOMADOS POR:		
				VERIFICADO Y APROBADO POR:		
				FECHA:		

Tabla © EASA

4. PROCESOS DE REPARACIÓN DEL MOTOR

En el estudio realizado por EASA/AEMT, la comparación de los resultados de las pruebas realizadas antes y después del bobinado, determinó que los cambios más significativos se produjeron tanto en las pérdidas en el núcleo como en las pérdidas adicionales con carga.

Los principales procesos de reparación de un motor incluyen:

- Inspección inicial
- Desensamble
- Toma de datos, remoción del antiguo bobinado limpieza del núcleo
- Rebobinado
- Reparaciones mecánicas
- Ensamble

Puntos clave

- La mayoría de los procesos de reparación que son mal realizados, pueden reducir la eficiencia.
- Los métodos de reparación que utilizan buenas prácticas pueden mantener y en algunos casos mejorar la eficiencia.
- Es esencial contar con registros o documentos escritos que suministren los datos exactos de cada una de las reparaciones.
- Durante la inspección inicial podemos obtener gran cantidad de información útil.

Comenzando con la inspección inicial, las secciones siguientes aportan procedimientos que utilizan buenas prácticas durante cada etapa del proceso de reparación.

4.1 Inspección inicial

Los formatos diseñados para recopilar datos durante la inspección inicial forman parte importante de los registros de reparación del motor y pueden proporcionarnos información de vital importancia sobre la causa de la falla. Tal como se aprecia en las **figuras 11 y 12**, es importante rellenar todos los campos de las hojas de datos. Particularmente, debe tomarse nota de la siguiente información.

Puntos clave

Es importante prestar atención a estos puntos:

- Datos de placa(s) del motor
- Resultados de la inspección externa
- Información del cliente

4.1.1 Datos de placa(s) del motor

- Tomar todos los datos de placa, teniendo en cuenta que algunos códigos, números o letras considerados sin importancia, pueden llegar a ser muy importantes

en el caso de que fuese necesario solicitar al fabricante información o repuestos.

- Recordar que el motor puede tener más de una placa. Algunos fabricantes de maquinaria y equipos instalan sus propias placas (que algunas veces reemplazan a las instaladas por los fabricantes originales de motores) y algunos centros de servicio instalan una placa adicional para indicar que el motor ya ha sido reparado con anterioridad.
- Verificar si la eficiencia del motor es EPAct (Estados Unidos) o EFF1 (Europa).
- Comprobar si el motor es apto para uso en atmósferas peligrosas (motores IEC clasificados EExd o EExe o máquinas NEMA clasificadas UL o CSA).

CATALOG #		MODEL #	
☐ SHAFT END BRG		☐ OPP END BRG	
FR	TYPE	ENCL	
PH	MAX AMB °C	ID#	
INSUL CLASS	DUTY	WT	BAL
HP	RPM	SF	HZ
VOLTS	MAX KVAR	NEMA NOM EFF	
AMPS	CODE	DES	
SF AMPS	PF	GUARANTEED EFF	

Figura 13. Placa de datos de un motor NEMA con su valor nominal de eficiencia.

Figura © EASA

AC MOTOR IEC 60034				EFF1	
TYP	SER. NO.		YEAR		
KW	r/min	V	A	HZ	
KW	r/min	V	A	HZ	
DUTY	INSUL	AMB °C	RISE °C	DESIGN	3 PHASE
COS Ø	CODE	IP	IC	SERVICE FACTOR	
GREASE	DE BRG		NDE BRG		
DIAG	I _A /I _N	M _A /M _N	kg MOTOR WT		

Figura 14. Placa de datos de un motor IEC clasificado como "EFF1."

Figura © EASA

4.1.2 Resultados de la inspección externa

Se debe observar y tomar nota de lo siguiente:

- Estado general es viejo/nuevo, está sucio/limpio, etc.
- Los ductos de enfriamiento están despejados/obstruidos. Esto puede haber causado recalentamiento.
- Decoloración en el eje (marrón/azul). Existen señales de recalentamiento del rotor o signos de un rodamiento dañado.
- Partes faltantes o dañadas o que han sido reemplazadas/ reparadas con anterioridad; por ejemplo, retenes (sellos), aletas de enfriamiento del estator, ventilador, tapa o cubierta de protección del ventilador, caja de conexiones, etc.

4.1.3 Información del cliente

Es posible que el cliente pueda proporcionar información sobre:

- Las condiciones de operación – temperatura, vibración, etc.
- El tipo de máquina o equipo impulsado por el motor.
- El tiempo de operación del motor en horas/días.
- La carga aproximada del motor.
- La frecuencia de los arranques.
- El tipo de arrancador (método de arranque).
- Dónde se ha reparado/bobinado el motor antes.
- Cuánto tiempo trabajó el motor desde nuevo (o desde su reparación/bobinado).
- Situaciones inusuales, tales como apagones, descargas atmosféricas, daños por agua, problemas con el equipo o máquina impulsada, etc.
- Alimentación eléctrica y método de arranque:
 - o Directo o Suave o Devanado bipartido
 - o Inversor/variador de frecuencia
 - o Estrella – delta o estrella – triángulo



Figura 15. Motor con aletas de enfriamiento obstruidas.

Figura © EASA

4.2 Desensamble

Debido a su apariencia exterior, algunas veces resulta evidente que el motor no es reparable y que será necesario reemplazarlo por uno nuevo. No obstante, antes de tomar esa decisión, el motor debe ser desensamblado. Es esencial que el motor sea desensamblado de forma cuidadosa, como también, es importante conservar adecuadamente los registros para asegurar que, si se realiza su reparación, el motor pueda ser ensamblado de nuevo correctamente. Coloque todas las partes que no van a ser reparadas en una caja o bandeja identificada con el número de serie del motor o con el número de la orden de trabajo del centro de servicios.



Como fue recibido



Como fue enviado

Figura 16. Este motor fue montado con el eje de salida en posición incorrecta. Para evitar este problema, las marcas realizadas en la carcasa y las tapas definen la orientación del eje.

Figura © EASA

Puntos clave

- Posición de la caja de conexiones.
- Esquema de conexiones.
- Posición de las tapas o escudos y tapas cubre-grasa.
- Medidas de los rodamientos, tipos tolerancias.
- Posición axial del rotor en relación con el estator (lado carga o lado libre).
- Posición del eje de salida del motor con respecto a la caja de conexiones principal.
- Extraer con cuidado el rotor para prevenir daños en las superficies de los entrehierros o en los devanados.
- Inspección interna.
- Daño mecánico de los componentes o señales de uso indebido.
- Motores contaminados (grasa, aceite, polvo, residuos químicos, etc.)

4.2.1 Caja de conexiones. Esquema de conexiones

- Tomar nota de las marcas en los cables de salida y en las terminales.
- Tomar nota de la posición de cualquier puente existente entre las terminales (hacer un esquema)
- Comprobar que el material aislante de los cables de salida no presenta recalentamiento en la zona de contacto con las terminales (hay señales de una decoloración o está quebradizo). Si es así, deben reemplazarse los cables de salida. Este recalentamiento puede haber sido causado por una conexión floja o falso contacto.
- Confirmar que todas las terminales están crimpadas (ponchado) firmemente o soldadas a los cables de salida del bobinado.
- Tomar nota del calibre y del tipo de los cables de salida.
- Tomar nota del tamaño y modelo de las terminales.

4.2.2 Posición de las tapas o escudos y tapas cubre-grasa

Los ajustes de las tapas o escudos con el borde de la carcasa no siempre son perfectamente circulares. Las tapas o escudos y las tapas cubre-grasa deben ser instaladas exactamente en la misma posición en la que se realizó el ajuste original. Por consiguiente, es necesario realizar marcas permanentes en ambos lados de todas las tapas o escudos y la carcasa del motor (p. ej. antes de desensamblar el motor, hacer marcas con puntos de todos los componentes usando un punto de golpe) (Ver la **figura 16**).

4.2.3 Medidas de los rodamientos, tipos y tolerancias

La mayoría de los motores tienen instalados rodamientos de bolas en cada uno de sus extremos. Algunos cuentan con rodamientos de rodillos en el lado carga para incrementar la capacidad de carga radial, o con rodamiento(s) axial(es) para soportar cargas axiales elevadas. Deben instalarse siempre rodamientos nuevos que sean del mismo tipo de los desensamblados, a no ser que se determine que estos están mal especificados para la aplicación.

Los siguientes puntos se consideran de importancia crítica para la selección de los rodamientos:

- Tipo de protección
- Ajuste y tolerancia
- Clase de precisión
- Tolerancia interna
- Capacidad de carga
- Tipo de lubricante

4.2.4 Posición axial del rotor en relación al estator (lado-carga o lado libre)

El rotor debe estar centrado axialmente con el núcleo del estator. Si se encuentra desplazado axialmente, las fuerzas de centrado ejercerán presión sobre los rodamientos. Si el rotor sobresale del núcleo del estator, la corriente de magnetización aumentará. Cuando sea desensamblado el motor, tome nota

de la posición de la arandela de presión o arandela ondulada (p. ej. lado carga o libre).

4.2.5 Posición del eje de salida del motor con respecto a la caja de conexiones principal

Hay que tomar nota de la posición del eje de salida con respecto a la posición de los cables de conexión (F1 o F2). Existen varias formas de hacer esto. Algunos centros de servicio describen esto como “cables de conexión a la izquierda viendo el eje” o “eje a la derecha viendo los cables de conexión.”

4.2.6 Extracción cuidadosa del rotor para prevenir daños en las superficies de los entrehierros o en los devanados

Cuando se desensambla una de las tapas o escudos del motor, el rotor experimenta una carga radial excesiva. Si durante la extracción del rotor hay contacto entre el estator y el rotor, las superficies de ambos entrehierros pueden sufrir daños incrementando las pérdidas. También se pueden ocasionar daños al bobinado. Una manera efectiva de extraer y reemplazar los rotores de motores horizontales es usando una herramienta especialmente diseñada para estos propósitos (Ver la **figura 17**).



Figura 17. Extracción de rotor usando una herramienta diseñada para desmontaje de rotores.

Figura © EASA



Figura 18. Pequeño roce en el estator.

Figura © EASA



Figura 19. Un roce grave, no reparable, a menos que el núcleo sea desmontado y reparado.

Figura © EASA

4.2.7 Inspección interna

Se debe observar y tomar nota acerca de:

- Ingreso de agua o suciedad.
- Estado de los núcleos del estator y rotor, daños o recalentamiento.
- Estado del bobinado - decoloración, tipo de falla.

4.2.7.1 Ingreso de agua o suciedad

La presencia de residuos de polvo, marcas de agua u óxido en las superficies internas, particularmente en el fondo del motor, pueden ser atribuidas al ingreso de agua o polvo, lo que puede haber contribuido a que se presente una falla. No obstante, en máquinas totalmente cerradas (TE) o totalmente cerradas enfriadas con ventilador (TEFC), las marcas de agua o el óxido pueden haber sido provocados por la condensación del aire dentro del motor durante su enfriamiento.

4.2.7.2 Estado de los núcleos del estator y rotor, daños o recalentamiento

Los núcleos del estator y rotor pueden haber sufrido daños debido a numerosas causas, incluyendo las siguientes:

- **Roce en el núcleo**, a menudo, causado por la falla de uno de los rodamientos del motor o por el empuje del rotor debido a una excesiva carga radial. Esto fricciona las láminas de las superficies del entrehierro entre sí y puede causar un aumento de las pérdidas por corrientes parásitas. Dependiendo del alcance de los daños, puede ser que el motor no sea reparable.
- **Daños mecánicos graves** en cualquiera de los núcleos, del estator o del rotor. Algunas veces, las partes del núcleo que faltan o que se encuentran soldadas entre sí, son consecuencia de fallas eléctricas graves como cortocircuitos dentro de las ranuras. Cualquier aplicación que funcione en un sistema sin puesta a tierra o con una puesta a tierra deficiente, está propensa a sufrir este tipo de daños. Si se ha producido un daño similar, debe evaluarse el impacto sobre la eficiencia y el funcionamiento del motor al considerar su reparación (Ver la **figura 20**).
- **Recalentamiento severo** de los núcleos del estator o del rotor. Si el aislamiento inter-laminar se encuentra dañado, se incrementarán las corrientes parásitas, causando excesivas pérdidas en el hierro (Ver la **figura 21**).

Nota: El calentamiento producido varía de forma cuadrática con las pérdidas por corrientes parásitas (P. ej. si las corrientes parásitas son el doble, se produce cuatro veces el calentamiento). Por consiguiente, un pequeño aumento en las pérdidas por corrientes parásitas puede causar un gran efecto sobre la temperatura y eficiencia del motor. Algunas veces, el recalentamiento severo del núcleo es evidente por la decoloración de las superficies del entrehierro, que puede ir desde un color paja claro hasta varios tonos de azul, dependiendo de la temperatura alcanzada.

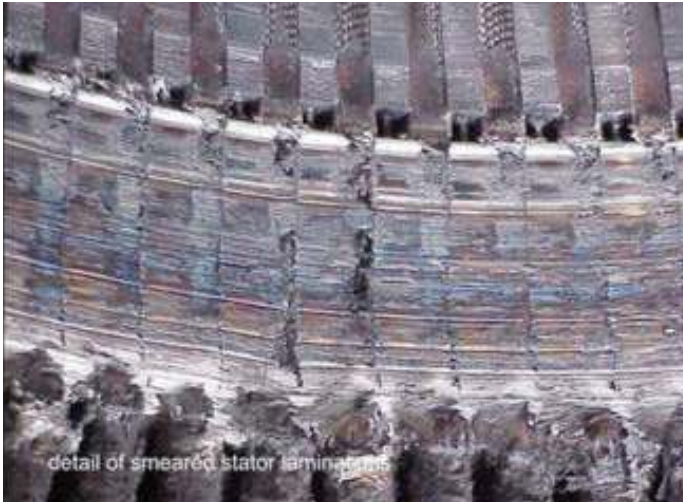


Figura 20. Daño mecánico severo en el diámetro interno del estator; no reparable a menos que el núcleo sea re-apilado o reemplazado.

Figura © EASA



Figura 21. Decoloración general en el devanado del estator que normalmente indica excesiva temperatura. Verifique la carga, la alimentación eléctrica y el sistema de enfriamiento.

Figura © EASA

4.2.7.3 Estado del bobinado – decoloración, tipo de falla

Normalmente, el recalentamiento del bobinado no es una falla irreparable, pero el reparador debe inspeccionar cuidadosamente los devanados para tratar de determinar la causa de la falla.

Una decoloración uniforme en ambos lados del bobinado puede indicar una falla debido a un problema de ventilación, sobrecarga o por una tensión de alimentación baja. Verifique con el cliente las condiciones de carga, pues es posible que la aplicación requiera de un motor de mayor potencia. En este caso, rebobinar el motor dañado dará como consecuencia otra falla por sobrecarga, posiblemente dentro del período de garantía otorgado por el reparador.

La mayoría de las fallas de los bobinados tienen muchas causas posibles y el diagnóstico de estas está fuera del alcance de esta guía. Para estos propósitos, se puede consultar el libro de EASA *Root Cause Failure Analysis*, así como también el catálogo *“Failures in Three-Phase Stator Windings”* Ver 9.3; en ellos se encuentran disponibles excelentes fotografías de los diferentes tipos de fallas de los bobinados.

4.2.8 Daño mecánico de los componentes o señales de uso indebido

Los daños mecánicos pueden afectar el funcionamiento del motor. Por ello, es necesario realizar una inspección en busca de:

- Daños en el ventilador, en su tapa o cubierta de protección.
- Ductos/canales/aletas de enfriamiento dañadas u obstruidas.
- Decoloración en el eje adyacente a cualquiera de los rodamientos (sobrecarga o mal alineamiento).

4.2.9 Motores muy contaminados

Si el exterior está lleno de contaminantes, tienen que llevarse a cabo los procedimientos de limpieza y mantenimiento, o considerar utilizar un motor con un tipo de encerramiento diferente. Si los bobinados están llenos de contaminantes, el tipo de encerramiento puede no ser el adecuado para el ambiente de trabajo del motor.

4.3 Remoción del antiguo bobinado y limpieza del núcleo

Existen cuatro elementos para realizar esta tarea:

- La toma de datos del bobinado en las hojas de datos apropiadas (Ver las **figuras 11 y 12**).
- Realizar las pruebas de pérdidas en el núcleo.
- Realizar la remoción del antiguo bobinado.
- Limpiar el núcleo del estator como preparación para el bobinado.

Aunque sea necesario que la ejecución de remoción del antiguo bobinado y la limpieza del núcleo sea realizada de una forma secuencial, la toma de datos es una actividad coordinada que se hace antes y durante la remoción del bobinado. Igualmente, la prueba de pérdidas en el núcleo es realizada en puntos fijos, durante el proceso.

