

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



*Reliable Solutions
Today!*



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*



Electrical Apparatus Service Association, Inc.
1331 Baur Boulevard
St. Louis, Missouri 63132 U.S.A.
314-993-2220 • Fax: 314-993-1269
easainfo@easa.com • www.easa.com

Association of Electrical and Mechanical Trades (AEMT Ltd)
Co. Reg. No. 00397289 (England and Wales)
St. Saviours House
St. Saviours Place
York, YO1 7PJ
England, UK
44 (0) 1904 674897 • Fax: 44 (0) 1904 674896
admin@aemt.co.uk • www.aemt.co.uk

Copyright © 2003. St. Louis, Missouri USA
and York, England UK. Todos los derechos reservados.

Exención de Responsabilidad

La información contenida en este informe y en la *Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor* (Parte 2), fue preparada cuidadosamente y se considera correcta. Pero tanto EASA como AEMT no se responsabilizan de ella y no asumen ninguna obligación o responsabilidad por pérdidas, daños o perjuicios de cualquier tipo, derivados de su uso o de la confianza depositada en ella.

(Esta página se dejó intencionalmente en blanco.)

Prefacio

Esta publicación contiene una Síntesis y un informe completo sobre los resultados del estudio de rebobinado EASA/AEMT(Parte 1), la *Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor* (Parte 2) y las *Lecturas Complementarias* (Parte 3). Su organización asume un grupo diverso de lectores cuyo interés en estos temas pueden variar ampliamente, por ejemplo: Gerentes de planta, jefes de compras, representantes de organismos gubernamentales, ingenieros y técnicos de los centros de servicio. Por consiguiente, puede que una parte del material no sea de interés para todos ellos.

Agradecimientos

Colaboradores Principales

- John Allen
- Thomas Bishop
- Austin Bonnett
- Brian Gibbon
- Alan Morris
- Cyndi Nyberg
- David Walters
- Chuck Yung

Patrocinadores del Proyecto

- Electrical Apparatus Service Association, Inc. (EASA)
- Association of Electrical and Mechanical Trades (AEMT)
- British Nuclear Fuels (BNF)

- United States Department of Energy (DOE)
- Energy Efficient Best Practice Program (EEBPP), UK
- Ministry of Defense Ships Support Agency (MoD SSA), UK
- UK Water Industry Research, Ltd. (UKWIR)

Fabricantes y Empresas Participantes

- Diez fabricantes de motores proporcionaron motores, datos técnicos y asistencia para el estudio: ABB, Baldor, Brook Crompton, GEC, Leeson, Reliance, Siemens, Toshiba, U.S. Electrical Motors y VEM.
- La empresa Dowding and Mills realizó en sus instalaciones de Birmingham, Inglaterra, todas las reparaciones y los rebobinados de los motores.
- La Universidad de Nottingham realizó las pruebas de eficiencia utilizando los dinamómetros de sus instalaciones de Birmingham, Inglaterra.

Siglas

A continuación se muestran las siglas de las demás organizaciones que fueron cruciales para la publicación de este documento.

ANSI—American National Standards Institute

CSA—Canadian Standards Association

IEC—International Electrotechnical Commission

IEEE—Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

NEMA—National Electrical Manufacturers Association

UL—Underwriters Laboratories, Inc.

BS—British Standards

EN—European Standard

Por favor dirija sus preguntas y comentarios acerca del estudio de rebobinado y la Guía de Buenas Prácticas a EASA, 1331 Baur Boulevard, St. Louis, Missouri 63132-USA ; Teléfono: 314-993-2220; Fax: 314-993-1269; easainfo@easa.com.

(Esta página se dejó intencionalmente en blanco.)

Tabla de Contenido

Parte 1: *Estudio de Rebobinado EASA/AEMT*

Síntesis	1-3
Protocolo de Ensayos y Resultados.....	1-9

Parte 2: *Guía de Buenas Prácticas Para Conservar La Eficiencia del Motor*

Introducción	2-3
Terminología	2-3
Pérdidas de Energía en los Motores de Inducción.....	2-4
Procesos de la Reparación del Motor.....	2-10

Parte 3: *Lecturas Complementarias*

Bibliografía	3-3
Apéndice 1: Factor de Cuerda y Factor de Distribución.....	3-4
Apéndice 2: Análisis de las Configuraciones de los Bobinados	3-6
Apéndice 3: Cambiando a Bobinados Imbricados-Ejemplos.....	3-7
Apéndice 4: Aceros Eléctricos	3-9
Apéndice 5: Consideraciones para Reparar o Reemplaza	3-17

(Esta página se dejó intencionalmente en blanco.)

Parte 1: *Estudio de Rebobinado EASA/AEMT*

Síntesis	1-3
Protocolo de Ensayos y Resultados	1-9
Protocolo de Ensayos–Puntos Clave	1-9
Comparación de los Métodos de Ensayo con Carga para las Normas IEC 60034-2 e IEEE 112-1996.....	1-11
Método de Segregación de Pérdidas Utilizado en el Estudio de Rebobinado EASA/AEMT	1-13
Prueba de Pérdidas en el Núcleo.....	1-15
Datos de Ensayo	1-16

(Esta página se dejó intencionalmente en blanco.)

Síntesis

El Efecto de la Reparación/Rebobinado en la Eficiencia del Motor

Introducción

Los motores eléctricos son los componentes principales de la mayoría de las plantas y equipos industriales y consumen dos tercios de toda la energía eléctrica utilizada en las aplicaciones industriales/comerciales en el mundo desarrollado. Al final de su vida útil, normalmente el coste de su propio consumo energético asciende a muchas veces el precio de compra original. Sólo en Europa y Estados Unidos, el coste anual de la energía utilizada por los motores está estimado en 100 billones de dólares americanos. No obstante, el fallo de un motor puede llegar a costar más en términos de pérdidas de producción, entregas no cumplidas y clientes inconformes. Aunque un simple fallo puede impactar negativamente en la rentabilidad de una compañía a corto tiempo, los fallos múltiples y repetitivos pueden llegar a reducir la competitividad futura a mediano y largo plazo.

Queda claro que las fábricas necesitan estrategias gerenciales y de un mantenimiento efectivo, para poder minimizar los costes de funcionamiento y la compra total de motores, a la vez que quieren evitar las dificultades producidas por los fallos inesperados de los motores.

Los usuarios más experimentado desde hace mucho tiempo saben, que tener motores reparados o rebobinados por centros de servicio cualificados, reduce los gastos y a la vez asegura una operación confiable.

Para ayudar a responder estas preguntas, las empresas EASA (Electrical Apparatus Services Association) y AEMT (Association of Electrical and Mechanical Trades), realizaron un estudio conjunto, para determinar los efectos causados por la reparación/rebobinado en la eficiencia de un motor. Esta síntesis describe brevemente la metodología y los resultados de este estudio. A continuación, la Parte 1 proporciona los detalles adicionales y los datos de prueba. También se incluye una Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor (Parte 2) que identifica los procedimientos para conservar o incluso mejorar la eficiencia después del rebobinado.

Antecedentes

Simples, robustos y eficientes, los motores eléctricos generalmente convierten en energía mecánica, entre el 90 y el 95% de la potencia eléctrica consumida. Aún así, teniendo en cuenta la gran cantidad de energía que utilizan, incluso un pequeño cambio en su eficiencia puede llegar a causar un gran efecto sobre los costes de operación.

En los últimos veinte años, los incrementos en los costes de energía y la intervención de los gobiernos han permitido obtener mejoras significativas en la eficiencia del motor eléctrico. En los Estados Unidos por ejemplo, las regulaciones EAct y los nuevos diseños de eficiencia Premium, elevaron la eficiencia a niveles más altos que los normalmente disponibles. En Europa, los acuerdos voluntarios entre los fabricantes líderes de motores y la Comisión Europea (CE) están logrando los mismos resultados con los motores de eficiencia EFF1.

Sin embargo, las quejas que la reparación/rebobinado inevitablemente disminuye la eficiencia del motor, han sido muy frecuentes. Tomando como base una gran cantidad de estudios disponibles, la mayoría sobre motores pequeños (hasta 30 hp o 22.5 kW), con

frecuencia estos afirman que al reparar/rebobinar un motor, su eficiencia disminuye 1-5 % é inclusive más, cuando es rebobinado varias veces [Refs. 1-5]. Esta percepción persiste, a pesar de las evidencias que dicen lo contrario, proporcionadas por el reciente estudio de Energía Avanzada [Ref. 6].

En este contexto, quienes toman las decisiones, actualmente evalúan cuidadosamente tanto la confiabilidad como la eficiencia de los motores que compran o reparan. Las dificultades a las que se enfrentan son, como distinguir la ficción de los hechos y la realidad de la ficción.

Objetivos

EASA y AEMT diseñaron este estudio para poder obtener respuestas definitivas a las preguntas de la eficiencia, particularmente a las que están relacionadas con la reparación/rebobinado de los motores. El objetivo principal del proyecto fue determinar el impacto que tiene la reparación/rebobinado sobre la eficiencia de un motor de inducción. Incluyendo para ello el estudio de muchas variables::

- Rebobinado de motores sin utilizar controles específicos durante los procedimientos de rebobinado y desmantelado de los bobinados.
- Exceso de lubricación.
- Como afectan las diferentes temperaturas de quemado a las pérdidas del núcleo del estator.
- Motores que han sido rebobinados varias veces.
- Rebobinado de motores de baja tensión vs motores de media tensión.
- Usar distintas configuraciones de bobinados y diferentes llenados de ranuras.
- Daño físico del núcleo del estator (mecánico).

El segundo objetivo fue identificar los procedimientos que degradan, que ayudan a conservar o inclusive a mejorar la eficiencia de los motores rebobinados y preparar la Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor (Parte 2).

El objetivo final fue intentar correlacionar los resultados obtenidos en las pruebas de las pérdidas en el núcleo estáticas y en carga.

Esta investigación está encuadrada a motores de inducción con potencias nominales mayores que las utilizadas en estudios previos (ej. aquellos más susceptibles a ser rebobinados) y en ella los motores han sido sometidos a ensayos independientes de eficiencia, antes y después de ser rebobinados. A través de este estudio EASA y AEMT han buscado un enfoque equilibrado, que tenga en cuenta las limitaciones básicas y las condiciones ambientales generales.

Los resultados de las pruebas realizadas por la Universidad de Nottingham (Reino Unido), EASA y AEMT, revelan que los métodos de reparación que utilizan buenas prácticas conservan la eficiencia dentro de un rango de precisión que se puede medir utilizando procedimientos industriales estándar de prueba (+- 0.2%), y en algunos casos se puede mejorar. El presente documento también identifica los procesos de reparación realizados con buenas prácticas y suministra una información importante de soporte técnico.

Alcance de los Productos Evaluados

El estudio involucra, 22 motores nuevos con potencias entre 50

y 300 hp (37.5 a 225 kW) y 2 motores pequeños [7.5 hp (5.5 Kw)]. Los que incluyen:

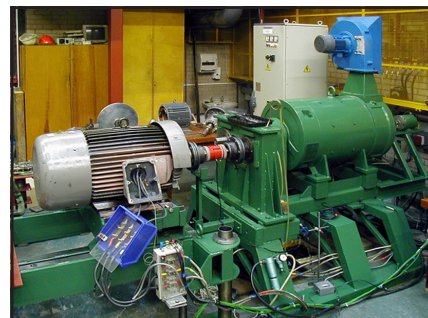
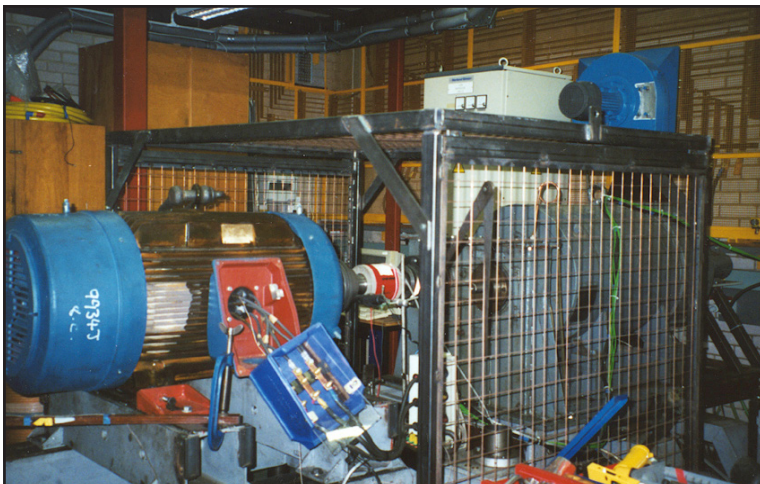
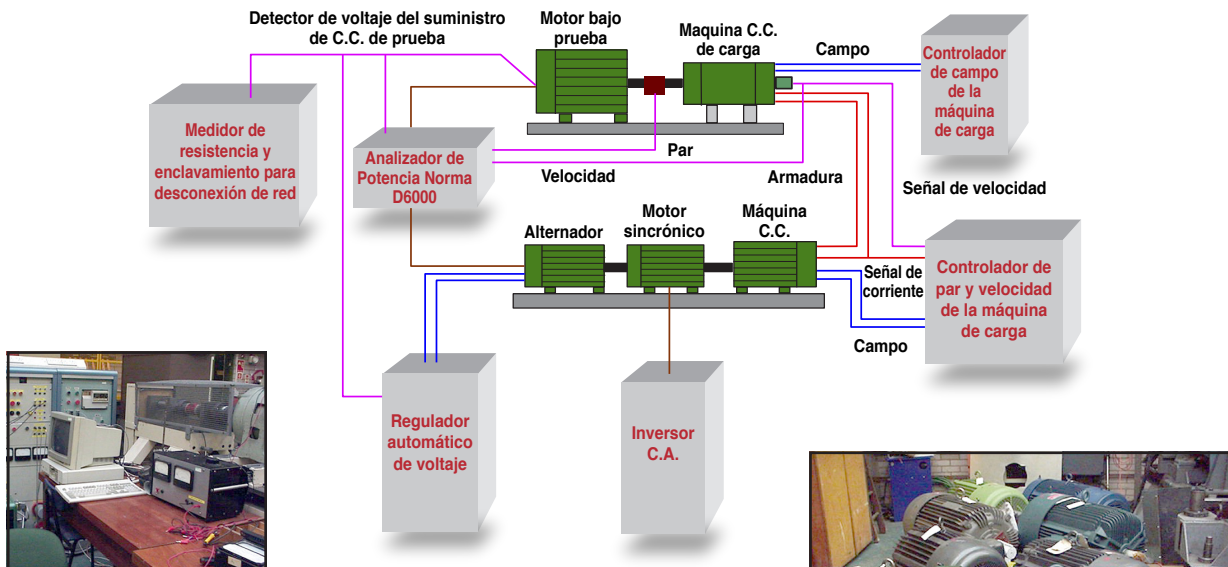
- Motores de 50 y 60 Hz
- Motores de baja y media tensión.
- Motores fabricados con diseños NEMA e IEC.
- Motores IP 23 (abierto a prueba de goteo) e IP 54(totalmente cerrados enfriados por ventilador).
- Motores de 2 y 4 polos.
- Motores de 7.5 hp (5.5 kW). (para verificar los resultados iniciales después de varios ciclos de quemado).
- Pruebas de inter-comparación (Round Robin Test) en un motor nuevo de 40 hp (30 kW), las cuales indican que al evaluarlos como un conjunto, factores como la tensión de suministro, la repetición de los procedimientos de prueba y la instrumentación, pueden afectar los resultados de las pruebas.

Metodología

Todas las pruebas fueron realizadas de conformidad con lo estipulado por la norma IEEE 112-Método B, utilizando un banco de pruebas con dinamómetro (ver Figura 1). El nivel de precisión de la instrumentación excedía la requerida por la norma. Para verificar la precisión de los equipos de prueba y los métodos utilizados por la Universidad de Nottingham, un motor nuevo de 40 hp (30 kW), fue sometido a ensayos en cuatro lugares diferentes (ver tabla "Pruebas de inter-comparación y Protocolo de Ensayo"), para efectos de comparación, las eficiencias fueron calculadas de acuerdo con la norma BS EN 60034-2, actualmente vigente en Europa.

Los motores nuevos se hicieron funcionar a plena carga hasta que alcanzaron sus condiciones de estado estable y posteriormente fueron probados con carga, desmontados y sus bobinados fueron quemados en un horno de pirolisis a temperatura controlada. Después de retirar los bobinados, fueron rebobinados, montados y probados nuevamente utilizando los mismos equipos de prueba

Figura 1
INSTALACIONES DE PRUEBA DE LA UNIVERSIDAD DE NOTTINGHAM



anteriores. En la mayoría de los casos, se midieron las pérdidas en el núcleo antes y después de retirar los devanados, utilizando una prueba de lazo (“toroide”) y/o dos probadores de núcleo disponibles en el comercio.

Resultados de los Ensayos de Eficiencia Realizados a los Motores Rebobinados

Los 22 motores nuevos utilizados en el estudio, fueron distribuidos en cuatro grupos, para así incluir las diferentes variables de prueba. El resumen de los resultados presentados a continuación, no indica cambios significativos en la eficiencia de los motores rebobinados mediante procedimientos que utilizaron buenas prácticas (dentro del rango de precisión de la norma IEE 112- Método B) y en varios casos se pudo mejorar la eficiencia real. (Para resultados detallados vea “Protocolo de Ensayos y Resultados EASA/AEMT.”

Grupo A Seis motores de bajo voltaje [100-150 hp (75-112 kW)], rebobinados una vez. No se utilizaron controles específicos en sus procesos, al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 660°F (350°C) y al rebobinarlos.

Resultados: Inicialmente se observó un cambio en la eficiencia promedio de -0.6% después de 1 rebobinado (rango -0.3 a -1%).

No obstante, los dos motores que presentaron las mayores reducciones de eficiencia, habían sido re-lubricados durante el montaje, lo que incrementó las pérdidas por fricción.

Después de corregir esto, la eficiencia promedio cambió a -0.4% (rango -0.3 a -0.5%).

Grupo B Diez motores de bajo voltaje [60-200hp (45-150 kW)], rebobinados una vez. Se utilizaron controles específicos en sus procesos, al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 680°F - 700°F (360°C - 370°C) y al rebobinarlos.

Resultados: La eficiencia promedio cambió de -0.1% (rango +0.2 to -0.7%).

Se detecta que el aislamiento inter-laminar uno de los motores presenta defectos de fábrica. Omitiendo los resultados de este motor, la eficiencia promedio cambió a -0.03% (rango +0.2% a -0.2%).

Grupo C1 Cinco motores de bajo voltaje [100-200hp (75-150 kW)], rebobinados dos o tres veces. Se utilizaron controles específicos en sus procesos, al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 680°F- 700°F (360°C-370 °C) y al rebobinarlos.

Resultados: Después de rebobinarlos tres veces (tres máquinas) y dos veces (dos máquinas), la eficiencia promedio cambió de -0.1% (rango +0.7 a -0.6%).

PRUEBAS DE INTER-COMPARACIÓN Y PROTOCOLO DE ENSAYO

Para asegurar la obtención de resultados precisos, la eficiencia de un motor IEC de 30 kW fue probada inicialmente en la Universidad de Nottingham y posteriormente en otras instalaciones diferentes. Estas instalaciones fueron: U.S. Electrical Motors en St. Louis, Missouri; Baldor Electric Co., Fort Smith, Arkansas y Oregon State University, Corvalls, Oregon.

Cada uno de estos centros de prueba probó la eficiencia del motor a 50 y 60 Hz, utilizando el procedimiento descrito por la norma IEEE 112-Método B (IEEE 112B).

Se utilizó el método de segregación de pérdidas (en vacío y con carga), el cual fue escogido por sus análisis detallados.

Como referencia, los resultados obtenidos fueron comparados con los arrojados por programas de pruebas inter-comparación previamente realizados por miembros de la National Electric Manufacturers Association (NEMA). Los resultados iniciales de las pruebas NEMA variaron la eficiencia en 1.7 puntos; como producto de la estandarización de los procedimientos de prueba, la variación posterior de la eficiencia se redujo hasta 0.5 puntos.

Como se muestra en la Tabla 1, el rango de los resultados de las pruebas de inter-comparación realizadas al motor de 30 kW de este estudio, no excede los 0.9 puntos de eficiencia a 60 Hz y los 0.5 puntos a 50 Hz. Estos resultados fueron obtenidos sin ninguna estandarización y son favorables al compararlos con la variación del 1.7 % obtenida con las pruebas NEMA.

Los resultados obtenidos también sirven para comprobar que el protocolo de prueba utilizado para determinar el impacto del rebobinado sobre la eficiencia del motor, concuerda con las prácticas aprobadas por la industria y que los resultados del estudio no están desviados por el método de evaluación.

TABLA 1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE INTER-COMPARACIÓN PARA UN MOTOR DE 30 KW-4 POLOS						
Centro de Prueba	Prueba	Eficiencia a plena carga	Factor de potencia a plena carga	Amperios a plena carga	Elevación de temperatura	rpm
Baldor	400v/50 Hz	91.8%	86.8%	54.0	69.4°C	1469
Nottingham	400v/50 Hz	92.3%	87.0%	54.2	68.0°C	1469
U.S. Electrical Motors	400v/50 Hz	91.9%	86.7%	53.5	59.0°C	1470
Nottingham	460/60 Hz	93.5%	85.9%	47.0	53.9°C	1776
Oregon State	460v/60 Hz	92.6%	85.9%	47.0	50.0°C	1774
U.S. Electrical Motors	460v/60 Hz	93.1%	86.4%	46.5	42.0°C	1774

Grupo C2 Dos motores de bajo voltaje [7.5 hp (5.5 kW)] quemados tres veces en el horno y rebobinados una vez. Se utilizaron controles específicos en sus procesos al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 680°F- 700°F (360°C-370°C) y al rebobinarlos.

Resultados: La eficiencia promedio cambió +0.5% (rango +0.2 a + 0.8%).

Grupo D Un motor de media tensión [300 hp (225 kW)] con bobinas formadas (pletina) y rebobinado una vez. Se utilizaron controles específicos en sus procesos, al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 680°F- 700°F (360°C-370°C) y al rebobinarlo.

Resultados: La eficiencia promedio cambió -0.2%. El comportamiento de este motor fue similar al obtenido en las máquinas de baja tensión rebobinadas con controles específicos.

Interpretación de los Resultados de las Pruebas

Los resultados de las pruebas en todos los grupos no se salieron del rango de desviación de las pruebas de inter-comparación, indicando que los procedimientos de prueba estuvieron acordes con las prácticas industriales aprobadas (ver tabla en "Pruebas de Inter-comparación").

El cambio de la eficiencia promedio en cada grupo también se mantuvo dentro del rango de precisión del método de prueba (+-

0.2%), lo que demuestra que los motores que han sido reparados/rebobinados utilizando buenas prácticas, conservan su eficiencia original y en muchos casos su eficiencia real puede ser mejorada. (ver tabla "Explicación de la Eficiencia Nominal").

Todos los motores fueron quemados a temperaturas controladas. Otros controles específicos aplicados a los motores (exceptuando al Grupo A), incluyen un control del método de limpieza y detalles para el rebobinado como espiras/bobina, longitud media de la espira y el área de la sección transversal de los alambres.

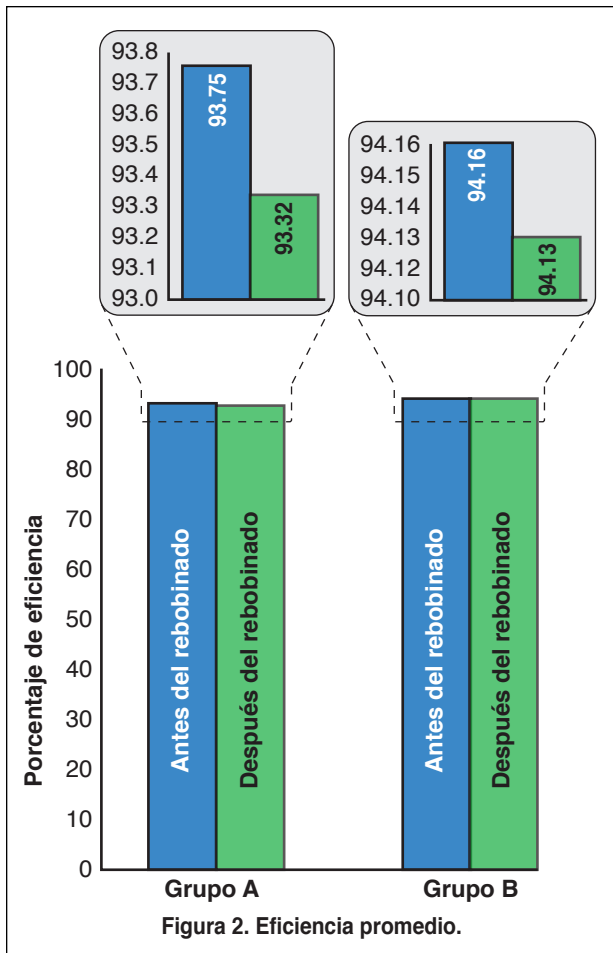
Los beneficios de estos controles forman parte las bases de la Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor (Parte 2), y se ilustran claramente en la Figura 2, la cual compara los resultados obtenidos para los motores de los Grupos A y B.

Conclusión

Este informe es el resultado del trabajo realizado por un equipo de expertos internacionales que trabajan en la industria y en la docencia. Los resultados demuestran claramente, que la eficiencia de un motor se puede conservar si los reparadores utilizan los métodos descritos en la Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor (Parte 2).

Listado Parcial de la Información de Soporte Suministrada en otras Partes de esta Publicación

- **Protocolo de Ensayos y Resultados EASA/AEMT (Parte 1).** Esta parte incluye una descripción detallada del estudio, como también los datos reales de las pruebas. Adicionalmente, esta sección explica de forma sencilla, como fueron calculadas las pérdidas en este estudio utilizando la IEEE 112-Método B, norma ampliamente reconocida como una de las más precisas utilizadas actualmente. También resume las principales diferencias existentes entre las normas de prueba IEC (BS EN 60034-2) y la IEEE112-1996 y compara las eficiencias de los motores medidas en este proyecto, pero calculadas por dos métodos diferentes. Finalmente, esta sección demuestra que las pruebas utilizadas comúnmente por los centros de servicio, son efectivas para determinar si los procesos de reparación (particularmente el quemado y la remoción del bobinado), han afectado la eficiencia del motor.
- **Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor (Parte 2).** Dirigida principalmente al personal de los centros de servicio, describe los métodos de reparación que emplean buenas prácticas utilizadas para lograr los resultados que se indican en este estudio. Esta guía puede ser empleada como un documento independiente. También contiene consejos de reparación, importante terminología acerca del motor e información acerca de las fuentes que producen las pérdidas en los motores de inducción que afectan la eficiencia. Incluye también un análisis útil a cerca de las pérdidas adicionales con carga, el cual es tratado de forma diferente en las normas IEC e IEEE utilizadas para la prueba de los motores.
- **Anexo 4: Aceros Eléctricos.** El tipo de aceros eléctrico y de aislamiento inter-laminar elegidos para las laminaciones del rotor y del estator, son factores decisivos en la eficiencia y el funcionamiento del motor. No obstante, los procesos de reparación inadecuados pueden alterar las calidades de los aceros del núcleo y su aislamiento inter-laminar. Este anexo revisa los diferentes tipos de aceros eléctricos mundialmente utilizados y explica detalladamente, las razones por las cuales se sugieren algunas de las buenas prácticas descritas en la Parte 2.



EXPLICACIÓN DE LA EFICIENCIA INDICADA EN LA PLACA DE DATOS

La eficiencia indicada en la placa de datos se usa como referencia para comparar la eficiencia del motor antes y después de la reparación. Por esto es importante entender las bases y las limitaciones de los valores nominales.

La placa de datos puede indicar, la eficiencia nominal, la eficiencia mínima (también denominada “garantizada”) o ambas. Si la placa indica solo una de ellas, generalmente se trata de la eficiencia nominal, que siempre tiene un mínimo valor asociado (que debe ser tenido en cuenta para las pérdidas más altas). Si la placa no indica ninguna eficiencia, contacte con el fabricante o consulte los catálogos y la literatura técnica disponible.

Para determinados diseños de motores, las eficiencias mínimas y nominales se entienden mejor como promedios- no como la eficiencia real medida en un motor en particular.

Estas eficiencias se obtienen probando los prototipos de motores de un determinado diseño.

Las Tablas 2 y 3 muestran los niveles de eficiencia para motores NEMA y el rango de eficiencias cubierto para motores IEC (entre la mínima y la nominal). No se tratan de valores discretos, por consiguiente pueden producir engaños al compararlas con las eficiencias obtenidas al probar el motor nuevo o rebobinado. Para los motores NEMA, la mínima eficiencia se basa sobre “una diferencia de pérdidas” del 20% y para los motores IEC en una diferencia del 10 ó 15%. Esto permite a los fabricantes hacer una variación en los materiales, procesos de fabricación y resultados de prueba para un determinado motor que hace parte de un lote de producción de motores de un determinado diseño.

Los valores mínimos y nominales de la eficiencia solo son exactos cuando los motores se prueban a plena carga, al nivel del mar, utilizando tensión nominal sinusoidal balanceada, a frecuencia nominal y a una temperatura ambiente de 25°C. Por consiguiente, normalmente no es posible medir la eficiencia in situ, a los mismos niveles de precisión indicados en los tres valores de eficiencia de la placa. El hecho de que la eficiencia de prueba no coincida con la nominal indicada en placa, no implica que el motor haya sido fabricado o reparado erróneamente.

Las Figuras 2 y 3 muestran placas de datos típicas para motores NEMA e IEC

Referencia: NEMA MG 1-1998 (Rev. 3).

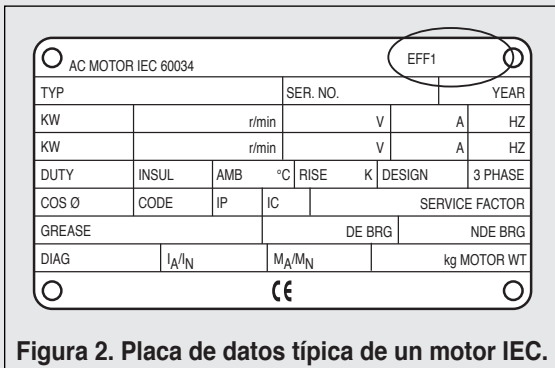


Figura 2. Placa de datos típica de un motor IEC.

Tabla 2. Niveles de Eficiencia NEMA/EPACTs

Eficiencia Nominal	Eficiencia Mínima Basada en una diferencia de pérdidas del 20 %
94.1	93.0
93.6	92.4
93.0	91.7
92.4	91.0
91.7	90.2
91.0	89.5
90.2	88.5
89.5	87.5
88.5	86.5
87.5	85.5

Referencia: NEMA MG 1-1998 (Rev. 3), Tabla 12-10.

Tabla 3. Niveles de Eficiencia IEC 60034-1-1998

Eficiencia Nominal	Eficiencia Mínima < 50 kW (diferencia de pérdidas del 15%)	Eficiencia Máxima > 50 kW (diferencia de pérdidas del 20%)
94.1	93.3	93.5
93.6	92.7	93.0
93.0	92.0	92.3
92.4	91.3	91.6
91.7	90.5	90.9
91.0	89.7	90.1
90.2	88.7	89.2
89.5	87.9	88.5
88.5	86.2	87.4
87.5	85.9	86.3

Referencia: IEC 60034-1, Tabla 18. Eficiencias mínimas y nominales de los motores IEC medidas por el método de suma o adición de pérdidas.