4.3.1 Toma de datos del bobinado

Es importante tomar nota de forma precisa y permanente de todos los detalles del antiguo bobinado (Ver **figuras 11 y 12**). También es buena idea comparar todos los datos del bobinado con los almacenados a través del tiempo en un banco de datos. Los datos que se deben tomar son los que aparecen más adelante en los puntos clave; las siguientes notas explicativas pueden ser útiles.

Es indispensable rellenar de forma correcta los datos para asegurar que el bobinador pueda duplicar el bobinado y los ingenieros puedan comprobar si los datos tomados son los apropiados.

Nota: Si el motor ha sido anteriormente bobinado, es posible que los datos del devanado no sean los originales y que estos no sean correctos para el motor. Por esto, se debe tratar de verificar los datos tomados con otras fuentes (p. ej. su propio banco de datos, la base de datos de EASA o con el mismo fabricante del motor).

Puntos clave

- Tipo de bobinado (imbricado o excéntrico, concéntrico, capa sencilla, doble capa, triple capa, etc.)
- Número de ranuras
- Número de polos
- Número de fases
- Cantidad, tamaño e identificación de los cables de salida
- Espiras/bobina
- Número de grupos
- Paso
- Conexiones
- Longitud de la cabeza de bobina en lado conexiones
- Longitud de la cabeza de bobina en lado opuesto conexiones
- Cantidad y sección/calibre de los alambres de cada bobina

4.3.2 Prueba de pérdidas en el núcleo

Los probadores de núcleo disponibles en el comercio pueden indicar si durante el proceso del bobinado las pérdidas en el núcleo del estator han aumentado o no. Normalmente, cuando las pérdidas se miden con este tipo de equipos, no es posible lograr los mismos resultados que los que se obtienen durante pruebas con carga del motor.

Una razón para esto, es que la distribución del flujo inducido en el núcleo por la acción del probador no es la misma que la inducida en el devanado del motor, particularmente cuando el rotor se encuentra fuera del estator. Las inexactitudes tienden a empeorar los límites de operación de este tipo de probadores, así que para realizar adecuadamente estas pruebas, se debe trabajar dentro de los rangos de operación recomendados por los fabricantes de estos equipos.

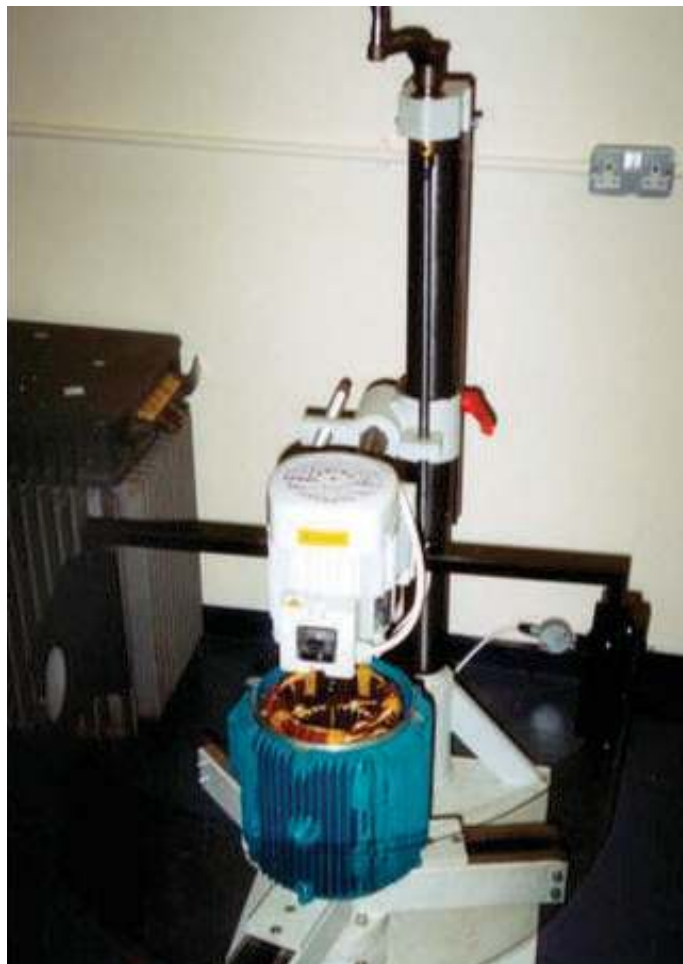


Figura 22. Máquina cortadora de cabezas de bobina.

Figura © EASA

Los resultados obtenidos con los probadores de núcleo pueden ser útiles cuando se usa el mismo equipo con los mismos ajustes para realizar pruebas en un determinado núcleo.

Puntos clave

- Realizar todas las pruebas usando el mismo probador.
- Asegurar que las pruebas se realizan de forma adecuada y dentro de los rangos de operación recomendados por el fabricante del equipo de pruebas que se está usando.
- Realizar pruebas:
 - Antes del quemado.
 - Después de limpiar el núcleo y antes del bobinado.
- Recordar que los resultados obtenidos son para comparar y no corresponden con las pérdidas reales.
- Si las pérdidas en el núcleo aumentan más de un 20%:
 - Asegurarse que los ajustes del probador de núcleos no han sido modificados y repita la prueba.
 - Si la nueva prueba confirma que las pérdidas son elevadas, reparar el núcleo o considerar su reemplazo.

4.3.3 Remoción del antiguo bobinado

4.3.3.1 Paso 1: Cortar las cabezas de las bobinas en un lado (normalmente del lado de las conexiones)

Cortar las cabezas de las bobinas del devanado, lo más cerca posible al estator sin causar daños al núcleo. Para esto existe un buen número de máquinas cortadoras disponibles en el mercado (Ver la **figura 22**). Independiente del método usado para cortar las cabezas de bobina, hay que cuidar no dañar las láminas del núcleo.

4.3.3.2 Paso 2: Retire el antiguo bobinado

El barniz y los aislamientos deben estar deshechos antes de que los bobinados puedan ser retirados del núcleo del estator. Normalmente, para esto se utiliza un horno de quemado con temperatura controlada.

Nota: Si para remover los bobinados fuese necesario aplicar fuerza excesiva o dañar las láminas del núcleo, esto es debido a un proceso de quemado que no fue realizado a la temperatura adecuada. En este caso, lo mejor es realizar de nuevo el ciclo de quemado.

4.3.3.3 Daño del núcleo causado por recalentamiento

Las bobinas deben ser calentadas suficientemente para quemar el aislamiento del antiguo bobinado sin causar daños en el aislamiento inter-laminar. La temperatura requerida depende del tipo de aislamiento del barniz utilizado y generalmente las resinas epóxicas requieren temperaturas más elevadas.

El núcleo del estator está hecho con láminas delgadas de acero aisladas entre sí por un recubrimiento de óxido o con barniz orgánico o inorgánico. Si el núcleo del estator se calienta demasiado, el aislamiento inter-laminar puede dañarse, dando como resultado un incremento en las pérdidas en el hierro reduciendo la eficiencia del motor.

Todos los resultados satisfactorios del estudio realizado por EASA/AEMT fueron obtenidos a una temperatura de quemado de 370 °C (Ver Nota Técnica 16 de EASA, *Guidelines for maintaining motor efficiency during rebuilding*, Ver 9.6)

4.3.3.4 Quemado de los bobinados usando un horno de quemado a temperatura controlada

De los métodos de quemado existentes, este es el que se encuentra más estrictamente controlado. Al realizar el quemado de los bobinados de una forma adecuada, se asegura que el núcleo del estator no sea sometido a temperaturas elevadas y por tal razón sufra daños en su aislamiento inter-laminar. Es importante que **para ajustar la temperatura del horno de quemado se use la temperatura medida en el núcleo del estator**, como también, cumplir con las indicaciones de limpieza y seguridad del fabricante del horno (Ver la **figura 23**).

Precauciones para realizar el quemado de motores

No deben amontonarse los estatores dentro del horno, ya que la temperatura de los estatores situados en la parte superior puede incrementarse debido al efecto del quemado de los que se encuentran debajo.

No deben situarse los estatores con los diámetros del núcleo en posición vertical; esto es especialmente crítico en las carcassas de aluminio.



Figura 23. Horno de quemado con temperatura controlada.
Figura © EASA

4.3.3.5 Remoción del antiguo bobinado

Cuando se finalice el proceso de quemado, hay que retirar el antiguo bobinado teniendo el cuidado de no dañar el núcleo (p. ej. deformando hacia dentro y hacia afuera los dientes del núcleo).

Puntos clave

- Cortar las cabezas de bobina en uno de los lados del estator usando una máquina cortadora de cabezas.
- Quemar los aislamientos del antiguo bobinado a una temperatura adecuada, utilizando un horno de quemado con temperatura controlada y realizando el ajuste, midiendo la temperatura directamente en el núcleo.
- No recalentar el núcleo.
- Remover el bobinado sin dañar el núcleo.
- **Precaución:** Algunos motores pueden tener cables de conexiones que salen por ambos lados de las

4.3.4 Limpieza del núcleo del estator

Puede ser que después de retirar el antiguo bobinado, queden en las ranuras restos de aislamiento y otro tipo de residuos, por lo que estos desechos deben ser limpiados cuidadosamente evitando dañar el núcleo. Si durante el proceso de remoción, los dientes de las láminas al final del núcleo han sido forzados o doblados hacia afuera, se debe restablecer su posición utilizando la mínima fuerza.

4.3.4.1 Métodos para retirar el aislamiento de las ranuras

Existen varios métodos para retirar el aislamiento de las ranuras después de realizar el quemado del núcleo. Los siguientes fueron los métodos utilizados satisfactoriamente durante el estudio realizado por EASA/AEMT:

- Raspado cuidadoso, usando un cuchillo afilado para separar los aislamientos que permanecen adheridos en las ranuras del núcleo.
- Lavado con alta presión, usando una máquina lavadora de alta presión de uso comercial o doméstico.
- Limpieza abrasiva, utilizando materiales medianamente abrasivos como cáscaras de nuez, mazorca triturada o gránulos plásticos. Realizar la limpieza con materiales más abrasivos como arena, piedra triturada, gránulos de cerámica o aún gránulos de vidrio pueden causar cortes en la superficie de las láminas, lo que incrementará las pérdidas en el núcleo y las pérdidas adicionales.
- Con cepillo metálico, usando un cepillo de alambre mediano/ suave.



Figura 24. Este núcleo ha sido parcialmente limpiado con una lavadora de alta presión para remover de la ranura restos de aislamiento.

Figura © EASA

Es indispensable evitar el uso de limas o pulidoras para remover el aislamiento de las ranuras. Esto puede friccionar las láminas entre sí y aumentar las pérdidas por corrientes parásitas cerca de las superficies del entrehierro del núcleo.

4.3.4.2 Dientes dañados al final del núcleo

Algunas veces, después de remover las bobinas, las láminas de los dientes al final del núcleo presentan problemas, por lo que es importante no golpearlos de una forma excesiva para devolverlos a su posición inicial. Debido a esto, se recomienda golpear las láminas con un martillo blando usando el mínimo de fuerza.

4.3.4.3 Daño de las superficies del entrehierro del núcleo

Puede ser que las superficies del entrehierro del estator y/o rotor hayan sufrido daños, y el daño más común se produce cuando las láminas de los núcleos han friccionado entre sí.

Si el área dañada no es muy extensa, el efecto sobre las pérdidas o la eficiencia no debe ser significativo. En casos de daños relativamente menores, golpear axialmente el área afectada mejorará las cosas. (Esto algunas veces es llamado “golpear los dientes del estator”, para eliminar los mini cortes que se originan por un mal desembobinado). Si esto no funciona, puede utilizarse un cuchillo afilado para separar las láminas en el área afectada y después realizar un tratamiento con material aislante a una temperatura adecuada. También es posible filtrar barniz entre las láminas separadas cuando se esté realizando la impregnación del bobinado nuevo, ayudando así a restaurar el aislamiento inter-laminar.

Si el área afectada del núcleo es muy grande, existe un riesgo de que las pérdidas se hayan incrementado de forma considerable y que la eficiencia del motor sea menor. La mejor solución en estos casos es reemplazar el núcleo o desensamblar para re-aislarlo y volver a apilarlo.

Puntos clave en la limpieza del núcleo del estator

Los métodos más adecuados para realizar la limpieza de las ranuras del estator incluyen:

- Raspado cuidadoso utilizando un cuchillo afilado.
- Lavado con alta presión.
- Limpieza con un material medianamente abrasivo.
- Cepillado con un cepillo de alambre medio/ suave.
- Después de limpiar las ranuras:
- Reposicionar los dientes dañados.
- Reparar los daños menores de las superficies de los entrehierros.
- Si ha ocurrido un daño severo, reemplace o re-aisle re-apile los núcleos.

4.4 Rebobinado del motor

El reparador tiene dos opciones para realizar el nuevo bobinado:

- Copiar (duplicar) el bobinado existente en el motor (siempre que este sea el original).
- Escoger otro tipo de bobinado que funcione igual o mejor que el original.

La mayoría de los reparadores tiene la habilidad para rediseñar los bobinados de los motores y hacerlos más eficientes. No obstante, la mayoría de las veces, lo mejor para mantener la eficiencia del motor es duplicar el bobinado original, incrementando tanto como sea posible la sección de los alambres, y manteniendo las cabezas del bobinado lo más

cortas posible (desde luego, no más largas que las originales). No obstante, hay que tener en cuenta que en algunos diseños la longitud de las cabezas del bobinado es crítica para realizar la disipación del calor; si estas cabezas son muy cortas, la temperatura del bobinado puede incrementarse, con el correspondiente aumento de las pérdidas I^2R .

Cuando el volumen de producción justifica los costos, los fabricantes de motores utilizan bobinadoras y máquinas de inserción automáticas para producir motores con **bobinas concéntricas**. A menudo, los reparadores encuentran que los devanados **excéntricos/imbricados** son más fáciles de hacer y más rápidos de instalar. Por lo tanto, esta sección establece las reglas básicas (en los términos para mantener la eficiencia) para solo dos tipos de bobinados:

- Una “copia” (o duplicado) del bobinado.



Figura 25. Bobinado concéntrico típico.
Figura © EASA



Figura 26. Bobinado excéntrico/imbricado típico.
Figura © EASA



Figura 27. Inserción de bobinas en un estator de 2 polos.
Figura © EASA

4.4.1 ¿Es un bobinado original?

Normalmente, solo con ver el bobinado, los técnicos experimentados pueden decir si es original o no. Aun así, generalmente, lo mejor es contrastar los datos tomados del bobinado con la información contenida en el *Motor Rewind Data CD-ROM de EASA, Ver 9.11*). Este recurso está disponible para los miembros de EASA y AEMT y contiene 340,000 datos. En caso de que el centro de servicios cuente con su banco de datos propio, la información contenida en el mismo también puede serle útil.

No obstante, también existen otras evidencias o indicios que pueden ayudar a determinar esto. Por ejemplo, en Norteamérica, los reparadores raramente utilizan bobinados concéntricos. Entonces, a menudo, los reparadores también son más cuidadosos que los fabricantes en la forma que tienen para ordenar los alambres cuando realizan los bobinados en forma de capas. Los centros de servicio también tienden a usar alambres más gruesos y mayor cantidad de amarres y aislamiento entre fases.

Estas diferencias no son una crítica de los bobinados originales y solamente reflejan el hecho de que, con frecuencia, los procesos de bobinado de los fabricantes se encuentran parcialmente o completamente automatizados, mientras que los reparadores bobinan de forma manual. También, muchos de los centros de servicio tratan de prevenir que ocurran en el futuro fallas en los motores que bobinan, mejorando el atado de las bobinas, los sistemas de aislamiento, etc.

4.4.2 Copia (duplicado) del bobinado

Una vez que se tome nota de los datos y los detalles del antiguo bobinado (Ver **Sección 4.3.1**) y se haya verificado que el bobinado es el original, el próximo paso es el de preparar el núcleo para poder realizar el rebobinado. Aunque los datos del paso (o pasos), espiras/bobina la conexión sigan siendo los mismos, se pueden realizar dos cambios que ayudarán a conservar o inclusive mejorar significativamente, la eficiencia del motor una vez que sea rebobinado:

- Recortar las cabezas de las bobinas.
- Aumentar la sección de los alambres de cada bobina.

4.4.2.1 Recorte de las cabezas de las bobinas

Las cabezas de las bobinas están compuestas de cobre “inactivo” que solamente sirve para conectar los conductores “activos” o lados de las bobinas que están dentro de las ranuras. En la mayoría de los bobinados de estator (especialmente los de 2 y 4 polos), el cobre de las cabezas pesa más que el cobre que está dentro de las ranuras y contribuye de forma sustancial con las pérdidas I^2R totales. Por consiguiente, es importante mantener las cabezas de bobina lo más cortas posible. Si la longitud media de la espira (LME) del nuevo bobinado, excede a la original, las pérdidas I^2R aumentarán. Para prevenir esto, deben seguirse estas reglas:



Figura 28. Cabeza de bobina típica de un motor reparado de 4 polos.
Figura © EASA



Figura 29. Cabeza de bobina de un motor original de 4 polos.
Figura © EASA

- Conservar la longitud de las cabezas de bobina dentro de las dimensiones del bobinado original.
- No alargar el aislamiento que sobresale al final de la ranura más de lo necesario, para prevenir que ocurran esfuerzos dentro del espacio de la ranura.

- No alargar las partes rectas de las bobinas más de lo que sea necesario, para que estas queden cubiertas por el aislamiento de la ranura.

Recortar las cabezas de las bobinas disminuirá la cantidad de cobre necesaria para el bobinado y reducirá las pérdidas. No obstante, si las cabezas son muy cortas, puede haber problemas para bobinar el estator o aún más, podría ser imposible realizarlo. En casos extremos, la refrigeración del motor puede verse afectada haciendo que el motor trabaje a mayor temperatura.

Con lo anterior, desde el punto de vista de las pérdidas, al realizar un ajuste cuidadoso de los datos del bobinado y de las dimensiones de las bobinas, es casi posible igualar o mejorar el funcionamiento del motor original. Por esto, es necesario tomar nota de las dimensiones de los datos de los nuevos bobinados.

4.4.2.2 Aumento de la sección de los alambres de cada bobina

A menudo, cuando se bobinan de forma manual motores que originalmente han sido bobinados con máquinas o motores muy antiguos, es posible aumentar la sección de los alambres de cada bobina. Si esto se hace de forma exagerada, se presentan inconvenientes, como el aumento de la cantidad de cobre y del tiempo necesario para el bobinado. Esto también resulta difícil e incluso puede ser impráctico en los motores de alta eficiencia (EPAct, EFF1 o de eficiencia Premium). Cuando sea práctico, el aumentar la sección de los alambres de cada bobina ayuda a reducir las pérdidas I^2R y a conservar (o mejorar) la eficiencia del motor después de la reparación.

La experiencia dictará cuánta sección de cobre puede aumentarse. El mejor método es cambiar los tamaños/calibres de los alambres de cada bobina, teniendo en cuenta el llenado de la ranura (p. ej. la sección del cobre en cada ranura/área de la ranura); si es menor, se puede incrementar el cobre usando alambres más gruesos, pero también hay que tener en cuenta que esto aumenta la dificultad para realizar el bobinado. Se tiene que tomar nota del tamaño/calibre de los alambres usados para el nuevo bobinado.

Puntos clave para copiar el bobinado

- Verificar que el antiguo bobinado es original.
- Usar la misma configuración del bobinado.
- Mantener la longitud de las cabezas de bobina tan cortas como sea práctico.
- Utilizar bobinas con cabezas de la misma longitud (preferiblemente menor).
- Usar el mismo paso (o pasos).
- Utilizar las mismas espiras/bobina.
- Usar alambres con la misma sección (preferiblemente aumentar la sección total transversal de la espira).
- Utilizar bobinas de igual LME o más cortas.
- Verificar que la resistencia (corregida por temperatura) del nuevo bobinado es igual o menor a la del antiguo bobinado.

4.4.3 Conversión a un bobinado de doble capa

Dado que todas las bobinas son iguales, a menudo los reparadores prefieren utilizar bobinados excéntricos/imbricados. Esto es aceptable, si el nuevo bobinado tiene el mismo flujo por polo que el del devanado original.

Algunas veces, los bobinados de ranura llena (una sola capa) se usan en motores pequeños y medianos debido a su facilidad de bobinado y a que no se requieren aislamientos/separadores entre fases. Esto permite contar con más espacio para alojar cobre.

Los bobinados de doble capa distribuyen mejor el flujo a través del núcleo que los bobinados de ranura llena. Reemplazar un bobinado original de media ranura (doble capa) por uno de ranura llena no es recomendable, ya que es seguro que esto reducirá la eficiencia del motor.

El paso de los bobinados de media ranura debe ser recortado de forma adecuada (p. ej. el paso del bobinado debe ser menor que el paso polar, a menos que se trate de un bobinado de una bobina por grupo). Para obtener mayor información y más detalles sobre el rediseño de bobinados, ver los Apéndices 1 y 2, así como también consultar el *Programa de Verificación y Rediseño de Motores de Corriente Alterna de EASA*.

Ventajas

- **La eficiencia se puede conservar o mejorar. Los bobinados de media ranura producen mejores resultados.**
- Las espiras de las bobinas pueden ser fabricadas con una longitud media (LME) menor o igual a las del devanado original.
- Todas las bobinas son iguales.
- Todas las bobinas están expuestas al mismo flujo de aire de refrigeración.
- La curva de la fuerza magneto – motriz (FMM) se acerca más a una onda sinusoidal.
- Es más probable que los aislamientos entre fases y el atado de las bobinas sean instalados/realizados de una forma más uniforme.

Desventajas

Ninguna, asumiendo que la conversión ha sido realizada correctamente.

Para más información, ver el *Programa de Verificación y Rediseño de Motores de Corriente Alterna de EASA*.

4.4.3.1 Flujo, torque (par) y reglas de bobinado

Las siguientes reglas son importantes cuando se realiza un cambio en la configuración de un bobinado.

En un motor de inducción, el torque (par) es proporcional al producto del flujo por la corriente. Ambos pueden verse afectados durante el bobinado o la conversión del bobinado.

Al voltaje aplicado en cada fase del motor, se le opone una fuerza contra electromotriz (voltaje inducido en una bobina cuando los conductores se mueven o son cortados por las líneas de flujo), con magnitud casi igual a la de la tensión aplicada. La fuerza contra electromotriz se expresa con la fórmula:

$$E = 4.44 \times f \times N \times \Phi \times K_d \times K_p$$

Donde:

- E** = fuerza contra electromotriz por fase
- f** = frecuencia
- N** = número de espiras en serie por fase
- Φ** = flujo magnético por polo
- K_d** = factor de distribución del bobinado
- K_p** = factor de paso del bobinado

Para efectos del bobinado (salvo en aquellos que vayan a funcionar a una tensión y frecuencia diferentes), E y f son constantes. Esto deja tres variables bajo el control del reparador:

- N** - número de espiras en serie por fase
- K_d** - factor de distribución del bobinado
- K_p** - factor de paso de cuerda del bobinado (factor de paso)

Para que la ecuación anterior se cumpla, el resultado de multiplicar estas variables debe permanecer constante y esto da lugar a las siguientes **reglas para la configuración del bobinado**:

- Aumentar las espiras, el factor de cuerda o el factor de distribución reducen el flujo.
- Reducir las espiras, el factor de cuerda o el factor de distribución incrementan el flujo.
- El flujo por polo permanecerá constante si el resultado de multiplicar el factor de cuerda por el factor de distribución y por las espiras, permanece constante.

Para conservar las características de funcionamiento del motor, tanto el torque (par) como la eficiencia, el flujo por polo debe permanecer constante.

La efectividad de un bobinado, en términos de optimizar las características de funcionamiento del motor (incluyendo la eficiencia), dependen del tipo de bobinado y su diseño, los dos requieren valores óptimos de K_p y K_d , que permitan maximizar las FEMs fundamentales de cada bobina y minimizar las FEMs debidas a los armónicos.

Aunque el tema es complejo, este se encuentra fuera del alcance de esta guía, aunque existen algunas reglas básicas que permiten ayudar al personal del centro de servicios:

- Con los bobinados de doble capa (dos bobinas por ranura) se obtienen mejores resultados que con los bobinados de una sola capa.

- Algunas configuraciones o diseños usados para el ensamble de las bobinas (especialmente aquellas en las que se saltan ranuras), dan peores resultados que los bobinados convencionales o los realizados por polos consecuentes.
- Las FEMs debidas a los armónicos de las bobinas fabricadas con paso completo (paso polar), son mayores que las producidas por las bobinas con paso acortado o con pasos alargados.
- En general, los devanados excéntricos/imbricados de doble capa y con paso acortado, producen mejores resultados. Los bobinados de una sola capa, excéntricos/imbricados y con paso acortado, se utilizan en máquinas pequeñas y medianas, pero nunca deben ser utilizados para sustituir bobinados de doble capa.

4.4.4 Finalización de los trabajos de bobinado

Después de insertar totalmente el bobinado, se conectan las bobinas y los cables de forma que concuerden exactamente con el esquema original de conexiones (si es una copia o duplicado del bobinado), o se realizan las conexiones de forma apropiada, si se trata de un bobinado sustituto tipo excéntrico/imbricado. Hay que usar cables de salida que sean tan largos como prácticos y márkuelos de forma correcta. Deben realizarse las soldaduras de los principios y finales de cada bobina de igual forma o mejor, de cómo lo hizo el fabricante original (p. ej. más rígidas).

Finalmente, después de revisar las cabezas de bobina, deben realizarse al bobinado pruebas de resistencia, resistencia de aislamiento, equilibrio de fases y rigidez dieléctrica o Hipot como se describe a continuación en la sección 4.4.5.3.

4.4.5 Pruebas del bobinado

Se deben realizar las pruebas de resistencia y equilibrio de fases en el bobinado.

4.4.5.1 Prueba de resistencia

Se debe medir la resistencia del primer grupo de bobinas del nuevo bobinado y compararla con la resistencia calculada. Es posible medir la resistencia de un grupo de bobinas del bobinado original para realizar una comparación posterior.

Con el bobinado a temperatura ambiente, se mide la temperatura ambiente (T_a). Se tienen que corregir ambos valores de resistencia a una temperatura común de referencia (normalmente 25 °C) usando la siguiente fórmula:

$$R_x = (234.5 + 25) / (234.5 + T_a) \times \text{Resistencia medida}$$

Donde:

R_x = resistencia corregida del grupo de bobinas.

T_a = temperatura ambiente.

Nota: En caso de no estar a temperatura ambiente (25 °C), medir

Los valores corregidos de la resistencia del nuevo grupo de bobinas deben ser iguales o menores a las del grupo original de bobinas.

Cuando el estator se encuentre totalmente bobinado se debe medir y registrar la resistencia de cada fase (o entre cables), como también la temperatura ambiente.

La desviación de las medidas de resistencia de cada uno de ellos debe estar dentro del 5 % (Ver la **figura 30**).



Figura 30. Medición de la resistencia de un grupo de bobinas. Note que los cables del equipo se encuentran conectados de forma segura a los alambres desnudos; también note el termómetro para medir la temperatura ambiente.

Figura © EASA

4.4.5.2 Prueba de equilibrio de fases (o prueba de impulso)

La prueba de onda de choque o por comparación de impulsos detecta un desbalance en los devanados, debido a un corto entre espiras o a conexiones desbalanceadas (que darán como resultado circulación de corrientes). Cualquiera de estos problemas aumentará las pérdidas I^2R .

Se realiza la prueba después del rebobinado, pero antes del barnizado. Esta prueba asegura que las tres fases se encuentran bobinadas y conectadas de la misma forma. La prueba consiste en aplicar pulsos idénticos simultáneos a dos de las fases del bobinado, registrando la caída de tensión en un osciloscopio de doble trazo (comparando las inductancias de ambas fases). Dos formas de onda iguales en cada fase, indican la misma atenuación y por consiguiente que las fases son idénticas. Formas de onda diferentes indican una falla que deberá ser corregida posteriormente.

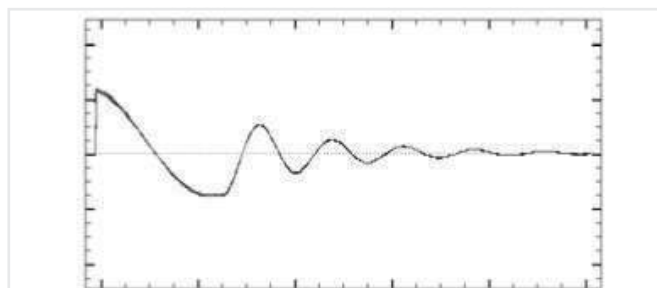


Figura 31. Forma de onda correcta durante la prueba de equilibrio de fases/onda de choque.

Figura © EASA

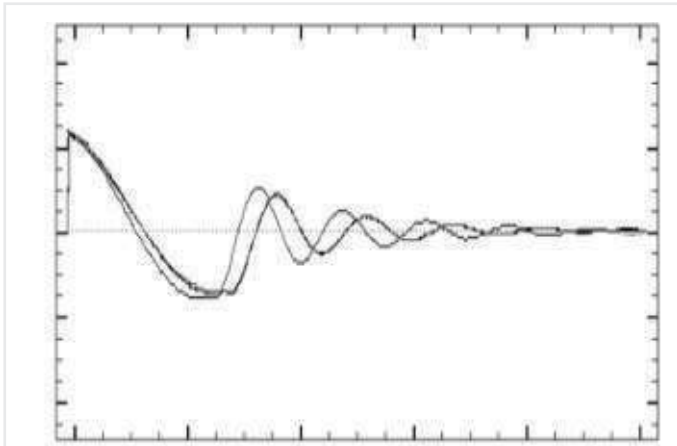


Figura 32. Forma de onda incorrecta que indica fallo durante la prueba de equilibrio de fases/onda de choque.

Figura © EASA

Puntos clave

- Hacer la prueba a bobinados conectados (estrella/delta) y antes de realizar su impregnación.
- Con la prueba, se compara la atenuación de dos pulsos idénticos aplicados simultáneamente a dos de las fases del bobinado.
- Las formas de onda indican si existen fases idénticas (hay aceptación – trazos idénticos) o fases diferentes (existe falla- las ondas no coinciden entre sí).
- Los patrones de las formas de onda indican el tipo de falla (Ver la guía suministrada por el fabricante del equipo).

4.4.5.3 Prueba a tierra/prueba de hipot

Las tensiones utilizadas para realizar esta prueba en bobinados con tensiones nominales mayores a 250 V y con potencias nominales mayores a 0.5 hp (0.3 kW) son:

- Prueba de hipot con corriente alterna: 1000 V + 2 veces la tensión nominal (mínimo 2000 V según IEC).
- Prueba de hipot con corriente continua: 1.7 veces la tensión de prueba de corriente alterna.

La tensión aplicada durante la prueba de hipot tiene como objeto someter el bobinado a un esfuerzo y esta prueba no deberá repetirse.

En caso de que se requiera una prueba de hipot adicional, esta deberá ser realizada al 85 % del valor de las tensiones de prueba indicadas anteriormente. Las pruebas subsiguientes no deberán exceder al 65 % de las tensiones de prueba antes mencionadas.

Nota: Para devanados antiguos, debe limitarse la tensión de prueba al 60 % de los valores anteriormente descritos.

4.4.6 Impregnación

La impregnación del bobinado con barniz y su posterior secado al aire o en el horno, hasta que sea curado, sirve para varios propósitos:

- Proporcionar adherencia mecánica entre los conductores.
- Incrementar el nivel dieléctrico del aislamiento.
- Proteger el bobinado contra contaminación y humedad.
- Rellenar los espacios o huecos de aire existentes entre los alambres del bobinado (particularmente en las ranuras).

Esta última propiedad es importante en términos de la eficiencia del motor, ya que permite que el calor generado en los alambres del bobinado sea más fácilmente transferido al núcleo y a la carcasa del estator y así conservar más baja la temperatura del bobinado. El proceso de impregnación debe ser controlado cuidadosamente para minimizar los huecos de aire y maximizar el llenado de la ranura. Una impregnación pobre puede dar como resultado el incremento de las temperaturas del bobinado y por consiguiente una resistencia elevada y una eficiencia menor.

Baja temperatura del bobinado = resistencia baja
= menores pérdidas I^2R

4.4.6.1 Tipos de barnices y clasificaciones

Los barnices aislantes se clasifican de acuerdo con su capacidad para soportar las temperaturas durante mucho tiempo y por el tipo de material con que son fabricados. La **Tabla 4** ilustra la capacidad para soportar temperaturas.

TABLA 4. CAPACIDAD PARA SOPORTAR TEMPERATURAS

Clase de aislamiento	Temperatura máxima soportada (IEC 60034-1; 1998)		Temperatura máxima soportada (NEMA MG1-12.43)	
A	105°C	221°F	105°C	221°F
E	120°C	248°F		
B	130°C	266°F	130°C	266°F
F	155°C	311°F	155°C	311°F
H	180°C	356°F	180°C	356°F
C	>180°C	356°F		

Tabla © EASA

La mayoría de los barnices modernos son Clase F o H. Para compensar los efectos de los puntos calientes y las condiciones inusuales de carga, es importante utilizar barnices al menos Clase F, aun si el motor tiene una clase de aislamiento inferior (p. ej. Clase B).

Dependiendo del tipo de impregnación utilizada, la meta es lograr que el llenado de los espacios o huecos de aire existentes entre los alambres del bobinado sea lo más completo posible. No obstante, hay que limpiar el exceso de barniz en el núcleo antes de situar el estator dentro del horno de secado.