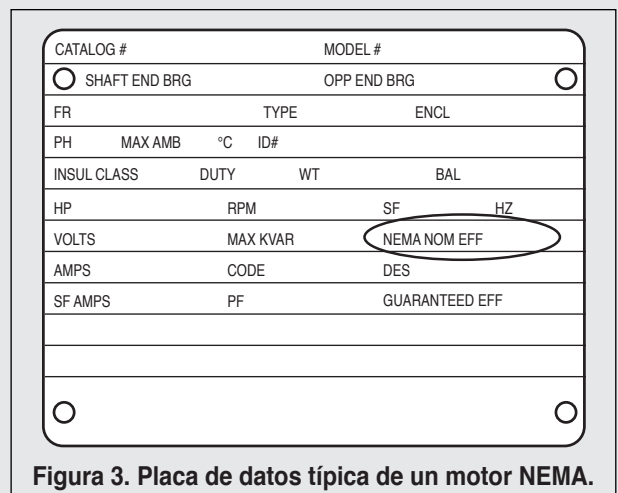


Figura 3. Placa de datos típica de un motor NEMA.

- **Anexo 5: Reparar o Reemplazar?** Esta difícil pregunta que a menudo nos hacemos, se encuentra ampliamente cubierta en este capítulo. Reemplazar un motor por uno nuevo de alta eficiencia, generalmente es la mejor opción económica. Otras veces, reparar el motor existente dará mejores resultados. Los factores clave incluyen tiempo de funcionamiento en horas, la disponibilidad del motor de repuesto de alta eficiencia, la pérdida de tiempo de producción y la confiabilidad. Este capítulo también contiene diagramas que ayudan a los usuarios y a los centros de servicio a tomar la mejor decisión.

Referencias

- [1] William U. McGovern, "High Efficiency Motors for Upgrading Plant Performance," *Electric Forum* 10, No. 2 (1984), pp. 14-18.
- [2] Roy S. Colby and Denise L. Flora, *Measured Efficiency of High Efficiency and Standard Induction Motors* (North Carolina State University, Department of Electrical and Computer Engineering (IEL), 1990).
- [3] D. H. Dederer, "Rewound Motor Efficiency," *Ontario Hydro Technology Profile* (Ontario Hydro, November 1991).
- [4] Zeller, "Rewound High-Efficiency Motor Performance," *Guides to Energy Management* (BC Hydro, 1992).
- [5] *Rewound Motor Efficiency, TP-91-125* (Ontario Hydro, 1991).
- [6] Advanced Energy, "The Effect of Rewinding on Induction Motor Losses and Efficiency" (EEMODS 02, 2002).

Protocolo de Ensayos y Resultados EASA/AEMT

PROTOCOLO DE ENSAYOS—PUNTOS CLAVE

Los usuarios experimentados desde hace mucho tiempo saben que reparando o rebobinando sus motores en centros de servicio calificados, reducen los gastos y aseguran la confiabilidad de operación. No obstante, los elevados costos de la energía en los años recientes han generado dudas acerca de la eficiencia energética de los motores reparados/rebobinados. Para ayudar a responder a esas preguntas, la Electrical Apparatus Service Association (EASA) y la Association of Electrical and Mechanical Trades (AEMT), han realizado un estudio sobre los efectos de la reparación/rebobinado en la eficiencia del motor.

Objetivos del estudio

El objetivo principal del estudio fue evaluar de la forma más precisa, el impacto causado en la reparación al rebobinar un motor. Esto incluye estudiar los efectos de diferentes variables:

- Rebobinado de motores sin utilizar controles específicos durante los procedimientos de rebobinado y desmantelado de los bobinados.
- Exceso de lubricación.
- Diferentes temperaturas de quemado en las pérdidas del núcleo del estator.
- Motores que han sido rebobinados varias veces.
- Rebobinado de motores de baja tensión vs motores de media tensión.
- Usar distintas configuraciones de bobinados y diferentes llenados de ranuras.
- Daño físico del núcleo del estator (mecánico).

El segundo objetivo fue identificar los procedimientos que degradan, que ayudan a conservar o inclusive a mejorar la eficiencia de los motores rebobinados y preparar la *Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor* (Parte 2).

El objetivo final fue intentar correlacionar los resultados obtenidos en las pruebas de las pérdidas en el núcleo estáticas y en funcionamiento.

Productos Evaluados

Esta investigación se centró en motores de inducción con rangos de potencia mayores que los utilizados en estudios anteriores (ej. aquellos que se rebobinan con más frecuencia), sometiéndolos a pruebas de eficiencia individuales antes y después de rebobinarlos [Ref. 1-6] Para el estudio fueron seleccionados 22 motores de inducción nuevos con potencias entre 50-300 hp/37.5-225 kW) y dos motores pequeños (7.5 hp/5.5 kW). Estos incluían:

- Motores de 50 & 60 Hz
- Motores de baja y media tensión
- Diseños IEC y NEMA
- Carcasas abiertas a prueba de goteo (IP 23) y totalmente cerradas enfriadas por ventilador (IP 54).
- Motores de 2 & 4 polos
- Motores de 7.5 hp (5.5 kW) (para verificar los resultados anteriores después de varios ciclos de quemado)
- Pruebas de inter-comparación (round robin test) en un motor nuevo de 40 hp (30 kW) las cuales indicaron que los resultados

pueden verse afectados si se analizan conjuntamente factores como la tensión de suministro, la repetitividad de los procedimientos de prueba y la instrumentación.

Normas para Evaluar las Pérdidas

Dos normas principales son relevantes para este trabajo. La Norma IEC 60034-2 que es la norma Europea vigente (la versión británica es la BS EN 60034-2) y la Norma Americana IEEE 112. La norma IEEE ofrece varios métodos para traducir los resultados de las pruebas en especificaciones de eficiencia para un motor. En este estudio se utilizó el método B de la IEEE 112 (IEEE 112 B) dado que este proporciona una medición indirecta de las pérdidas adicionales con carga, en lugar de asumir un valor como lo hace la norma IEC. Por consiguiente la eficiencia medida con la IEEE 112B es más precisa que la que se obtiene al utilizar el método IEC.

Tanto los procedimientos de prueba de la IEC 60034-2 como los de la IEEE 112 B requieren pruebas en vacío, a carga parcial y a plena carga. El enfoque de la IEEE requiere pruebas en vacío dentro de un rango de voltajes y en un rango más amplio de cargas para las condiciones de carga parcial. La IEEE 112B también requiere una medición precisa del par (torque), mientras que la prueba IEC no lo necesita.

A pesar que el estudio se llevó a cabo de acuerdo con los procedimientos de prueba de la IEEE, se incluyeron los resultados tanto para las normas IEEE como para las IEC. Curiosamente, la diferencia más significativa entre ellas se encuentra en la zona de las pérdidas adicionales con carga. (consulte la Página 1-12 para ver una comparación detallada entre la IEEE 112 B y la IEC 60034-2 y la Página 1-14 para una explicación de la segregación de pérdidas según la IEEE 112-1996).

Metodología

Todas las pruebas fueron realizadas de conformidad con la IEEE 112B, utilizando un banco de pruebas con dinamómetro (ver Figura 1). El nivel de precisión de la instrumentación excedía el requerido por la norma. Para verificar la precisión de los equipos de prueba y los métodos utilizados por la Universidad de Nottingham, un motor de 40 hp (30 kW) fue sometido a ensayos en cuatro lugares diferentes (ver tabla “Pruebas de inter-comparación” en la Página 1-11). Para efectos de poder comparar las eficiencias, estas también fueron calculadas de acuerdo con la norma BS EN 60034-2 actualmente vigente en Europa (vea en la Página 1-14 una discusión entre los métodos de cálculo de las pérdidas adicionales con carga utilizados por las normas IEEE e IEC).

Inicialmente, cada motor se hizo funcionar a plena carga hasta alcanzar las condiciones de estado estable y posteriormente se probaron con carga. Después, los motores fueron desmontados, sus estatores se procesaron en un horno de pirolisis a temperatura controlada y los bobinados fueron removidos. A continuación, cada motor fue rebobinado, montado y probado nuevamente, utilizando los mismos equipos de prueba anteriores. En la mayoría de los casos, se midieron las pérdidas en el núcleo antes del quemado y después de retirar los devanados utilizando una prueba de lazo (“toroide”) y/o dos probadores de núcleo comerciales. Para minimizar los cambios en el desempeño debidos a factores diferentes a los producidos por los procesos normales de rebobinado, no se realizaron cambios en los conjuntos de los rotores.

Fuentes Potenciales de Error

Idealmente, el suministro eléctrico para una máquina bajo carga deberá ser perfectamente sinusoidal y tener un voltaje trifásico balanceado. Un desbalance entre las tensiones de fase (línea-línea si se utiliza un sistema de solo tres hilos) o una imperfección en el ángulo de fase de 120 grados eléctricos entre dos fases adyacentes, aumentará las pérdidas en la máquina. Aunque las pérdidas cambian con la variación del desbalance diario del suministro eléctrico, la regulación del voltaje de fase puede solucionar esto.

La presencia de armónicos de voltaje o la distorsión en la fuente de suministro, también aumentará las pérdidas de potencia de la máquina. La distorsión considerable presente en las redes de alimentación normales cambia constantemente durante el día o durante el día-día.

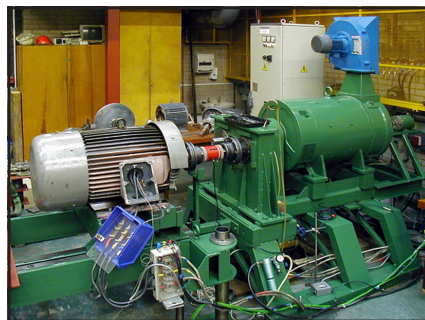
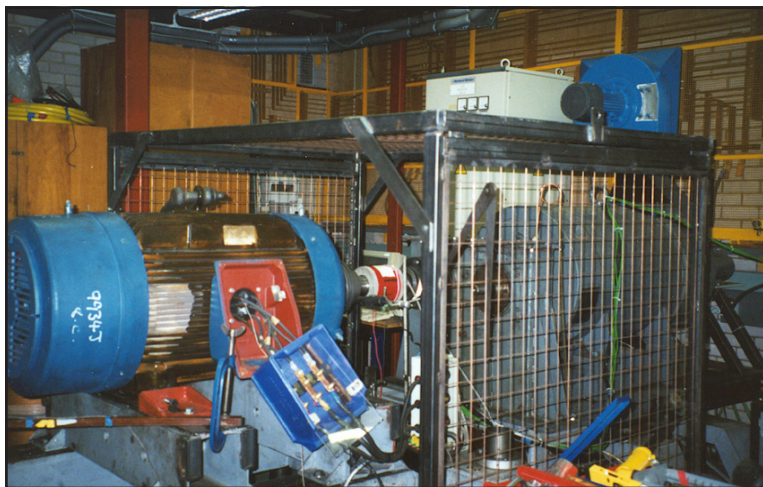
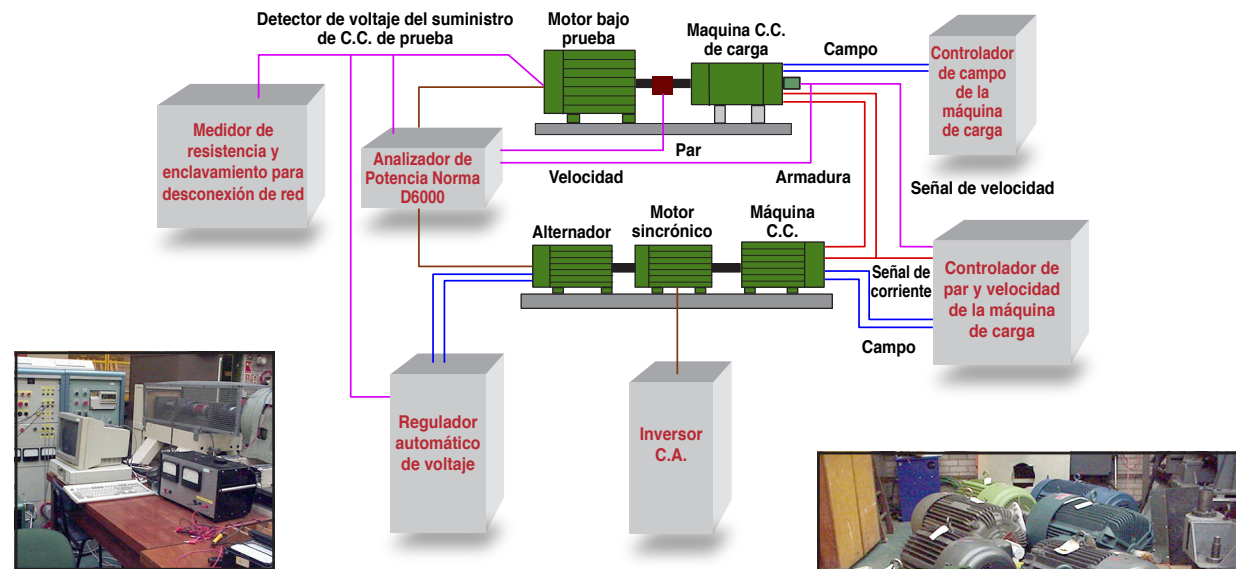
En este proyecto se evitaron fuentes de error similares a estas, cumpliendo rigurosamente con los procedimientos de prueba de la IEEE 112B y utilizando un centro de ensayos bien diseñado.

Repetitividad de los Resultados

Aunque obviamente se requería una precisión muy alta, la repetitividad aún era más importante. Por consiguiente, el centro de pruebas para este proyecto (ver Figura 1), fue diseñado para controlar tres de los cuatro factores básicos que contribuyen a la repetitividad: El suministro eléctrico, el sistema de carga mecánica y la instrumentación. La cuarta variable, los procedimientos de prueba, se discutirán por separado más adelante.

Centro de ensayos y equipos. Los equipos de ensayo empleados por la Universidad de Nottingham consistieron en una máquina C.C. de carga, acoplada al motor sometido a prueba por medio de un transductor de par montado en un eje cardán. La energía C.A. utilizada para probar los motores fue proporcionada por un generador C.A. impulsado por un motor sincrónico alimentado por un inversor. Este conjunto proporcionó un voltaje constante sinusoidal casi perfectamente balanceado y una forma de onda limpia. Una segunda máquina de C.C. fue acoplada al mismo eje

Figura 1. Esquema del Centro de Ensayos Utilizado para las Pruebas con el Método B de la IEEE 112



del generador y del motor sincrónico para recuperar energía desde la máquina C.C. de carga.

Una gama de transductores de par en línea fue empleado en cada equipo para asegurar la máxima precisión. La potencia, el voltaje, la corriente, la velocidad y el par fueron medidos con un vatímetro Norma D6000 con opción para motores. Todas las medidas del par, la velocidad y la potencia fueron tomadas al mismo tiempo y promediadas sobre varios ciclos de desviación para minimizar las fluctuaciones de las medidas. La resistencia de los devanados fue medida en los terminales del motor con un puente electrónico Valhalla con precisión básica de 0.02%.

Por consiguiente en el conjunto de pruebas se controlaron tres de las cuatro fuentes potenciales de error: La alimentación eléctrica, el sistema de carga y los equipos de prueba. Lo que solo nos deja los procedimientos de prueba.

Procedimientos de prueba. Las pruebas de este estudio fueron realizadas de acuerdo con la IEEE 112B. Los procedimientos de prueba, los intervalos de medición y la ubicación de la termocupla (termopar) en el bobinado fueron optimizados comparando los resultados de las pruebas realizadas a un motor de 30 kW, con los obtenidos al medir directamente las pérdidas con un calorímetro.

Antes de la prueba con carga, cada motor sometido a ensayo completó un ciclo térmico funcionando a plena carga hasta que la temperatura se estabilizó y la grasa de los rodamientos se asentó. Normalmente esto tomó un mínimo de cuatro horas con carga. Entonces la máquina se dejó enfriar a temperatura ambiente.

Las pruebas en vacío fueron realizadas esencialmente con una temperatura en el motor asociada a una operación sin carga y a voltaje nominal. Las temperaturas de los bobinados se midieron con termocuplas instaladas en las cabezas de bobina del devanado.

Una vez las temperaturas se estabilizaron, se tomó un conjunto de resultados mecánicos y eléctricos y la temperatura de los bobinados y la resistencia fueron determinadas. Entonces, el motor bajo ensayo fue puesto de nuevo en funcionamiento a plena carga para restablecer la temperatura a plena carga. Posteriormente, se realizaron mediciones a carga parcial, comenzando con la carga más alta y terminando con la más baja. En cada caso las medidas se tomaron rápidamente, después de esperar un intervalo muy breve para que la máquina se acomodara a su nueva carga.

Las técnicas y los equipos descritos anteriormente aseguran una **repetitividad dentro del 0.1%** en las pruebas realizadas durante varios meses a un stock de motores. Un motor de 100 hp (75 kW) sin modificaciones se conservó especialmente para estos propósitos.

Pruebas de Inter-comparación en un Motor IEC de 30 kW

Como una verificación adicional para asegurar la obtención de resultados precisos, la eficiencia de un motor IEC de 30 kW fue probada inicialmente en la Universidad de Nottingham y posteriormente en tres instalaciones diferentes. Estas instalaciones fueron: U.S. Electrical Motors en St. Louis, Missouri; Baldor Electric Co., Fort Smith, Arkansas y Oregon State University, Corvallis, Oregon.

Cada uno de estos centros de ensayo probó el motor a 50 y 60 Hz, utilizando el procedimiento descrito por la norma IEEE 112 –Método B (IEEE 112B). Todas las pruebas emplearon el método de segregación de pérdidas (en vacío y a plena carga), el cual fue escogido por sus detallados análisis.

Como referencia, los resultados obtenidos fueron comparados con los arrojados por programas de inter-comparación previamente realizados por miembros de la National Electric Manufacturers Association (NEMA). Los resultados iniciales de las pruebas NEMA variaron la eficiencia en 1.7 puntos; como producto de la estandarización de los procedimientos de prueba, la variación posterior de la eficiencia se redujo hasta 0.5 puntos.

Como se muestra en la Tabla 1, el rango de los resultados de las pruebas de inter-comparación realizadas al motor de 30 kW de este estudio no excedió los 0.9 puntos de eficiencia a 60 Hz y los 0.5 puntos a 50 Hz. Estos resultados fueron obtenidos sin ninguna estandarización y son favorables al compararlos con la variación del 1.7 % obtenida con las pruebas NEMA.

Los resultados obtenidos también verifican que el protocolo de prueba utilizado para determinar el impacto del rebobinado en la eficiencia del motor, concuerda con las prácticas aprobadas por la industria y que los resultados de este estudio no están desviados por el método de evaluación.

COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO CON CARGA PARA LAS NORMAS IEC 60034-2 E IEEE 112-1996

Para el estudio de rebobinado EASA/AEMT se seleccionó el procedimiento de prueba de la IEEE 112B, ya que con este procedimiento se mide la eficiencia de un motor de forma más precisa que con el método de la IEC 60034-2. Muchas de las diferencias entre los dos métodos se explican a continuación y se pueden ver en las Tablas 2-7.

Sin embargo, la diferencia más significativa entre los dos métodos estriba en la forma de calcular las pérdidas indeterminadas con

Centro de prueba	Prueba	Eficiencia a plena carga	Factor de potencia a plena carga	Amperios a plena carga	Elevación de temperatura	rpm
Baldor	400v/50 Hz	91.8%	86.8%	54.0	69.4°C	1469
Nottingham	400v/50 Hz	92.3%	87.0%	54.2	68.0°C	1469
U.S. Electrical Motors	400v/50 Hz	91.9%	86.7%	53.5	59.0°C	1470
Nottingham	460/60 Hz	93.5%	85.9%	47.0	53.9°C	1776
Oregon State	460v/60 Hz	92.6%	85.9%	47.0	50.0°C	1774
U.S. Electrical Motors	460v/60 Hz	93.1%	86.4%	46.5	42.0°C	1774

carga (SLL). La IEEE 112B utiliza el método de segregación de pérdidas, el cual es explicado con más detalle en la Página 1-14. La IEC 60034-2 asume unas pérdidas del 0.5% de la potencia de entrada a carga nominal, que se asume varían en otros puntos de carga con el cuadrado de la corriente del estator. El efecto puede ser exagerar el nivel de eficiencia hasta los 1.5 puntos, dependiendo del porcentaje de las pérdidas totales que esté representado por las pérdidas adicionales con carga. Las diferencias en el estudio de rebobinado EASA/AEMT fueron menores (ver Tabla 7).

TABLA 2. MÉTODO

IEEE 112 B	IEC 60034-2
Entrada-salida	Prueba de frenado
Entrada-salida con segregación de pérdidas Medición indirecta de las pérdidas adicionales con carga	—
Máquinas idénticas	Accionamiento mecánico externo (mechanical back-to back)
Mediciones de potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas 1) Medición directa de las pérdidas adicionales con carga 2) Valor asumido de las pérdidas adicionales con carga-punto de carga calibrado	Sumatoria de pérdidas (máquina de accionamiento calibrada)
Circuito equivalente 1) Medición directa de la pérdidas adicionales con carga-punto de carga calibrado 2) Valor asumido de las pérdidas adicionales con carga-punto de carga calibrado	—
—	Accionamiento eléctrico externo (electrical back-to back)

TABLA 3. PRECISIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

	IEEE 112-1996	IEC 60034-2
General	±0.2%	±0.5%
Vatímetro trifásico	±0.2%	±0.1%
Transformadores	±0.2%	Incluido
Velocidad/deslizamiento	Estroboscopio/digital	Estroboscopio/digital
Par (torque)		
a) Clasificación	≤15%	—
b) Sensibilidad	±0.25%	—
EPACT (IEEE 112-1996)		
General	±0.2%	—
Transformadores	±0.2%	—
Combinado	±0.2%	—
Velocidad	±1 rpm	—
Par (torque)	±0.2%	—

Diferencias generales entre la IEEE 112B y la IEC 60034-22

- Para las pruebas en vacío, la IEC no requiere la estabilización de la temperatura de los rodamientos para determinar las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación (F&W). La IEEE requiere mediciones sucesivas del 3% ó menos, en intervalos de media hora.
- Para las pruebas con carga, la IEC utiliza la temperatura de prueba para determinar las pérdidas I²R del estator. La IEEE emplea la elevación de la temperatura de prueba más 25°C.

- Para las pruebas con carga, la IEC no especifica alguna corrección por temperatura por deslizamiento (pérdidas I²R en el rotor). La IEEE corrige a la temperatura especificada del estator.
- Para la corrección de la temperatura del cobre de los bobinados la IEC utiliza 234.5 grados C y la IEEE propone usar 235°C.

TABLA 4. TEMPERATURA DE REFERENCIA

	IEEE 112-1996	IEC 60034-2
Ambiente	25°C	20°C
Especificada		
1) Prueba	Preferida	Utilizada solo para pruebas con carga
2) Otra		
Clase A/E	75°C	75°C
Clase B	95°C	95°C
Clase F	115°C	115°C
Clase H	130°C	130°C

Pérdidas adicionales con carga (SLL). Exceptuando las pruebas con carga [(frenado, acoplamiento externo (back-to back) y máquina calibrada)], la IEC utiliza un porcentaje específico para las SLL. El valor especificado es el 0.5% de la potencia de entrada a carga nominal, que se asume cambia en otras cargas con el cuadrado de la corriente del estator.

Para todas las pruebas con carga excepto la de entrada-salida, la IEEE requiere el cálculo de las SLL suavizando los datos de las mediciones indirectas—ej. Las pérdidas SLL brutas son iguales a las pérdidas totales menos las pérdidas segregadas restantes (y medibles).

Para las pérdidas en vacío, la IEEE requiere la medición directa de las SLL, a no ser que se acuerde otra cosa. La Tabla 5 muestra los valores asumidos a carga nominal. Se asume que los valores de las SLL para otras cargas varían con el cuadrado de la corriente del rotor.

TABLA 5. PÉRDIDAS ADICIONALES CON CARGA ASUMIDAS EN LA IEEE 112 VS. HP/KW

Rango de potencias	% de las pérdidas adicionales con carga a potencia nominal
1 - 125 hp / 0.75 - 93 kW	1.8%
126 - 500 hp / 94 - 373 kW	1.5%
501 - 2499 hp / 374 - 1864 kW	1.2%
≥2500 hp / 1865 kW	0.9%

Pruebas Entrada - Salida: IEEE 112-1996 vs. IEC 60034-2

- La IEC no especifica ningunas limitaciones en el tamaño o la sensibilidad del dinamómetro.
- La IEC no especifica corrección por fricción y ventilación en el dinamómetro.
- La IEC utiliza la elevación de temperatura medida sin corrección. IEEE emplea el incremento de temperatura más 25°C.

- La IEEE especifica 6 puntos de carga. La IEC no especifica ninguno.

Prueba de entrada-salida con segregación de pérdidas (medición indirecta de las pérdidas adicionales con carga): IEEE 112-1996 vs. IEC 60034-2

La IEC no tiene un método de prueba equivalente.

Medición de la potencia eléctrica por el método de segregación de pérdidas: IEEE 112-1996 vs. IEC 60034-2

- La IEEE requiere la medición exacta de las SLL mediante una prueba por inversión de giro. Se acepta un valor específico solo por acuerdo. La IEC emplea un valor conservador especificado.
- La IEEE requiere que la máquina sea probada con carga exactamente en 6 puntos. La IEC no especifica el número de puntos de carga y para calcular las pérdidas con carga permite utilizar voltaje reducido a deslizamiento constante y con corrección vectorial de la corriente del estator.
- Tanto la IEEE como la IEC corrigen las pérdidas I²R del estator a la misma temperatura especificada. No obstante, la IEC no corrige por temperatura las pérdidas I²R del rotor.

Información variada: NEMA MG 1-1998, Rev. 3 vs. IEC 60034-1-1998

- La IEC no utiliza factores de servicio.
- La IEC permite menores variaciones en la potencia de suministro.
- Por lo general los límites de incremento de temperatura son los mismos.
- Las características de par (torque) son muy similares.
- Los requerimientos para la corriente Inrush de la IEC no son tan exigentes como los de la NEMA y generalmente permiten un 20 % ó más en motores de 5 hp (3.5 kW) o en potencias superiores.
- La IEC no asigna una potencia de salida específica a la carcasa, pero especifica potencias favoritas.

TABLA 6. TOLERANCIAS

	IEEE 112-1996	IEC 60034-1-1998
Resumen de pérdidas	Ver nota.	≤ 50 kW -15% de (1 - efic.)
	Ver nota.	> 50 kW -10% de (1 - efic.)
Entrada/salida	Ver nota.	-15% de (1 - efic.)
Pérdidas totales	Ver nota.	> 50 kW + 10% de (1 - efic.)

Nota: Aunque la IEEE no especifica ninguna tolerancia. NEMA y EPACT requieren que la mínima eficiencia en los motores polifásicos de 1-500 hp no exceda en más del 20% el incremento en pérdidas del valor nominal

La Tabla 7 compara los resultados de las pruebas de eficiencia IEEE e IEC realizadas a los motores del estudio EASA/AEMT. Las cifras representan la eficiencia de cada motor antes de ser rebobinado

MÉTODO DE SEGREGACIÓN DE PÉRDIDAS UTILIZADO EN EL ESTUDIO DE REBOBINADO EASA/AEMT

En el estudio de rebobinado EASA/AEMT se utilizó el método de la IEEE 112-1996 para segregarse las pérdidas. Las secciones aplicables de la norma se resumen a continuación para ayudar a explicar el proceso. Los procedimientos exactos para determinar estas pérdidas se describen en la norma. La discusión de la forma

TABLA 7. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS IEEE & IEC PARA EL ESTUDIO EASA/AEMT

Motor	Eficiencia IEEE	Eficiencia IEC	Diferencia
1A	94.1	94.7	0.6
2B	92.9	93.5	0.6
3C	94.5	95.3	0.8
4D	95.0	95.0	0.0
5E	92.3	92.3	0.0
6F	94.4	94.4	0.0
7B	93.7	94.0	0.3
8C	96.2	96.3	0.1
9E	90.1	90.3	0.2
10D	95.4	95.3	-0.1
11F	96.4	95.9	-0.5
12F	95.9	95.5	-0.4
13G	94.8	95.3	0.5
14H	89.9	91.2	1.3
15J	93.0	94.2	1.2
16H	95.4	95.5	0.1
17H	86.7	87.3	0.6
18G	94.2	94.2	0.0
19H	93.0	92.7	-0.3
20H	93.9	94.1	0.2
21J	93.7	94.6	0.9
22H	83.2	84.0	0.8
23K	95.7	95.7	0.0
24E	95.1	95.1	0.0

en que la instrumentación, la calibración del dinamómetro, los métodos de corrección de temperatura y otros puntos de los diferentes procedimientos pueden afectar la precisión de los datos adquiridos, se encuentra fuera del alcance de esta sección.

Otras normas de prueba relevantes similares incluyen la Norma Canadiense C390, la Norma Australiana/Neo Zelandesa AS/NZS 1359.5, la Norma Japonesa JEC 2137-2000 y la recientemente adoptada IEC 61972. Como se explica en la página 1-12, la norma de prueba empleada actualmente en Europa (IEC 60034-2) difiere de esas normas.

Es necesario enfatizar en varios puntos importantes relacionados con este procedimiento. Primero, el estudio EASA/AEMT confirmó que las pérdidas por fricción no se estabilizan hasta que la cavidad de la grasa haya sido adecuadamente purgada, lo que puede tomar un tiempo considerable. El estudio también sugiere que en algunos casos el calor generado por el rodaje del motor puede afectar a otras pérdidas.

El protocolo de pruebas empleado por este proyecto incluye el rodaje de cada motor. Una vez realizado el rodaje, se tuvo el cuidado de no alterar el llenado de la grasa durante el desmontaje, excepto en los motores 1A y 3C, en lo que se agregó grasa.