4.5 Reparaciones mecánicas que pueden afectar la eficiencia

4.5.1 Reparación de los núcleos

a) Estator

- Esmerilados que causan daños en las superficies del núcleo.
- Esmerilado excesivo del núcleo.
- Uso de fuerza desmedida para reparar los dientes deformados.
- Reducción del número de láminas del núcleo.
- Reapilamiento incorrecto.

b) Rotor

- Esmerilado de su superficie.
- Mecanizado del rotor con una herramienta sin filo o a una velocidad superficial incorrecta (p. ej. fricción de las láminas entre sí).
- Entrehierro excesivo.
- Realización de un diagnóstico equivocado de fallas o realizar reparaciones de las barras rotas o anillos de la jaula.

4.5.2 Reparaciones del eje

- Fallas al mecanizar los ajustes de los asientos de los rodamientos.
- Fabricación de un eje nuevo con materiales que tienen propiedades magnéticas diferentes.

4.5.3 Reparaciones de los alojamientos

- Reparaciones de las superficies de ajuste o encaje de la carcasa con las tapas o de los anillos de ajuste de las tapas con la carcasa, que presenten errores de concentricidad.
- Errores al mecanizar los ajustes correctos en alojamientos de rodamientos que han sido reconstruidos.
- Instalación de una nueva carcasa que tenga demasiado ajuste de interferencia con el núcleo del estator (incrementa las pérdidas rotacionales en el núcleo). La norma empírica dice que el ajuste de apriete debe estar entre 0.10-0.15 mm (0.004 y 0.006 pulgadas). Para mayor referencia, ver la EASA Standard AR100-2015, Ver 9.4). Si hay poco ajuste, se anula la transferencia de calor con el núcleo y las pérdidas del devanado del estator se elevarán.
- Errores al limpiar los conductos de aire o ductos de ventilación obstruidos.
- Errores al reparar o reemplazar las aletas de refrigeración rotas o faltantes.

4.5.4 Rodamientos y sellos

- Mala selección de los rodamientos.
- Mala instalación de los rodamientos.
- Problemas al lubricar los rodamientos (grasa equivocada, mezcla de grasas o usar mucha grasa).
- Instalación de un tipo de sello incorrecto.
- Ajuste incorrecto de los sellos.

4.5.5 Ventiladores y cubiertas de protección

- Instalación de un ventilador inadecuado o instalar el ventilador o la cubierta/tapa de protección en la posición incorrecta (la distancia entre el ventilador y la cubierta/tapa de protección no es la apropiada).
- No reemplazo de un ventilador dañado (p. ej. que le falten aletas o que estén rotas).
- Instalación de una tapa/cubierta de ventilador inadecuada.
- No asegurarse que la entrada al ventilador está libre de polvo u otro material que puede reducir el flujo de aire.

4.6 Ensamble del motor

Ciertos pasos del proceso de ensamble pueden causar impacto sobre la eficiencia al probar el motor.

- **Lubricación de los rodamientos.** Durante este paso crítico, lo más importante es determinar la cantidad de grasa a utilizar para llenar la cavidad del rodamiento. El estudio realizado por EASA/AEMT determinó que el exceso de grasa puede incrementar las pérdidas por fricción en el orden de 500 Watts. El motor debe funcionar 8 horas o más para purgar la cantidad de grasa necesaria para reducir estas pérdidas. Todos, tanto el diseño de la cavidad, las tolerancias de montaje con el eje y la viscosidad de la grasa, afectan la capacidad del motor para purgar la grasa. Por lo tanto, no es posible predecir el tiempo requerido por un determinado motor para normalizar las pérdidas por fricción.
- **Arandelas de presión/onduladas.** Durante el proceso de ensamble, particularmente en los casos en los que el rodamiento se encuentra muy ajustado dentro del alojamiento, el rodamiento podría pre-cargarse, incrementando así las pérdidas por fricción hasta que el motor haya alcanzado su ciclo térmico varias veces. Hacer funcionar el motor sin carga durante largos períodos no dará solución a esta condición, ya que la expansión térmica del eje es mínima, hasta que el motor alcance la temperatura aproximada de operación a plena carga. Por esto, es necesario asegurarse que la arandela de presión se encuentra correctamente instalada.
- **Ventiladores y deflectores (tolva) de aire.** La posición de montaje de los ventiladores externos (en los motores TEFC/IP 54, IP 55), puede afectar la efectividad de la refrigeración y, por consiguiente, la resistencia del bobinado. En los motores ODP (IP 11, IP12), es también probable que las posiciones relativas de las aletas de ventilación del rotor y de los deflectores de aire afecten la temperatura del bobinado. El no realizar el montaje de los deflectores de aire puede provocar efectos significativos sobre el sistema de enfriamiento. Por supuesto, los ventiladores de diseño unidireccional deben ser montados adecuadamente teniendo en cuenta la dirección de rotación del motor.
- **Manipulación.** Los daños físicos provocados en las superficies de los entrehierros del rotor y del estator pueden incrementar las pérdidas adicionales con carga y una manipulación brusca del motor puede dañar las superficies de los entrehierros, lo que puede elevar las respectivas pérdidas en el núcleo.

- **Pintura.** Finalmente, se tiene que verificar que, al pintar el motor, los orificios de ventilación no quedan obstruidos. No obstante, este es un punto de poca importancia, dado que particularmente esto solo es posible cuando se instalan rejillas anti roedores en los orificios.

4.7 Consejos de reparación

Para la comodidad del personal del centro de servicio, la mayoría de la información contenida en esta sección ha sido extraída de otras partes de esta guía. El material referente a “Verificación de la confiabilidad de la reparación” resulta especialmente beneficioso cuando las circunstancias no permiten realizar un procedimiento de pruebas más completo.

4.7.1 Pérdidas del motor y eficiencia

Es importante entender por qué algunos procesos de reparación pueden afectar la eficiencia de un motor y cómo las buenas prácticas la pueden conservar o aun mejorar. Aunque, lo primero es que sirve de ayuda recordar que la eficiencia es la medida de la cantidad de energía de entrada (electricidad) que el motor convierte en trabajo útil vs. la cantidad de energía que desperdicia (en calor). La energía desperdiciada, mucha de ella en forma de calor (llamada pérdidas), tiene varios componentes: pérdidas en el bobinado del estator, pérdidas en el núcleo del estator, pérdidas en el rotor, pérdidas adicionales

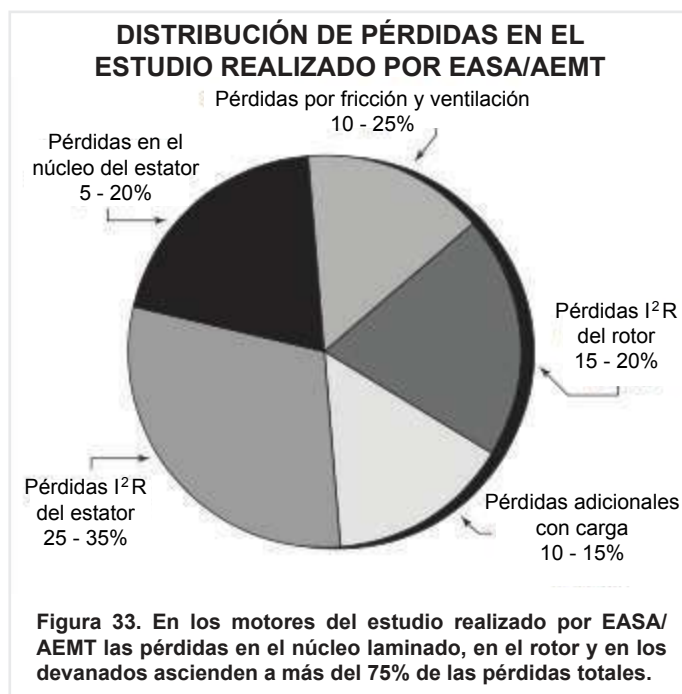


Figura © EASA

4.7.2 Pérdidas: Menos calor significa mayor eficiencia

En el diseño de los motores de alta eficiencia, los fabricantes tratan de reducir las pérdidas (energía desperdiciada en forma de calor). Por consiguiente, su objetivo es el de producir un motor que opere con un mínimo incremento de temperatura.

Para lograrlo, los fabricantes se concentran en las zonas del motor donde la potencia se pierde en forma de calor, fricción o ventilación. Por ejemplo, para reducir las pérdidas en el núcleo, los fabricantes diseñan estatores con núcleos de mayor longitud, con sus correspondientes rotores más largos, o usan núcleos con láminas fabricadas con aceros eléctricos de un mejor grado. Para reducir las pérdidas en el cobre, los fabricantes también aumentan la sección de los alambres del bobinado (lo que incrementa el llenado de la ranura).

Estos cambios ayudan a bajar la temperatura de los bobinados, lo que permite utilizar ventiladores más pequeños. Esto posibilita aumentar la eficiencia del motor minimizando la potencia empleada para su refrigeración. Como ejemplo, se tiene que, para realizar su trabajo, la mayoría de los ventiladores externos de los motores de alta eficiencia totalmente cerrados enfriados con ventilador (TEFC), ahora son lo más pequeños posible.

La lección para los centros de servicios es que utilizar estas prácticas de reparación no incrementará las pérdidas totales, pero sí ayudará a reducirlas. En algunos casos, los reparadores pueden aplicar los mismos principios utilizados por los diseñadores de los motores para reducir las pérdidas y aumentar la eficiencia.

4.7.3 Desglose: áreas críticas

Hablando en términos de conservar o mejorar la eficiencia del motor, algunos procesos de reparación tienen una importancia crítica. Estos incluyen: El proceso de quemado, la remoción de las bobinas y la preparación del núcleo, tamaño/calibre del alambre, longitud media de la espira, la resistencia del bobinado, los rodamientos y la ventilación.

4.7.3.1 Proceso de quemado

Para reducir las corrientes parásitas en el núcleo, el estator está fabricado con láminas -piezas delgadas de acero-impregnadas con aislamiento. Asumiendo que no hay láminas fundidas entre sí o que no se haya producido una explosión dentro del núcleo (con su correspondiente reducción de masa), el siguiente paso es el realizar el quemado de los bobinados a una temperatura apropiada.

El aislamiento inter-laminar puede ser del tipo orgánico, químico o por oxidación. En los motores modernos, es posible encontrar aislamiento inter-laminar tipo C-5 (inorgánico), que puede soportar temperaturas más altas que los motores antiguos.

Dado que los materiales del aislamiento de los bobinados se deshacen a temperaturas más bajas que el aislamiento inter-laminar, un proceso de quemado -bien realizado- no causará daños en el aislamiento inter-laminar del núcleo. La *Nota Técnica 16 de EASA (Ver 9.6)* recomienda que la temperatura de quemado del núcleo no exceda de 370 °C, a no ser que se sepa de antemano que el núcleo tiene aislamiento inter-laminar del tipo C-5 (inorgánico). En ese caso, la temperatura de quemado del núcleo no debe estar por arriba de 400 °C. Todos los resultados óptimos obtenidos en el estudio realizado por EASA/AEMT, fueron logrados utilizando una temperatura de quemado (medida en el núcleo) de 370 °C.

de quemado del núcleo no debe estar por arriba de 400 °C. Todos los resultados óptimos obtenidos en el estudio realizado por EASA/AEMT, fueron logrados utilizando una temperatura de quemado (medida en el núcleo) de 370 °C.

En algunos procesos utilizados para aplicar aislamiento inter-laminar en los núcleos fabricados con aceros de grado bajo, es posible que las láminas del núcleo no sean aptas para ser quemadas y se requiera tomar precauciones extremas. Estos procesos pueden incluir: coloración por vapor de óxido, algunos barnices a base de agua y algunos barnices orgánicos de bajo grado.

El horno de quemado debe estar equipado con un registrador para documentar que el proceso de quemado de cada estator es realizado a una temperatura segura. Durante el proceso de quemado, la sonda de medición de temperatura debe permanecer fija al núcleo del estator.

Precauciones al situar los motores dentro del horno de quemado

No se deben amontonar los estatores dentro del horno, ya que la temperatura de los estatores ubicados en la parte superior puede incrementarse debido al efecto del quemado de los que están debajo de ellos. Tampoco deben situarse los estatores con los diámetros del núcleo en posición vertical; esto es especialmente crítico para las carcasas de aluminio.

4.7.3.2 Prueba del núcleo

La forma más segura de evitar problemas relacionados con el quemado del núcleo, es realizando una prueba antes del quemado y otra después de que el núcleo haya sido desmantelado y limpiado. Para simplificar este proceso, se pueden usar probadores de núcleo de uso comercial o realizar una prueba de inducción (*loop test*) o de "toroide", utilizando el procedimiento descrito en el Manual Técnico de EASA, (Para mayor información Ver la sección 3.2.) o la nota técnica 16 de EASA (Ver. 9.6)

4.7.3.3 Remoción de las bobinas

Desmantelar los devanados afecta directamente la eficiencia del motor. Si durante el proceso de extracción del bobinado, se causan daños en las láminas del estator (p. ej. dientes doblados hacia fuera y hacia dentro, láminas externas torcidas debido a excesiva fuerza o mucho calor, etc.), las pérdidas en el núcleo y las pérdidas adicionales con carga aumentarán. Para evitar esto, realice el quemado del núcleo a una temperatura que permita deshacer completamente el aislamiento del bobinado, de esta forma las bobinas podrán ser retiradas sin necesidad de aplicar mucha fuerza.

Para evitar que durante la remoción de las bobinas los alambres se enganchen y que las láminas del núcleo se doblen o tuerzan, tire de las bobinas lejos del diámetro interior del estator y utilizando un ángulo muy pequeño. En los casos

en que la bobina sea de difícil remoción, aplique presión uniforme para reducir la posibilidad de causar daños debido a la elongación del diente. (*Recordar: dientes separados o sueltos incrementan las pérdidas adicionales con carga*).

A menudo, el quemado del núcleo a temperaturas muy bajas eleva las pérdidas adicionales con carga debido al daño físico causado al núcleo durante la remoción de las bobinas. Para evitar esto realice el quemado del estator a una temperatura adecuada. Asimismo, el uso de temperaturas de quemado seguras no causa daños en el aislamiento inter-laminar y por ende las pérdidas por corrientes parásitas no se incrementan.

4.7.3.4 Preparación del núcleo

Durante la reparación de las zonas dañadas del núcleo, realizar los mínimos trabajos de limado o esmerilado. Las pérdidas en el núcleo aumentarán al quitar láminas o al cortocircuitarlas. A menos que sean reparados, los daños graves causados en el núcleo debido a las fallas presentadas en el motor (p. ej. rozamiento con el rotor por la falla de un rodamiento) harán bajar la eficiencia. Esto debe ser cuidadosamente evaluado contra la necesidad que tiene el cliente de poner de nuevo el motor en servicio, ya que, en algunos casos, la reparación es la solución provisional hasta que se cuente con un motor de repuesto.

4.7.3.5 Tamaño/Calibre del alambre

Cuando una corriente atraviesa un conductor se producen pérdidas I^2R en forma de calor. Para una determinada corriente, un conductor más grueso se calentará menos que uno más delgado. El área/sección de los alambres en paralelo determina la cantidad de cobre del motor. Tomando como base la densidad de corriente, expresada en amperes por mm², entre menor sea la densidad de corriente, tendremos menos pérdidas I^2R . Cuando sea posible, lo mejor es formar un conductor con pocos alambres gruesos y no con muchos alambres delgados, aun si los dos conductores tienen la misma sección.

4.7.3.6 Longitud media de la espira (LME)

Es importante que la LME del nuevo bobinado no exceda (preferiblemente sea menor) a la LME del antiguo bobinado. De otra forma, el nuevo bobinado tendrá una resistencia más alta que el original y por consiguiente las pérdidas I^2R serán más altas. (Ver la **figura 5**)

4.7.3.7 Resistencia del bobinado

A menudo, haciendo un ajuste cuidadoso de los datos del bobinado, es posible obtener un bobinado con *resistencia menor* a la original. Las resistencias más bajas reducen las pérdidas I^2R , haciendo más eficiente el motor. Si todo lo demás se mantiene igual, un bobinado cuyos datos han sido cuidadosamente ajustados, puede ser más eficiente que uno original. Como regla general, el centro de servicios bobina el

estator realizando una copia exacta o un duplicado del antiguo bobinado. Esto significa que usa los mismos calibres de alambres, el mismo tipo de bobinado, la misma cantidad de espiras, el mismo paso y conserva la misma longitud en las cabezas de bobina.

Se debe tener cuidado de no incrementar la longitud de las cabezas de bobina para facilitar la instalación del bobinado ya que eso aumentará la resistencia total del bobinado.

Cuando la eficiencia sea lo primordial, no deben convertirse bobinados concéntricos en excéntricos/imbricados, sin antes calcular la LME de ambos bobinados y teniendo en cuenta que la resistencia total sea menor.