Cálculo de la eficiencia

La eficiencia es la relación entre la potencia de salida y la potencia total de entrada. La potencia de salida equivale a la potencia de entrada menos las pérdidas. Por consiguiente, si dos de estas tres variables (salida, entrada o pérdidas) se conocen, la eficiencia se

puede calcular utilizando una de las siguientes ecuaciones:

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}}$$

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{potencia de entrada} - \text{pérdidas}}{\text{potencia de entrada}}$$

Método de prueba 112 B: entrada-salida con segregación de pérdidas

Este método consiste de varios pasos. Se toman todos los datos con la máquina funcionando como motor o como generador, dependiendo de la región de operación en la que se requieren los datos de eficiencia. La pérdida total aparente (entrada menos salida) es segregada en varios componentes, con las pérdidas adicionales con carga definidas como la diferencia entre las pérdidas totales aparentes y la suma de las pérdidas convencionales (pérdidas I²R del estator y del rotor, pérdidas en el núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación). El valor calculado de las pérdidas adicionales con carga se grafica contra el cuadrado del par (torque) y se realiza una regresión lineal para reducir el efecto de los errores aleatorios en las mediciones de la prueba. La curva suavizada con los datos de las pérdidas adicionales con carga se utiliza para calcular el valor final de las pérdidas totales y de la eficiencia

Tipos de pérdidas

Pérdidas I²R del estator. Las pérdidas I²R (en vatios) de las máquinas trifásicas son iguales a 1.5 x I²R, donde:

I = la corriente rms medida o calculada en cada borne o terminal de línea a la carga especificada

R = la resistencia C.C. entre cualquiera de dos terminales de línea, corregida a la temperatura especificada

Pérdidas I²R del rotor. Las pérdidas en el rotor se deben calcular en deslizamiento por unidad, siempre que el deslizamiento se pueda determinar de forma precisa, utilice la siguiente ecuación:

$$\text{Pérdidas I}^2\text{R del rotor} = (\text{potencia de entrada medida en el estator} - \text{las pérdidas I}^2\text{R del estator} - \text{pérdidas en el núcleo}) \cdot \text{deslizamiento}$$

Pérdidas en el núcleo y pérdidas por fricción y ventilación (ensayo en vacío). La prueba se hace haciendo funcionar la máquina en vacío como motor, a la tensión y frecuencia nominales. Para estar seguros de que se obtienen los valores correctos de las pérdidas por fricción, la máquina deberá ser puesta en operación una vez la entrada se haya estabilizado.

Corriente en vacío. Se mide la corriente en cada línea. El valor de la corriente en vacío es el promedio de las corrientes de línea.

Pérdidas en vacío. La potencia de entrada medida corresponde a las pérdidas totales en vacío del motor. Restando las pérdidas I²R del estator (a la temperatura de esta prueba), de la entrada se obtiene la suma de las pérdidas por fricción (incluyendo las pérdidas por fricción de las escobillas de los motores con rotor bobinado), las pérdidas por ventilación y en el núcleo.

Separación de las pérdidas del núcleo de las pérdidas por fricción y ventilación. La separación de las pérdidas en el núcleo de las pérdidas por fricción y ventilación puede hacerse midiendo la tensión, la corriente y la potencia de entrada a frecuencia nominal y a voltajes a partir del 125% del voltaje nominal, debajo del punto donde una reducción posterior aumente la corriente.

Fricción y ventilación. Se grafica la potencia de entrada menos las pérdidas I²R del estator vs el voltaje, y la curva obtenida se prolonga hasta voltaje cero. La intercepción del eje con el voltaje

cero son las pérdidas por fricción y ventilación. Esta intercepción se puede obtener de forma más precisa si las entrada menos las pérdidas I²R del estator se grafican contra el cuadrado del voltaje para los valores en el rango más pequeño de voltajes.

Pérdidas en el núcleo. Las pérdidas en el núcleo en vacío y a tensión nominal, se obtienen restando el valor de las pérdidas por fricción y ventilación, de la suma de las pérdidas por fricción, ventilación y en el núcleo.

Pérdidas adicionales con carga. Estas pérdidas son la parte de las pérdidas totales en una máquina, no tenidas en cuenta al sumar las pérdidas por fricción y ventilación, las pérdidas I²R del estator, las pérdidas I²R del rotor y las pérdidas en el núcleo.

Medición indirecta de las pérdidas adicionales con carga. Las pérdidas adicionales con carga se determinan midiendo las pérdidas totales y restando de estas pérdidas la suma de las pérdidas por fricción y ventilación, las pérdidas I²R del estator, las pérdidas I²R del rotor y las pérdidas en el núcleo.

Las pérdidas adicionales con carga no se pueden medir directamente debido a que tienen muchas fuentes y su contribución relativa cambiará entre máquinas con diseños diferentes y de distinta construcción. En la IEEE 112B, las pérdidas residuales se evalúan restando la potencia de salida medida en el motor, de la potencia de entrada menos todas las demás pérdidas.

Si no existen errores de medición, las pérdidas residuales serán iguales a las pérdidas adicionales con carga. Se requiere un alto grado de precisión en la medición debido a que para obtener una cantidad muy pequeña se van a restar dos cantidades grandes, casi del mismo valor. No obstante, el error más grande puede ser inducido por la necesidad de una medición exacta del par/torque (en el orden de error del 0.1% o mejor) para evaluar de forma precisa la potencia de salida.

Determinar el valor exacto del par cero siempre es un problema. La IEEE sugiere comparar las potencias de entrada y salida con cargas muy livianas, en las que la mayoría de las pérdidas corresponden a la fricción y ventilación, al bobinado del estator y al núcleo de la máquina. Aquí se puede asumir que las pérdidas adicionales con carga son insignificantes. Bajo esas condiciones, la medida del par se puede ajustar de tal forma que la potencia de entrada menos las pérdidas conocidas son iguales a la potencia de salida.

Impacto de lubricar demasiado los rodamientos

Un número de estudios ha determinado que engrasar excesivamente los rodamientos puede aumentar las pérdidas por fricción (ver más información en la Parte 2: *Guía de Buenas Prácticas para*

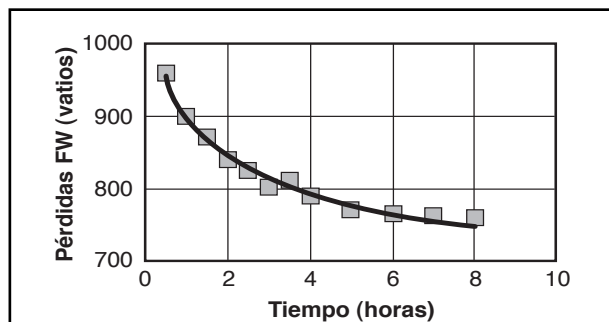


Figura 2. Reducción de las pérdidas por fricción y ventilación durante el rodaje inicial de un motor de 60 hp (45 kW) engrasado de forma apropiada, probado en el estudio de bobinado realizado por EASA/AEMT.

Conservar la Eficiencia del Motor). En el estudio de rebobinado EASA/AEMT, se adicionó grasa a los rodamientos de dos motores rebobinados probados en el grupo A. No se realizaron cambios en la lubricación del resto de los motores probados. Como era de esperarse, la fricción de los rodamientos aumentó en los motores re-engrasados y la eficiencia cayó entre el 0.3 y el 0.5 por ciento. La Figura 2 muestra el descenso de las pérdidas en el tiempo para un motor del estudio EASA/AEMT de 60 hp (45 kW) que se encuentra bien lubricado.

Análisis de las pérdidas adicionales con carga

Las pérdidas adicionales con carga de los motores del grupo A del estudio de rebobinado EASA/AEMT aumentaron significativamente. La causa fue el daño mecánico provocado en el núcleo del estator al remover los antiguos devanados y los aislamientos de ranura (ej. laminaciones sueltas y torcidas en los dientes situados al final núcleo del estator). Esto a su vez aumentó las pérdidas por pulsación o pérdidas zigzag (ver más información en la Parte 2: *Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor*).

La temperatura de quemado para los motores del Grupo A fue de 660°F (350°C)—demasiado baja para deshacer por completo el aislamiento del viejo bobinado. Debido a esto, para poder retirar los bobinados fue necesario ejercer una fuerza excesiva y labores de limpieza extra. El daño mecánico infringido aumentó las pérdidas adicionales con carga.

Se incrementó la temperatura de quemado para los motores de los Grupos B, C y D del estudio a 680-700°F (360-370°C), lo que deshizo los aislamientos viejos de forma más completa, facilitando la remoción de los bobinados y la limpieza de las ranuras. Debido a que durante este proceso los dientes de las laminaciones no sufrieron daños, las pérdidas adicionales con carga no aumentaron.

PRUEBA DE PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO

Uno de los objetivos del estudio de rebobinado EASA/AEMT fue el de evaluar la correlación entre las pérdidas reales del núcleo obtenidas con las pruebas IEEE 112B y los diferentes métodos utilizados por los centros de servicio, para determinar la condición del estator antes y después de remover los bobinados. Los métodos de prueba evaluados fueron la prueba de lazo convencional (“toroide”) y las realizadas con dos probadores de núcleo comerciales de fabricantes diferentes.

Prueba de pérdidas en el núcleo IEEE 112B. En la IEEE 112B, Las pérdidas en el núcleo del estator se obtienen haciendo funcionar el motor en vacío a tensión y frecuencia nominales. Para estar seguros que se logran los valores correctos de las pérdidas por fricción, no se deben tomar medidas hasta que la entrada se haya estabilizado. La primera medición es la corriente en vacío. Se miden las corrientes de línea y la corriente en vacío es el promedio de estas corrientes. Después, se determinan las pérdidas en vacío midiendo la potencia total de entrada sin carga. Restando las pérdidas I²R del estator (a la temperatura de prueba) de la potencia de entrada, se obtiene la suma de las pérdidas por fricción, ventilación y en el núcleo.

La separación de las pérdidas en el núcleo de las pérdidas por fricción y ventilación, se logra midiendo la tensión, la corriente y la potencia de entrada a frecuencia nominal y a voltajes desde el 125% del voltaje nominal hasta debajo del punto donde una reducción posterior aumente la corriente en vacío. Se gráfica la potencia de entrada menos las pérdidas I²R del estator vs el voltaje y la curva obtenida se prolonga hasta voltaje cero. La intercepción del eje con el voltaje cero proporciona las pérdidas por fricción y ventilación.

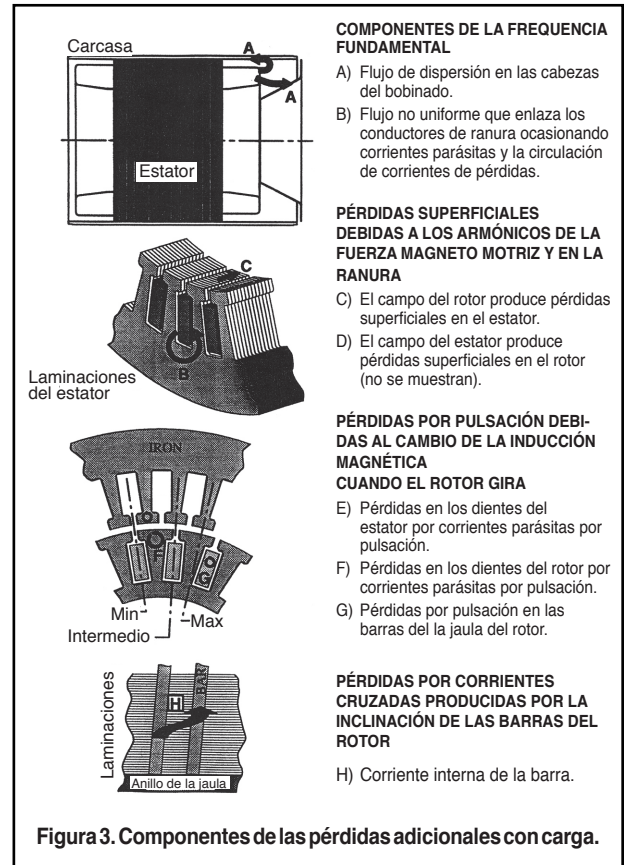


Figura 3. Componentes de las pérdidas adicionales con carga.

Esta intercepción se puede determinar de forma más precisa si se grafica la entrada menos las pérdidas I²R del estator contra el cuadrado del voltaje en el menor rango de voltajes. Las pérdidas en el núcleo en vacío y a tensión nominal se obtienen restando el valor de las pérdidas por fricción y ventilación de la suma de las pérdidas por fricción, ventilación y en el núcleo.

Prueba de lazo o “toroide.” La prueba de lazo (también denominada prueba de anillo) es una técnica de prueba utilizada principalmente para detectar puntos calientes en el núcleo del estator (ej. localizar áreas en las que el aislamiento inter-laminar esté dañado). El cálculo del número de vueltas de la bobina necesarias para lograr el nivel de flujo de magnetización deseado, se hace con el objetivo de obtener 85.000 líneas por pulgada cuadrada (85 kl/pulg² ó 1.32 Teslas), que es el flujo más común. Algunos centros de servicio calculan las vueltas de la bobina necesaria para magnetizar el núcleo del estator para obtener el flujo de diseño del bobinado,

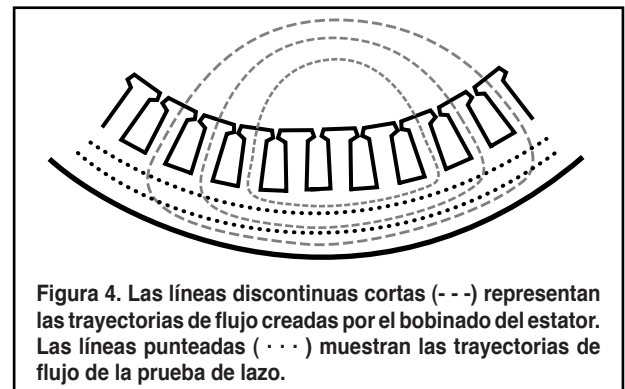


Figura 4. Las líneas discontinuas cortas (- - -) representan las trayectorias de flujo creadas por el bobinado del estator. Las líneas punteadas (· · ·) muestran las trayectorias de flujo de la prueba de lazo.

a esto se le llama una prueba de núcleo “a flujo completo.” No obstante, la distribución del flujo inducido en la prueba de lazo no es la misma que la inducida por el devanado de la máquina, particularmente cuando el rotor está fuera del estator (ver la Figura 4).

La prueba de lazo se hace arrollando vueltas de cable alrededor del núcleo—ej. pasando los cables a través del diámetro interior del núcleo y alrededor del exterior del núcleo o la carcasa del estator. Los cálculos de la corriente de magnetización proporcionan un valor de amperios-vuelta que excitarán el núcleo para obtener un nivel de flujo magnético. Por ejemplo, si se requieren 3600 amperios-vuelta para llegar a un nivel de magnetización de 85 kl/pulg², y se desea limitar la corriente que circula por el cable a 80 amperios, entonces las vueltas requeridas serán 45 (80 x 45 = 3600). Generalmente, las vueltas se arrollan unas al lado de las otras, para maximizar el área del núcleo en la que se desea hacer la prueba de puntos calientes.

Para probar todo el núcleo será necesario arrollar las mismas vueltas de la bobina de prueba en varios sitios diferentes y así poder comprobar problemas en zonas del núcleo inaccesibles durante la prueba inicial. Los puntos calientes se pueden comprobar con un termómetro infra-rojo o midiendo la temperatura con termocuplas (termopares).

En términos del estudio de rebobinado EASA/AEMT, la prueba de lazo fue usada para comparar las pérdidas en vatios del núcleo del estator, antes y después de retirar los bobinados. Las mediciones se realizaron arrollando una bobina de detección de una sola vuelta para detectar el voltaje inducido en el núcleo y un transformador de corriente- verdadero valor eficaz (RMS) para detectar el amperaje en las vueltas del lazo. El voltaje y la corriente fueron detectados con un vatímetro. Se realizó una prueba de lazo al mismo nivel de magnetización antes y después de remover los bobinados.

Probadores de núcleo comerciales. Con los probadores de núcleo comerciales se realizan pruebas de núcleo que tienen patrones de flujo equivalentes a los obtenidos en la prueba de lazo convencional. Las ventajas de utilizar este tipo de probadores de núcleo en lugar de hacer una prueba de lazo, consisten principalmente en el ahorro de tiempo en la prueba y en mejorar la repetitividad de los resultados de la prueba. Los probadores de núcleo comerciales normalmente requieren arrollar una sola vuelta alrededor del estator, debido a que pueden producir corrientes grandes. Además, por lo general estos probadores tienen incorporados instrumentos de medida que muestran la corriente y la potencia. Los programas de computador normalmente disponibles a través de los fabricantes de estos probadores, pueden calcular el valor de la corriente requerida para lograr el nivel del flujo magnético deseado, como también determinar el nivel de flujo real obtenido durante la prueba. Con la prueba se puede comprobar si existen puntos calientes en el núcleo, tal como se hace con la prueba de lazo convencional. Dado que la trayectoria del flujo magnético es la misma que en la prueba de lazo, los valores de las pérdidas en el núcleo obtenidos con un probador de núcleos comercial no se pueden comparar con las pérdidas en el núcleo obtenidas con la IEEE 112B.

Niveles de aceptación para la prueba de núcleo. La mayoría de los fabricantes de los probadores de núcleo comerciales (incluyendo los dos de los equipos utilizados en el estudio de rebobinado EASA/AEMT) sugieren un flujo de prueba en el yugo o corona del núcleo de 85 kl/pulg² (1.32 T). Un problema potencial que presenta este enfoque, es que el material del núcleo se puede estar aproximando al punto en el cual la curva de fuerza magnética vs corriente “deja de ser lineal”—ej. saturación. Si este fuera el caso, un gran incremento de corriente no daría como resultado un incremento significativo del flujo magnético, debido a que la curva es solo

eso, una curva y no una línea recta. Debido a que esta condición puede distorsionar los resultados de las pruebas realizadas antes y después de retirar los bobinados, se sugiere una tolerancia del 20% en el resultado obtenido después de remover los bobinados. Esto significa, que las pérdidas en el núcleo después de retirar los bobinados, realizadas convencionalmente o con un probador comercial, no deben exceder en más de un 20% a las pérdidas obtenidas durante la prueba inicial. Para aislar un punto caliente en el núcleo, se recomienda un nivel de flujo más alto [a partir de 85 kl/ pulg² (1.32 T) hasta 97 kl/ pulg² (1.5 T)].

Debido a la gran variedad de aceros magnéticos empleados por los fabricantes de motores, es imposible establecer normas estrictas para dar la conformidad (aceptación) a las pruebas de núcleo, en términos de pérdidas vatios/libra. El criterio se ve muy afectado por la permeabilidad de cada tipo de acero. No obstante, el estudio EASA/AEMT confirmó que probando el núcleo antes y después de retirar los bobinados, utilizando un probador comercial o mediante una prueba de lazo convencional, se puede detectar el aumento de pérdidas causadas durante el quemado y la limpieza del núcleo.

Comparación de los Resultados para los Diferentes Métodos de Pérdidas en el Núcleo. Como parte del estudio de rebobinado EASA/AEMT, se realizaron pruebas antes y después de retirar los bobinados y limpiar el estator de cada motor de acuerdo con la IEEE 112B. De nuevo, se realizaron pruebas de lazo antes y después de retirar los bobinados en casi todos los núcleos. También se probaron los núcleos antes y después de remover los bobinados de varios motores de tamaños representativos, utilizando probadores de núcleo comerciales. Sin embargo, debido a la disponibilidad de las máquinas sometidas a ensayo, no todos los núcleos fueron probados con estos probadores comerciales.

Los resultados de las pruebas de lazo y de las pruebas realizadas con los probadores comerciales, fueron comparados con los cambios de las pérdidas medidas antes y después de retirar los bobinados, utilizando el método IEEE 112B. Sin embargo, esta evaluación no fue concluyente debido a que:

- El resultado de los tres métodos de prueba variaba significativamente.
- En algunos casos los datos de prueba mostraron una disminución de las pérdidas después de retirar los bobinados.
- Se experimentaron algunas dificultades al operar los probadores comerciales; esto pudo contribuir a la obtención de resultados errados.
- La evaluación de los resultados de prueba indicaron que el tamaño de la muestra era muy pequeño para obtener conclusiones precisas.

A pesar que los resultados para los diferentes métodos de prueba no se correlacionaron bien, quedó claro que las pruebas de núcleo producen evidencias válidas y repetibles sobre la degradación o preservación del núcleo. Por tanto, cada uno de estos métodos puede ser útil para evaluar la condición del núcleo antes y después del quemado.

DATOS DE ENSAYO PARA EL ESTUDIO EASA/AEMT

Los 24 motores nuevos del estudio, fueron divididos en cuatro grupos, para poder incluir las diferentes variables de prueba. El resumen de los resultados presentados a continuación, no indica cambios significativos en la eficiencia de los motores rebobinados con procedimientos que utilizaron buenas prácticas (dentro del rango de precisión del método IEEE 112B) y en varios casos se

pudo mejorar la eficiencia de forma real. Los datos completos de las pruebas se encuentran agrupados en las Tablas 8-13.

Grupo A Seis motores de bajo voltaje [100-150 hp (75-112 kW)], rebobinados una vez. No se utilizaron controles específicos en los procesos al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 660°F (350°C) y al rebobinarlos.

Resultados: Inicialmente se observó un cambio en la eficiencia promedio del **-0.6% después de 1 rebobinado (rango -0.3 a -1%)**.

No obstante, dos motores que presentaron las mayores reducciones de eficiencia, habían sido re-lubricados durante el montaje, lo que incrementó las pérdidas por fricción.

Después de corregir esto, **la eficiencia promedio cambió al -0.4% (rango -0.3 a -0.5%)**.

Grupo B Diez motores de bajo voltaje [60-200hp (45-150 kW)], rebobinados una vez. Se utilizaron controles específicos en sus procesos, al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 680°F - 700°F (360°C-370°C) y al rebobinarlos.

Resultados: La eficiencia promedio cambió en **-0.1%(rango +0.2 a -0.7%)**.

Posteriormente se encontró que un motor tenía aislamiento el inter-laminar defectuoso de fábrica. Omitiendo el resultado de este motor, **la eficiencia promedio cambió al -0.03% (rango +0.2 a -0.2%)**.

Grupo C Motores de bajo voltaje rebobinados más de una vez. Procesos controlados de desmantelado y rebobinado. Procesos de desmantelado y rebobinado controlados.

Grupo C1. Cinco motores de bajo voltaje [100-200hp (75-150 kW)], rebobinados dos o tres veces. Se utilizaron controles específicos en sus procesos, al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 680°F - 700°F (360°C - 370°C) y al rebobinarlos.

Resultados: Después de rebobinarlos tres veces (tres máquinas) y dos veces (dos máquinas), **la eficiencia promedio cambió al -0.1%(rango +0.6 a -0.4%)**.

Grupo C2. Dos motores de bajo voltaje [7.5 hp (5.5 kW)] procesados tres veces en el horno y rebobinados una vez. Se utilizaron controles específicos en sus procesos al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 680°F - 700°F (360°C - 370°C) y al rebobinarlos.

Resultados: La eficiencia promedio cambió al **+0.5% (range +0.2 to +0.8%)**.

Grupo D Un motor de media tensión [300 hp (225 kW/3.3 kV)] con bobinas formadas (pletina), rebobinado una vez. Se utilizaron controles específicos en sus procesos, al desmantelarlos a una temperatura de quemado de 680° F - 700° F (360° C - 370° C) y al rebobinarlo.

Resultados: La eficiencia cambió al **-0.2%**. El comportamiento de este motor fue similar al de las máquinas de baja tensión rebobinadas con controles específicos.

Las Tablas 9 y 12 muestran los datos de funcionamiento a plena carga para cada grupo, calculados de acuerdo con la IEEE 112B. Cada motor está identificado por un código (la primera columna a la izquierda). En algunos casos, existían más de un motor de la misma marca.

Inicialmente, cada uno de los motores fue probado, desmontado y sus devanados fueron removidos del estator. Después, fueron rebobinados, montados y probados nuevamente. Para minimizar

cambios en el desempeño debidos a factores diferentes que los producidos por los procesos normales de rebobinado, no se realizaron cambios en los conjuntos de los rotores. En el caso de los motores 1A y 3C, los rodamientos fueron re-lubricados. Esto violó el protocolo de prueba pero demostró que la sobre-lubricación incrementa significativamente las pérdidas por fricción y ventilación y disminuye la eficiencia.

Para estabilizar las pérdidas, se realizó un rodaje de los motores antes de las pruebas. El método de recolección de datos fue totalmente informatizado y registrado en el formato B de la IEEE112-1996.

También están incluidos en esta sección los resultados de las pruebas de inter-comparación de un solo motor, como también una muestra del formato para recopilar los datos de acuerdo con la IEEE 112B.

Interpretación de los Resultados de las Pruebas

Los resultados de las pruebas para cada grupo controlado estuvieron dentro del rango de desviación de las pruebas de inter-comparación, indicando que los procedimientos de prueba estuvieron acordes con las prácticas industriales aprobadas (ver tabla en "Pruebas de Inter-comparación").

El cambio de la eficiencia promedio para cada grupo controlado también se mantuvo dentro del rango de precisión del método de prueba ($\pm 0.2\%$), demostrando que los motores que han sido reparados/rebobinados siguiendo buenas prácticas, conservan su eficiencia original y en varios casos su eficiencia puede ser mejorada realmente.

Todos los motores fueron quemados a temperaturas controladas. Otros controles específicos aplicados a los motores (exceptuando los del Grupo A), incluyen un control de los métodos de limpieza del núcleo y detalles del rebobinado como: Las espiras/bobina, la longitud media de la espira y el área de la sección transversal de los conductores. Los beneficios de estos controles forman las bases de la *Guía de Buenas Prácticas para Conservar la Eficiencia del Motor* (Parte 2).

TABLA 8. COMPARACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE PÉRDIDAS PARA LOS MOTORES PROBADOS EN EL ESTUDIO EASA/AEMT

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

TABLA 9. GRUPO A-MOTORES DE BAJA TENSIÓN REBOBINADOS SIN CONTROLES ESPECÍFICOS AL RETIRAR LOS BOBINADOS O DURANTE EL REBOBINADO

Motor	Prueba	Resistencia del bobinado (ohms)	Temp (°C)	Resistencia corregida (ohms)	% carga	Pérdidas en el estator (vatios)	Pérdidas en el rotor (vatios)	Pérdidas en el núcleo (vatios)	Pérdidas por fricción y ventilación (vatios)	Pérdidas adicionales con carga (vatios)	Eficiencia (%)	Cambio (%)	Comentarios
1A 100 hp, 2 polos	antes	0.0580	45.00	0.0538	102.5	1458.1	834.0	1163.8	526.0	805.0	94.1		
	después	0.0591	45.45	0.0548	99.9	1313.1	773.9	1298.7	1152.0	977.3	93.1	-1.0	
	después	0.0601	47.85	0.0552	100.1	1323.1	774.2	1251.5	993.5	976.9	93.3	-0.8	Se limpió el rodamiento L.A.
	después	0.0601	47.85	0.0552	99.9	1323.1	770.9	1257.3	857	969.6	93.5	-0.6	Ambos rodamientos se limpiaron
	después	0.0601	47.85	0.0552	100.0	1323.1	770.5	1298.7	755.5	959.3	93.6	-0.5	Cambio de rodamientos
2B 100 hp, 4 polos	antes	0.0933	37.10	0.0892	102.3	2640.8	1608.5	499.7	386.0	655.5	92.9		
	después	0.0927	34.08	0.0896	99.9	2536.6	1661.2	526.3	360.6	1043.4	92.4	-0.5	
	antes	0.0448	36.70	0.0429	100.4	1423.2	714.0	632.8	609.8	944.1	94.5		
3C 100 hp, 2 polos	después	0.0496	54.00	0.0446	99.5	1560.5	726.0	659.6	1151.1	1076.1	93.5	-1.0	
	después	0.0484	41.47	0.0455	99.5	1591.7	722.2	656.3	730.8	1047.3	94.0	-0.5	Se limpió el rodamiento L.A.
	después	0.0484	41.47	0.0455	99.0	1590.3	718.1	656.8	679.6	1050.1	94.1	-0.5	Ambos rodamientos se limpiaron
4D 100 hp, 2 polos	antes	0.0385	38.90	0.0366	99.2	852.0	752.4	705.4	1161.4	440.6	95.0		
	después	0.0415	36.93	0.0397	100.2	930.7	774.7	752.0	1137.4	719.0	94.5	-0.5	
5E 150 hp, 2 polos	antes	0.0611	32.90	0.0593	100.5	3436.2	1593.2	1906.9	1689.7	715.7	92.3		
	después	0.0652	34.65	0.0628	99.7	3486.2	1621.5	2300.1	1639.8	717.5	92.0	-0.3	
7B 150 hp, 2 polos	antes	0.0268	49.70	0.0245	99.8	1247.6	1381.6	1179.2	2781.6	942.1	93.7		
	después	0.0268	43.90	0.0250	99.9	1255.2	1439.9	1256.0	3077.0	1051.1	93.3	-0.4	

TABLA 10. GRUPO B-MOTORES DE BAJA TENSIÓN REBOBINADOS UNA VEZ CON PROCESOS CONTROLADOS DURANTE EL REBOBINADO

Motor	Prueba	Resistencia del bobinado (ohms)	Temp (°C)	Resistencia corregida (ohms)	% carga	Pérdidas en el estator (vatios)	Pérdidas en el rotor (vatios)	Pérdidas en el núcleo (vatios)	Pérdidas por fricción y ventilación (vatios)	Pérdidas adicionales con carga (vatios)	Eficiencia (%)	Cambio (%)	Comentarios
6F	antes	0.0359	31.60	0.0350	100.4	1661.9	1637.1	988.5	1586.4	743.0	94.4		
	después	0.0390	30.63	0.0382	99.8	1729.8	1624.2	1058.2	1624.8	662.5	94.3	-0.1	
9E	antes	0.1308	45.57	0.1212	99.8	1055.4	1124.2	647.7	1674.7	392.5	90.1		
	después	0.1266	43.17	0.1183	100.1	1026.0	1206.0	679.8	1645.0	497.8	89.9	-0.2	
10D	antes	0.0347	28.95	0.0341	100.0	1317.9	931.1	785.3	986.8	602.1	95.4		
	después	0.0360	36.67	0.0344	100.1	1286.9	964.3	847.5	936.4	750.6	95.2	-0.2	
11F	antes	0.0203	50.48	0.0185	99.8	1721.1	1020.7	1333.3	1439.7	113.8	96.4		
	después	0.0208	47.47	0.0192	100.1	1799.3	1250.9	1291.6	1291.1	114.3	96.3	-0.1	
14H 50 Hz	antes	0.0675	47.42	0.0621	100.0	1577.0	1215.7	1650.2	664.9	1069.7	89.9		
	después	0.0600	47.30	0.0553	99.9	1405.2	1165.3	2447.6	750.7	882.7	89.2	-0.7	Núcleo del estator defectuoso
16H 50 Hz	antes	0.0196	45.75	0.0182	99.0	2304.3	1053.0	2122.9	740.1	904.8	95.4		
	después	0.0171	36.85	0.0163	100.1	1981.1	1017.6	2075.1	772.9	1112.0	95.6	+0.2	
18G 50 Hz	antes	0.0775	48.70	0.0711	99.2	1334.6	803.1	733.2	219.6	277.6	94.2		
	después	0.0710	34.75	0.0685	100.0	1310.9	824.6	737.5	229.3	303.3	94.2	0	
19H 50 Hz	antes	0.0296	43.97	0.0276	99.6	2537.6	1704.8	1925.3	3434.0	475.1	93.0		
	después	0.0259	36.15	0.0248	99.7	2167.1	1684.8	1863.0	3722.7	403.9	93.0	0	
20H 50 Hz	antes	0.0773	41.53	0.0727	101.0	801.8	697.0	722.1	386.4	363.1	93.9		
	después	0.0712	39.03	0.0676	100.3	707.9	669.6	664.1	451.2	427.3	93.9	0	
21J 50 Hz	antes	0.0468	44.55	0.0435	99.6	1319.6	870.0	1146.0	566.2	1087.9	93.7		
	después	0.0435	40.38	0.0411	99.9	1239.9	856.7	1126.8	510.4	1093.2	93.9	+0.2	
24E	antes	0.0951	39.58	0.0900	100.4	1389.4	759.4	876.9	389.2	415.7	95.1		
	después	0.0936	34.99	0.0902	100.0	1465.7	775.3	1032.6	420.0	274.5	95.0	-0.1	

TABLA 11. GRUPO C-MOTORES DE BAJA TENSIÓN REBOBINADOS MÁS DE UNA VEZ CON PROCESOS CONTROLADOS

Motor	Prueba	Resistencia del bobinado (ohms)	Temp (°C)	Resistencia corregida (ohms)	% carga	Pérdidas en el estator (vatios)	Pérdidas en el rotor (vatios)	Pérdidas en el núcleo (vatios)	Pérdidas por fricción y ventilación (vatios)	Pérdidas adicionales con carga (vatios)	Eficiencia (%)	Cambio (%)	Comentarios
4D 100 hp, 2 polos	antes	0.0385	38.9	0.0366	99.2	852.0	752.4	705.4	1161.4	440.6	95.0		
	después	0.0415	36.93	0.0397	100.2	930.7	774.7	752.0	1137.4	719.0	94.5	-0.5	Primer rebobinado
	después	0.4083	36.13	0.0391	100.2	895.1	745	686.2	1159.9	562.2	94.9	-0.1	Segundo rebobinado
	después	0.4087	37.78	0.0389	100.5	896.4	744.9	693.0	1140.7	596.2	94.8	-0.2	Tercer rebobinado
12F 150 hp, 2 polos	antes	0.0276	51.32	0.0250	99.9	1326.8	795.7	1123.0	1394.8	163.2	95.9		
	después	0.0272	50.33	0.0248	100.0	1280.2	852.8	1108.8	1296.7	282.1	95.9	0.0	Primer rebobinado
	después	0.0259	43.43	0.0241	100.0	1243.1	830.9	1050.0	1307.2	380.1	95.9	0.0	Segundo rebobinado
	después	0.0266	43.52	0.0248	100.1	1295.6	817.2	1093.6	1427.8	216.4	95.8	-0.1	Tercer rebobinado
15J 50 Hz 75 kW, 4 polos	antes	0.0465	43.37	0.0435	100.3	1805.3	1204.2	1093.7	319.7	1280.7	93.0		
	después	0.0404	34.92	0.0389	100.2	1546.0	1102.9	1078.3	272.4	1117.3	93.6	+0.6	Primer rebobinado
	después	0.0402	34.6	0.0387	100.2	1523.1	1098.0	1078.7	309.3	1138.6	93.6	0.0	Segundo rebobinado
	después	0.0397	33.35	0.0385	100.3	1489.3	1059.7	1131.9	297.6	1094.6	93.7	0.1	Tercer rebobinado
8C 200 hp, 4 polos	antes	0.0217	43.73	0.0202	99.2	1922.6	1129.1	1459.6	448.1	851.0	96.2		Aleta de ventilador rota ¹
	después	0.0194	38.33	0.0185	99.1	1775.5	1238.4	1612.1	358.2	1632.4	95.7	-0.5	Cambio en el patrón del bobinado
	antes	0.0217	43.73	0.0202	99.0	1922.6	1129.1	1459.6	761.3	851.0	96.0	-0.2	Efecto del ventilador nuevo instalado
	después	0.0199	30.68	0.0195	99.8	1772.1	1121.0	1618.8	671.4	1621.3	95.6	-0.4	Segundo rebobinado, ventilador nuevo
13G 50 Hz 110 kW, 4 polos	antes	0.0228	29.0	0.0224	99.4	1647.6	915.9	1453.9	856.9	1087.3	94.8		
	después	0.0236	39.37	0.0224	99.9	1662.7	932.0	1576.3	912.6	1250	94.6	-0.2	Primer rebobinado
	después	0.0248	41.82	0.0233	99.9	1702.2	897.6	1388.9	1008.3	1217.4	94.6	0	Segundo rebobinado
17H 50 Hz 5.5 kW, 4 polos	antes	1.8100	39.28	1.7156	100.5	411.2	212.9	131.5	22.5	72.8	86.7		
	después	1.6324	36.13	1.5653	99.1	365.6	177.9	153.5	69.2	53.7	86.9	+0.2	
22H 50 Hz 5.5 kW, 4 polos	antes	2.1991	42.83	2.0577	99.1	578.1	229.1	196.6	40.6	56.3	83.2		
	después	1.9681	51.15	1.7879	98.9	557.6	194.5	214.0	42.7	25.7	83.6	+0.4	

¹ Este valor no se usó en los cálculos finales, debido a que cuando el motor fue probado tenía una aleta del ventilador rota. Los datos fueron normalizados utilizando las pérdidas por fricción y ventilación obtenidas después de instalar un nuevo ventilador.

TABLA 12. GRUPO D—MOTORES DE MEDIA TENSIÓN REBOBINADOS UNA VEZ CON PROCESOS CONTROLADOS DURANTE EL REBOBINADO

Motor	Prueba		Resistencia del bobinado (ohms)	Temp (°C)	Resistencia corregida (ohms)	% carga	Pérdidas en el estator (vatios)	Pérdidas en el rotor (vatios)	Pérdidas en el núcleo (vatios)	Pérdidas por fricción y ventilación (vatios)	Pérdidas adicionales con carga (vatios)	Eficiencia (%)	Cambio (%)	Comentarios
	antes	después												
23K 50 Hz 225 kW, 4 polos 3300V	antes		0.6899	34.40	0.6657	99.5	2687.3	2379.8	1928.9	1702.5	1269.4	95.7		Ver notas.
	después		0.6766	37.88	0.6446	100.0	2750.3	2561.0	2484.7	855.3	1011.7	95.9	+0.2	Ver notas.

Notas para 23K

Las pérdidas por fricción y ventilación (F&W) disminuyeron un 50% en la prueba realizada después del rebobinado. Esto pudo ser ocasionado por un error en la separación de las pérdidas en el núcleo y las pérdidas F&W. Cuando las dos se suman, la diferencia no es tan significativa como: antes 3631.4 y después 3340 (ej. una reducción del 10%).

Esta máquina era usada y estuvo guardada durante algún tiempo antes de las pruebas. Funcionó en vacío antes de ser enviada a Nottingham. La lubricación de los rodamientos no se alteró durante el rebobinado.

Referencias

- [1] William U. McGovern, "High Efficiency Motors for Upgrading Plant Performance," *Electric Forum* 10, No. 2 (1984), pp. 14-18.
- [2] Roy S. Colby and Denise L. Flora, *Measured Efficiency of High Efficiency and Standard Induction Motors* (North Carolina State University, Department of Electrical and Computer Engineering (IEL), 1990).
- [3] D.H. Dederer, "Rewound Motor Efficiency," *Ontario Hydro Technology Profile* (Ontario Hydro, November 1991).
- [4] Zeller, "Rewound High-Efficiency Motor Performance," *Guides to Energy Management* (BC Hydro, 1992).
- [5] *Rewound Motor Efficiency, TP-91-125* (Ontario Hydro, 1991).
- [6] Advanced Energy, "The Effect of Rewinding on Induction Motor Losses and Efficiency" (EEMODS 02, 2002).

Parte 2: *Guía de Buenas Prácticas Para Conservar La Eficiencia del Motor*

Introducción	2-3
Terminología.....	2-3
Pérdidas de Energía en los Motores de Inducción.....	2-4
Procesos de la Reparación del Motor.....	2-10
Inspección inicial	2-10
Desmontaje.....	2-11
Remoción del antiguo bobinado y limpieza del núcleo.....	2-14
Rebobinado del motor	2-16
Reparaciones mecánicas que pueden afectar la eficiencia.....	2-20
Montaje	2-21
Consejos de reparación.....	2-21

(Esta página se dejó intencionalmente en blanco.)

Guía de Buenas Prácticas Para Conservar La Eficiencia del Motor

INTRODUCCIÓN

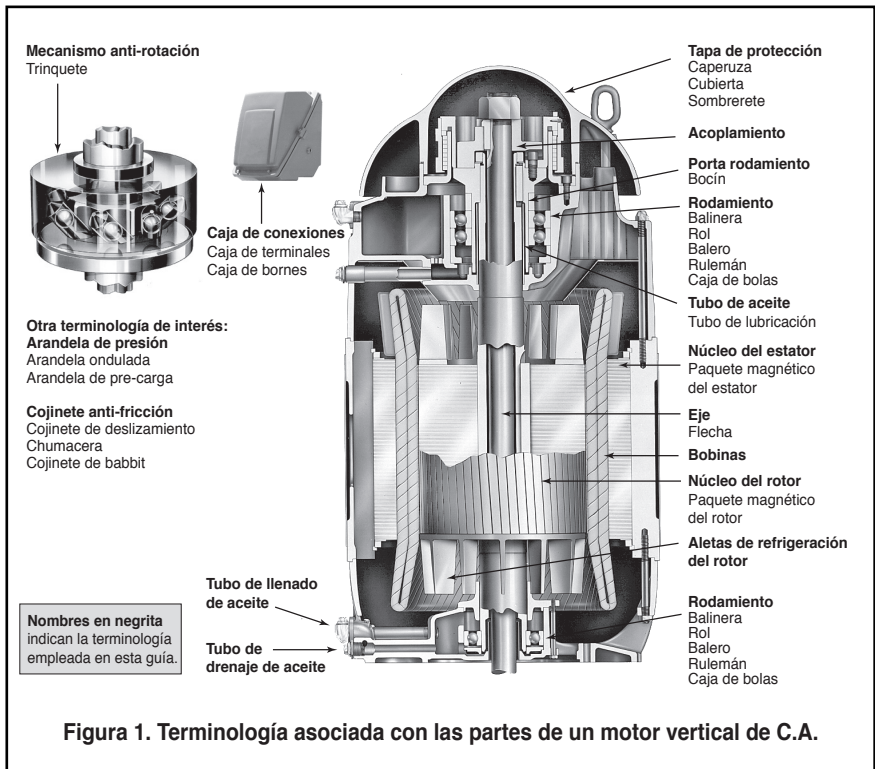
La finalidad de esta guía, es la de proporcionar prácticas y consejos de reparación/bobinado que ayuden a los técnicos y a los bobinadores del centro de servicios, a conservar o mejorar la eficiencia, la confiabilidad y la calidad de los motores que reparan.

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 moldeadas (en pletina) de tamaños similares.

(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.)



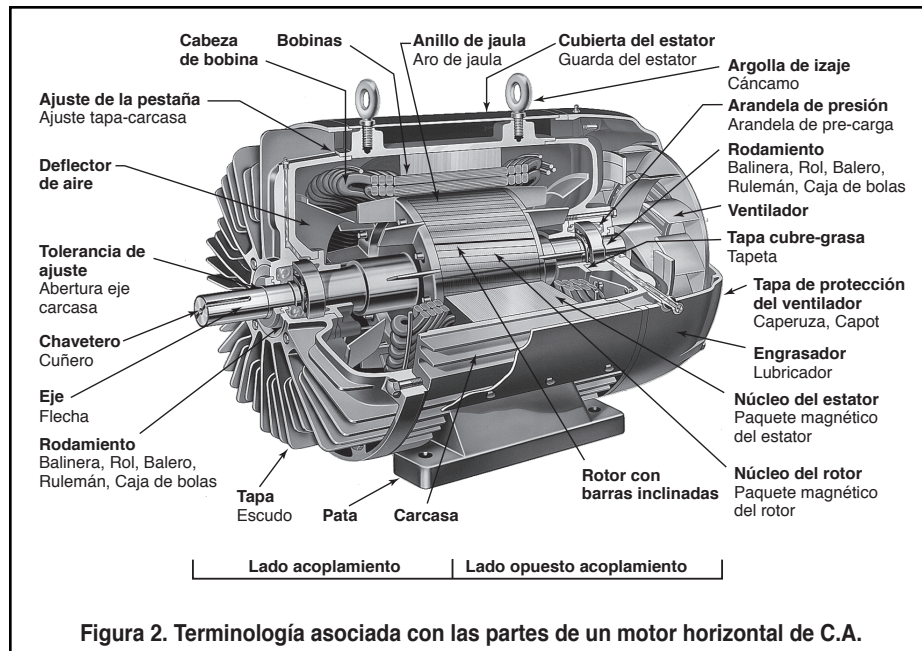
ADVERTENCIA

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 (ej. UL, CSA, EExd, EExe).

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.



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

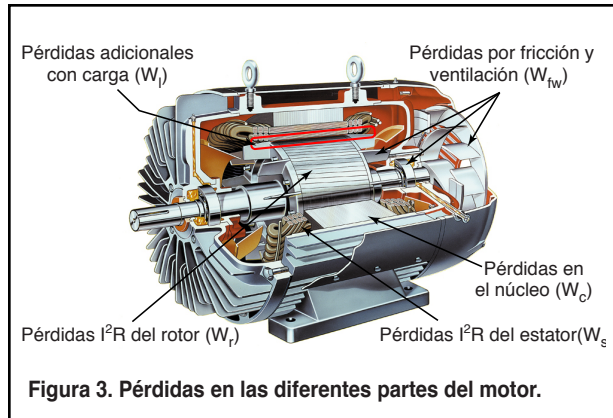


Figura 3. Pérdidas en las diferentes partes del motor.

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 (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 (vea también la *Nota Técnica 16 de EASA*).

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

- Rigidez del núcleo y del diente y la capacidad de mantener su forma
- Daños causados por el fallo.
- 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.

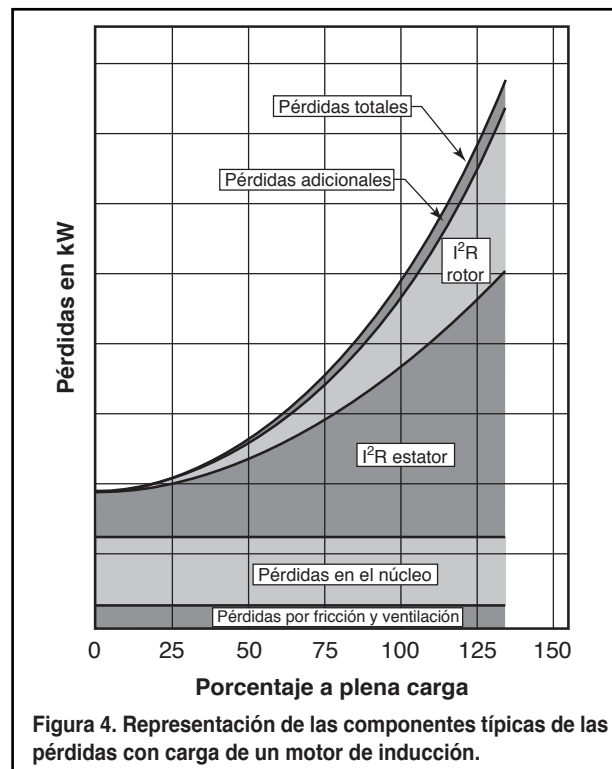


Figura 4. Representación de las componentes típicas de las pérdidas con carga de un motor de inducción.

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_a)	11%	14%	Proceso de fabricación, diseño de la ranura, entrehierro, estado de las superficies del entrehierro y de las láminas del núcleo

- Pulido y limado excesivos.

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 680°F (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 (ej. dientes separados o sueltos) e incrementar las pérdidas adicionales con carga.

No obstante, realizar el quemado a más de 750°F (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. Es posible que no sea conveniente realizar el quemado de núcleos fabricados con algunos de los otros procesos de aislamiento inter-laminar (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 700°F (370°C), estas temperaturas fueron medidas en la zona del diente del núcleo del estator.

Precauciones al situar los motores dentro del horno de quemado. No amontone 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 abajo. No sitúe 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 del quemado y después de realizar la remoción y limpieza de los antiguos devanados, determinará si existen incrementos significativos en las pérdidas. Considere reemplazar el motor si sus pérdidas aumentan en más de un 20%. En casos especiales, considere realizar el re-apilado o reemplazo de las láminas.

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 vatios/lb (3.3 a 13.2 vatios/kg).
- Rango del espesor desde 0.014" a 0.035" (0.4 a 0.9 mm).
- 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 más 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, vea una discusión previa en "Proceso de Quemado" en el Apéndice 4: *Aceros Eléctricos*.

Pérdidas I²R del Estator

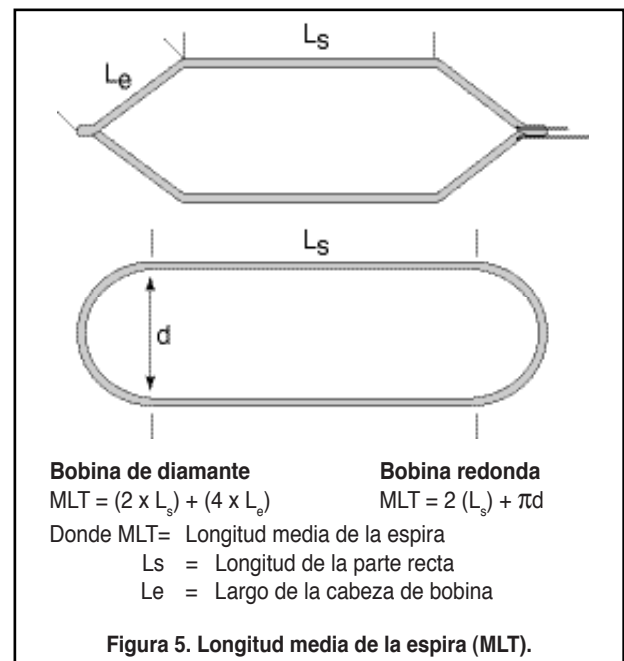
A menudo, en un motor, las pérdidas I²R del estator son las componentes más altas de las pérdidas totales. En los motores con potencias mayores o iguales a 45 hp (30 kW), probados en el estudio de bobinado realizado por EASA/AEMT, el promedio de las pérdidas I²R fue del 30% de las pérdidas totales (rango de 22-46%).

Por consiguiente, cualquier cosa que afecte las pérdidas I²R del estator, puede llegar a causar un gran impacto sobre la eficiencia del motor reparado/rebobinado.

Las pérdidas I²R del estator pueden ser reducidas incrementando la sección/calibre de los alambres del bobinado o recortando la longitud media de las espiras (MLT). Las pérdidas I²R pueden incrementarse al realizar cambios en el bobinado, aunque algunas de estas modificaciones también pueden reducirlas (ej. aumento de la sección/calibre del alambre de los bobinados).

La Tabla 2, 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 MLT) en motores estándar TEFC (IP 54). Siempre que sea posible, una reducción de la MLT reduce las pérdidas I²R 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 MLT son críticas para la eficiencia del motor.

Longitud media de la Espira (MLT). Si permitimos que la



MLT aumente, las pérdidas I²R del estator serán más altas y por consiguiente, la eficiencia del motor disminuirá. Al contrario, cuando sea posible reducir la MLT, las pérdidas I²R 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, asegúrese que las cabezas del bobinado no sean más largas que las originales.

Evite reducir mucho la MLT, si lo hace, 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.

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.

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.
- Montaje 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-ej.

los ductos o canales de la carcasa o del núcleo por los que pasa el aire de enfriamiento. Los ductos o canales que estén parcialmente o totalmente obstruidos, pueden reducir las pérdidas por fricción o ventilación, no obstante, el efecto de reducir la refrigeración del motor incrementará mucho más las pérdidas-particularmente las I²R. Esto puede ocasionar fallos en corto tiempo, como también, reducir la eficiencia de operación del motor.

Impacto debido a un engrase excesivo. Numerosos estudios han detectado que utilizar mucha grasa para lubricar los rodamientos puede incrementar las pérdidas por fricción (vea 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 un 0.3 y un 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.

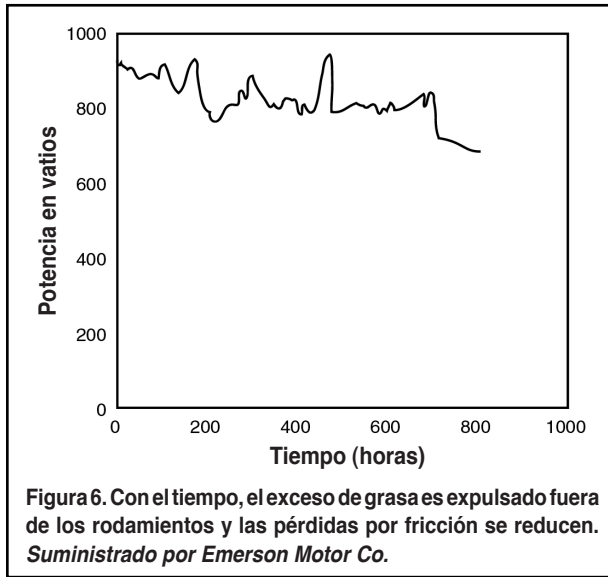
Pérdidas Adicionales con Carga

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 pérdidas, 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 (ej. por daño mecánico, excesivo pulido o esmerilado, etc.). Las pérdidas adicionales también aumentan cuando el entrehierro no es uniforme (ej. estator y rotor que no están concéntricos) o si el núcleo del rotor está desplazado axialmente en relación con el estator (ej. si se instala un rotor de

TABLA 2. 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

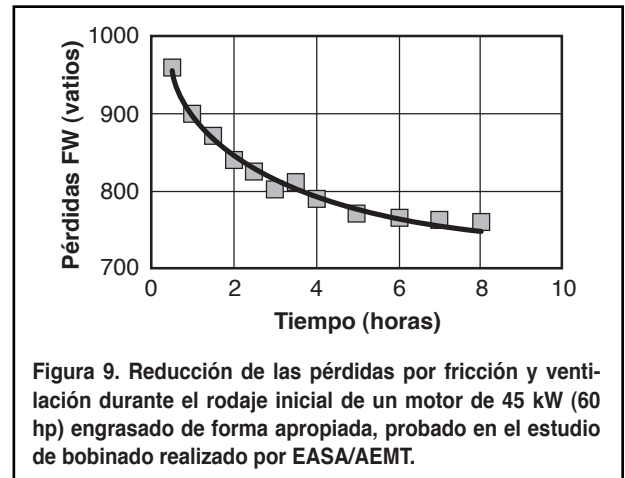
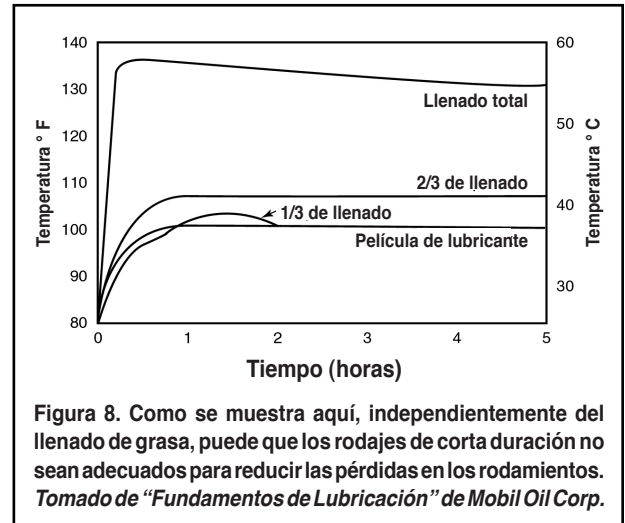
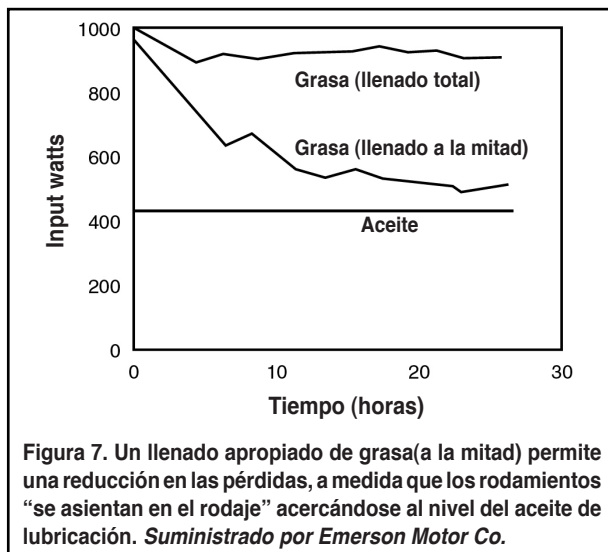


repuesto equivocado).

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 (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 660°F (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 desmantelar 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.

En este mismo estudio, la temperatura de quemado de los motores de los Grupos B, C y D se incrementó hasta 680-700°F (360-370°C). Como resultado el aislamiento de los bobinados se 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.

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 660°F (350°C) hasta 680-700°F (360-370°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:

Guía de Buenas Prácticas

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 (ej. daño del aislamiento inter-laminar).
- Daño mecánico del núcleo (ej. dientes con láminas deformadas, sueltas o esmeriladas).

Pérdidas I²R del estator

- Aumento de la MLT de las bobinas (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 (ej. rotor excéntrico con respecto al diámetro interior del estator).
- Cambios en el entrehierro.
- Daños en las láminas externas del núcleo.

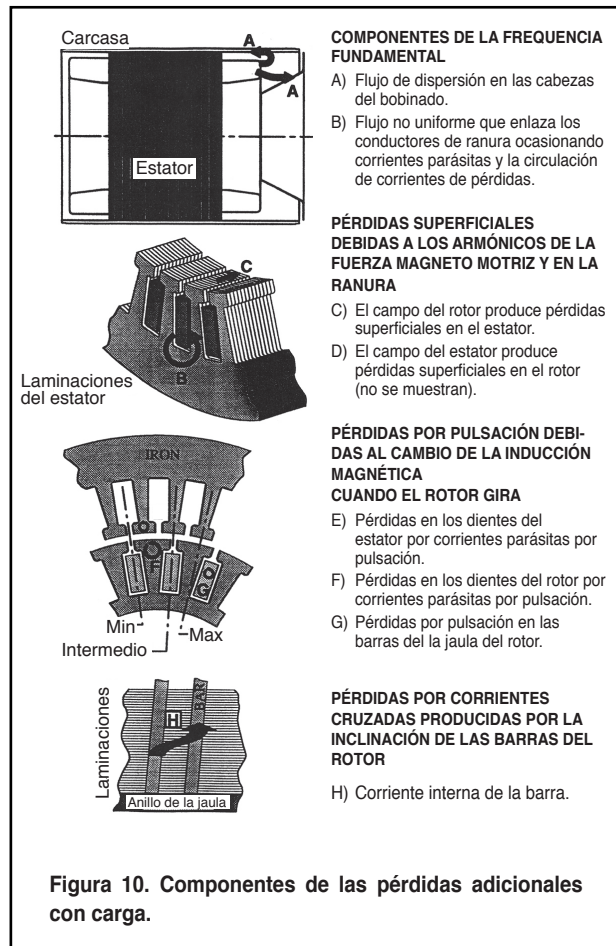


Figura 10. Componentes de las pérdidas adicionales con carga.

Figura 11. Carta de Datos para Bobinados Originales Polifásicos de C.A.

HP/kW	RPM	Polos	Fabricante/Marca	
RANURAS		TIPO		VOLTIOS
BOBINAS		MODELO		AMPERIOS
GROUPOS		ESTILO		FASES
ESPIRAS/VUELTAS		DISPOSITIVOS AUXILIARES	EFICIENCIA	Hz
SECCIÓN/CALIBRE DEL ALAMBRE		LONGITUD DEL CABLE DE SALIDA	NO. DE CABLES DE SALIDA	TAMAÑO CONSTRUCTIVO
CANTIDAD DE ALAMBRES		ELEVACIÓN DE TEMPERATURA °C	CICLO DE TRABAJO	TEMPERATURA AMBIENTE °C
PASSO: 1 -		N° SERIE		CLASE DE AISLAMIENTO
CONEXIÓN		TIPO DE ENCERRAMIENTO		FACTOR DE SERVICIO
PUENTES		ESQUEMA DE LA BOBINA	DENSIDADES:	CMA
LARGO DEL NÚCLEO				A/MM²
DIÁMETRO INTERIOR DEL NÚCLEO				ENTREHIERRO
YUGO/CORONA				DIENTE
FONDO DE RANURA				YUGO/CORONA
ANCHO DEL DIENTE				
PESO DEL ALAMBRE				
ORDEN DE TRABAJO				
CLIENTE				

Figura 12. Hoja de Datos para Bobinados Originales Polifásicos de C.A.

Características del Bobinado de CA

Cliente: _____

Marca: _____

Nº de Serie: _____ Modelo: _____ Encerramiento: _____

HP/kW V A RPM

Datos	Estator	Rotor	Verificado por	PRUEBAS ANTES DEL BARNIZADO		
	Existente	Nuevo				
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 ranuras						
Nº ranuras/polo/fase				HIPOT A TIERRA		
Paso						
Nº grupos						
Nº bobinas/grupo				HIPOT ENTRE FASES		
Nº de circuitos en paralelo						
Conexiones						
Alambres en paralelo				EQUILIBRIO DE FASES		
Espiras/bobina				VOLTIOS: Y/Δ:		
Sección/calibre del alambre				Amps	Amps	Amps
Profundidad de ranura				PRUEBA DE POLARIDAD		
Ancho del diente						
Largo del yugo/corona						
Peso de la bobina				OTRAS PRUEBAS		
Clase de aislamiento						
Sección/calibre del cable						
ESQUEMA Y OTROS DETALLES				DATOS TOMADOS POR:		
				VERIFICADO Y APROBADO POR:		
				FECHA:		

PROCESOS DE REPARACIÓN DEL MOTOR

Si no son llevados a cabo de forma apropiada, la mayoría de los procesos de reparación pueden causar la reducción de la eficiencia del motor. Al contrario, el hacerlos bien, mantendrá e incluso podrá mejorar la eficiencia. También es importante contar con registros escritos que documenten los procesos de reparación de forma clara y concisa.

Los principales procesos de reparación de un motor incluyen:

- Inspección inicial.
- Desmontaje.
- Toma de datos, remoción del antiguo bobinado y limpieza del núcleo.
- Rebobinado.
- Reparaciones mecánicas.
- Montaje.

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.

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 del fallo. Tal como se aprecia en las Figuras 11 y 12, es importante rellenar todos los campos de las hojas de datos. Particularmente, tome nota de la siguiente información:

Puntos clave

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

1.1 Datos de placa(s) del motor

- Tome todos los datos de placa. Tenga 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.
- Recuerde 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.
- Verifique si la eficiencia del motor es EAct (Estados Unidos) o EFF1 (Europa).

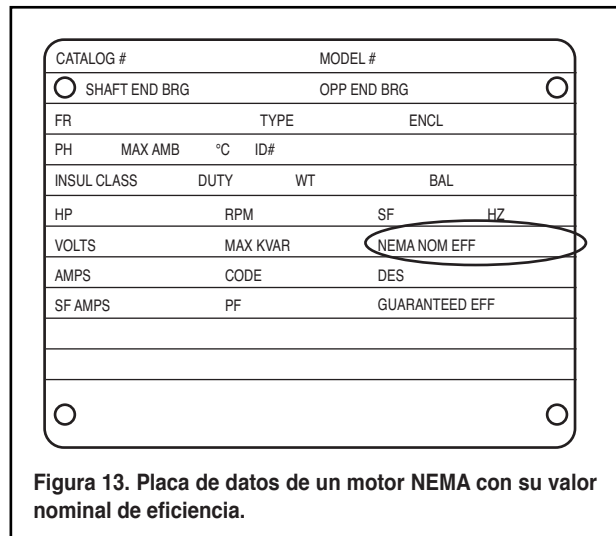


Figura 13. Placa de datos de un motor NEMA con su valor nominal de eficiencia.