Cuando se comparen bobinados concéntricos y excéntricos/imbricados, debe tenerse en cuenta la forma en la que cada bobina está expuesta a las corrientes de aire que enfrían el devanado. En los bobinados excéntricos/imbricados, cada una de las bobinas está expuesta al mismo flujo de aire, mientras que la capacidad de disipación de calor en los bobinados concéntricos por capas es variable.



Figura 34. "Bobinado excéntrico o imbricado con "Bobinas enterradas".

Figura © EASA

Lo mejor es evitar las "bobinas enterradas", ya que la vida del aislamiento tiende a acortarse y algunas veces la impregnación del barniz es pobre (Ver la **figura 34**). Este inconveniente se puede presentar en la capa central de los bobinados concéntricos de triple capa. Por tanto, cuando se copie este mismo tipo de bobinados, hay que insertar las bobinas de la misma manera como si fuese un bobinado excéntrico/imbricado, para así equilibrar efectivamente la refrigeración.

TÍPICO GRUPO DE UN BOBINADO CONCÉNTRICO

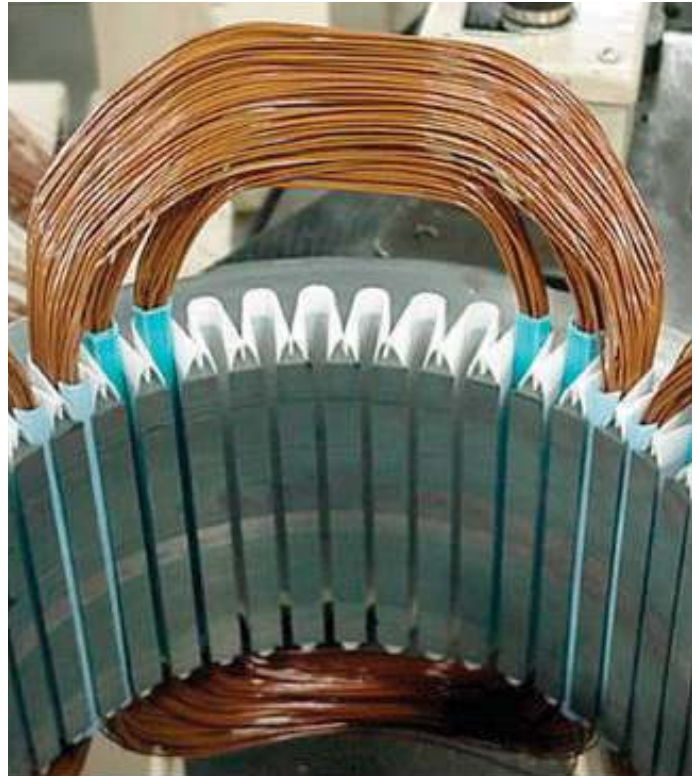


Figura 35. En los bobinados concéntricos las bobinas tienen pasos diferentes. La efectividad de cada bobina no es la misma, dado que cada paso tiene un factor de cuerda distinto.

Figura © EASA

TÍPICO GRUPO DE UN BOBINADO EXCÉNTRICO/IMBRICADO



Figura 36. Bobinado excéntrico/imbricado con todas las bobinas fabricadas con un mismo paso.

Figura © EASA

4.7.3.8 Tipo de bobinado

Asumiendo que no hay daños en el rotor y que los circular amper/mm² no se han reducido, la potencial eficiencia del motor debe permanecer constante durante el proceso de reparación. Por tanto, la siguiente consideración es el tipo de bobinado.

Cuando el volumen de producción y el aspecto económico lo justifican, los fabricantes prefieren los bobinados concéntricos (Ver la **figura 35**), que requieren menos mano de obra y pueden ser realizados de forma automática. Esto beneficia a los consumidores, ya que el precio de los motores se mantiene económico. El inconveniente es que las espiras en cada bobina de los bobinados concéntricos no tienen la misma efectividad.

Los centros de servicio, que generalmente bobinan de forma manual, encuentran más fácil utilizar bobinados excéntricos/imbricados debido a que todas sus bobinas son iguales. (El bobinador utiliza sólo un poco más de tiempo que el necesario para insertar manualmente un bobinado concéntrico de dos capas y casi el mismo tiempo para un bobinado concéntrico de tres capas)

Mediante el uso de algunas reglas simples, es posible remplazar un bobinado concéntrico por uno excéntrico/imbricado (y esto puede aún mejorar el funcionamiento del motor). Esto se explica en la Sección 4.3.

Nota: Como ya se mencionó anteriormente, cuando la eficiencia sea el aspecto primordial, no deben convertirse bobinados concéntricos en excéntricos/imbricados sin calcular primero la longitud media de la espira [LME] de ambos bobinados y teniendo en cuenta que siempre la resistencia total del bobinado será menor.

Visto desde la parte exterior de las ranuras, un bobinado concéntrico puede tener bobinas con 2, 3 o pasos diferentes (algunas veces más). Cada paso tiene un ángulo distinto (expresado como *Factor de Cuerda*), que determina la efectividad de las espiras de cada bobina. Dependiendo del factor de cuerda, una bobina con X espiras y paso 1-9 no tendrá la misma fuerza que la misma bobina de X espiras, fabricada con paso 1-8 o 1-10.

El cálculo del factor de cuerda (k_p) se hace con la fórmula:

$$k_p = \text{Seno} (90 \times \text{dientes expandidos/ranuras por polo}) \text{ o } \\ k_p = \text{Coseno} [((\text{paso polar} - \text{paso de bobina}) \times 90) / \text{paso polar}]$$

El siguiente ejemplo ayuda a ilustrar el punto anteriormente descrito. Para algunos diseños de bobinados concéntricos, su conversión a excéntrico/imbricado ofrece mayores mejoramientos sustanciales que para otros diseños.

Ejemplo: Conversión Concéntrico a Excéntrico/Imbricado

Una posible conversión a bobinado excéntrico/imbricado de un diseño típico de un bobinado concéntrico, 36 ranuras, 24 espiras, 4 polos con paso 1-8, 10, 12 (como el de la **figura 35**), sería:

Para 24 espiras por bobina. Paso 1-8, 10, 12 el cálculo de los respectivos factores de cuerda es 0.940, 1.0 y 0.940.

$24 (.940) + 24 (1.0) + 24 (0.940) = 69.12$ espiras efectivas
Si seleccionamos un paso 1-9 para la conversión a excéntrico/imbricado:

$69.12/3 = 23.04$ espiras efectivas por bobina.

Las nuevas espiras por bobina se calculan dividiendo las espiras efectivas por bobina por ($k_p \times k_d$)

$23.04 / (.985 \times 0.960) = 24.37$ espiras por bobina

Redondeando a 24 espiras obtendremos un incremento del flujo del 1 %.

Nota: Cuando un bobinado concéntrico tiene un solo lado de bobina por ranura y el bobinado imbricado que lo reemplaza tiene dos lados de bobina por ranura, divide las espiras por ranura entre dos para obtener las espiras por bobina.

Dependiendo del paso escogido, las espiras por ranura para el bobinado excéntrico/imbricado pueden ser menores, iguales o mayores que el número de espiras por ranura del bobinado concéntrico original.

La distancia alrededor de las bobinas también cambia con el paso. Un paso más amplio requiere un conductor más largo —la longitud adicional multiplicada por las espiras por bobina. Un conductor más largo tiene mayor resistencia, por lo que la resistencia total del bobinado depende en parte del paso(s) de bobina escogido.

La longitud de la cabeza —la distancia que sobresale la bobina al final del núcleo— también afecta la longitud del conductor. La longitud media de la espira (LME) puede ser controlada realizando una fabricación cuidadosa de las bobinas. Entre más corta la longitud, menor es la resistencia total del bobinado, lo que a su vez incrementa la eficiencia.

Al realizar un control cuidadoso, una bobina en forma de diamante requiere menor LME que otra con punta redonda. Aunque sea una diferencia de longitud pequeña (cerca del 3 al 7% menos en el área final de la bobina), cualquier reducción de la resistencia es beneficiosa.

Como ya se mencionó, otra de las ventajas de los bobinados excéntricos/imbricados es que todas las bobinas tienen el mismo paso, con lo cual cada bobina tiene la misma efectividad.

4.7.3.9 Rodamientos

Los rodamientos más comúnmente utilizados en la mayoría de los motores eléctricos tienen juego interno C3. Un rodamiento con sellos de contacto puede crear más fricción que uno abierto, con sellos sin contacto o con tapas de protección. El aumento de fricción da como resultado una pequeña disminución de la eficiencia. Como buena política, para evitar reducir la eficiencia del motor, los fabricantes utilizan rodamientos abiertos.

Los intervalos de lubricación, la cantidad y la viscosidad de la grasa, también producen un impacto sobre la eficiencia de un motor eléctrico. Para mantener la eficiencia de cada motor, deben seguirse las directrices de los fabricantes. El estudio realizado por EASA/ AEMT determinó que lubricar en exceso los rodamientos, aun en pequeñas cantidades, incrementa las pérdidas por fricción cerca de 500 Watts. La lubricación excesiva no solo causa la reducción de la eficiencia, sino que también provoca recalentamiento local, lo cual puede reducir drásticamente la vida de los rodamientos.

Cuando el tipo de aplicación y el ambiente de trabajo del motor requieran de la confiabilidad que ofrecen los rodamientos con tapas de protección, espere un incremento de temperatura en los rodamientos con las respectivas pérdidas por fricción. Una mejor alternativa es la de instalar rodamientos con sellos sin contacto o aisladores, que evitan la contaminación sin causar fricción. Algunos fabricantes de rodamientos también ofrecen rodamientos con tapas de protección sin contacto.

4.7.3.10 Ventilación

Los ventiladores externos son otra fuente potencial de pérdida de eficiencia. La ventilación varía de acuerdo con el diseño del ventilador y depende de factores como el diámetro, número y tamaño de las aspas, materiales y acabado de la superficie. No obstante, la variable más importante es el diámetro del ventilador.

Todo esto equivale a que un ventilador con un diámetro más pequeño mueva considerablemente menos aire $[(D2/D1)^5]$ que uno de mayor diámetro. Esto significa que se requiere más energía para impulsar un ventilador con mayor diámetro.

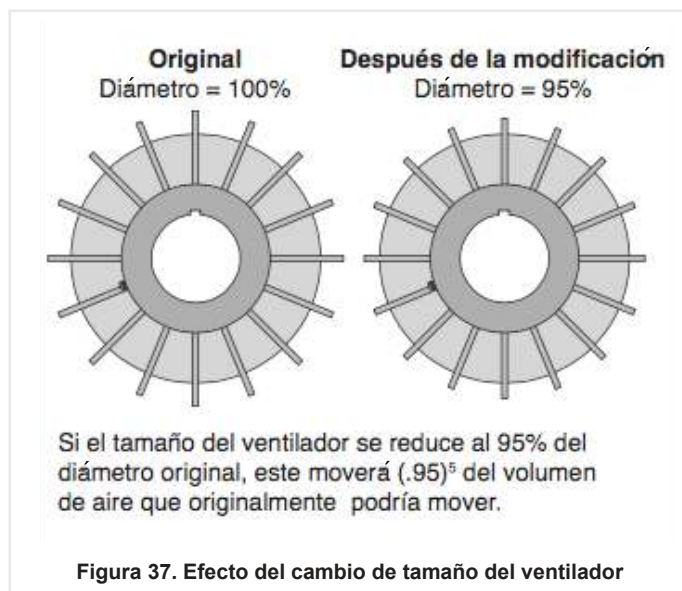


Figura © EASA

Como ejemplo, se requeriría un 16% más de potencia (hp) para impulsar un ventilador de iguales características, pero con un diámetro más grande que el original. Estos hp invertidos se convierten en una pérdida de potencia, que reduce la eficiencia del motor (Ver la **figura 37**).

No es recomendable reemplazar el ventilador original por otro de menor diámetro. Realizar esto reduce también el flujo de aire causando la elevación de la temperatura del bobinado. Esto significa incremento en las pérdidas y menor eficiencia.

Por estas razones, se considera como buena práctica usar un ventilador de recambio idéntico al que se ha dañado. Reemplazarlo por uno diferente puede cambiar la eficiencia del motor. Por supuesto, si los procesos químicos u otro tipo de consideraciones hacen impráctico copiar el diseño original del ventilador, se recomienda discutir con el fabricante las alternativas disponibles para evitar causar efectos adversos que afecten la eficiencia.

4.7.4 Confirmando la integridad de la reparación

Las pruebas con carga no siempre son prácticas, considerando el tiempo de preparación necesario para ellas, el tiempo utilizado para realizarlas y el consumo de potencia generado. Afortunadamente, es relativamente fácil confirmar la integridad de la reparación verificando si se han presentado cambios en las componentes principales -pérdidas en el núcleo, pérdidas en el cobre y pérdidas en el rotor.

- La comparación de las pruebas del núcleo antes y después del quemado determina si las pérdidas en el núcleo han cambiado o no. Un incremento de más de un 20 % sería causa de preocupación.
- La medida precisa de la resistencia verifica cualquier cambio en las pérdidas en el cobre.
- Las pérdidas en el rotor permanecen invariables a menos que el rotor se haya dañado durante la falla o que su diámetro haya sido mecanizado.

El mecanizado del diámetro del rotor para aumentar el entrehierro puede reducir las pérdidas, pero a costa del factor de potencia; sin embargo, un gran incremento en el entrehierro elevará las pérdidas. Los centros de servicio usan este procedimiento solo si conocen la medida de diseño del entrehierro. (Si un rotor es mecanizado varias veces después de cada una de las reparaciones, tarde o temprano, el entrehierro será un problema. Debido a que la historia de reparación de los motores raramente es conocida, los centros de servicio evitan mecanizar el diámetro del rotor.)

Esto nos deja las pérdidas por ventilación, fricción y pérdidas adicionales con carga. La ventilación no varía, a menos que el ventilador se modifique o se cambie. Eso es fácil de evitar. La fricción no cambia si se usan rodamientos idénticos (y sellos adecuados), con los ajustes correctos. Reemplazar rodamientos abiertos por rodamientos sellados incrementa la fricción. Debido a esto mismo, se debe evitar la lubricación en exceso de los rodamientos.

Es difícil cuantificar las pérdidas adicionales con carga, pero una de las actividades del proceso de reparación que puede causarles impacto es la remoción de las bobinas. Los dientes del núcleo con láminas dobladas o torcidas hacia delante y hacia atrás incrementarán las pérdidas adicionales con carga. Entre más fuerza se aplique para la remoción de las bobinas existen más probabilidades de doblar o torcer los dientes del núcleo. Para evitar esto, se deben los estatores a la temperatura adecuada que permita deshacer los aislamientos y una fácil remoción de las bobinas. Todos los resultados óptimos del estudio realizado por EASA/AEMT fueron logrados a una temperatura de quemado de 370 °C, medida en el núcleo del estator.

Precaución: En algunos procesos de aislamiento interlaminar de bajo grado como coloración por vapor de óxido, barnices a base de agua o barnices orgánicos de bajo grado es posible que las láminas del núcleo no sean aptas para ser quemadas y se requiera tomar precauciones extremas.

5 CONSIDERACIONES PARA REPARAR O REEMPLAZAR MOTORES ELÉCTRICOS

INTRODUCCIÓN

Cuando los motores de propósito general fallan, existen casos en los que la mejor opción es reemplazarlos por motores más eficientes (NEMA PREMIUM). No obstante, en ciertos casos el motor volverá a fallar de nuevo, a no ser que la causa raíz de falla sea solucionada realizando alguna modificación en el motor o en el sistema.

También existen muchos casos en los cuales la mejor opción es la reparación del motor averiado. Esto es especialmente cierto si para solucionar la causa de la falla se requiere realizar una mejora, o en algunos casos en los cuales el costo, la disponibilidad o las características únicas del motor se convierten en un problema.

El centro de servicios se encuentra en una excelente posición para realizar esa evaluación.

En muchos casos, cuando un motor falla, el procedimiento a seguir es desmontar el motor averiado y montar un motor de repuesto sin realizar una evaluación concienzuda de la “causa de falla”. Dependiendo del tamaño del motor y el alcance de los daños presentados, el motor viejo puede ser reparado y guardado en el almacén de repuestos o incluso ser dado de baja.

El problema al utilizar este enfoque es que el motor de repuesto, sea nuevo o reparado, puede volver a fallar por las mismas causas. Si se realiza un análisis de causa raíz, a menudo es posible identificar y corregir la causa principal de la falla.

Todo esto puede requerir la modificación del motor, de los equipos impulsados o del sistema, para prolongar significativamente el tiempo medio entre fallas (MTBF).

En muchos casos, en los cuales un motor estándar ya no es adecuado para la aplicación, el centro de servicio es capaz de realizar las modificaciones requeridas en un tiempo más rápido que el que requiere el fabricante para construir un motor a medida.

La Electrical Apparatus Service Association (EASA) ha establecido prácticas recomendadas para más de 2,100 miembros a nivel mundial para asegurar que los procesos de reparación no degraden las características de funcionamiento de los motores. Tanto este estudio como otros más recientes han determinado que la eficiencia de los motores reparados algunas veces puede ser mejorada, si se utilizan buenas prácticas durante la reparación.