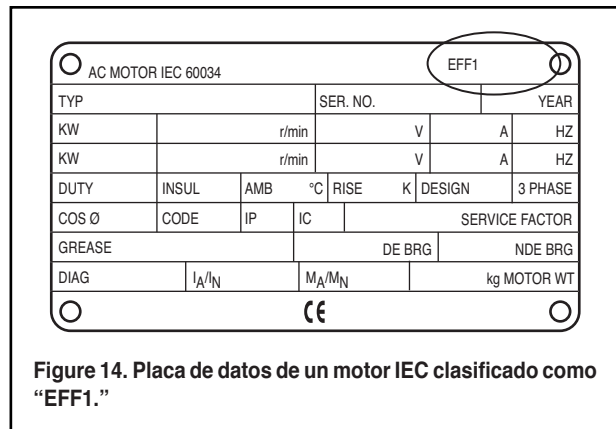


Figure 14. Placa de datos de un motor IEC clasificado como "EFF1."

- Compruebe si el motor es apto para uso en atmósferas peligrosas (motores IEC clasificados EExd o EExe o máquinas NEMA clasificadas UL o CSA).

1.2 Resultados de la inspección externa

Observe y tome note 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 agarrado.
- Partes faltantes o dañadas o que han sido reemplazadas/ reparadas con anterioridad—ej. retenes (sellos), aletas de enfriamiento del estator, ventilador, tapa o cubierta de protección del ventilador, caja de conexiones, etc..

1.3 Información del cliente

Es posible que el cliente pueda proporcionarnos 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.



Figura 15. Motor con aletas de enfriamiento obstruidas.

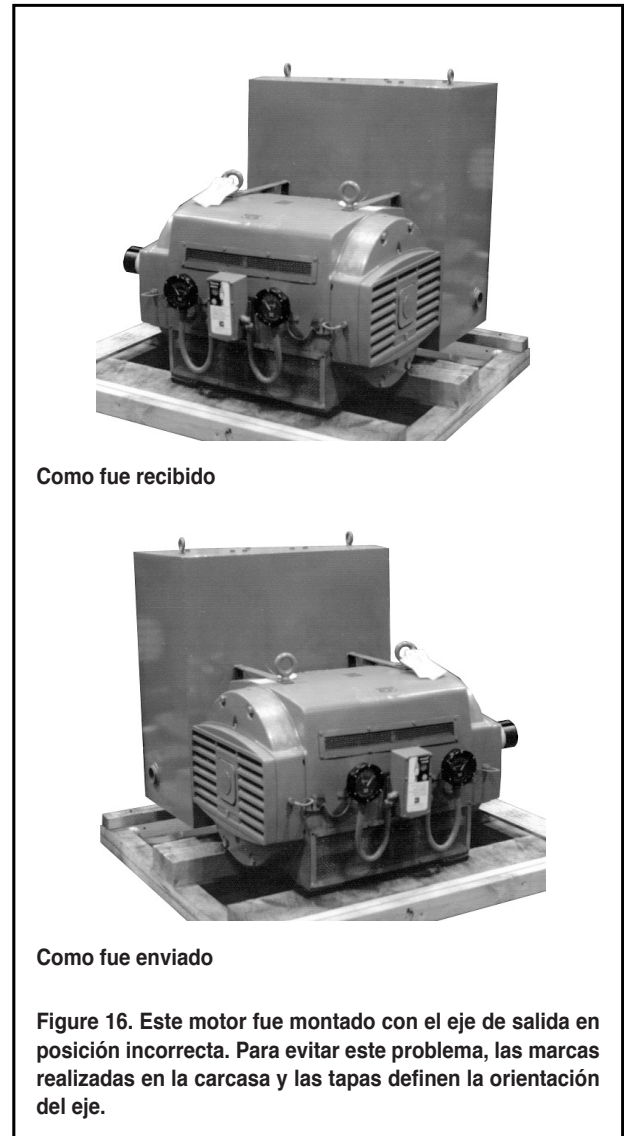
- La frecuencia de los arranques.
- El tipo de arrancador (método de arranque).
- Donde se ha reparado/bobinado el motor antes.
- Cuanto tiempo trabajó el motor desde nuevo (o desde su reparación/bobinado).
- Situaciones inusuales-ej. apagones, descargas atmosféricas, daños por agua, problemas con el equipo o máquina impulsada, etc.
- Alimentación eléctrica y método de arranque.
 - o Directo
 - o Suave
 - o Devanado partido
 - o Inversor/Variador de frecuencia
 - o Estrella-delta o estrella-triángulo

2 Desmontaje

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 desmontado. Es esencial que el motor sea desmontado de forma cuidadosa, como también, es importante conservar adecuadamente los registros para asegurar que si se realiza su reparación, el motor pueda ser montado 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..

Puntos clave

- Posición de la caja de conexiones, esquema y conexiones.
- Posición de las tapas o escudos y tapas cubre-grasa.
- Medidas de los rodamientos, tipos y tolerancias.
- Posición axial del rotor en relación con el estator (lado acoplamiento o lado opuesto acoplamiento).
- 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 superfi-



Como fue recibido

Como fue enviado

Figure 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.

- cies de los entrehierros o en los devanados.
- Inspección interna.
- Daño mecánico de las componentes o señales de uso indebido.
- Motores contaminados.

2.1 Caja de conexiones, esquema y conexiones

- Tome nota de las marcas en los cables de salida y en los terminales.
- Tome nota de la posición de cualquier puente existente entre los terminales (haga un esquema).
- Compruebe que el material aislante de los cables de salida no presenta recalentamiento en la zona de contacto con los terminales (hay señales de una decoloración o está quebradizo). Si es así, reemplace los cables de salida. Este recalentamiento puede haber sido causado por una mala conexión.
- Confirme que todos los terminales están crimpados firmemente o soldados a los cables de salida del bobinado.
- Tome nota del calibre y del tipo de los cables de salida.
- Tome nota del tamaño y modelo de los terminales.

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 realice marcas permanentes en ambos lados de todas las tapas o escudos y la carcasa del motor (ej. antes de desmontar el motor hacer marcas con puntos de todos los componentes usando un centro punto) (ver Figura 16).

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 acoplamiento para incrementar la capacidad de carga radial, o con rodamiento(s) axial(es) para soportar cargas axiales elevadas. Instale siempre rodamientos nuevos que sean del mismo tipo de los desmontados, 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.

2.4 Posición axial del rotor en relación al estator (lado acoplamiento o lado opuesto acoplamiento).

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 desmonte el motor tome nota de la posición de la arandela de presión o arandela ondulada (ej. lado acoplamiento o lado opuesto acoplamiento).

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

Tome nota de la posición del eje de salida con respecto a la



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

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.”

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

Cuando se desmonta 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 Figura 17).

2.7 Inspección interna.

Observe y tome 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 fallo.

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 un fallo. 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 de la máquina durante su enfriamiento.

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 el fallo 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 si y puede causar un aumento de las pérdidas por corrientes parásitas. Dependiendo del alcance de

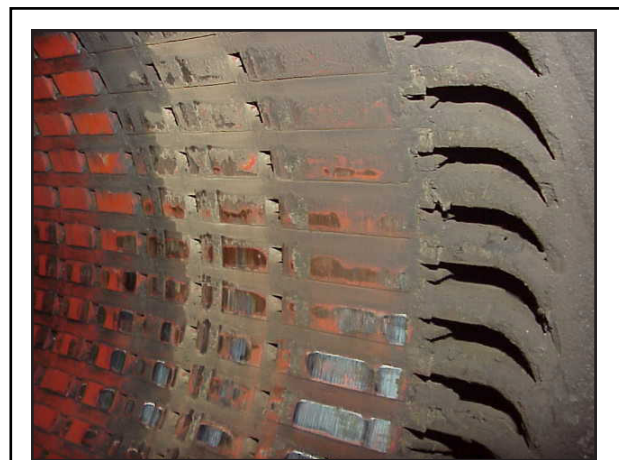


Figura 18. Pequeño roce en el estator.

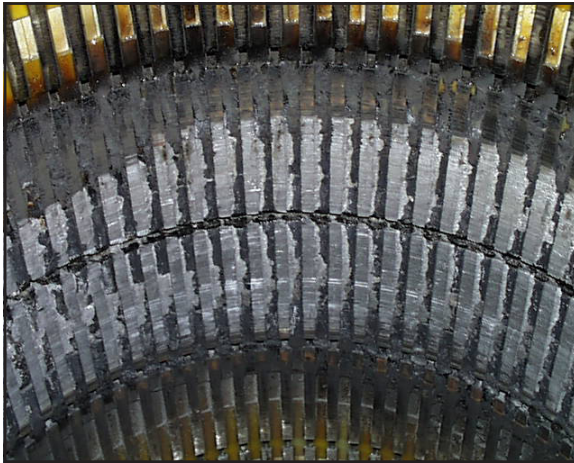


Figura 19. Un roce grave, no reparabile, a menos que el núcleo sea desmontado y reparado.

los daños, puede que el motor no sea reparabile.

- **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 fallos eléctricos graves como corto circuitos 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, evalúe el impacto sobre la eficiencia y el funcionamiento del motor al considerar su reparación (vea 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 (vea la Figura 21).

Nota: El calentamiento producido varía de forma cuadrática con las pérdidas por corrientes parásitas - 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

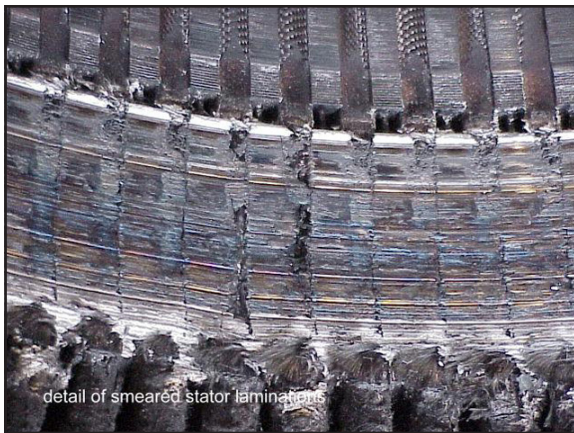


Figura 20. Daño mecánico severo en el diámetro interno del estator; no reparabile a menos que el núcleo sea re-apilado o reemplazado.

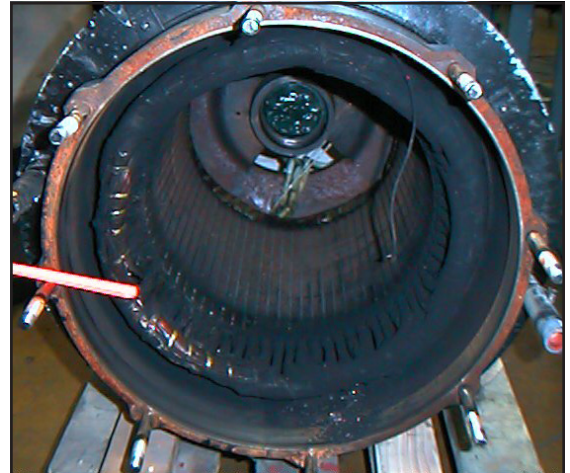


Figura 21. Decoloración general en el devanado del estator—que normalmente indica excesiva temperatura. Verifique la carga, la alimentación eléctrica y el sistema de enfriamiento.

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.

2.7.3 Estado del bobinado-decoloración, tipo de fallo.

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

Una decoloración uniformemente en ambos lados del bobinado puede indicar un fallo debido a un problema de ventilación, sobrecarga u 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, bobinar el viejo motor dará como consecuencia otro fallo por sobrecarga, posiblemente dentro del período de garantía otorgado por el reparador.

La mayoría de los fallos de los bobinados tienen muchas causas posibles y el diagnóstico de estos está fuera del alcance de esta guía. Para estos propósitos, consulte el libro de EASA Root Cause Failure Analysis, como también el catálogo "Failures in Three-Phase Stator Windings" en ellos se encuentran disponibles excelentes fotografías de los diferentes tipos de fallos de los bobinados.

2.8 Daño mecánico de las componentes o señales de uso indebido.

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

- Daños en el ventilador o 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).

2.9 Motores muy contaminados

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

3 Remoción del antiguo bobinado y limpieza del núcleo

Existen cuatro elementos para realizar esta tarea:

- La toma de datos del bobinado en fichas u hojas apropiadas (ver 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.

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.

Rellene 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, trate de verificar los datos tomados con otras fuentes (ej. su propio banco de datos, la base de datos de EASA o con el mismo fabricante del motor).

Puntos clave-toma de datos del bobinado

- 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.

3.2 Prueba de pérdidas en el núcleo

Los probadores de núcleo disponibles en el comercio pueden indicarnos 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 de la máquina.

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 de la máquina, 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

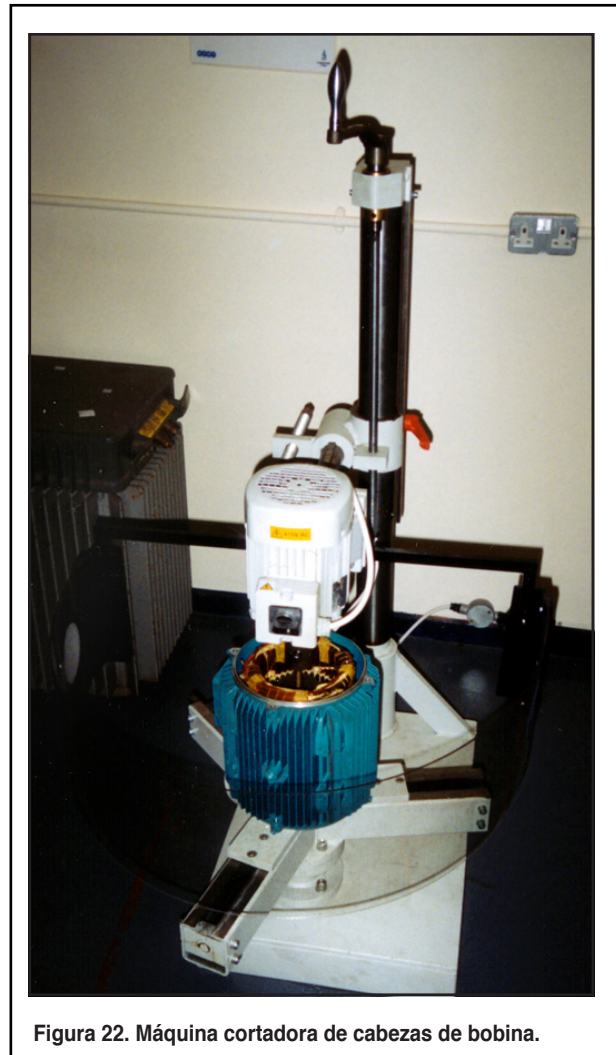


Figura 22. Máquina cortadora de cabezas de bobina.

realizar adecuadamente estas pruebas trabaje dentro de los rangos de operación recomendados por los fabricantes de estos equipos.

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-pruebas de pérdidas en el núcleo

- Realice todas las pruebas usando el mismo probador.
- Asegúrese 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.
- Realice pruebas:
 - Antes del quemado.
 - Después de limpiar el núcleo y antes del bobinado.
- Recuerde 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%:
 - Asegúrese 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, repare el núcleo o considere su reemplazo.

3.3 Remoción del antiguo bobinado

3.3.1 Paso 1—Corte las cabezas de las bobinas en un lado (normalmente el opuesto conexiones)

Corte 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 (vea la Figura 22). Independiente del método usado para cortar las cabezas de bobina tenga cuidado de no dañar las láminas del núcleo.

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 no realizado a la temperatura adecuada. En este caso lo mejor es realizar de nuevo el ciclo de quemado.

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 y reduciendo la eficiencia del motor.

Todos los resultados satisfactorios del estudio realizado por EASA/AEMT fueron obtenidos a una temperatura de quemado de 700°F (370°C).

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 Figura 23).

Precauciones para realizar el quemado de motores: No amontone 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 sitúe los estatores con los diámetros del núcleo en posición vertical; esto es especialmente crítico en las carcasas de aluminio.

3.3.5 Remoción del antiguo bobinado

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

Puntos clave- remoción del antiguo bobinado

- Corte las cabezas de bobina en uno de los lados del estator usando una máquina cortadora de cabezas.



Figura 23. Horno de quemado con temperatura controlada.

- Queme 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 recaliente el núcleo.
- Remueva el bobinado sin dañar el núcleo.
- Precaución: Algunos motores pueden tener cables de conexiones que salen por ambos lados de las cabezas del bobinado

3.4 Limpieza del núcleo del estator

Puede 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, restablezca su posición utilizando la mínima fuerza.

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 trituradas o gránulos plásticos. Realizar la limpieza con materiales más abrasivos como arena, piedra triturada, gránulos de cerámica o aún gránulos de vidrio pueden causar cortos 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.

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

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..

3.4.3 Daño de las superficies del entrehierro del núcleo

Puede 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 vatios”, ya que esto “golpea” los vatios fuera del núcleo). Si esto no funciona, utilice un cuchillo afilado para separar las láminas en el área afectada y después realice 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 considerablemente y que la eficiencia del motor sea menor. La mejor solución en estos casos es reemplazar el núcleo o desmontarlo para re-aislarlo y volver a apilarlo.

Puntos clave-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:

- Re-posicione los dientes dañados.
- Repare los daños menores de las superficies de los entrehierros.
- Si ha ocurrido un daño severo, reemplace o re-aisle y re-apile los núcleos.

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 tienen 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, tenga en cuenta que en algunos diseños la longitud de las cabezas del bobinado es crítica para realizar la disipación del calor y si estas cabezas son muy cortas, la temperatura del bobinado puede incrementarse, con el correspondiente aumento de las pérdidas I²R.

Cuando el volumen de producción justifica los costes, 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.
- Cambiar un bobinado concéntrico original a un bobinado excéntrico/imbricado.

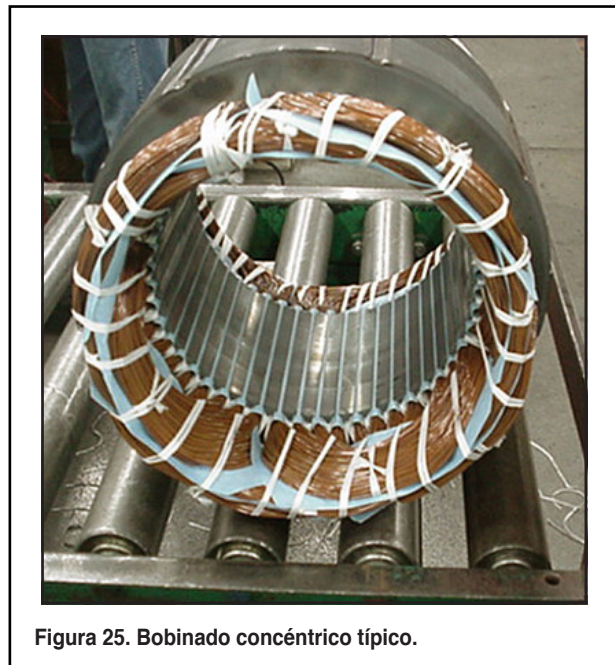


Figura 25. Bobinado concéntrico típico.



Figura 26. Bobinado excéntrico/imbricado típico.

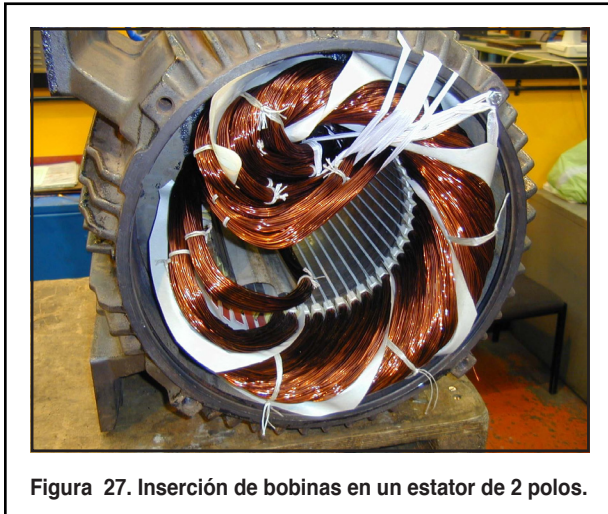


Figura 27. Inserción de bobinas en un estator de 2 polos.

4.1 ¿Es un bobinado original?

Normalmente solo con ver el bobinado, los técnicos experimentados pueden decir si es original o no. Aún así, generalmente lo mejor es contrastar los datos tomados del bobinado con la información contenida en el *Motor Rewind Data CD-ROM de EASA*. Este recurso está disponible para los miembros de EASA y AEMT y contiene 340.000 datos. En caso 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 nos pueden ayudar a determinar esto. Por ejemplo, en Norte América, 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 fallos en los motores que bobinan, mejorando el atado de las bobinas, los sistemas de aislamiento, etc.

4.2 Copia (duplicado) del bobinado

Una vez se tome nota de los datos y los detalles del antiguo bobinado (ver Sección 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 y 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 sea rebobinado.

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

4.2.1 Recortar las cabezas de las bobinas

Las cabezas de las bobinas están compuestas de cobre “inactivo” que solamente sirven 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 (MLT) del

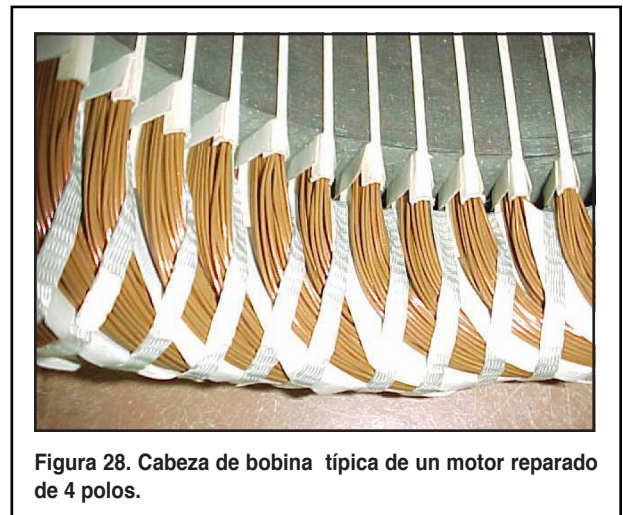


Figura 28. Cabeza de bobina típica de un motor reparado de 4 polos.

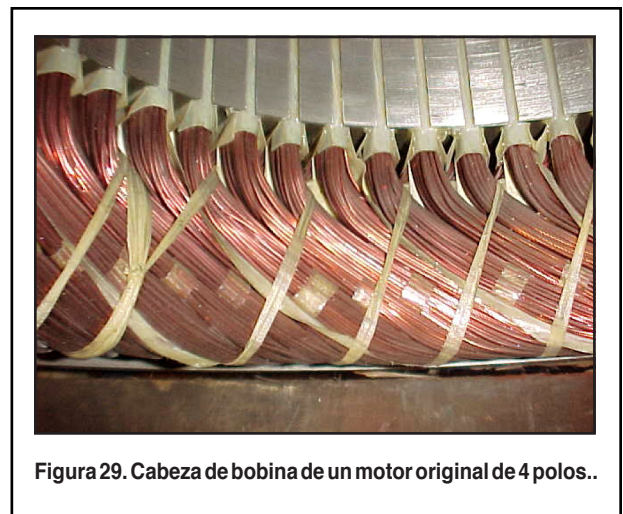


Figura 29. Cabeza de bobina de un motor original de 4 polos..

nuevo bobinado, excede a la original, las pérdidas I²R aumentarán. Para prevenir esto, tenga cuidado de seguir las siguientes reglas:

- Conserve la longitud de las cabezas de bobina dentro de las dimensiones del bobinado original.
- No alargue 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 alargue 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, que sea imposible realizarlo. En casos extremos, la refrigeración del motor puede verse afectada haciendo que el motor trabaje más caliente.

Con lo cual, 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 tome nota de las dimensiones de los datos de los nuevos bobinados.

4.2.2 Aumentar la sección de los alambres de cada bobina

A menudo, cuando se bobina 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 (y aún 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 I²R y a conservar (o mejorar) la eficiencia del motor después de la reparación.

La experiencia le dirá cuanta sección de cobre puede aumentarse. El mejor método es de cambiar los tamaños/calibres de los alambres de cada bobina, teniendo en cuenta el llenado de la ranura (ej. la sección del cobre en cada ranura/área de la ranura), si es menor, incremente el cobre usando alambres más gruesos, pero también tenga en cuenta que esto aumenta la dificultad para realizar el bobinado. Asegúrese de tomar nota del tamaño/calibre de los alambres usados para el nuevo bobinado.

Puntos clave-para copiar el bobinado

- Verifique que el antiguo bobinado es original.
- Use la misma configuración del bobinado.
- Mantenga la longitud de las cabezas de bobina tan cortas como sea práctico.
- Utilice bobinas con cabezas de la misma longitud (preferiblemente menor).
- Use el mismo paso (o pasos).
- Utilice las mismas espiras/bobina.
- Use alambres con la misma sección (preferiblemente más grandes).
- Utilice bobinas de igual MLT o más cortas.
- Verifique que la resistencia (corregida por temperatura) del nuevo bobinado es igual o menor a la del antiguo bobinado.

4.3 Conversión a un bobinado de doble capa

Dado que todas las bobinas son iguales, a menudo los repara-

dores 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 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 una sola capa. Reemplazar un bobinado original de doble capa por uno de una sola capa no es recomendable ya que es seguro que esto reducirá la eficiencia del motor.

El paso de los bobinados de doble capa debe ser recortado de forma adecuada (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, vea los Apéndices 1 y 2, así como también consulte el *Programa de Verificación y Rediseño de Motores de Corriente Alterna de EASA*.

Ventajas

- **La eficiencia se puede conservar o mejorar. Los bobinados de doble capa producen mejores resultados.**
- Las espiras de las bobinas pueden ser fabricadas con una longitud media (MLT) 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. Para más información, vea el Apéndice 3.
- 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, vea el *Programa de Verificación y Rediseño de Motores de Corriente Alterna de EASA*.

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 y 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:

$$1) \quad E = 4.44 \times f \times N \times F \times K_d \times K_p$$

Donde E = fuerza contra electromotriz por fase

f = frecuencia

N = número de espiras en serie por fase

F = 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 (1), 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 FEM's fundamentales de cada bobina y minimizar las FEM's 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 montaje 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 FEM's 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, excéntrico/imbricados y con paso acortado, se utilizan en máquinas pequeñas y medianas, pero nunca deben ser utilizados para sustituir bobinados de doble capa.
- Para mayor información acerca de los factores de paso y de distribución, vea el Apéndice 1.

4.4 Finalización de los trabajos de bobinado

Después de insertar totalmente el bobinado, conecte 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 realice las conexiones de forma apropiada, si se trata de un bobinado sustituto tipo excéntrico/imbricado. Use cables de salida que sean tan largos como prácticos y márkuelos de forma correcta. Realice las soldaduras de los principios y finales de cada bobina de igual forma o mejor, de como lo hizo el fabricante original (ej. más rígidas).

Finalmente, después de revisar las cabezas de bobina, realice al bobinado pruebas de resistencia, resistencia de aislamiento, equilibrio de fases y rigidez dieléctrica o Hipot como se describe a

continuación en la sección 4.5.

4.5 Pruebas del bobinado

Realice las pruebas de resistencia y equilibrio de fases en el bobinado.

4.5.1 Prueba de resistencia

Mida la resistencia del primer grupo de bobinas del nuevo bobinado y compárela 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, mida la temperatura del aire T(a). Corrija ambos valores de resistencia a una temperatura común de referencia (normalmente 25°C) usando la siguiente fórmula: $R_x = \left(\frac{234.5 + 25}{234.5 + T_a} \right) \times \text{Resistencia medida}$

Donde

- R_x = resistencia corregida del grupo de bobinas
- T_a = temperatura ambiente del aire

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, mida y registre 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% (vea 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.

4.5.2 Prueba de equilibrio de fases (o prueba de onda de choque)

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 I²R.

Realice 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

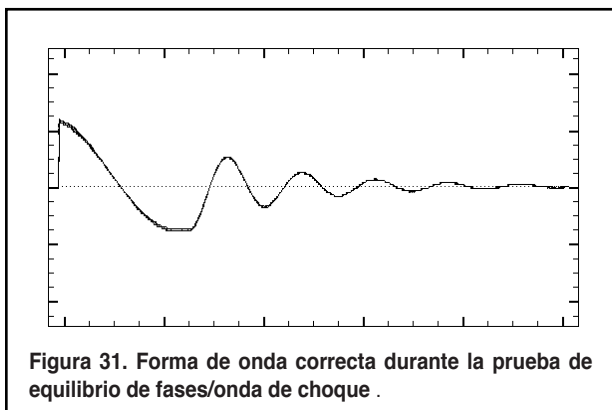


Figura 31. Forma de onda correcta durante la prueba de equilibrio de fases/onda de choque .

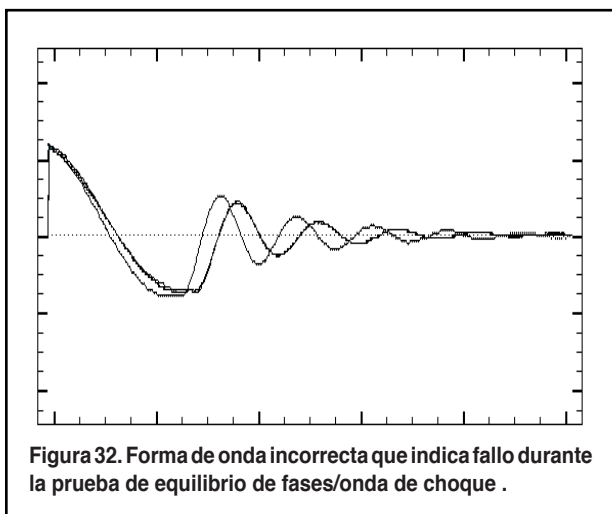


Figura 32. Forma de onda incorrecta que indica fallo durante la prueba de equilibrio de fases/onda de choque .

bobinado, registrando la caída de tensión en un osciloscopio de doble trazo. 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 un fallo que deberá ser detectado mediante una inspección posterior.

Puntos clave—prueba de equilibrio de fases/onda de choque

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

4.5.3 Prueba a tierra/prueba de hipot

Las tensiones utilizadas para realizar esta prueba en bobinados con tensiones nominales mayores a 250 voltios y con potencias nominales mayores a 0.5 hp (0.37 kW) son:

- Prueba de hipot con corriente alterna: 1000 voltios + 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 subsecuentes no deberán exceder al 65% de las tensiones de prueba antes mencionadas.

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

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 (“voids”) 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 I²R

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 3 ilustra la capacidad para soportar temperaturas.

TABLA 3. CAPACIDAD PARA SOPORTAR TEMPERATURAS

Clase de aislamiento	Temperatura máxima soportada (IEC 60034-1; 1998)		Temperatura máxima soportada (NEMA MG1-12.43)	
	°C	°F	°C	°F
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		

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, aún si el motor tiene una clase de aislamiento inferior (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, limpie el exceso de barniz en el núcleo antes de situar el estator dentro del horno de secado.

5. Reparaciones mecánicas que pueden afectar la eficiencia

5.1 Reparación de los núcleos

a) Estator

- Esmerilados que causan daños en las superficies del núcleo.