Se presentan criterios para determinar cuándo la reparación no es práctica y cuándo puede reducir los niveles de eficiencia. En algunos casos, durante la reparación es posible mejorar los niveles de eficiencia de operación del motor.

La **tabla 5** muestra los posibles mejoramientos de eficiencia que pueden ser realizados en una generación de motores con carcasa T producidos entre 1970 y 1980. No todos los motores ofrecen esta posibilidad, pero para aquellos en los que sí sea factible, esto se considera como una posible mejora de producto.

TABLA 5. MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA EN UNA GENERACIÓN DE MOTORES CON CARCASA T					
	HP	Tipo de bobinado	Factor de espacio (%)	Eficiencia nominal (%)	Eficiencia plena carga (%)
Original antes de EPACT	25	Máquina	43.0	88.5	88.7
Rebobinado antes de EPACT	25	Imbricado	62.0	90.2	90.8
Referencia EPACT	25			91.7	
Original antes de EPACT	50	Máquina	46.0	91.7	91.6
Rebobinado antes de EPACT	50		60.0	92.4	92.6
Referencia EPACT	50	Imbricado		93.0	
Típico motor de 4 polos, ODP, propósito general, carcasa T con un diseño anterior de eficiencia.					
*Porcentaje de factor de espacio = $\frac{\text{Número total de alambres por ranura} \times (3.14D^2/4)}{\text{del alambre} \times 100}$					
Área total de la ranura – área de aislamiento					
D= diámetro del alambre					

Tabla © EASA

Modelo de decisión para reparar o reemplazar

En el pasado, la decisión de reparar o reemplazar un motor habría sido económica. Reemplazar un motor eléctrico viejo por otro modelo más eficiente tiene sentido para

motores que trabajan de forma continua. No obstante, en muchos casos la decisión es más compleja (Ver las figuras 38 y 39).

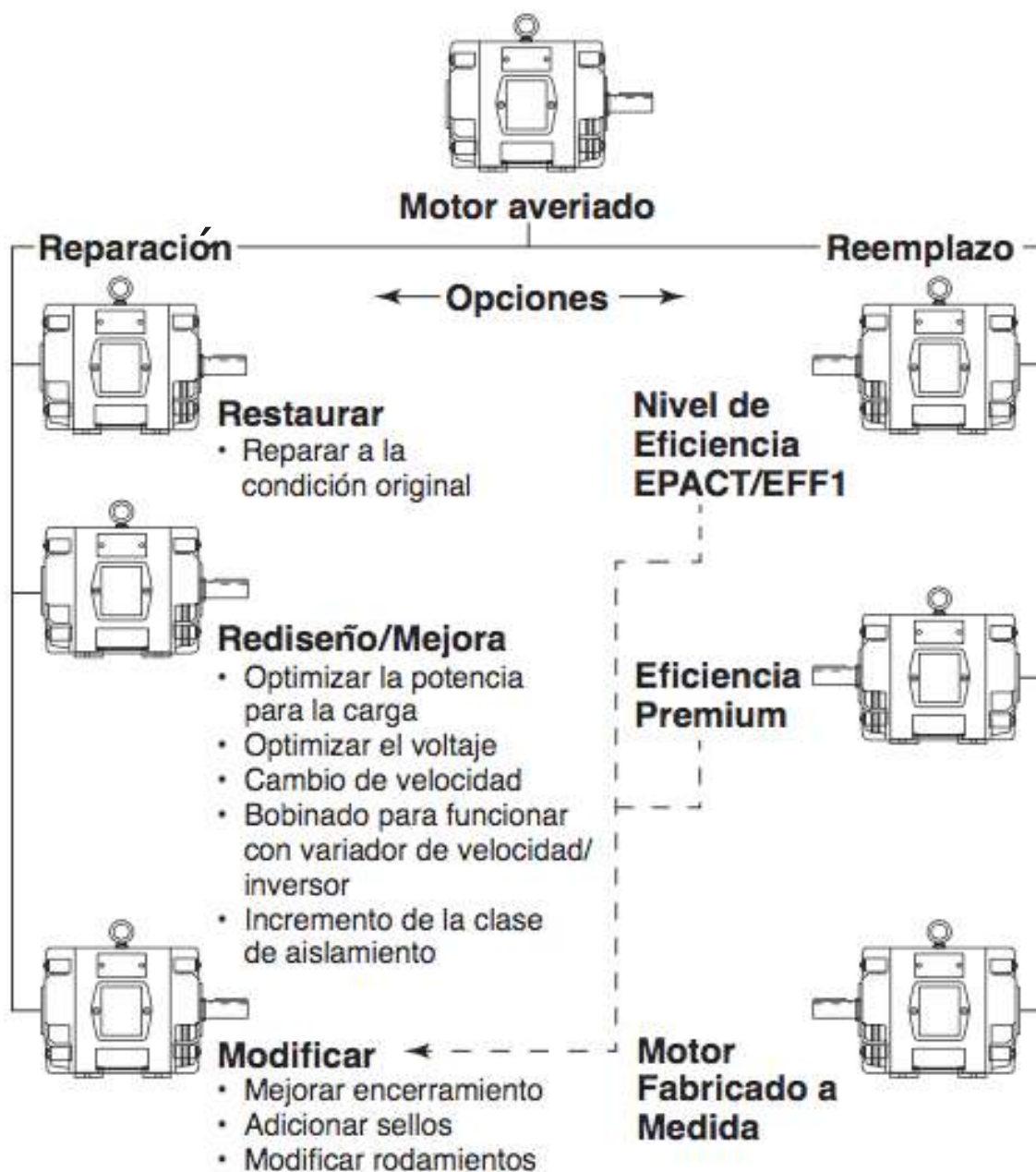


Figura 38 La matriz para tomar la decisión de reparar o reemplazar un motor es más complicada que utilizar la regla básica del “porcentaje de costo.”

Dibujo © EASA

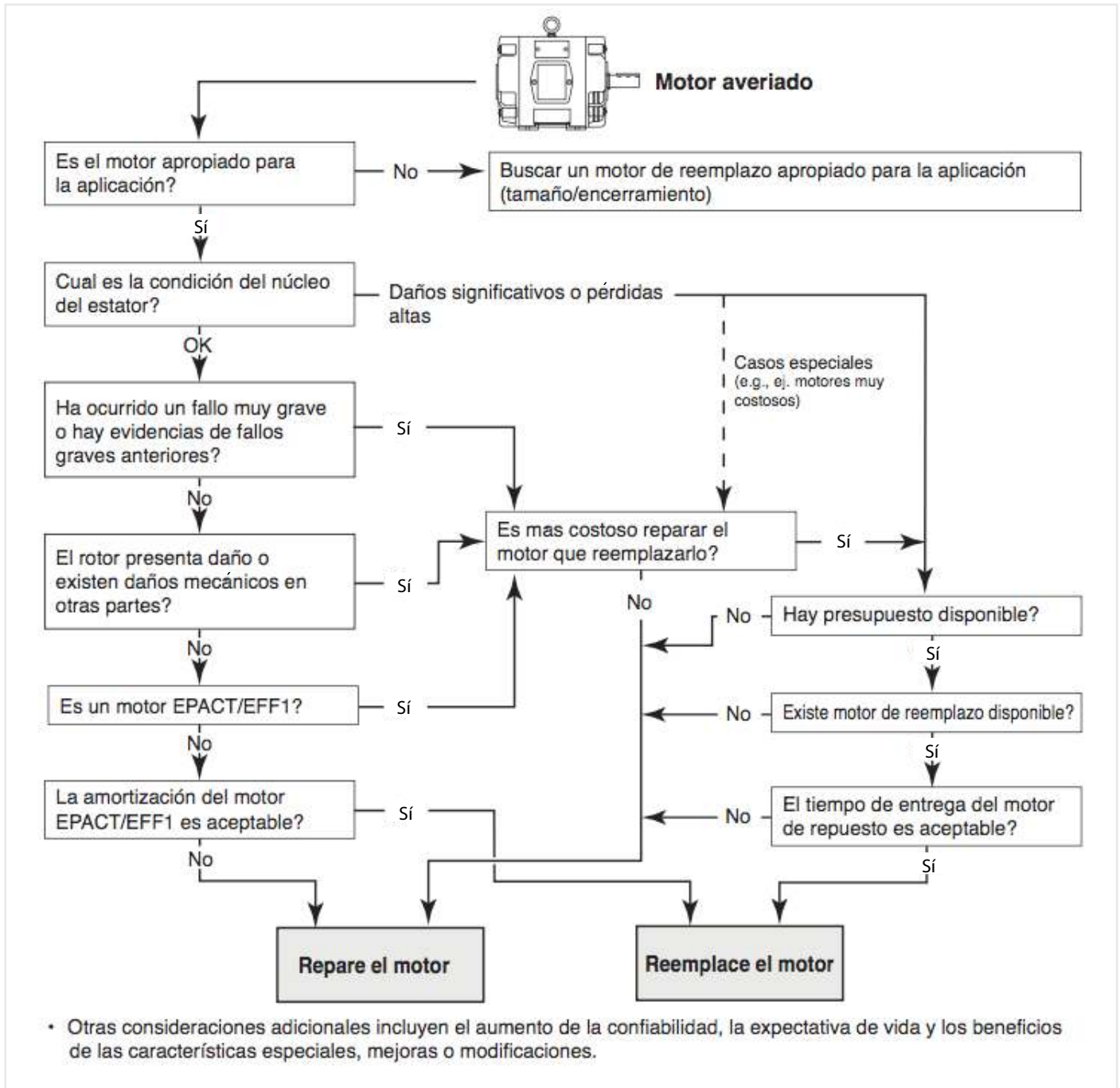


Figura 39 Proceso real para la toma de decisiones cuando un motor falla
Figura © EASA

Nota 1: Para motores de propósito general, cuando su costo de reparación represente más del 40 % de su valor, se sugiere el reemplazo por un motor nuevo. De la misma manera, para motores inferiores a 30 HP, por razones económicas es recomendable su reemplazo en vez de su reparación.

Nota 2: Para motores de aplicaciones especiales (críticos), independientemente del costo, se sugiere su reparación. Esto debido a que los costos de paro de operación son

más altos que la reparación del equipo, además que los motores nuevos especiales no son de entrega inmediata.

Un motor que funciona poco, con características especiales de ensamble o de diseño o con niveles de eficiencia EPACT/EFF1 o superiores, son ejemplos de cuándo puede ser mejor tomar la opción de reparar.

CONDICIONES INUSUALES DE SERVICIO, NEMA MB 1-2016**14.3 CONDICIONES INUSUALES DE SERVICIO**

Se debe consultar al fabricante en caso que existan condiciones inusuales de servicio que puedan afectar la construcción u operación del motor. Entre otras tenemos las siguientes:

- a. Exposición a:
 1. Polvos combustibles, abrasivos, conductivos o explosivos.
 2. Presencia de pelusa o condiciones de operación muy sucias en las que la acumulación de polvo puede interferir con la ventilación normal.
 3. Humos químicos, gases explosivos o inflamables.
 4. Radiación nuclear.
 5. Vapor, aire salino o vapor de aceite.
 6. Humedad o lugares muy secos, radiación de calor, presencia de bichos e insectos o atmósferas propicias para la formación de hongos.
 7. Golpes anormales, vibraciones o cargas mecánicas de fuentes externas.
 8. Empuje axial o lateral anormal en el eje del motor.
- b. Funcionamiento en el cual:
 1. Exista desviación excesiva del voltaje, frecuencia o de ambos.
 2. El factor de desviación de la tensión C.A. de suministro excede al 10 %.
 3. La tensión CA de suministro se encuentra desbalanceada por más de +/- 5 %
 4. Se requieren bajos niveles de ruido.
 5. El sistema de potencia no tiene puesta a tierra.
- c. Operación a velocidades que superen la velocidad máxima nominal.
- d. Funcionamiento en espacios con poca ventilación, en un foso o en una posición inclinada.
- e. Funcionamiento en la cual esté sometido a:
 1. Cargas de impacto torsional.
 2. Sobrecargas anormales repetitivas.
 3. Cambio de sentido de giro o frenado eléctrico.
 4. Arranques frecuentes.
 5. Transferencia desfasada entre barrajes eléctricos.
 6. Cortocircuitos frecuentes.
- f. Operación a máquina parada o a plena carga durante tiempos cortos con cualquier bobinado continuamente energizado.
- g. Operación de máquinas de corriente continua, en las que la corriente de armadura promedio sea menor que 50 por ciento de los amperios normales a plena carga, durante un período de 34 horas o funcionamiento continuo, durante más de 4 horas con una corriente de armadura menor que el 50 % de la corriente nominal.

Figura 40. Condiciones inusuales de servicio.

Tabla © EASA

Cuando se compara el costo de reemplazar o reparar un motor eléctrico, la ecuación no solo debe incluir los costos operacionales y el retorno de la inversión, sino también los tiempos muertos y los factores asociados con la depreciación del capital y las pérdidas por producción.

Un motor de reemplazo inadecuado para la aplicación, que falle en uno o dos años, puede tener costos más significativos que los derivados por una reparación que optimice el motor para su aplicación única.

Los considerables ahorros anuales de energía desaparecen rápidamente por un paro de producción no programada causada por la falla inesperada de un motor.

Mucha de la literatura actual enfatiza que la eficiencia y los costos de energía son factores independientes dentro de la matriz de decisión para reparar o reemplazar.

Frecuentemente, el costo del motor o de su reparación es una pequeña parte de los costos totales generados por los tiempos muertos cuando se tienen en cuenta las pérdidas por producción.

Otros factores a tener en cuenta (diferentes a la eficiencia y al simple retorno de inversión) incluyen la confiabilidad, funcionamiento y expectativa de vida, como también la disponibilidad de tener un repuesto. De estas, la más crítica es la confiabilidad. Un motor diseñado para una aplicación definida, tendrá la gran posibilidad de trabajar durante mucho tiempo (larga vida). "Tiempo muerto cero" es una meta noble que requiere compromiso y planeación.

La norma NEMA MG-3 1-1998 define las "Condiciones Inusuales de Servicio" (Ver la **figura 40**). La mayoría de los usuarios adoptarán muchas de ellas para escoger los motores para una determinada aplicación. Por sí mismas, estas condiciones pueden justificar la reparación a medida para un motor que ha fallado, en vez de reemplazarlo por uno de stock.

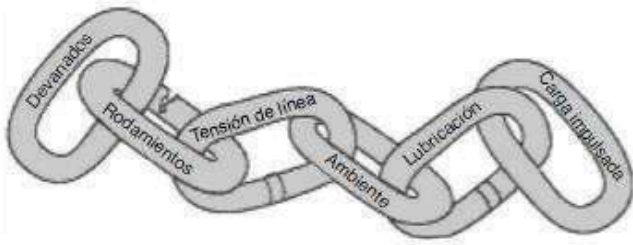


Figura 41- Eslabones de procesos.

Figura © EASA

Esto tiene una connotación económica, por lo que se hace necesario identificar el eslabón débil en cualquiera de los procesos y detectar fallas inminentes antes de que estos ocurran (Ver **figura 41**). Un motor sometido a salpicaduras de agua y que no tenga la carcasa apropiada, puede ser modificado para protegerlo contra este riesgo.

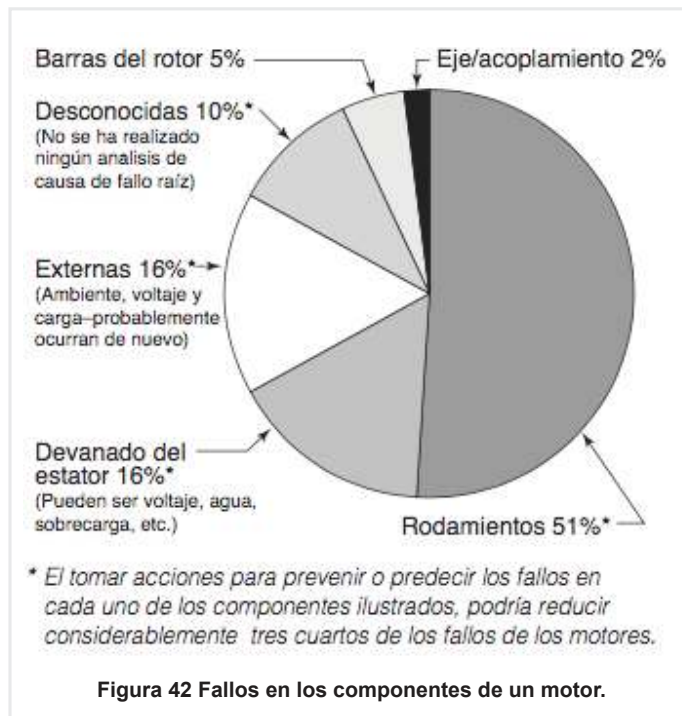


Figura 42 Fallos en los componentes de un motor.

Figura © EASA

Nota: Para reducir el porcentaje de fallas en los rodamientos de los motores, es importante considerar las especificaciones técnicas del fabricante de rodamientos. Entre las que se encuentran: tipo y cantidad de grasa, marca de rodamiento, frecuencia de lubricación, además de técnicas adecuadas de mantenimiento, tales como montaje y ajuste adecuado, balanceo de los rotores, y alineación.

De igual forma, dado que más del 50 % de los daños en los motores comienzan por fallas en los rodamientos (Ver la **figura 42**), en muchos casos instalar detectores de temperatura y sensores de vibraciones para proteger los rodamientos son opciones lógicas.

Debido a los rápidos cambios tecnológicos actuales, los fabricantes de motores están sometidos a fuertes presiones para incorporar tecnologías emergentes en un período de 2 a 3 años. Una de las ventajas de los centros de servicios es su capacidad para hacer frente a la reparación de cualquier motor exclusivo y aplicar nuevas tecnologías, a medida que se desarrollan, para resolver problemas específicos relacionados con la aplicación en particular el medio ambiente en el que trabajan.

Esto significa que el usuario final puede sacar ventaja de la tecnología exclusiva que cumple con sus necesidades exclusivas.

Si el problema está en las temperaturas de los rodamientos o del bobinado, durante el proceso de reparación se pueden instalar accesorios específicos para prolongar la vida del motor y permitir al usuario final hacer seguimiento de esta característica crítica.

Considerando solamente la temperatura del bobinado, existen cuatro tipos de resistencias (RTD) y 14 clases de termopares (termocuplas) diferentes, como también varios termistores e interruptores bimetalicos que son de uso común. Obviamente, un motor en stock no puede ofrecer esas opciones.

Para los fabricantes, instalar este tipo de dispositivos se convierte en un pedido especial y normalmente requieren de tiempos de entrega largos. El centro de servicios puede hacer una reparación exclusiva y a medida, para que los detectores instalados coincidan con los equipos de monitoreo del usuario final, incorporando características exclusivas sin alterar el tiempo de entrega.

El monitoreo de vibraciones está disponible en sistemas que trabajan en línea y de forma continua. Los acelerómetros son algunos de los sensores que pueden ser adaptados para mejorar la capacidad del usuario para predecir una falla. Actualmente, se encuentran disponibles sondas (sensores) que no necesitan contacto con el eje, acelerómetros para monitoreo continuo y toma periódica de datos, acelerómetros integrales para sistemas sofisticados de monitoreo continuo. Una vez que los usuarios realizan el esfuerzo financiero en un sistema en particular, raramente resulta práctico abandonar dicho sistema y decantarse en favor de otra tecnología emergente.

Con muchas compañías regresando a su “actividad principal” y practicando mantenimiento externo (outsourcing), un centro de servicios competente es el más calificado para determinar la causa de falla presentada en el motor y para desarrollar un plan que reduzca la posibilidad que se repita. La garantía concedida por los trabajos asegura que el centro de servicios tiene pleno interés en identificar la causa raíz de la falla y hacer una reparación de calidad del motor.

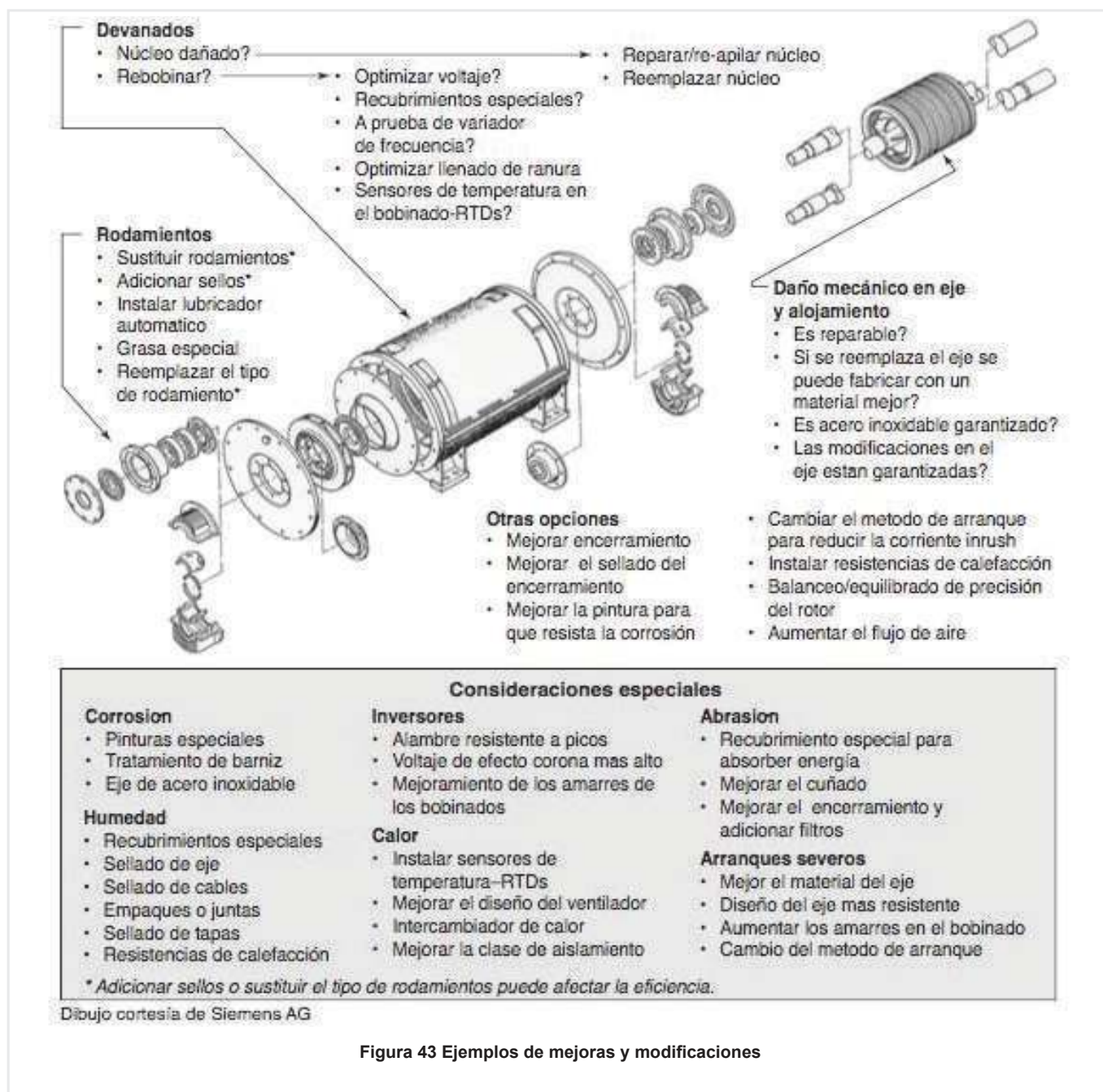


Figura 43 Ejemplos de mejoras y modificaciones

Figura © EASA

Ejemplos de mejoras y modificaciones

Una vez sea identificada la causa de la falla, el centro puede trabajar conjuntamente con el dueño del motor, para identificar las soluciones específicas y prolongar el tiempo medio entre fallas (MTBF), (Ver la **figura 43**). Los siguientes son unos pocos ejemplos de problemas frecuentemente detectados y de soluciones encontradas por los centros de servicio.

Optimización del voltaje

Una estación de bombeo se encuentra localizada al final de una línea de transmisión de energía. La falla de los motores es común y la temperatura de sus devanados es mayor que la de los motores idénticos que funcionan en la planta de tratamiento de la ciudad. Las continuas mediciones de voltaje realizadas en la red han confirmado una baja tensión crónica.

Cuando un bobinado falla por bajo voltaje, el motor de repuesto -sin importar su eficiencia- será sometido a la misma baja tensión. La solución pasa por rediseñar el motor para optimizar su funcionamiento con la tensión de red aplicada. Es frecuente utilizar un motor de 230 V en una aplicación de 200 o 208 Voltios.

Agravando el problema, la fuente de 208 Voltios puede aún suministrar menos tensión. La Tabla 6 ilustra el efecto de la variación de voltaje en la eficiencia y la temperatura de los bobinados.

Las tensiones bajas son comunes en zonas rurales, donde los motores funcionan a grandes distancias de la subestación más cercana. Las bombas de irrigación y las estaciones de bombeo son dos ejemplos de ello.

Mientras algunos fabricantes pueden suministrar motores capaces de funcionar con tensiones no normalizadas, el tiempo de fabricación de entre cinco y ocho semanas puede resultar prohibitivo. El centro de servicios puede realizar la optimización del voltaje durante el rebobinado.

Un beneficio añadido es la práctica común de los fabricantes de producir motores con hasta 12 cables de conexión, por lo que el motor puede ser usado con varias tensiones, y a menudo, para varios tipos de arranque como devanado partido, estrella-delta o delta. Esto significa que el electricista debe manejar gran cantidad de cables dentro de la caja de conexiones, aumentando el riesgo de una falla a tierra por fricción entre los cables. Al reparar un motor, el centro de servicios tiene la opción de utilizar solo el número de cables requerido. Con 3 o 6 cables, existe más espacio en la caja de conexiones y menos posibilidades de dañar los cables, o de que ocurra un error en la conexión durante su instalación.

TABLA 6. EFECTOS EN LA EFICIENCIA Y LA TEMPERATURA DE LOS BOBINADOS		
Volts	208	230
Eficiencia (%)	80.6	84.4
Factor de potencia (%)	85.0	82.7
Corriente a plena carga (amps)	30.5	26.9
Corriente de arranque (amps)	129	148
Aumento de temperatura (°C)	91	72
Deslizamiento (%)	5.9	4.1
Motor de 4 polos, diseño B, tres tensiones (208-230/460)		

Tabla 6. Los efectos de la variación del voltaje sobre la eficiencia y temperatura de los devanados.

Tabla © EASA

Nota: Los motores que funcionan con tres tensiones diferentes son una solución para las posibles tensiones de red disponibles. Esto permite contar con más recursos, pero la eficiencia del motor disminuye al utilizar ciertas tensiones.

En la Unión Europea, el rango de tensiones disponibles se encuentra entre 380-420 Volts. La mayoría de los motores modernos están diseñados para funcionar óptimamente con 400 V, pero muchos de los motores antiguos están diseñados para 380 V o 415 V dependiendo de la región de origen. El rebobinado puede ser usado como una oportunidad para optimizar el motor a un determinado voltaje.

Mejoramiento de la eficiencia energética

Existen ocasiones en las cuales el rebobinado puede presentar una oportunidad para aumentar la confiabilidad y el funcionamiento del motor mediante la modificación de la configuración del bobinado, por medio del aumento de la sección de los conductores (alambres).

En muchos diseños, las pérdidas I^2R son las mayores componentes de pérdidas totales (Ver la **figura 44**). Algunas veces, estas pérdidas se pueden reducir convirtiendo un bobinado a máquina en otro tradicional hecho a mano. La **figura 45** compara un estator cuyo llenado de ranura es relativamente bajo (40 al 50 %), con otro que tiene un porcentaje de llenado de ranura más alto (60 al 64 %).

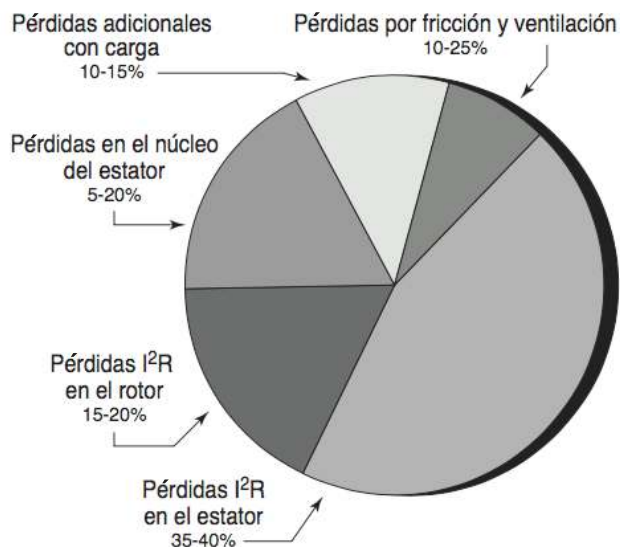


Figura 44. Distribución típica de las pérdidas de un motor (ref NEMA MG10)

Figura © EASA

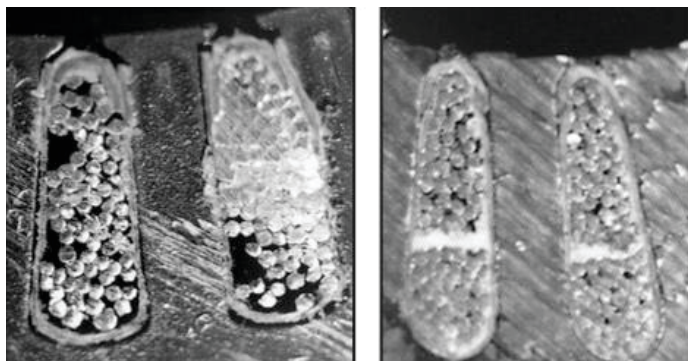


Figura 45. Aumento del llenado de ranura, de un menor (a la izquierda) a otro mayor a la derecha. El aumento en la sección de los conductores reduce las pérdidas I^2R .

Figura © EASA

Esta modificación mejorará la transmisión de calor, reduciendo la temperatura del devanado y las pérdidas I^2R , mejorando la eficiencia del motor. Habrá un menor movimiento de las bobinas y una mayor resistencia a la humedad debida una mejor retención del barniz. Aunque para el centro de servicios es difícil cuantificar estas mejoras, son reales y generalmente mejorarán la confiabilidad y el funcionamiento del motor. Por medio de estas mejoras, el factor de servicio aumentará y el motor estará en la capacidad de soportar amplias variaciones de voltaje, y las condiciones de arranque y ambientales a las que esté sometido.

Reconexión

Por lo general, el centro de servicios puede reconectar el bobinado de un motor existente para reducir el par y la corriente durante el arranque. Para ello, se puede utilizar una conexión estrella-delta funcionamiento en delta. En algunos casos, el bobinado podrá reconectarse, y en otros requerirá ser rebobinado. Otras opciones de arranque disponibles son utilizar un variador de velocidad electrónico (inversor) o un arrancador de estado sólido (arrancador suave).

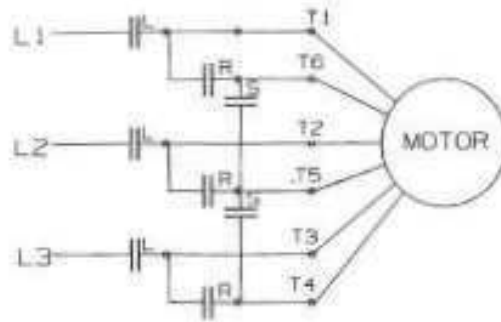
Siempre existirán aplicaciones en las cuales se requiera un arranque reducido. En la mayoría de los casos, un motor de Diseño A, aún con su alta corriente de arranque inherente, seguirá siendo justificado cuando funcione con un arrancador dimensionado adecuadamente para la corriente. Con base en el costo de la energía y el tiempo de operación del motor, al comparar los ahorros de energía obtenidos, se tendrá un tiempo de retorno de inversión del capital invertido en el arrancador de entre 1 y 3 años. El arrancador estrella-delta reduce la corriente de arranque (Inrush) en un 37 % y el par de arranque en 1/3.

Un arrancador por devanado partido reduce la corriente de Inrush a la mitad o a un tercio, mientras suministra la mitad del par de arranque. Este método utiliza una parte del bobinado (1/2 y algunas veces 2/3), incrementando la impedancia vista por el sistema de potencia. Este método se usa solo para la recuperación del voltaje y no se debe permanecer en la conexión de arranque más de 2 o 3 segundos, durante la conexión de arranque no se espera que el motor siempre acelere y puede que el motor no gire.

La conexión doble delta o delta extendida, externamente es la misma para realizar el típico arranque por devanado partido, pero internamente es diferente. Este método permite lograr un arranque a tensión reducida cambiando durante el arranque del motor los grupos en paralelo de un bobinado conectado en delta en grupos en serie. Este método es denominado frecuentemente "devanado partido en delta doble o delta extendida", debido a que utiliza un arrancador convencional para devanado partido. La ventaja de esta conexión es que, durante el ciclo de arranque, todo el bobinado permanece conectado y no hay un aumento de calor muy elevado.

Para los casos en que aplique, el centro de servicios puede realizar los cambios necesarios. (Ver figura 46).