- Esmerilados excesivo del núcleo.
- Utilizar fuerza desmedida para reponer los dientes deformados.
- Reducir el número de láminas del núcleo.
- Re-apilamiento incorrecto.

b) Rotor

- Esmerilado de su superficie.
- Mecanizado del rotor con una herramienta sin filo o a una velocidad superficial incorrecta (ej. fricción de las láminas entre sí).
- Entrehierro excesivo.
- Equivocarse en el diagnóstico de fallos o al realizar reparaciones de las barras rotas o anillos de la jaula.

5.2 Reparaciones del eje

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

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.
- Instalar 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 ente 0.004 y 0.006 pulgadas (0.10-0.15 mm). Si hay poco ajuste, se anula la transferencia de calor con el núcleo y las pérdidas del devanado del estator se elevaran.
- Errores al limpiar los conductos de aire o ductos de ventilación obstruidos.
- Errores al reparar o reemplazar las aletas de refrigeración rotas o faltantes.

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).
- Instalar el tipo de sello incorrecto.
- Ajuste incorrecto de los sellos.
- Fallos al lubricar los sellos (o poca lubricación).

5.5 Ventiladores y Cubiertas de protección

- Instalar 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 remplazar un ventilador dañado (ej. que le falten aletas o que estén rotas).
- Instalar 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.

6. Montaje del motor

Ciertos pasos del proceso de montaje 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 vatios. 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.

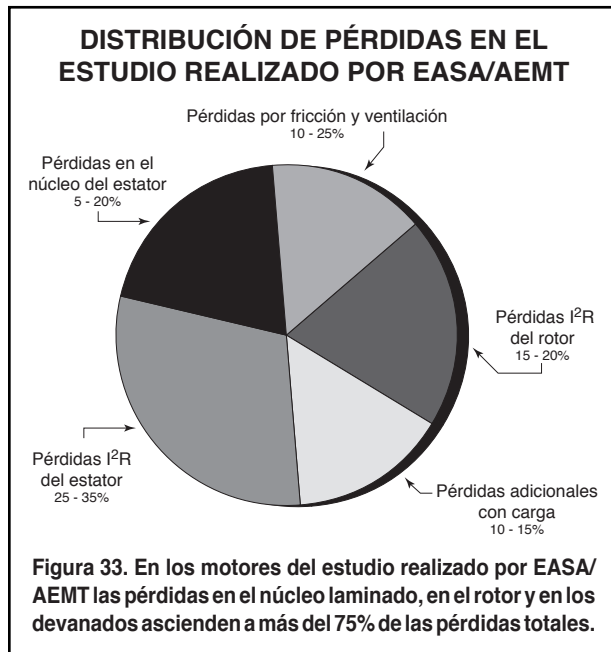
- **Arandelas de presión/onduladas.** Durante el proceso de montaje, particularmente en los casos en los que el rodamiento se encuentra muy ajustado dentro del alojamiento, el rodamiento podría pre-cargarse, incrementando así las pérdidas por fricción hasta que el motor haya alcanzado su ciclo térmico 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 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, IP 12), 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, verifique 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.

7. Consejos de reparación

Para la comodidad del personal del centro de servicios, la mayoría de la información contenida en esta sección ha sido extractada 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.

7.1 Pérdidas del motor y eficiencia

Es importante entender, porque algunos procesos de reparación pueden afectar la eficiencia de un motor y como las buenas prácticas la pueden conservar o aún mejorarla. 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 varias componentes: pérdidas en el bobinado del estator, perdidas en el núcleo del estator, pérdidas en el rotor, pérdidas adicionales con carga (vea la Figura 33).



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 tenemos, 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 si 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.

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.

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* recomienda que la temperatura de quemado del núcleo no exceda de 680°F (360°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 750°F (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 700°F (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 amontone 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. No sitúe los estatores con los diámetros del núcleo en posición vertical; esto es especialmente crítico para las carcasas de aluminio.

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 vea la sección 3.2.)

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 (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 aumentarían. 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. (*Recuerde, 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. Así mismo, 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.

7.3.4 Preparación del núcleo

Durante la reparación de las zonas dañadas del núcleo, realice los mínimos trabajos de limado y 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 los fallos presentados en el motor (ej. rozamiento con el rotor por el fallo 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.

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 circular mils por amperio (CMA) [amperios por mm^2], 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, aún si los dos conductores tienen la misma sección.

7.3.6 Longitud media de la espira (MLT)

Es importante que la longitud media de la espira (MLT) del nuevo bobinado no exceda (preferiblemente sea menor) a la MLT 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. Vea la Figura 5.

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 espiras, el mismo paso y conserva la misma longitud en las cabezas de bobina.

Tenga 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 convierta bobinados concéntricos en excéntricos/imbricados, sin antes calcular la MLT de ambos bobinados y teniendo en cuenta que la resistencia total sea menor.

Cuando compare bobinados concéntricos y excéntricos/imbricados, tenga en cuenta la forma en la que cada bobina está

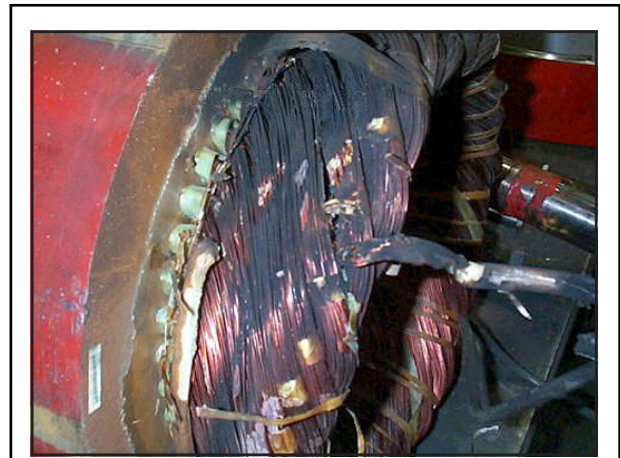


Figura 34. “Bobinado excéntrico o imbricado con “Bobinas enterradas”.

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.

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 (vea la Figura 34). Este inconveniente se puede presentar en la capa central de los bobinados concéntricos de triple capa. Por tanto, cuando copie este mismo tipo de bobinados, inserte 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

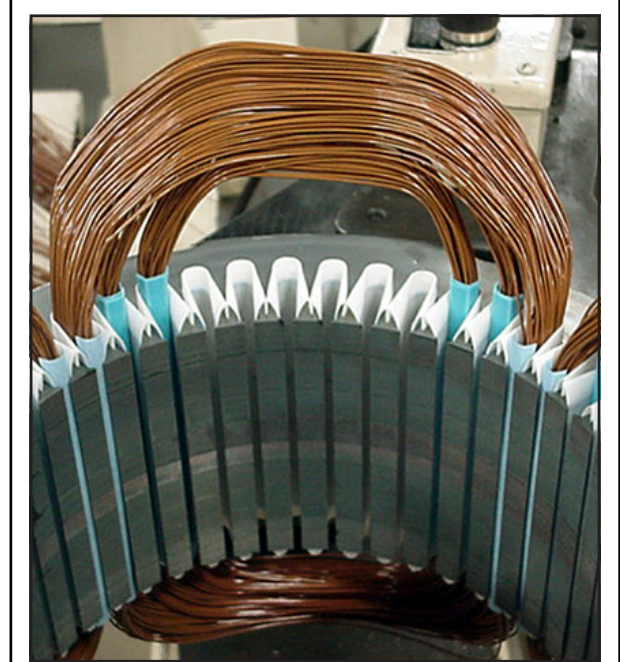


Figura 35. En los bobinados concéntricos las bobinas tienen pasos diferentes. La efectividad de cada bobina no es la misma, dado que cada paso tiene un factor de cuerda distinto.

TÍPICO GRUPO DE UN BOBINADO EXCÉNTRICO/IMBRICADO

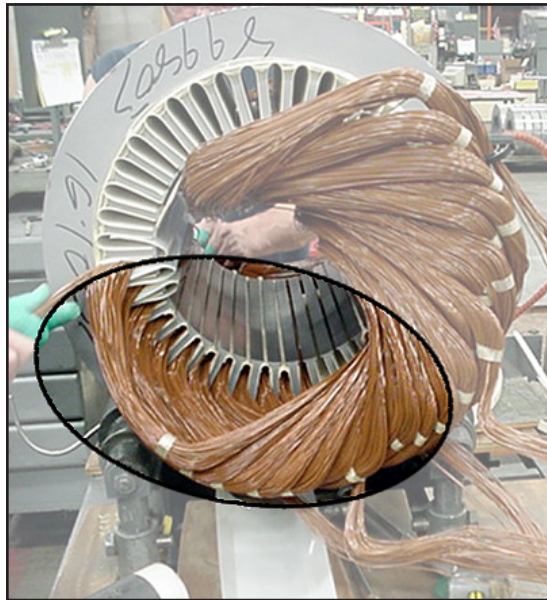


Figura 36. Bobinado excéntrico/imbricado con todas las bobinas fabricadas con un mismo paso..

7.3.8 Tipo de bobinado

Asumiendo que no hay daños en el rotor y que los circular mil / amperio 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 (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 de la máquina). Esto se explica en la Sección 4.3 y en los apéndices.

(Nota: Como ya mencionamos anteriormente, cuando la eficiencia sea el aspecto primordial, no convierta bobinados concéntricos en excéntricos/imbricados sin calcular primero la longitud media de la espira [MLT] 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 4 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 ó 1-10.

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

$$k_p = \text{Seno} (90 \times \text{dientes expandidos/ranuras por polo})$$

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.

$$24 (.940) + 24 (1.0) + 24 (0.940) = 69.12 \text{ espiras efectivas}$$

Si seleccionamos un paso 1-9 para la conversión a excéntrico/imbricado:

$$69.12/3 = 23.04 \text{ espiras efectivas por bobina}$$

Las nuevas espiras por bobina se calculan dividiendo las espiras efectivas por bobina por ($k_p \times k_d$) [Véa el Apéndice 1 para una discusión adicional sobre el factor de cuerda (k_p) y el factor de distribución (k_d):]

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

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, divida 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 (MLT) 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 MLT 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 mencionamos anteriormente, 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.

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.

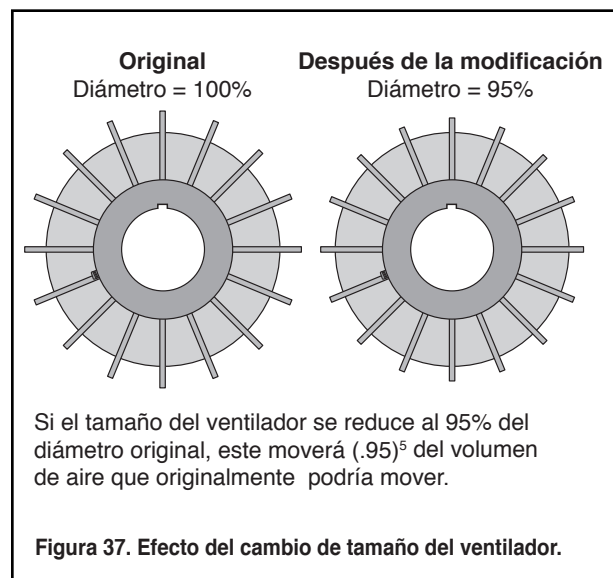
Los intervalos de lubricación, la cantidad y la viscosidad de la grasa, también producen un impacto sobre la eficiencia de un motor eléctrico. Para mantener la eficiencia de cada motor siga las directrices de los fabricantes. El estudio realizado por EASA/AEMT determinó que lubricar en exceso los rodamientos, aún en pequeñas cantidades, incrementa las pérdidas por fricción cerca de 500 vatios. 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 las 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.

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. Como ejemplo, se requeriría un 16% más de potencia (hp) para impulsar un ventilador de iguales características pero con un diámetro 5% más grande que el original. Estos hp invertidos se convierten en una pérdida de potencia, que reduce la eficiencia del motor (ver 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, discuta con el fabricante las alternativas disponibles para evitar causar efectos adversos que afecten la eficiencia.

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 el fallo 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 sólo 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 no ser 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, queme 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 700°F (370°C), medida en el núcleo del estator.

(Precaución: En algunos procesos de aislamiento inter-laminar 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).

(Esta página se dejó intencionalmente en blanco.)

Parte 3: *Lecturas Complementarias*

Bibliografía	3-3
Apéndice 1: Factor de Cuerda y Factor de Distribución	3-4
Apéndice 2: Análisis de las Configuraciones de los Bobinados	3-6
Apéndice 3: Cambiando a Bobinados Imbricados-Ejemplos	3-7
Apéndice 4: Aceros Eléctricos	3-9
Apéndice 5: Consideraciones para Reparar o Reemplazar	3-17

(Esta página fue dejada intencionalmente en blanco.)

Bibliografía

- AS 1359.102.1-1997 *Rotating Electrical Machines - General Requirements - Methods for Determining Losses and Efficiency*. Standards Australia International Ltd., Sydney, Australia, 1997.
- AS/NZS 1359.5:2000 *Rotating Electrical Machines: High Efficiency and Minimum Energy Performance Standards*. Standards Australia International Ltd., Sydney, Australia, 2000.
- Beckley, Philip. *Electrical Steels for Rotating Machines*. Institution of Electrical Engineers, 2002.
- Bonnett, Austin and Yung, Chuck. *Guidelines for Repair/Replace Decisions and Performance Optimization*. Electrical Apparatus Service Association, Inc. (EASA), St. Louis, MO, 2001.
- BS 60034-2:1999 *Rotating electrical machines. Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles)*. British Standards, London, United Kingdom, 1999.
- CAN/CSA-C390-98 *Energy Efficiency Test Methods for Three-Phase Induction Motors*. Canadian Standards Association (CSA), Toronto, Ontario, Canada, 1998.
- Christensen, Preben. *Tech Note 17: Stator Core Testing*. Electrical Apparatus Service Association, Inc. (EASA), St. Louis, MO, 1992.
- EASA/ANSI Standard AR100-2001: *Recommended Practice for the Repair of Rotating Electrical Apparatus*. Electrical Apparatus Service Association, Inc. (EASA), St. Louis, MO, 2001.
- EN 60034-2:1996 *Rotating electrical machines. Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles)*. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Brussels, Belgium, 1996.
- Good Practice Guide: The Repair of Induction Motors—Best Practices to Maintain Energy Efficiency*. Association of Electrical and Mechanical Trades (AEMT), 1998.
- IEC Standard 60034-2: *Rotating electrical machines. Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles)*. International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 1998.
- IEC Standard 61972: *Dimensions and Output Series for Rotating Electrical Machines*. International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 1998.
- IEEE Standard 43-2000: *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE). New York, NY, 2000.
- IEEE Standard 112-1996: *IEEE Standard Test Procedure for Poly-phase Induction Motors and Generators*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), New York, NY, 1997.
- Standard of the Japanese Electrotechnical Committee JEC-2137-2000 Induction Machines*. Japanese Electrotechnical Committee, Japan, 2000.
- Montgomery, D. "Testing Rewinds to Avoid Motor Efficiency Degradation." *Energy Engineering*, Vol. 86, No. 3, 1989.
- NEMA Standards MG 1-1998 (Revision 3, 2002): Motors and Generators*. National Electrical Manufacturers Association (NEMA), Rosslyn, VA, 2002.
- Principles of Large AC Motors*. Electrical Apparatus Service Association, Inc. (EASA), St. Louis, MO, 2000.
- Rewound High Efficiency Motor Performance*. BC Hydro, M101, British Columbia, Canada, 1993.
- Rewound Motor Efficiency*. Ontario Hydro, TP-91-125 Ontario, Canada, 1991.
- Root Cause Failure Analysis*. Electrical Apparatus Service Association, Inc. (EASA), St. Louis, MO, 2002.
- Steel Products Manual: Electrical Steels*. American Iron and Steel Institute (AISI), Washington, D.C., 1983.
- Tech Note 16 (Revised): Guidelines for Maintaining Motor Efficiency During Rebuilding*. Electrical Apparatus Service Association, Inc. (EASA), St. Louis, MO, 1999.
- Thorsen, O.V. and Dalva, M. "A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals and Oil Refineries." *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 5, Sept./Oct. 1995.
- Walters, D.G. "Minimising Efficiency Loss Caused by Motor Rewinds." *Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives*. Springer, 1999.
- Yung, Chuck. *Rewinding Tips for Energy Efficient and Inverter-duty Motors*. Presented at the Electrical Apparatus Service Association convention, Chicago, IL, June 2001.

Apéndice 1: Factor de Cuerda y Factor de Distribución

Factor de Cuerda

Asumiendo que el flujo por polo es constante, el factor de cuerda, también llamado factor de paso (K_p) se define como el factor mediante el cual se acorta el paso de cada bobina de un bobinado imbricado, lo que reducirá la fuerza contra electromotriz.

Matemáticamente se calcula como:

$$K_p = \text{Sen} [(paso de bobina \times 90)/paso polar]$$

o

$$K_p = \text{Cos} [(paso polar - paso de bobina) \times 90/paso polar]$$

(Nota: El paso polar es el número de ranuras por polo. El paso de bobina es el número de dientes abarcados por 1 bobina.)

Ejemplo del cálculo del factor de paso:

Un motor de 4 polos, 48 ranuras tiene un paso polar de 12 ranuras (48/4). El paso completo de una bobina imbricada abarcará 12 ranuras (1-13). Si el paso de bobina fuera reducido, digamos a 10 ranuras (1-11) tendremos:

$$K_p = \text{Sen} [(10 \times 90)/12] = 0.966$$

$$K_p = \text{Cos} [(12-10) \times 90/12] = 0.966$$

Esto aplica para bobinados imbricados de una y dos capas (ej. dos bobinas/ranura), no obstante los bobinados de dos capas permiten una mejor distribución de flujo en el entrehierro. El grado en el cual el paso de bobina puede ser acortado está condicionado hasta cierto punto por el número de ranuras por polo y en cualquier caso no deberá ser excesivo.

El paso de bobina usualmente se expresa como un porcentaje del paso completo o como el factor de cuerda del ángulo. El paso ideal para un motor de 4 polos ó más es el 83% del paso completo, o un factor de cuerda de 0.966. Para los devanados de 2 polos, normalmente se requiere emplear un paso acortado para hacer una inserción práctica de las bobinas; el preferido es del 67% o un factor de cuerda de 0.866.

Para facilitar los cálculos se incluye una tabla del factor de cuerda, no obstante la siguiente tabla abreviada puede ser de utilidad:

Porcentaje del paso completo	Factor de cuerda
100%	1.0
83%	.966
67%	.866

La Tabla 1 proporciona los factores de paso para muchas combinaciones ranura/polo.

TABLA 1. TABLA PARA EL FACTOR DE PASO/FACTOR DE CUERDA

Paso de Bobina	RANURAS POR POLO													
	24	22	20	18	16	15	12	11	10	9	8	6	4	3
1-25	1.000	.990	.951	.866										
1-24	.998	.997	.972	.906										
1-23	.991	1.000	.988	.940	.831									
1-22	.981	.997	.997	.966	.882									
1-21	.966	.990	1.000	.985	.924	.866								
1-20	.947	.977	.997	.996	.957	.914								
1-19	.924	.959	.988	1.000	.981	.951								
1-18	.897	.937	.972	.996	.995	.978	.793							
1-17	.866	.910	.951	.985	1.000	.995	.863	.756						
1-16	.831	.878	.924	.966	.995	1.000	.924	.841	.707					
1-15	.793	.841	.891	.940	.981	.995	.966	.910	.809	.643				
1-14	.752	.801	.853	.906	.957	.978	.991	.959	.891	.766				
1-13	.707	.756	.809	.866	.924	.951	1.000	.990	.951	.866	.707			
1-12	.659	.707	.760	.819	.882	.914	.991	1.000	.988	.940	.831			
1-11	.609	.655	.707	.766	.831	.866	.966	.990	1.000	.985	.924			
1-10	.556	.599	.649	.707	.773	.809	.924	.959	.988	1.000	.981	.707		
1-9	.500	.541	.588	.643	.707	.743	.866	.910	.951	.985	1.000	.866		
1-8	.442	.479	.522	.574	.634	.669	.793	.841	.891	.940	.981	.966		
1-7	.383	.415	.454	.500	.556	.588	.707	.756	.809	.866	.924	1.000	.707	
1-6	.321	.349	.383	.423	.471	.500	.609	.655	.707	.766	.831	.966	.924	
1-5	.259	.282	.309	.342	.383	.407	.500	.541	.588	.643	.707	.866	1.000	.866
1-4	.195	.213	.233	.259	.290	.309	.383	.415	.454	.500	.556	.707	.924	1.000
1-3	.131	.142	.156	.174	.195	.208	.259	.282	.309	.342	.383	.500	.707	.866

Factor de Distribución

El factor de distribución, K_d , simplemente tiene en cuenta el hecho de que todas las bobinas de un grupo no se encuentran centradas y en lugar de tener el mismo centro, como en un bobinado concéntrico, estas se encuentran dispersas o distribuidas en un determinado número de ranuras. Dado que las bobinas están distribuidas estas no contribuyen simultáneamente con el par o torque.

K_d se calcula con la fórmula:

$$K_d = \text{sen}(nd^\circ / 2)$$

o

$$K_d = n \times \text{sen}(d^\circ / 2)$$

Donde: K_d = factor de distribución

n = número de ranuras por polo y por fase

d° = grados eléctricos entre las ranuras ocupadas por las bobinas de un grupo*

Como consecuencia de esto, la instalación de las bobinas afecta al factor de distribución real. La Figura 1 muestra un devanado imbricado de dos capas estándar en el cual cada ranura contiene dos bobinas, una en la parte superior y otra en su parte inferior y el número de bobinas por grupo = total de ranuras divididas entre (polos x fase). Existen dos variantes para un bobinado imbricado a ranura llena en el cual cada ranura contiene un solo lado de

bobina. En la Figura 2, las bobinas están alojadas en ranuras adyacentes mientras que en la Figura 3 se encuentran insertadas en ranuras salteadas.

Para un bobinado de 48 ranuras, 4 polos, los resultados serían:

Bobinado imbricado estándar:	$K_d =$.958
Imbricado ranura llena (ranuras secuenciales):		.966
Imbricado ranura llena (ranuras salteadas)		.991

Dependiendo del método utilizado, la parte del diámetro interior del núcleo del estator que queda cubierta por las bobinas varía. Por consiguiente K_d también lo hace. Los cálculos básicos no muestran el efecto producido cuando cada ranura no aloja dos lados de bobina. El resultado es un notorio aumento de los armónicos. A continuación se muestra el porcentaje de K_d para cada armónico fundamental en un bobinado con ranuras salteadas.

Bobinado	5° Armónico	7° Armónico
Imbricado estándar	21%	17%
Imbricado ranuras salteadas	80%	61%

* Los libros de texto normalmente calculan K_d utilizando los grados eléctricos por ranura, lo que no tiene en cuenta un bobinado imbricado a ranura llena.

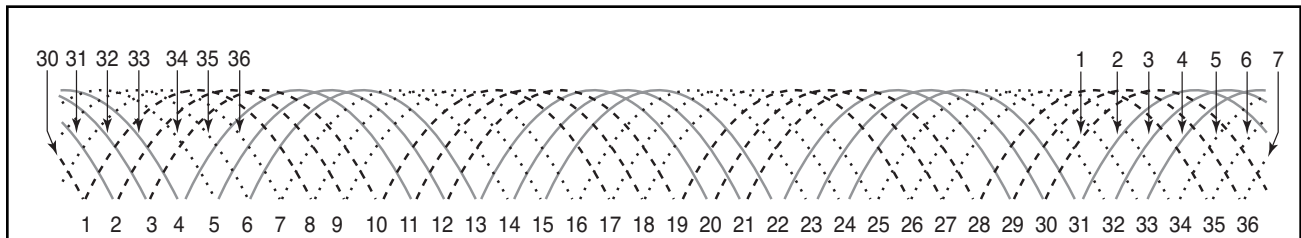


Figura 1. Un bobinado estándar de dos capas con una bobina superior y otra inferior en cada ranura; las bobinas por grupo son iguales a las ranuras divididas entre los polos multiplicados por las fases.

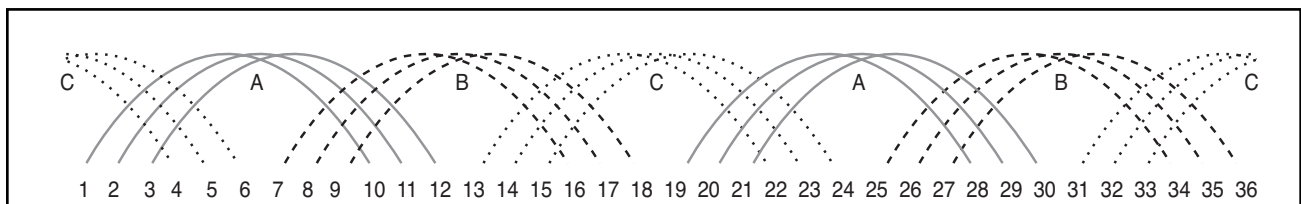


Figura 2. Las bobinas están alojadas en ranuras adyacentes.

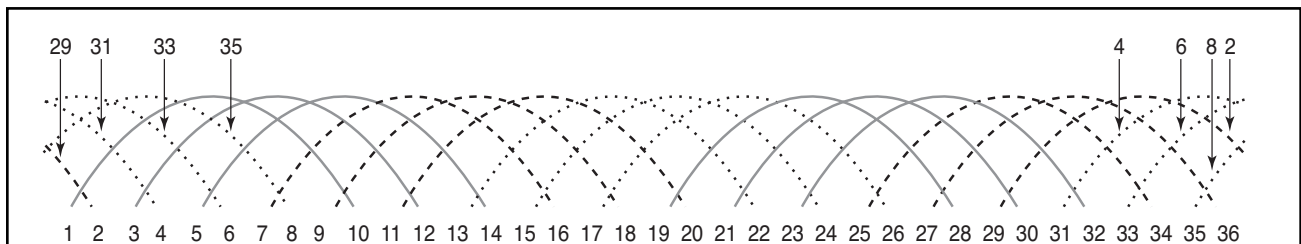


Figura 3. Las bobinas están instaladas en ranuras salteadas.

Apéndice 2: Análisis de las Configuraciones de los Bobinados

Los siguientes gráficos de fuerza magneto motriz (FMM) pertenecen a las configuraciones típicas de los bobinados usados en la actualidad. Las variaciones y las desviaciones de las formas de onda sinusoidales están influenciadas por las configuraciones reales de los bobinados y el contenido de armónicos. El bobinado imbricado tiene la mejor forma de onda y el menor contenido de pérdidas adicionales con carga.

Para poder lograr la misma cantidad de espiras efectivas que los bobinados imbricados, los bobinados concéntricos normalmente requieren una longitud media de espira mayor (MLT). Por consiguiente, tendrán pérdidas I^2R más altas. Debido a que los bobinados concéntricos normalmente se insertan con máquinas, estos tienen menor cantidad de cobre dentro de la ranura, lo que también aumenta las pérdidas I^2R para el mismo número de espiras efectivas. En muchos casos, para la misma combinación de ranuras, los bobinados imbricados serán más silenciosos. La configuración ideal deberá tener:

- Mínimo contenido de armónicos
- Ranuras compartidas
- Todas las bobinas simétricas
- Largo de las cabezas de bobina moderado
- Un paso que minimice los armónicos 5th y 7th
- Geometría de la bobina controlada de forma precisa para minimizar alambres sueltos y los cruces de alto voltaje
- Aislamientos de fase mejor posicionados.
- Reducir las probabilidades de tener bobinas enterradas.

Estas figuras muestran las formas de onda de la FMM de un bobinado de 36 ranuras, 4 polos. Los 3 dibujos representan respectivamente un bobinado concéntrico de doble capa, un bobinado concéntrico con tres capas y a un bobinado imbricado de dos capas, paso 1-8 (factor de cuerda 0.940).

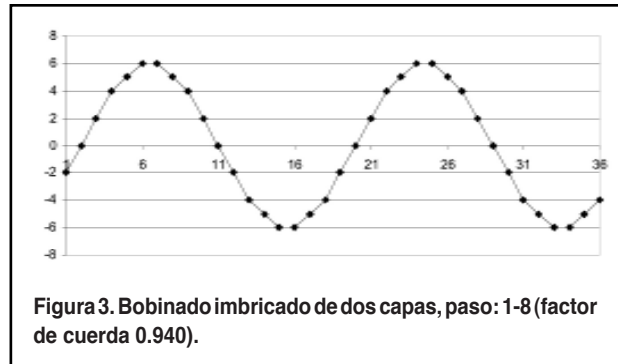


Figura 3. Bobinado imbricado de dos capas, paso: 1-8 (factor de cuerda 0.940).

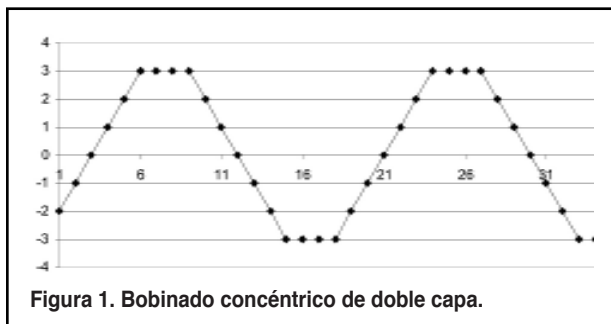


Figura 1. Bobinado concéntrico de doble capa.

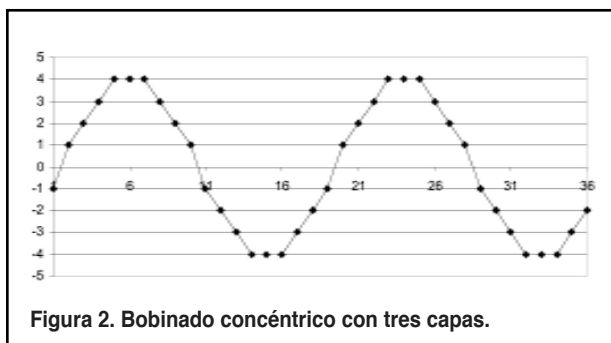


Figura 2. Bobinado concéntrico con tres capas.

Apéndice 3: Cambiando a Bobinados Imbricados–Ejemplos

Cambios Comunes en la Configuración del Bobinado: Concéntrico a Imbricado

Usado en: Motores de 4 polos ó más.

Utilice un bobinado imbricado de doble capa (dos bobinas por ranura), paso acortado. Este tipo de bobinado produce mejores resultados que un imbricado de una sola capa.

Recomendación: Utilice el paso óptimo para un bobinado imbricado de doble capa. (83% = factor de cuerda de 0.966).

Para optimizar la eficiencia de un bobinado imbricado:

- Use un bobinado imbricado de doble capa. Calcule el factor de cuerda y las espiras por bobina para mantener el flujo constante.
- No cambie las espiras por bobina sin haber realizado el cambio correspondiente del factor de cuerda.
- Utilice espiras con la misma longitud media (MLT) (preferiblemente menor).
- Utilice la misma sección de los conductores (preferiblemente mayor).
- Conserve la misma resistencia del bobinado (preferiblemente menor) corregida a la temperatura.

Cálculos para acortar el paso del bobinado imbricado:

- Factor de cuerda = $\text{Sen}[(8 \times 90^\circ)/9] = 0.985$, o $\text{Cos}[(1 \times 90/9] = 0.985$
- Para mantener el flujo constante, las espiras por bobina se incrementan en $1/0.985$ o 1.5%.

Ejemplo 1: Conversión de un bobinado concéntrico de 2 capas a imbricado de doble de capa con paso acortado 1-9 (abarca 8 dientes)

Un motor de 36 ranuras, 4 polos tiene 18 bobinas con 24 espiras por bobina; el paso para cada grupo es 1-8, 10, 12 (ver Figura 1).

De la Tabla 1, Apéndice 1, el factor de cuerda para cada bobina por separado es:

Paso	K_p
1-8	.940
1-10	1.0
1-12	.940

Para calcular las espiras efectivas utilice:

$(T/C_1 \times K_{p1}) + (T/C_2 \times K_{p2}) + (T/C_3 \times K_{p3}) \dots$ para un grupo completo de bobinas.

Una conversión adecuada a un bobinado imbricado puede calcularse como sigue:

Para 24 espiras por bobina. Paso:1-8, 10, 12 con factores de cuerda de 0.940, 1.0 y 0.940 respectivamente tenemos.

$$24 (.940) + 24 (1.0) + 24 (.940) = 69.12 \text{ espiras efectivas}$$

Si para la conversión a bobinado imbricado seleccionamos un paso de 1-9 (ver la Figura 2):

$$69.12/3 = 23.04 \text{ espiras efectivas por bobina}$$

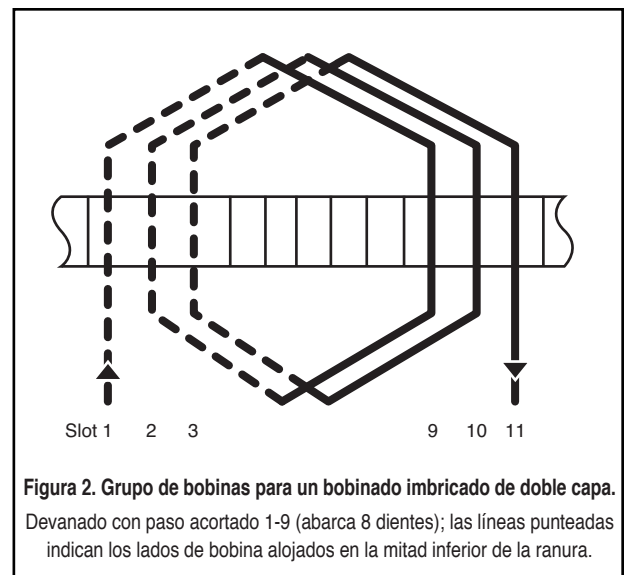
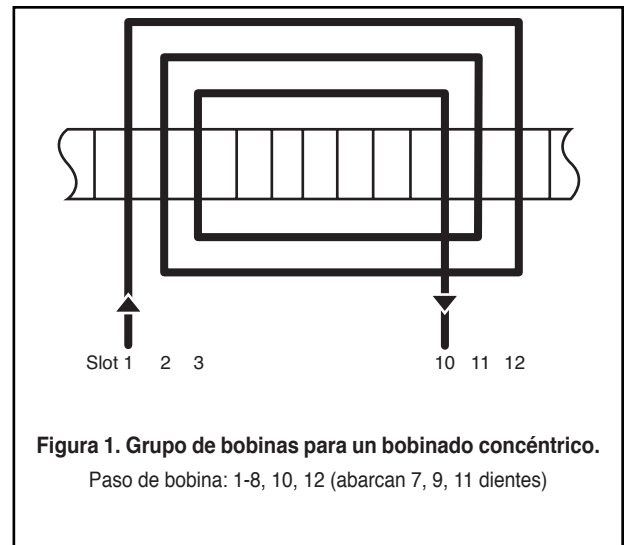
Las espiras reales se calculan dividiendo las espiras efectivas por bobina entre ($k_p \times k_d$):

$$23.04/ (.985 \times .960) = 24.37 \text{ espiras por ranura}$$

Redondeando a 24 espiras se obtiene un aumento de flujo de un 1%.

(Nota: Cuando un bobinado concéntrico tiene un solo lado de bobina por ranura y el devanado de imbricado de reemplazo tiene 2 lados de bobina por ranura, divida las espiras por ranura entre dos para obtener las espiras por bobina.)

Dependiendo del paso seleccionado para el bobinado imbricado, las espiras por ranura del bobinado imbricado pueden ser menores, iguales o mayores que las espiras por ranura utilizadas en el diseño original del bobinado concéntrico.



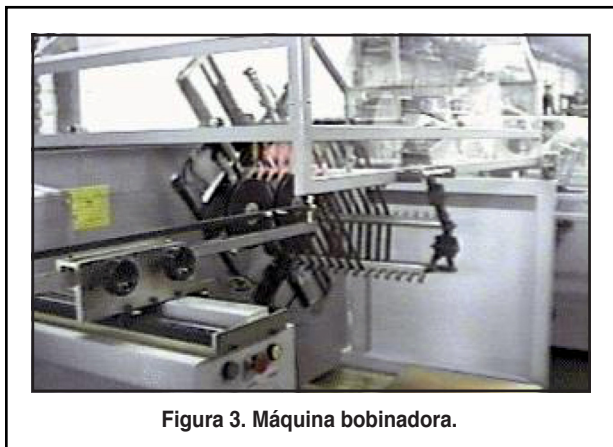


Figura 3. Máquina bobinadora.

Ejemplo 2: Conversión de un bobinado concéntrico de doble capa a un bobinado imbricado de doble capa convencional

Utilizada en: Grandes motores de 2 polos o más, cuando el reparador no quiere copiar el bobinado concéntrico original.

Ventajas

- En un grupo de bobinas básico, la longitud media de la espira (MLT) puede ser la misma que la del devanado original (posibilidad de ser más corta).
- La eficiencia puede conservarse o mejorarse.
- Todas las bobinas son iguales.

Precaución

- Se debe tener cuidado al calcular el paso del nuevo bobinado

Ejemplo: Cambio de un bobinado concéntrico de 4 polos, 72 ranuras, 12 grupos, 6 bobinas por grupo y 15 espiras por bobina a un bobinado imbricado de doble capa, 72 ranuras con paso óptimo.

Los pasos típicos para un bobinado concéntrico son (Figura 4) :

1-11 (abarca 10 dientes)	1-17 (abarca 16 dientes)
1-13 (abarca 12 dientes)	1-19 (abarca 18 dientes)
1-15 (abarca 14 dientes)	1-21 (abarca 20 dientes)

El paso promedio es 1-16 (abarca 15 dientes)

El paso polar es 72/4 1-19 (abarca 18 dientes)

Si se utiliza un bobinado imbricado de doble capa paso 1-16 (abarca 15 dientes) con las misma espiras y el mismo calibre de alambres, la eficiencia se conserva.

$$83.13/6 = 13.86 \text{ Espiras efectivas por bobina}$$

$$\frac{13.86}{.966 \times .956} = 15.01 \quad (\text{Use 15 espiras por bobina; paso 1-16 (Vea la Figura 5).})$$

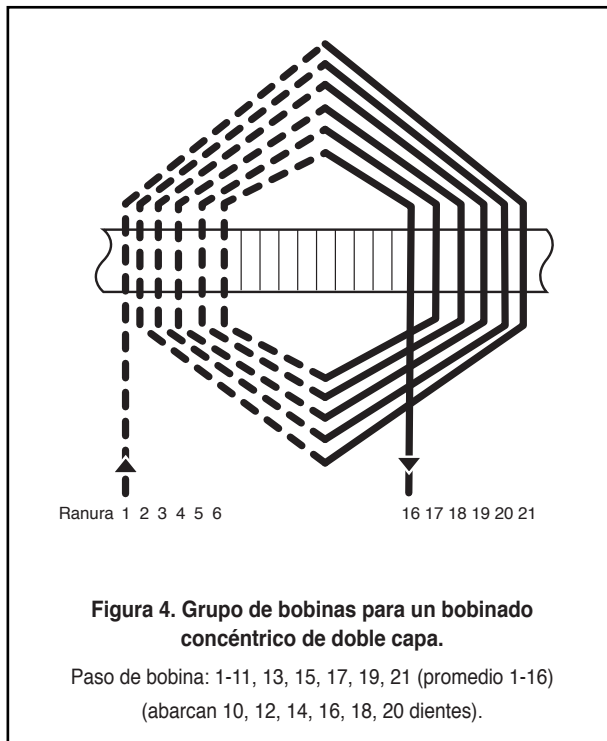


Figura 4. Grupo de bobinas para un bobinado concéntrico de doble capa.

Paso de bobina: 1-11, 13, 15, 17, 19, 21 (promedio 1-16) (abarcan 10, 12, 14, 16, 18, 20 dientes).

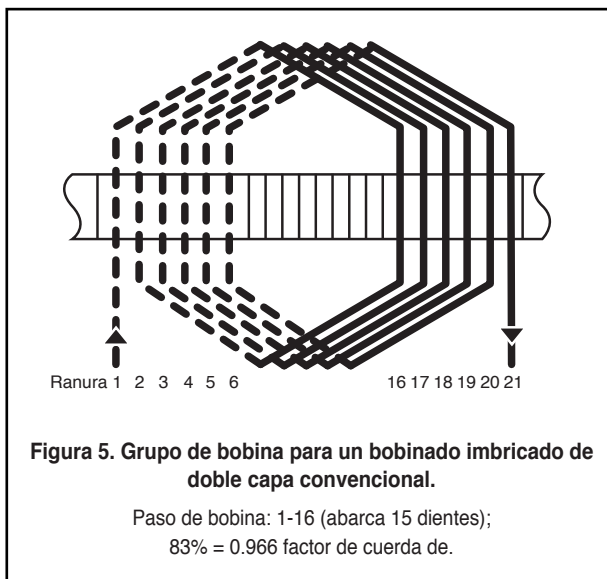


Figura 5. Grupo de bobina para un bobinado imbricado de doble capa convencional.

Paso de bobina: 1-16 (abarca 15 dientes);
83% = 0.966 factor de cuerda de.

Cálculo de las espiras efectivas por polo	Paso	K_p	Espiras efectivas por bobina
15 espiras por bobina	1-11 (abarca 10 dientes)	.766	11.49
	1-13 (abarca 12 dientes)	.866	12.99
	1-15 (abarca 14 dientes)	.940	14.1
	1-17 (abarca 18 dientes)	.985	14.775
	1-19 (abarca 12 dientes)	1.0	15
	1-21 (abarca 20 dientes)	.985	14.775
Espiras efectivas por polo =			83.13

Apéndice 4: Aceros Eléctricos

1 Normativas Mundiales

La mayoría de los aceros eléctricos se designan de acuerdo con su máxima pérdida total específica garantizada a una magnetización pico de 1.5 ó 1.7 Teslas (97 ó 110 kl/pulg²) y a una frecuencia determinada (60 Hz en USA y 50 Hz para la mayoría de los otros países). Los principales organismos mundiales de normalización son:

ASTM	- American Society for Testing and Materials
AISI	- American Iron & Steel Institute
BS	- British Standards
DIN	- Deutsches Institut für Normung (Germany)
EN	- European Standards
GOST R	- National Standard of the Russian Federation
IEC	- International Electrotechnical Commission
JIS	- Japanese Industrial Standards

En Europa, las normas de cada país (ej. BS, DIN, etc.) están siendo reemplazadas por Normas Europeas (ENs). La estrecha colaboración entre los organismos de normalización europeos (CEN y CENELEC) y el organismo de normalización internacional (IEC) están dando como resultado una convergencia cada vez mayor entre las normas EN e IEC. No obstante, las normas Americanas se mantienen diferentes, principalmente en términos de dimensiones, unidades y como nivel de referencia. Sin embargo, los principios físicos y electromagnéticos fundamentales que gobiernan el desempeño de los aceros eléctricos son los mismos a ambos lados del Atlántico. En esta sección se describen estos principios, resaltando lo relacionado con la industria de reparación de motores y también se comparan las prácticas europeas y americanas.

2 Categorías Generales de los Aceros Eléctricos

En la práctica, los aceros eléctricos están divididos en dos clases principales que tienen varias subdivisiones. Estas han sido establecidas de común acuerdo en la industria y son tan universalmente utilizadas que se hace necesaria su correcta comprensión. Estas clases se basan en la propiedad magnética primaria del material, la forma, la diferencia con los otros grados, o el método con el cual se produce el material. Las dos clases principales son:

- Grano orientado
- Grado no orientado

2.1 Aceros de grano orientado

Este término describe los aceros eléctricos que tienen propiedades magnéticas que están fuertemente orientadas con respecto a la dirección del laminado. Mediante un proceso de laminado y recocido se pueden producir aleaciones de composición adecuada con estructura metálica cristalina en la cual los granos se alinean de tal forma que las propiedades magnéticas son muy superiores en la dirección del laminado. No obstante, esto da como resultado propiedades inferiores en otras direcciones. Estos aceros son usados principalmente en núcleos de transformadores y en grandes máquinas sincrónicas de baja velocidad que tienen núcleos fabricados con muchas secciones de acero. Los aceros de grano orientado se encuentran fuera del alcance del estudio de rebobinado realizado por EASA/AEMT.

2.2 Aceros de grado no orientado

Este tipo de aceros eléctricos tienen prácticamente las mismas propiedades magnéticas en cualquier dirección de magnetización a lo largo del material. El término “no orientado” diferencia este material de aquellos producidos mediante procesos que crean una orientación definida o una direccionalidad de las propiedades magnéticas. Estos son los aceros con los cuales se fabrica la gran mayoría de motores y generadores eléctricos industriales. De acuerdo con su proceso de fabricación, los aceros de Grano no orientado pueden ser sub divididos en dos grupos:

- Completamente procesados
- Semi-procesados

2.2.1 Aceros completamente procesados

Estos son aceros eléctricos en los cuales las propiedades magnéticas están totalmente desarrolladas por el fabricante del acero. El nombre se deriva del hecho de que el material está procesado totalmente, listo para usar y que no necesita ningún procedimiento adicional para lograr la calidad magnética deseada. El usuario puede utilizar un tratamiento de calor para eliminar las tensiones producidas al fabricar los núcleos con este material. No obstante se debe tener cuidado ya que algunos barnices orgánicos usados para aislar las laminaciones (coreplates) tiene una capacidad muy limitada para soportar temperaturas (vea la sección 4.6.1).

2.2.2 Aceros Semi-procesados

Estos aceros eléctricos se fabrican con su espesor final y forma física (láminas o bobinas) pero no se encuentran totalmente recocidos para desarrollar su calidad magnética final. Con estos aceros, el usuario (ej. el fabricante del motor) es responsable de lograr las propiedades magnéticas realizando un tratamiento de recocido. El proceso de recocido final se realiza después de que las laminaciones han sido perforadas. La temperatura y el tiempo requeridos dependen del tipo de acero que se use.

3 Características de los Aceros Eléctricos

Tres características principales de los aceros eléctricos son importantes para su uso en las máquinas eléctricas:

- **Pérdidas del acero**—vatios/lb (vatios/kg) a una densidad de flujo pico “B”. Las tablas 1, 2 y 3 muestran los valores máximos de estas pérdidas para las normas Americanas (ASTM) e Internacionales (IEC). Observe que las pérdidas promedio para cualquier grado de acero en particular son normalmente menores (10-25%) que las máximas indicadas por la norma.
- **Permeabilidad**—determina la densidad de flujo que pueden manejar las laminaciones sin saturarse y la relaciona con la fuerza de magnetización requerida para producir la densidad de flujo.
- **Conductividad térmica**—Influye en la forma en que el acero disipa las pérdidas térmicas generadas dentro de él.

En los siguientes apartados se discuten cada una de estas características con más detalle.

TABLA 1. PÉRDIDAS MÁXIMAS EN EL NÚCLEO PARA ACEROS ELÉCTRICOS DE GRANO NO ORIENTADO CON ALEACIÓN DE SILICIO COMPLETAMENTE PROCESADOS

Norma			Espesor (calibre)		Pérdida máxima @ 1.5 Teslas (15 kG)	
ASTM A677 1996	Antiguo grado AISI	IEC 60404-8-4 1986*	pulgadas	mm	Vatio/lb 60 Hz	Vatio/kG 50 Hz
		270-50A5	0.0197	0.50	1.66	2.90
47F168	M-15		0.0185	0.47	1.68	2.93
47F174	M-19		0.0185	0.47	1.74	3.03
		310-50A5	0.0197	0.50	1.78	3.10
47F185	M-22		0.0185	0.47	1.85	3.22
		330-50A5	0.0197	0.50	1.90	3.30
47F190	M-27		0.0185	0.47	1.90	3.31
		350-50A5	0.0197	0.50	2.01	3.50
47F205	M-36		0.0185	0.47	2.05	3.57
		400-50A5	0.0197	0.50	2.30	4.00
47F230	M-43		0.0185	0.47	2.30	4.01
		530-50A5	0.0197	0.50	3.04	5.30
47F305	M-45		0.0185	0.47	3.05	5.31
47F400	M-47		0.0185	0.47	4.00	6.98
		700-50A5	0.0197	0.50	4.02	7.00
		400-65A5	0.0256	0.65	2.25	3.92
64F270	M-43		0.0250	0.64	2.70	4.70
		530-65A5	0.0256	0.65	3.05	5.30
64F320	M-45		0.0250	0.64	3.20	5.57
		600-65A5	0.0256	0.65	3.45	6.00
64F360	M-45		0.0250	0.64	3.60	6.27
64F400			0.0250	0.64	4.00	6.96
		700-65A5	0.0256	0.65	4.02	7.00

TABLA 2. PÉRDIDAS MÁXIMAS EN EL NÚCLEO PARA ACEROS ELÉCTRICOS DE GRANO NO ORIENTADO CON ALEACIÓN DE SILICIO SEMI- PROCESADOS

Norma			Espesor (calibre)		Pérdida máxima @ 1.5 Teslas (15 kG)	
ASTM A683	Antiguo grado AISI	IEC 60401-8-2	pulgadas	mm	Vatio/lb 60Hz	Vatio/kG 50Hz
47S178	M-27		0.0185	0.47	1.78	3.10
47S188	M-36		0.0185	0.47	1.88	3.27
		340-50-E5	0.0197	0.50	1.95	3.39
47S200	M-43		0.0185	0.47	2.00	3.48
		390-50-E5	0.0197	0.50	2.24	3.90
47S250	M-45		0.0185	0.47	2.50	4.35
		560-50-E5	0.0197	0.50	3.17	5.52
47S350			0.0185	0.47	3.50	6.10
64S230	M-43		0.0250	0.64	2.30	4.01
		390-65-E5	0.0256	0.65	2.30	4.01
		450-65-E5	0.0256	0.65	2.67	4.60
64S280	M-45		0.0250	0.64	2.80	4.88
		520-65-E5	0.0256	0.65	3.03	5.28
		630-65-E5	0.0256	0.65	3.61	6.29
64S420			0.0256	0.64	4.20	7.31

TABLA 3. PÉRDIDAS MÁXIMAS EN EL NÚCLEO PARA ACEROS ELÉCTRICOS DE GRANO NO ORIENTADO, SEMI-PROCESADOS Y SIN ALEACIONES

Norma			Espesor (calibre)		Pérdida máxima @ 1.5 Teslas (15 kG)	
ASTM	Antiguo grado AISI	IEC 60404-8-2	pulgadas	mm	Vatio/lb 60 Hz	Vatio/kG 50 Hz
		420-50-D5*	0.0197	0.50	2.41	4.19
		660-50-D5	0.0197	0.50	3.78	6.58
		890-50-D5	0.0197	0.50	5.10	8.88
		570-65-D5*	0.0256	0.65	3.27	5.69
		800-65-D5	0.0256	0.65	4.59	7.98
		1000-65-D5	0.0256	0.65	5.74	9.98

*Estas designaciones se refieren a los aceros "Polycor" fabricados en Europa por Cogent Power. No existen grados normalizados en las normas IEC, EN o BS para usar como referencia.

3.1 Pérdidas del acero

Las componentes principales de las pérdidas de los aceros utilizados en las máquinas eléctricas son:

- Pérdidas por histéresis
- Pérdidas por corrientes parásitas
- Pérdidas inter-laminares
- Perdidas rotacionales
- Pérdidas en la superficie del entre hierro(normalmente consideradas parte de las pérdidas adicionales con carga))

Las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas, son propiedades inherentes al material y las demás pérdidas se relacionan con la forma en que se utiliza el núcleo en la máquina eléctrica. Todas estas pérdidas aumentan con la frecuencia de red, pero todas, exceptuando las perdidas en la superficie del entrehierro, son independientes de la carga de la máquina..

3.1.1 Pérdidas por Histéresis

El flujo producido en los materiales del núcleo magnético difiere dependiendo si la fuerza magnética que produce el cambio del flujo aumenta o disminuye. La diferencia es causada por el fenómeno conocido como histéresis. El consumo de energía asociado con esta diferencia se conoce como pérdidas por histéresis. Estas pérdidas se manifiestan en forma de calor interno en los materiales del núcleo. Las pérdidas por histéresis aumentan rápidamente con el aumento de la densidad de flujo y con la frecuencia en que alterna la magnetización. (ej. frecuencia de red).

3.1.2 Pérdidas por corrientes parásitas

Las corrientes eléctricas que fluyen en los conductores circundantes a un núcleo magnético inducen un flujo magnético en los materiales del núcleo. Si el flujo magnético inducido cambia, a su vez induce voltajes en cualquier trayectoria que rodee o enlace las líneas de flujo. Algunas de esas trayectorias conductoras están dentro la estructura del núcleo. Los voltajes a largo de esas trayectorias o caminos producen circulación de corrientes dentro del material del núcleo. Estas corrientes se conocen como corrientes parásitas o corrientes de eddy.

La magnitud de las corrientes parásitas depende de la frecuencia de la red, la densidad del flujo magnético, de la resistencia específica y el espesor del material del núcleo.

Si un núcleo magnético ha sido fabricado de una sola pieza de material, las corrientes parásitas no serán restringidas dando

como resultado una pérdida de energía alta. Esta pérdida se manifestaría en calor que va incrementar la temperatura del núcleo considerablemente. Desde los inicios de los diseños de las máquinas eléctricas, estas pérdidas de energía útil en el núcleo han sido reducidas considerablemente fabricando núcleos con muchas capas o laminaciones de acero. Las laminaciones restringen los caminos de las corrientes de Eddy reduciendo de gran forma las pérdidas por corrientes parásitas: entre más delgadas sean las láminas, menores son las pérdidas. Por esta razón, para producir estas láminas se usa acero eléctrico laminado plano, el cual al ser apilado y debidamente ensamblado, se convierte en el núcleo magnético de muchos dispositivos eléctricos.

3.1.3 Perdidas Inter laminares

Adicionalmente a las pérdidas por corrientes parásitas que ocurren entre las laminaciones o chapas, se presenta otra pérdida de energía denominada pérdida inter laminar, que ocurre a no ser que las laminaciones se aislen entre sí. La cantidad de aislamiento necesario para mantener este componente de pérdidas despreciable, varía con el tamaño del núcleo magnético, con la presión mecánica aplicada al núcleo, con la densidad de flujo y la frecuencia. Excesivas rebabas en el borde de las laminaciones aumentarán las pérdidas inter laminares. Los reparadores de máquinas pueden aumentar de una forma muy considerablemente estas pérdidas utilizando prácticas como limar las ranuras del estator. Estas pérdidas también pueden aumentar cuando se aplica demasiada presión axial al reconstruir un núcleo después que ha sido re-aislado.

3.1.4 Pérdidas rotacionales

Estas pérdidas son una forma específica de las pérdidas por corrientes de Eddy causadas al aplicar excesiva presión radial sobre el núcleo del estator y son de una importancia particular en máquinas de inducción con devanados de estator distribuidos. Si la presión radial aplicada al núcleo del estator es excesiva, fluirán por cada lámina corrientes de Eddy circulares en la parte superior de cada diente del estator, las cuales pueden incrementar de forma significativa las pérdidas en el hierro del estator. Por consiguiente cuando se instale una nueva carcasa, los reparadores deben asegurarse que el ajuste de interferencia entre la nueva carcasa y el núcleo no es mayor al que había entre la carcasa antigua y el núcleo.

3.1.5 Pérdidas en la superficie del entre hierro

Estas pérdidas son causadas en los motores de inducción cuando las pérdidas por corrientes parásitas en los dientes del estator y

del rotor se cruzan entre sí a la velocidad de deslizamiento. Estas son corrientes de alta frecuencia, y esta frecuencia depende de la velocidad del deslizamiento y del número de dientes del estator y del rotor. Su magnitud aumenta con la carga del motor y pueden dar como resultado que las aparentes pérdidas en el hierro a plena carga sean consideradas mayores que las pérdidas en el hierro de la máquina medidas en vacío.

3.2 Permeabilidad

Cuando se aplica una fuerza magnética en un espacio de aire se produce un campo magnético. Si el espacio de aire se llena con material ferro magnético y se sigue aplicando la misma fuerza magnética, obtendremos un gran incremento de flujo. El cociente entre el flujo producido en el material ferro magnético y el flujo desarrollado en el mismo espacio de aire da como resultado lo que se denomina permeabilidad del material ferro magnético.

En los materiales ferro magnéticos, la permeabilidad no es constante- esta cambia con la fuerza de magnetización aplicada y con la densidad de flujo. De tal forma que si la fuerza de magnetización se aumenta linealmente, la densidad de flujo en el acero aumenta lentamente al comienzo, luego de una manera más rápida y después progresivamente más lento hasta que el flujo satura el acero. Cuando la fuerza de magnetización es menor y se invierte, el flujo se reduce pero no en la misma trayectoria en la cual aumentó. Debido a esto una simple inversión cíclica de la fuerza de magnetización producirá un gráfico densidad de flujo/fuerza de magnetización que forma un “ciclo” (denominado comúnmente ciclo de histéresis del material). El área dentro del ciclo es proporcional a las pérdidas por histéresis en el acero. La Figura 1 muestra una gama de ciclos de Histéresis para diferentes tipos de aceros e indica cuales de los aceros eléctricos ofrecen un buen compromiso de producir una densidad de flujo alta al aplicar una baja fuerza de magnetización razonable.

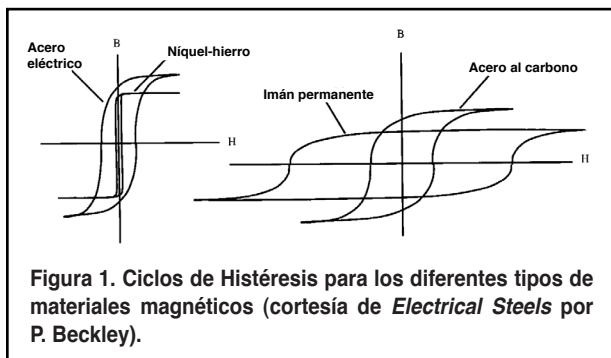


Figura 1. Ciclos de Histéresis para los diferentes tipos de materiales magnéticos (cortesía de *Electrical Steels* por P. Beckley).

3.3 Conductividad térmica

En los aceros eléctricos es importante una buena conductividad térmica debido a que las pérdidas en el acero generan calor el cual debe ser conducido a aquellas partes del núcleo que están en contacto con el medio de refrigeración- generalmente aire. La conductividad térmica no es fácil de medir, pero está estrechamente ligada con la conductividad eléctrica. La proporción entre la conductividad térmica y la conductividad eléctrica es aproximadamente constante (cerca de 3).

$$\frac{\text{Conductividad térmica}}{\text{Conductividad eléctrica}} \cong 3 \text{ (constante)*}$$

*Para unidades consistentes, e.g.:

Conductividad eléctrica = mhos (recíproca ohms)

Conductividad térmica = vatios/mKelvin (v/mK)

Con lo cual al medir la resistividad del acero [1/(conductividad)] se obtiene una buena guía para determinar su conductividad térmica. La resistividad de la masa del acero sigue muy de cerca el porcentaje de silicio presente (ver Figura 3). Observe que los aceros que no tienen silicio o son bajos en él, tienen resistividades menores que aquellos aceros con altos porcentajes de silicio. Traduciendo esto en conductividades térmicas para los aceros eléctricos típicos, obtenemos lo siguiente:

- 1) Paralelo al plano de la lámina.

Acero de grano orientado	27 vatios/mK
1.3% de acero al silicio	45 vatios/mK
Acero sin silicio	66 vatios/mK

2) Perpendicular al plano de la lámina (ej. transversalmente a lo largo del paquete magnético), la conductividad térmica se reduce un 2-3% en relación con la obtenida en la dirección paralela. Vea la Figura 2.

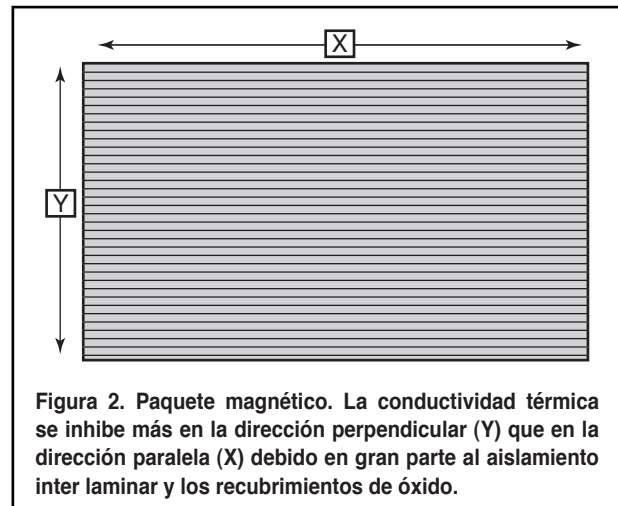


Figura 2. Paquete magnético. La conductividad térmica se inhibe más en la dirección perpendicular (Y) que en la dirección paralela (X) debido en gran parte al aislamiento inter laminar y los recubrimientos de óxido.

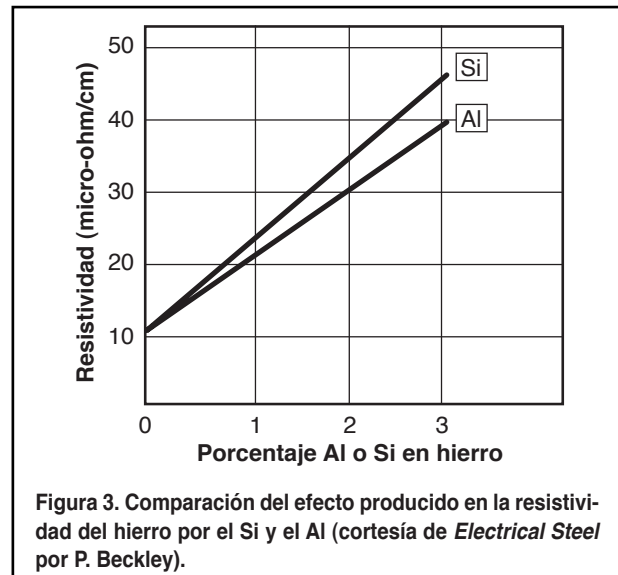


Figura 3. Comparación del efecto producido en la resistividad del hierro por el Si y el Al (cortesía de *Electrical Steel* por P. Beckley).