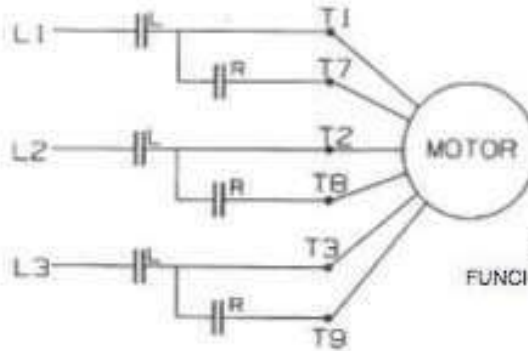
arranque en estrella - delta



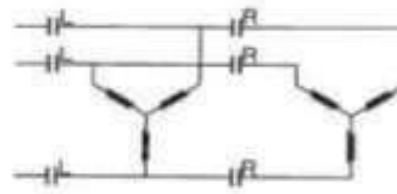
ARRANQUE: R ABIERTO, L & S CERRADOS
FUNCIONAMIENTO: R & L CERRADOS, S ABIERTO



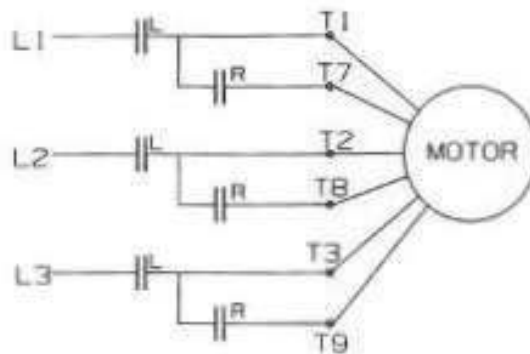
devanado partido



ARRANQUE: L CERRADOS, R ABIERTO
FUNCIONAMIENTO: L & R CERRADOS



doble delta



ARRANQUE: L CERRADOS, R ABIERTO
FUNCIONAMIENTO: L & R CERRADOS



Figura 46 Métodos alternativos de conexión.

Dibujo © EASA

CONCLUSIÓN

Los aspectos económicos durante el proceso de la toma de la decisión de reparar o reemplazar un motor, son complejos y se deben considerar tantas variables como sea posible para escoger la mejor opción disponible.

Mediante la incorporación de tecnología efectiva, cuando esta se encuentre disponible, es posible reducir los tiempos muertos, mejorar la productividad y operar de forma más eficiente. La reducción de costos hace que la organización sea más rentable. Los ahorros pueden ser invertidos en otros “eslabones débiles”. El profesional de mantenimiento competente siempre está buscando la manera de mejorar los procesos y un buen centro de servicios se encuentra en la disposición de ayudarle con esa tarea.

Cuando se evalúan los costos de operación de un motor eléctrico, el costo de la energía es solo una de las variables de la ecuación. La clave para maximizar la productividad es eliminar los tiempos muertos (paros de producción). No obstante, no siempre es posible minimizar a cero los paros de producción, por lo que cualquier reducción significativa

de los tiempos muertos mejora la productividad. Cuando los costos por paros de producción son muy altos, el retorno de inversión o la amortización como consecuencia de prolongar la vida del motor puede ser enorme.

La eficiencia de un motor eléctrico puede ser conservada, o en algunos casos mejorada, utilizando buenas prácticas durante la reparación.

Reconocer las oportunidades de mejora y entender los métodos de reparación que pueden causar impacto en la eficiencia, son claves para el proceso de reparación. Si la reparación se realiza de forma apropiada, un motor puede ser rebobinado varias veces, sin degradar su eficiencia.

En caso de requerir mayor información de detalle sobre las técnicas y recomendaciones de reparación de motores eléctricos, consultar la siguiente Norma: EASAAR 100 2015, Práctica recomendada para la reparación de máquinas eléctricas rotativas.

6 VALORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA INFORMATIVOS

La aplicación de las mejores prácticas en el proceso de reparación de motores eléctricos trifásicos que se comercializan en México, tiene el objetivo de garantizar que se mantenga la eficiencia energética y la confiabilidad de la operación de los motores reparados, a fin de contar con

una referencia del nivel de eficiencia energética que deben cumplir los motores reparados para comercialización, **por lo que se sugiere** apegarse lo más cercano a los valores de la siguiente tabla:

Potencia Nominal	Potencia Nominal	MOTORES CERRADOS				MOTORES ABIERTOS			
kW	CP	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
0.746	1	77.0	85.5	82.5	75.5	77.0	85.5	82.5	75.5
1.119	1.5	84.0	86.5	87.5	78.5	84.0	86.5	86.5	77.0
1.492	2	85.5	86.5	88.5	84.0	85.5	86.5	87.5	86.5
2.238	3	86.5	89.5	89.5	85.5	85.5	89.5	88.5	87.5
3.730	5	88.5	89.5	89.5	86.5	86.5	89.5	89.5	88.5
5.595	7.5	89.5	91.7	91.0	86.5	88.5	91.0	90.2	89.5
7.460	10	90.2	91.7	91.0	89.5	89.5	91.7	91.7	90.2
11.19	15	91.0	92.4	91.7	89.5	90.2	93.0	91.7	90.2
14.92	20	91.0	93.0	91.7	90.2	91.0	93.0	92.4	91.0
18.65	25	91.7	93.6	93.0	90.2	91.7	93.6	93.0	91.0
22.38	30	91.7	93.6	93.0	91.7	91.7	94.1	93.6	91.7
29.84	40	92.4	94.1	94.1	91.7	92.4	94.1	94.1	91.7
37.30	50	93.0	94.5	94.1	92.4	93.0	94.5	94.1	92.4
44.76	60	93.6	95.0	94.5	92.4	93.6	95.0	94.5	93.0
55.95	75	93.6	95.4	94.5	93.6	93.6	95.0	94.5	94.1
74.60	100	94.1	95.4	95.0	93.6	93.6	95.4	95.0	94.1
93.25	125	95.0	95.4	95.0	94.1	94.1	95.4	95.0	94.1
111.9	150	95.0	95.8	95.8	94.1	94.1	95.8	95.4	94.1
149.2	200	95.4	96.2	95.8	94.5	95.0	95.8	95.4	94.1
186.5	250	95.8	96.2	95.8	95.0	95.0	95.8	95.8	95.0
223.8	300	95.8	96.2	95.8	---	95.4	95.8	95.8	---
261.1	350	95.8	96.2	95.8	---	95.4	95.8	95.8	---
298.4	400	95.8	96.2	---	---	95.8	95.8	---	---
335.7	450	95.8	96.2	---	---	96.2	96.2	---	---
373	500	95.8	96.2	---	---	96.2	96.2	---	---

Nota: Esta tabla corresponde a la tabla 1 de la NOM-016-ENER-2016 (Ver 9.2)

7 SÍMBOLOS Y TÉRMINOS ABREVIADOS

Para la correcta aplicación e interpretación de la presente Guía, se establecen los siguientes símbolos y términos abreviados

%	Por ciento
°C	Grados Celsius
Amps	Amperes
A/mm ²	Densidad de corriente eléctrica en amperes por milímetro cuadrado
AEMT	The Association of Electrical and Mechanical Trades
C.A.	Corriente Alterna
CMA	Circular mils por amperios
CSA	Canadian Standards Association
EASA	Electrical Apparatus Service Association
EExd	Equipo a prueba de explosión (a prueba de flama)
EExe	Equipo a prueba de explosión (seguridad aumentada)
EFF1	Clase de eficiencia del motor
EPACT	Nivel de Eficiencia Alta (NEMA) equivalente a IE2 (IEC)
FEM	Fuerza electromotriz
FMM	Fuerza magneto-motriz
hP	Caballo Fuerza
hP/Kw	Caballo Fuerza/Kilowatt
Hz Hertz	Hertz
IEC	The International Electrotechnical Commission
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Kg	Kilogramo
Kw	Kilowatts
Lb	Libras
mm	Milímetros
mm ²	Milímetros cuadrados
Max	Máximo
Min	Mínimo
LME	Longitud Media de Espira
MTBF	Tiempo Medio entre Fallas
NEMA	The National Electrical Manufacturers Association
Pérdidas I ² R del estator	Pérdidas por efecto Joule del estator
Pérdidas I ² R del rotor	Pérdidas por efecto Joule del rotor
RPM	Revoluciones por minuto
RTD	Resistance Temperature Detector
TE	Característica del tipo de torque del motor
TEFC (TCVE)	Motores totalmente cerrados con ventilación exterior.
VETC	Ventilador enfriado totalmente cerrado
ODP	Open Drip Proof
PGA	Prueba de goteo abierto
UL	Underwriters Laboratories
V	Tensión Eléctrica (Volts).
IPXX	International Protection

8 GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS

8.1 Bobinado concéntrico

Bobinado de corriente alterna es concéntrico cuando los lados activos de una misma fase, situados frente a polos consecutivos, son unidos mediante conexiones o cabezas concéntricas. Los bobinados concéntricos pueden ser contruidos tanto por polos como por polos consecuentes. La forma de ejecutar los bobinados de una y dos fases es por polos, mientras que en los bobinados trifásicos se realizan por polos consecuentes.

8.2 Bobinado excéntrico

Bobinado de corriente alterna es excéntrico cuando los lados activos de una misma fase, situados frente a polos consecutivos, son unidos mediante un solo tipo de conexiones o cabezas, de forma que el conjunto del bobinado está constituido por un determinado número de bobinas iguales.

Este tipo de bobinado es normalmente ejecutado por polos, pudiendo ser imbricados u ondulados, ejecutándose indistintamente en una o dos capas por ranura. Los bobinados excéntricos pueden ser enteros o fraccionarios, según resulte el valor del número de bobinas por grupo U.

$$U = K / 2p.q$$

Al aplicar la formula anterior, se debe tener presente que los bobinados de dos capas por ranura, el número de bobinas es igual al de ranuras $B=K$, mientras que los de una capa por ranura, el número de bobinas es la mitad que el de ranuras $B= K/2$.

8.3 Economía Circular

Consiste en minimizar residuos a través de la reutilización, una adecuada reparación y reciclaje, que aplica a materiales y productos que han sido utilizados, los cuales se pueden reparar con el fin de prolongar su vida útil. Su objetivo principal es reducir el consumo y desperdicio de materias primas, agua y fuentes de energía.

9. BIBLIOGRAFÍA

- 9.1 Guía de Buenas Prácticas Para Conservar La Eficiencia del Motor. Electrical Apparatus Service Association, Inc. (EASA) & Association of Electrical and Mechanical Trades (AEMT Ltd).
- 9.2 NOM-016-ENER-2016, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 kW a 373 kW. Límites, método de prueba y marcado.
- 9.3 EASA Root Cause Failure Analysis, catálogo "Failures in Three-Phase Stator Windings"
- 9.4 EASAAR 100 2015, Práctica recomendada para la reparación de máquinas eléctricas rotativas.
- 9.5 EASA – Principios de motores C.A. medianos y grandes. Segunda edición 2000-2015. (Versión 0815_0119). Basado en las normas de diseño de motores NEMA.
- 9.6 Nota Técnica 16 de EASA, Guidelines for maintaining motor efficiency during rebuilding.
- 9.7 The Electromechanical Authority (EASA) <https://www.easa.com/>
- 9.8 EASA Root Cause Failure Analysis <https://www.easa.com/education/private/seminar/root-cause-failure-analysis>
- 9.9 Failures in Three-Phase Stator Windings <https://www.easa.com/resources/booklet/typical-failures-three-phase-stator-windings>
- 9.10 Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) <https://www.ieee.org/>
- 9.11 Motor Rewind Data CD-ROM de EASA <https://www.easa.com/software/MotorRewindData>
- 9.12 Programa de Verificación y Rediseño de Motores de Corriente Alterna de EASA. <https://www.easa.com/resources/books/redise%C3%B1o-de-motores-ac>
- 9.13 National Electrical Manufacturers Association (NEMA) <https://www.nema.org/pages/default.aspx>
- 9.14 The Association of Electrical and Mechanical Trades (AEMT) <https://www.theaemt.com/>
- 9.15 The International Electrotechnical Commission <https://www.iec.ch/>
- 9.16 Underwriters Laboratories (UL) <https://www.ul.com/>
- 9.17 Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) <https://www.gob.mx/conuee>
- 9.18 ICA Procobre <https://www.procobre.org/es/>

10. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la participación de las siguientes organizaciones, instituciones y talleres para la elaboración de esta Guía.

- AEMT - Association of Electrical & Mechanical Trades, por permitir utilizar sus documentos.
- Asesoría en Reembobinado Urgente y Venta de Motores y Controles Eléctricos, S.A. de C.V.
- Centro Mexicano para la Producción más limpia del Instituto Politécnico Nacional (IPN)
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), por las facilidades, para la elaboración de esta Guía.
- EASA - Electrical Apparatus Service Association, por permitir utilizar sus documentos y por todo el soporte técnico recibido durante la elaboración de esta guía.
- Embobinados Garay, S.A. de C.V.
- Embobinados Universal, S.A. de C.V.
- Ermecel Embobinados, S. DE R.L. de C.V.
- Grupo Delta de Tabasco, S.A. de C.V.
- Grupo Marro de México, S.A. de C.V.
- Instituto Empresarial y de Certificación Biotransformo, S.A.S.
- MihCat Asociados, S.A. de C.V.
- NF Instalaciones Integrales Ingeniería Eléctrica, S.A. de C.V.
- Técnicas en Desarrollo de Electromáquinas Rotativas, S.A. de C.V.
- Tecnología Aplicada Potencial, S.A. de C.V.

Agradecemos a las personas que, en representación de sus instituciones, participaron en la elaboración de la presente guía:

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE)	M. en C. Odón de Buen Rodríguez Ing. Israel Jáuregui Nares Ing. Noé Villegas Alcántar Ing. Tania Alejandra Reyes Castañeda Ing. Eduardo Álvarez Flores
Asesoría en Reembobinado Urgente y Venta de Motores y Controles Eléctricos, S.A. de C.V.	Sr. David Ocampo Vargas
Centro Mexicano para la Producción más Limpia del Instituto Politécnico Nacional (IPN)	Ing. José Baltazar López Iñiguez Ing. José Raúl Durán Vidal
Embobinados Garay, S.A. de C.V.	Ing. Arturo Garay Madero
Embobinados Universal, S.A. de C.V.	Ing. Jaqueline Moreno Estrada
Ermecel Embobinados, S. DE R.L. de C.V.	Ing. Edgar Andrés Suárez Parra Ing. Luis Erick Suárez Parra
Grupo Delta de Tabasco, S.A. de C.V.	Ing. Gerardo Zapata Lázaro
Grupo Marro de México, S.A. de C.V.	Ing. Diomel Guerra Caraballo Ing. José Luis Camacho Sáenz
Instituto Empresarial y de Certificación Biotransformo, S.A.S.	L.N.I. Jesús Sansón Figueroa
MihCat Asociados, S.A. de C.V.	Ing. Sigifredo Sánchez Vargas
NF Instalaciones Integrales Ingeniería Eléctrica, S.A. de C.V.	Ing. Francisco Javier Pérez Escalona
Técnicas en Desarrollo de Electromáquinas Rotativas, S.A. de C.V.	Ing. Martín Fragozo Ramírez
Tecnología Aplicada Potencial, S.A. de C.V.	Ing. Francisco Javier Díaz Palafox

Directorio de talleres de reparación de motores eléctricos, con quienes se pueden contactar para servicio de reparación de motores eléctricos:

- **Asesoría en Reembobinado Urgente y Venta de Motores y Controles Eléctricos, S.A. de C.V.**

Correo electrónico: dov@areurmot.com

Teléfono: (777) 32 86 63 70

- **Embobinados Garay, S.A. de C.V.**

Correo electrónico: arturo@embobinadosgaray.com.mx

Teléfono: (33) 37 00 50 39

- **Embobinados Universal, S.A. de C.V.**

Correo electrónico: jmorenoes@embobinadosuniversal.com.mx; taller@embobinadosuniversal.com.mx

Teléfono: (55) 58 72 19 65

- **Ermecelembobinados, S. DE R.L. de C.V.**

Correo electrónico: ventas@ermecelembobinados.com.mx

Teléfono: (461) 6 13 05 93

- **Grupo Delta de Tabasco, S.A. de C.V.**

Correo electrónico: gerenciatecnica@grupodeltadetabasco.com

Teléfono: (993) 3 50 20 67

- **Grupo Marro de México, S.A. de C.V.**

Correos electrónicos: luisc@grupomarro.com.mx y diomelg@grupomarro.com.mx

Teléfonos: (81) 81 25 55 55 Ext. 5110 y (81) 15 01 75 66

- **Técnicas en Desarrollo de Electromáquinas Rotativas, S.A. de C.V.**

Correo electrónico: mfragoso@tdesa.com

Teléfono: (55) 56 90 14 14

La participación de las autoridades e instituciones mencionadas no les concede autorización respecto de la obra.

Procobre Centro Mexicano de Promoción del Cobre, A.C.

Paseo de Francia 159 Piso 1 Lomas Verdes 3a Sección

Naucalpan de Juárez, Estado de México 53125, México

Tel. +52(55) 1665 6562

contacto@copperalliance.mx

www.procobre.org