3.4 El acero “ideal” para una máquina eléctrica

Desde el punto de vista del diseñador, el acero ideal para una máquina eléctrica deberá ser uno que tenga bajas pérdidas, alta permeabilidad y alta conductividad. Desafortunadamente el silicio

que es el elemento de aleación principal utilizado para reducir las pérdidas en los aceros eléctricos, también reduce la permeabilidad y la conductividad, incrementando los costes de fabricación. Los fabricantes de aceros eléctricos se han comprometido, tanto en la composición del acero como con los métodos de fabricación, para producir a precios razonables una gama de aceros con diferentes pérdidas y características de permeabilidad (para diferentes tipos y calidades de máquinas).

En los años recientes se han realizado considerables investigaciones para desarrollar aceros de bajas pérdidas, con bajo contenido de silicio o sin silicio, con muy bajo contenido de carbono o con un contenido muy bajo de sulfuro. Algunos de estos aceros ya se ofrecen y se esperan en el futuro más desarrollos.

4 Composición de los Aceros Eléctricos

Los aceros laminados planos son producidos para cumplir con las especificaciones de las propiedades magnéticas antes que con una composición química específica. Las características magnéticas tienen la mayor importancia y dependen tanto del proceso como de la composición química.

El Silicio es el elemento principal de aleación presente en los aceros eléctricos y se adiciona debido a que aumenta la resistividad del volumen del acero y por consiguiente reduce las componentes de las corrientes parásitas de las pérdidas en el núcleo. El silicio es un beneficio añadido. Este afecta la estructura granular del acero, mejorando de algún modo las pérdidas en el núcleo al reducir las componentes de histéresis en los aceros eléctricos de grano no orientado.

Dependiendo del tipo de producto, otros de los elementos principales de aleación adicionados al acero son el aluminio y el manganeso. Cada uno de ellos se añade debido a su efecto metalúrgico en vez de crear cualquier efecto físico como la resistividad del volumen. Cada uno de ellos también afecta favorablemente la estructura granular del acero y por consiguiente contribuyen a rebajar las componentes de histéresis de las pérdidas del núcleo.

Existen otros elementos presentes, pero son básicamente impurezas que se encuentran solo en cantidades residuales. El carbono es un elemento que cambia en contenido desde la fundición hasta el producto final. Los tratamientos térmicos especiales durante el proceso de laminado reducen el contenido de carbono del producto finalmente procesado, hasta unos valores muy bajos. El carbono es retirado por los clientes durante el recocido de los aceros de grados semi-procesados (ej. fabricantes de motores). En el caso de los aceros de grano orientado, las impurezas como el sulfuro y el nitrógeno se requieren inicialmente para desarrollar la orientación del cristal, pero estos elementos son removidos durante el recocido final.

Debido a que la calidad magnética del acero eléctrico es función del análisis químico y del proceso de laminado, puede existir una superposición de grados. No obstante las pérdidas en el núcleo varían con el contenido de silicio, por lo que si se utiliza un gran contenido de silicio para la producción de un determinado grado de acero las pérdidas en el núcleo mejoran pero se reduce su permeabilidad a valores altos de inducción.

5 Producción de los Aceros Eléctricos

5.1 Métodos de producción y productores principales

La mayoría del acero eléctrico mundial se fabrica en acerías integradas que utilizan materia prima como el hierro, carbón y

piedra caliza que terminan en bobinas de acero eléctrico. Una producción mínima es fabricada en pequeñas acerías que utilizan chatarra en vez de materia prima. Los productores principales integrados incluyen:

USA/Américas

- CAK (antigua Armco) US
- Inland (US)
- LTV (US)
- US Steel (US)
- Acesita (Brazil)

Europa

- Thyssen Krupp Stahl (Alemania/Italia/Francia)
- Cogent Power (UK, Escandinavia)

Cuenca del Pacífico

- Kawasaki (Japón)
- Nippon Steel (Japón)
- Pohang Steel (Corea)

5.2 Procesos de producción que afectan las pérdidas

Muchos de los procesos productivos tienen algún efecto sobre las pérdidas de los aceros, pero aparte de la aleación los más importantes son:

- Recocido
- Recubrimiento del aislamiento superficial
- Espesor de las láminas (calibre)

5.2.1 Recocido

Los fabricantes de aceros eléctricos regulan sus procesos de producción para fabricar aceros que tengan buenas propiedades magnéticas inherentes que puedan satisfacer las especificaciones requeridas por los grados y tipos de los aceros que producen. No obstante, los beneficios óptimos de estas propiedades pueden no verse cumplidos en el dispositivo eléctrico final si el cliente (ej. fabricante del motor) no admite la necesidad de controlar algunos factores que pueden ocasionar daños al acero. Estos incluyen el manejo de las tensiones, distorsiones durante el corte del acero, distorsiones al perforar el acero, bordes con rebabas, descarburación incompleta durante el proceso de recocido de las láminas y oxidación excesiva, para nombrar unos cuantos. Es importante saber que la mejor calidad magnética está asociada con un recocido adecuado del núcleo o en que las láminas estén libres de tensiones y bien descarburizadas, pero no muy oxidados. También es esencial que el núcleo ya ensamblado se encuentre libre de tensiones.

El recocido de los clientes falla generalmente en una o dos grandes clasificaciones: El "Recocido para aliviar las tensiones" que es un tratamiento térmico normalmente usado para restablecer las propiedades magnéticas de los grados completamente procesados y una "Evaluación de la calidad del recocido" que no solo alivia cualquier condición de tensión presente en las laminaciones sino que también descarburiza y estimula el crecimiento del grano.

Los propósitos generales del recocido de las laminaciones y núcleos de las tres grandes clases de aceros eléctricos se muestran en la Tabla 4.

Tanto el alivio de tensión como la evaluación de la calidad del recocido se realizan más frecuentemente a través de procesos continuos. Los hornos de recocido continuos están adaptados para un gran volumen de producción y cuentan con atmósferas de gases controladas para proteger el acero contra daños por

TABLA 4. TIPOS DE RECOCIDO PARA ACEROS ELÉCTRICOS Y SU FINALIDAD

Clase de Acero	Práctica de Recocido	Propósito Principal del Recocido
Grano orientado	Alivio de tensión	Alivio de tensiones desarrolladas durante la manipulación, corte, conformación, o perforación. Los aceros de grano orientado deben ser protegidos cuidadosamente de la condiciones de oxidación o carburación que pueden perjudicar seriamente la calidad magnética.
No-orientado completamente procesados	Alivio de tensión	Alivio de las tensiones provocadas por el laminado y los procesos del cliente. Algunas veces se desea el desarrollo de oxido aislado.
No.-orientado semi-procesado y No-orientado endurecido totalmente	Evaluación de calidad	Desarrollo de la calidad magnética por medio de un apropiado descarburado y crecimiento de grano. Forma una superficie aislante de oxido.

oxidación mientras se cumple con la tarea de desarrollar las características magnéticas deseadas. Los hornos de proceso continuo normalmente consisten de: 1) Una sección para el quemado de los lubricantes utilizados en la perforación. 2) Zonas de alta temperatura para descarburado y crecimiento del grano y 3) Sección de enfriamiento que también podría estar dispuesta para la formación del oxido de aislamiento.

5.2.2 Superficie aislante de los materiales del núcleo

La limitación de las pérdidas por corrientes de Eddy requiere aceros eléctricos con valores adecuados de resistividad, laminaciones lo suficientemente delgadas y un aislamiento efectivo entre laminaciones. Las corrientes de Eddy no solo fluirán entre cada una de las laminaciones sino también a través de sus superficies cuando el núcleo ya está apilado. Las laminaciones de un núcleo magnético no prevendrán por si solas la circulación de corrientes excesivas a través de un núcleo completamente apilado a no ser que las superficies de las láminas se encuentren debidamente aisladas y con pocas rebababas.

La resistencia superficie aislada las laminaciones se considera perfectamente adecuada cuando las pérdidas inter laminares son un pequeño porcentaje de las pérdidas totales del núcleo (generalmente entre un 1 ó 2 %) ¿Cuál es valor de aislamiento adecuado? y ¿cuáles de los diferentes medios disponibles de aislamiento se deben usar? son preguntas muy complejas y sus respuestas no

TABLA 5. DESCRIPCIÓN DE LOS AISLAMIENTOS DE LOS ACEROS ELÉCTRICOS O COREPLATES (CLASIFICACIÓN AISI)

Nombre	Descripción
C-0	Esta identificación simplemente tiene el propósito de describir la oxidación natural de la superficie que ocurre en los aceros eléctricos al silicio laminados que crean una ligera pero efectiva capa de aislamiento suficiente para la mayoría de los núcleos pequeños y que soportará las temperaturas normales de alivio de tensión Estas condición de la superficie oxidada pueden mejorarse si el recocido para el alivio de tensión de los núcleos terminados es realizado en una atmosfera controlada para que haya más o menos oxidación de la superficie.
C-2	Esta identificación describe un aislamiento inorgánico el cual consiste de una película parecida al vidrio que se forma durante el recocido con hidrógeno a alta temperatura del acero al silicio de grano orientado como resultado de la reacción de un recubrimiento aplicado de MgO y los silicatos presentes en la superficie del acero. Este aislamiento está destinado a núcleos refrigerados por aire o sumergidos en aceite. Este aislamiento soporta las temperaturas de alivio de tensión y tiene una resistencia inter laminar suficiente para ser utilizado en núcleos con flejes estrechos como los que se usan en los núcleos de los transformadores de distribución. No está destinado a laminas troqueladas debido a la naturaleza abrasiva del recubrimiento.
C-3	Este consiste en un esmalte o recubrimiento de barniz destinado para núcleos sumergidos en aceite o refrigerados por aire. Su resistencia inter laminar es superior a la del recubrimiento C-1 que se utiliza principalmente como lubricante para troquelados. El recubrimiento C-3 mejorará la capacidad a la "perforación" y resiste las temperaturas normales de operación pero no soportará el recocido para el alivio de tensiones (ver nota*).
C-4	Este aislamiento consiste de un tratamiento químico o una superficie fosfatada destinada a los núcleos inmersos en aceite o refrigerados por aire que requieren niveles de resistencia de aislamiento moderados. Este soportará el recocido para aliviar las tensiones y fomenta la capacidad de "perforación."
C-5	Este es un aislamiento inorgánico similar al C-4 pero con cargas cerámicas adicionales para aumentar la resistencia del aislamiento inter laminar. En los aceros al silicio de grano orientado se aplica generalmente sobre una capa de C-2. Esta principalmente destinado para núcleos sumergidos en aceite o refrigerados por aire que utilizan laminaciones compartidas y trabajan con una alta relación voltio/ vuelta. También puede ser utilizado en todos los aparatos que requieren altos niveles de resistencia inter laminar. Como el C-2, puede soportar el recocido para aliviar las tensiones en una atmósfera neutra o ligeramente reducida.

Nota: En los procesos de fabricación que requieran aplicar calor, como la soldadura y la fundición, puede ser conveniente aplicar una capa de recubrimiento más delgada envés de una normal para dejar la menor cantidad posible de residuos. Este recubrimiento puede aumentar la "capacidad de perforación" y los fabricantes deberán ser consultados para obtener el peso correcto del recubrimiento. Para identificar estos recubrimientos se han adoptado varias sufijos (letras), y los fabricantes deben ser consultados para emplear el sufijo apropiado.

*C-1 ha sido eliminado de esta tabla y generalmente se reemplaza por C-3.

solo dependen de la eficiencia deseada en el equipo, sino también de un número de factores de diseño y fabricación, cada uno de los cuales afecta el valor de pérdidas de potencia inter laminares.

Es posible que los pequeños equipos eléctricos, como los motores de potencias fraccionarias, no requieran superficies aisladas más allá que la proporcionada por la película natural de oxido producida durante el proceso del recocido para aliviar las tensiones en los aceros eléctricos. Pero puede que el aislamiento se necesite por otras razones. ej. en equipos en los cuales la superficie del núcleo pueda estar sometida a ambiente corrosivos, es preferible utilizar un recubrimiento con coreplate para prevenir el deterioro de la resistencia limitada proporcionada por la película de oxido.

Los recubrimientos con coreplate son principalmente usados en algunos casos debido a que mejoran la "capacidad de perforación" del acero. Su uso se puede justificar ya que los costes de perforación se reducen y aumenta la vida de los troqueles.

Un recubrimiento anti-adherente disponible para los aceros eléctricos semi-procesados de grado no orientado reduce la adherencia de las laminaciones. Los mejoramientos derivados de los recubrimientos permiten que las laminaciones sean recocidas a temperaturas más altas que las normales, lo que da como resultado un incremento de producción o una calidad magnética mejorada.

El tipo de recubrimiento usado para las laminaciones es importante para los reparadores debido a que los diferentes recubrimientos tienen diferentes grados de resistencia al tratamiento térmico. ej. el quemado del núcleo antes de rebobinar.

5.2.3 Espesor de las láminas

Las pérdidas por corrientes de eddy se incrementan casi linealmente con el espesor de las láminas (calibre). En algunas ocasiones se dice que para un determinado grado de acero las pérdidas se doblan si el espesor aumenta al doble, pero esto es simplificar demasiado. La Figura 4 muestra el impacto que causa la variación del espesor (calibre) de las laminaciones de acero en las perdidas por corrientes de eddy.

En teoría, para un determinado grado de acero el voltaje inducido aumenta proporcionalmente con el área de la sección transversal—ej. en proporción al espesor de una determinada

forma de lámina. No obstante "los efectos en el borde" causados por el perforado, al igual que otros factores indican que las corrientes de Eddy producidas por los voltajes inducidos en el acero no siguen necesariamente el mismo modelo de la "ley cuadrática". Sin embargo, probablemente en la práctica "la aproximación del doble" resulta suficiente.

Teóricamente, entre más delgada sea la lámina, es mejor. No obstante en la práctica, las láminas más delgadas son más costosas tanto para el fabricante del acero como para el fabricante del motor. Láminas con espesores menores de 0.0197" (0.5 mm) son más difíciles de manejar y más propensas a dañarse durante el laminado y la fabricación del núcleo. Por esta razón muy pocos motores industriales tienen láminas más delgadas que estas, no obstante los materiales más delgados se usan en aplicaciones de alta frecuencia y otras máquinas de propósito especial.

Desde el punto de vista del reparador, las laminaciones más delgadas necesitan más cuidado al remover los bobinados antiguos. Esto es particularmente cierto para los núcleos de estator fabricados sin prensa núcleos.

En USA, los motores generalmente utilizan láminas con espesores típicos entre 0.0185" y 0.025" (0.47 - 0.64 mm), pero esto cambia de un fabricante a otro. En Europa, los dos espesores de laminaciones comúnmente usadas tanto en motores de potencias fraccionarias como de potencias integrales son 0.5 mm y 0.65 mm (0.0197 - 0.0296"). La Tabla 6 ilustra los espesores estándar de las laminaciones para máquinas de inducción.

Un cambio en el espesor de las láminas de acero significa un costo importante para los fabricantes. Las matrices de corte normalmente están optimizadas para un determinado grosor de lámina, por lo que hay que sustituirlas cuando se hace un cambio de espesor. Esto es costoso particularmente por la inversión en herramientas de progresión. El uso de matrices que no estén optimizadas para el espesor del material afecta de manera adversa al tamaño de las rebabas y puede causar que los troqueles se peguen o golpeen durante el perforado. La mayoría de los fabricantes de motores o de laminaciones han estandarizado un solo espesor para cualquier diámetro particular de lámina.

6 Conclusiones

Durante los últimos cien años, los desarrollos de los aceros eléctricos y la capacidad de los diseñadores de motores para opti-

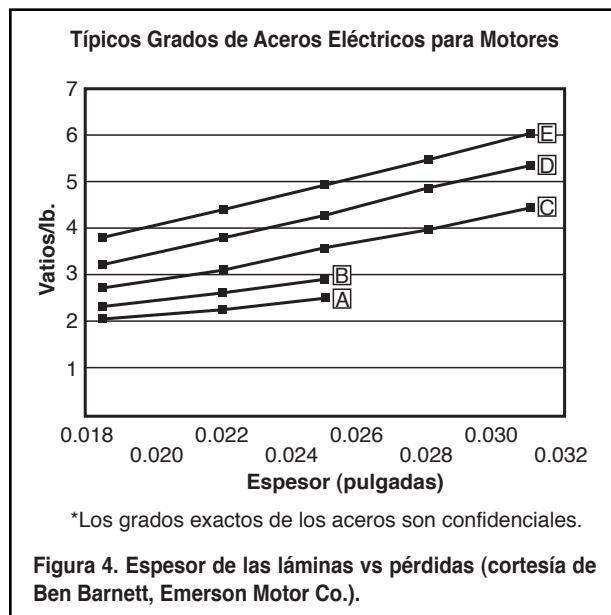


TABLA 6. ESPESORES NORMALIZADOS (CALIBRES) DE LOS ACEROS ELÉCTRICOS

Región	Espesor (calibre)		Nº Normalizado
	pulgadas	mm	
Europa		0.27	
Europa		0.30	
Europa		0.35	
USA	0.0170	0.43	27
USA	0.0185	0.47	26
Europa	0.0197	0.50	
USA	0.0220	0.56	25
USA	0.0250	0.64	24
Europa	0.0256	0.65	
USA	0.0280	0.72	23
USA	0.0310	0.79	22

mizar su uso han dado como resultado un marcado incremento en la relación potencia-peso de las máquinas eléctricas (más de 10 veces). No obstante, las configuraciones básicas de las máquinas no han sufrido cambios fundamentales y el acero laminado aún constituye la base de la mayoría de los núcleos de las máquinas. Es poco probable que pronto suceda algún cambio radical, pero con el tiempo nuevos materiales y nuevas técnicas de diseño, bien pueden alterar la forma de construcción de las futuras generaciones de máquinas eléctricas.

El factor principal continúa siendo el coste mínimo, pero el incremento de las presiones ambientales apunta a utilizar nuevos tipos de materiales con bajas pérdidas. Estos incluyen:

- **Hierros de cobalto.** La inducción de saturación de estos materiales ha aumentado considerablemente y con un 25% de cobalto se puede llegar a alcanzar 158 kI/pulg² (2.45 Tesla). Son muy costosos, no obstante, actualmente solo se usan en aplicaciones donde el factor predominante es el peso mínimo. (ej. máquinas para el sector aeroespacial).
- **Metales Amorfos.** Estos materiales pueden ser fabricados en tiras muy delgadas por enfriamiento rápido. (ej. 1 millón de grados por segundo o más). La solidificación es alcanzada sin que se presente cristalización y en la actualidad hay disponibles tiras de hasta 1.2" (30 cm) de ancho. Estos materiales que tienen pérdidas de solo 1/3 de las de los aceros de grano orientado, están siendo usados en algunos transformadores y se ve muy difícil que puedan ser aplicados de forma satisfactoria en máquinas rotativas.
- **Aleaciones micro cristalinas.** Estas son producidas por las mismas técnicas de solidificación rápida que son utilizadas para la producción de los aceros amorfos. En general se aplican los

mismos comentarios en cuanto a lo que concierne a su utilización en máquinas rotativas.

- **Materiales compuestos.** Al menos dos fabricantes han desarrollado métodos para producir núcleos sólidos agregando y presionando entre sí partículas de hierro (o aleaciones de hierro) que están aisladas unas con otras por una superficie de recubrimiento delgada. Los núcleos compuestos resultantes, limitan en gran parte las corrientes de eddy, estos son particularmente útiles en máquinas que funcionan a frecuencias mayores o iguales de 100 Hz. A pesar que sus densidades pico de flujo son menores que las de los aceros eléctricos, la habilidad del diseñador para pensar en tres dimensiones y diseñar núcleos en los cuales el uso optimizado del acero puede conducir a nuevos conceptos de diseño potencialmente útiles, particularmente para máquinas pequeñas.
- **Superconductividad.** La superconductividad permite la circulación de grandes corrientes por las espiras de solenoides superconductoras. Esta técnica puede ser usada para producir campos magnéticos muy grandes como los requeridos en algunos tipos de escáner médicos. La superconductividad en las máquinas eléctricas se está investigando activamente en unas pocas máquinas especializadas, pero su aplicación a todas se encuentra todavía un poco lejos

Actualmente, todas estas opciones son más costosas que las laminaciones de acero convencionales. (algunas mucho más que otras). Además, genera un coste, tanto para los productores de acero y como para los fabricantes de motores al realizar un cambio radical en el diseño.

Apéndice 5: Consideraciones para Reparar o Reemplazar

INTRODUCCIÓN

Cando los motores de propósito general fallan, existen casos en los que la mejor opción es reemplazarlos por motores más eficientes (alta eficiencia). No obstante, en ciertos casos el motor volverá a fallar de nuevo a no ser que la causa raíz de fallo 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. Estos es especialmente cierto, si para solucionar la causa de fallo se requiere realizar una mejora, o en algunos casos en los cuales el coste, 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 fallo”. Dependiendo del tamaño del motor y el alcance de los daños presentados, el viejo motor 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 fallo.

Todo esto puede requerir la modificación del motor, de los equipos impulsados o del sistema, para prolongar significativamente el tiempo medio entre fallos (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 2100 miembros a nivel mundial para asegurar que los procesos de reparación no degraden las características de funcionamiento de los motores. Tanto este estudio como otro más reciente [Estudio Avanzado de Energía] 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 cuando la reparación no es práctica y cuando 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 1 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 si sea posible, esto se considera como una posible mejora de producto.

Modelo de decisión para reparar o reemplazar

En el pasado, la decisión de reparar o reemplazar un motor hubiera sido económica. Reemplazar un viejo motor eléctrico 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 Figuras 1 y 2).

TABLA 1. MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA EN UNA GENERACIÓN DE MOTORES CON CARCASA T

	Hp	Tipo de bobinado	Factor de espacio (%) *	Eficiencia nominal (%)	Eficiencia a 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	Imbricado	60.0	92.4	92.6
Referencia EPACT	50			93.0	

Típico motor de 4 polos, ODP, propósito general, carcasa T con un diseño anterior de eficiencia.

*Porcentaje de factor de espacio = $\frac{\text{Número total de alambres por ranura} \times \frac{3.14D^2}{4} \text{ del alambre}}{\text{Área total de la ranura-área de aislamiento}} \times 100$

D= diámetro del alambre

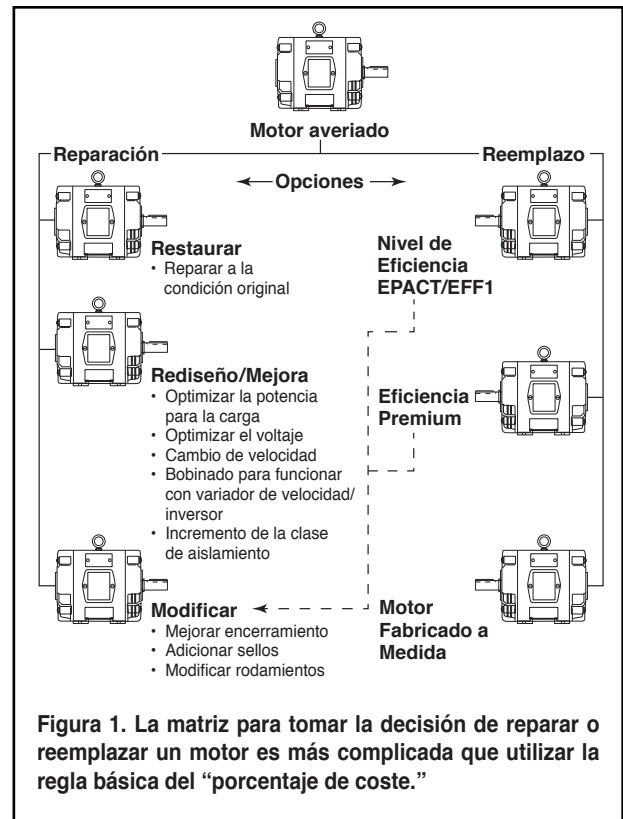
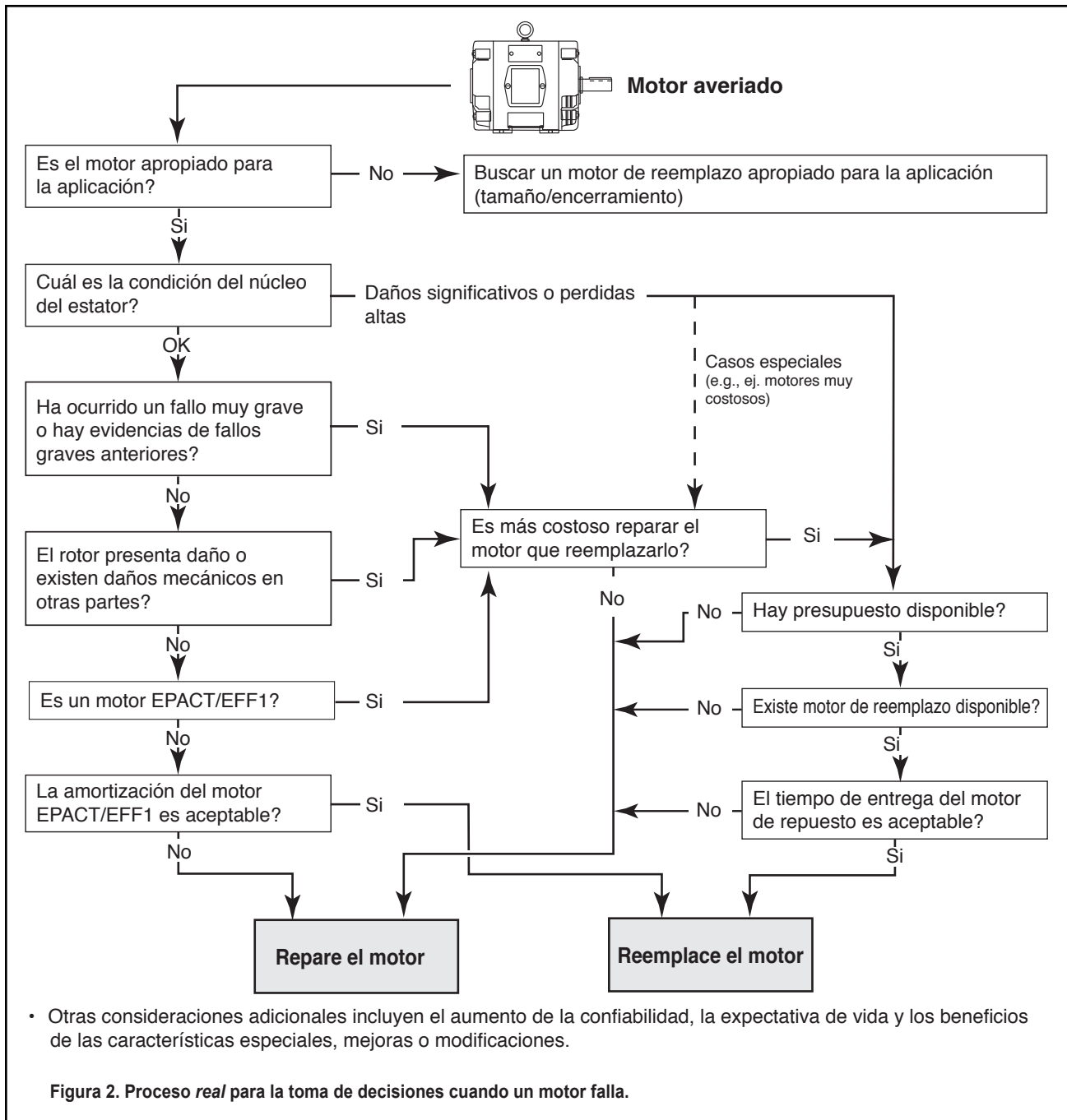


Figura 1. La matriz para tomar la decisión de reparar o reemplazar un motor es más complicada que utilizar la regla básica del “porcentaje de coste.”



Un motor que funciona poco, con características especiales de montaje o de diseño o con niveles de eficiencia EPACK/EFF1 o superiores, todos son ejemplos de cuando puede ser mejor tomar la opción de reparar.

Cuando se compara el coste de reemplazar o reparar un motor eléctrico, la ecuación no solo debe incluir los costes 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 costes 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 una parada de producción no programada causada por el fallo inesperado de un motor.

Mucha de la literatura actual enfatiza que la eficiencia y los costes de energía son factores independientes dentro de la matriz de decisión para reparar o reemplazar. Frecuentemente, el coste del motor o de su reparación es una pequeña parte de los costes totales generados por los tiempos muertos cuando se tienen en cuenta las pérdidas por producción.

Otras consideraciones 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

CONDICIONES INUSUALES DE SERVICIO, NEMA MG 1-1998

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 CA de suministro excede al 10 por ciento
 3. La tensión CA de suministro se encuentra desbalanceada por más del 1 por ciento

4. La salida rectificadora que alimenta un motor de corriente continua se encuentra desbalanceada de tal forma, que la diferencia entre las amplitudes pico mayores y menores de los pulsos de corriente en un ciclo, excede el 10 por ciento de la amplitud pico más alta a corriente nominal.
5. Se requieren bajos niveles de ruido
6. 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 barras
 6. Cortos circuitos 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 el 50 por ciento de los amperios nominales a plena carga, durante un periodo de 24 horas o funcionamiento continuo, durante más de 4 horas, con una corriente de armadura menor que el 50 por ciento de la corriente nominal.

Figura 3. Condiciones inusuales de servicio.

tener un repuesto. De estas la más crítica es la confiabilidad. Un motor a medida para una aplicación 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 Figura 3). La mayoría de los lectores 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.



Esto tiene una connotación económica, por lo que se hace necesario identificar el eslabón débil en cualquiera de los procesos y detectar fallos inminentes antes de que estos ocurran. Un motor sometido a salpicaduras de agua y que no tenga la carcasa apropiada, puede ser modificado para protegerlo contra este riesgo. De igual forma, dado que más del 50% de los daños en los motores comienzan por fallos en los rodamientos (ver Figura 4), 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 periodo de 2-3 años. Una de las ventajas de los centros de servicios es su capacidad para hacer

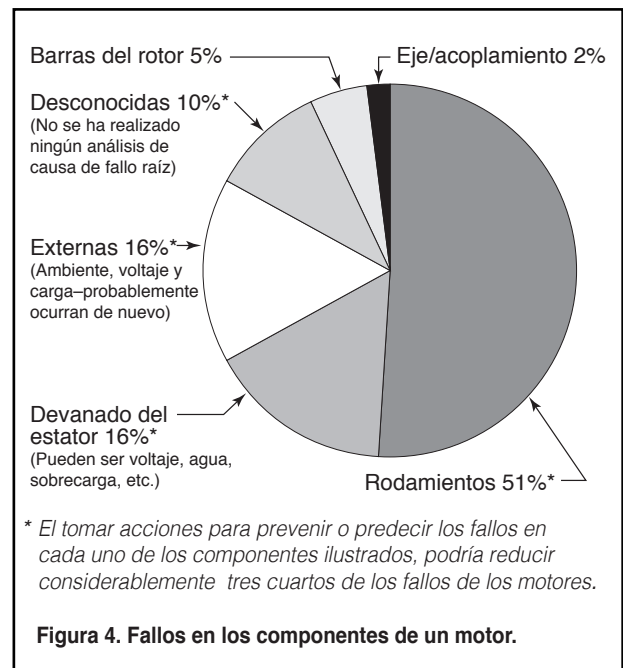


Figura 4. Fallos en los componentes de un motor.

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 y 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.

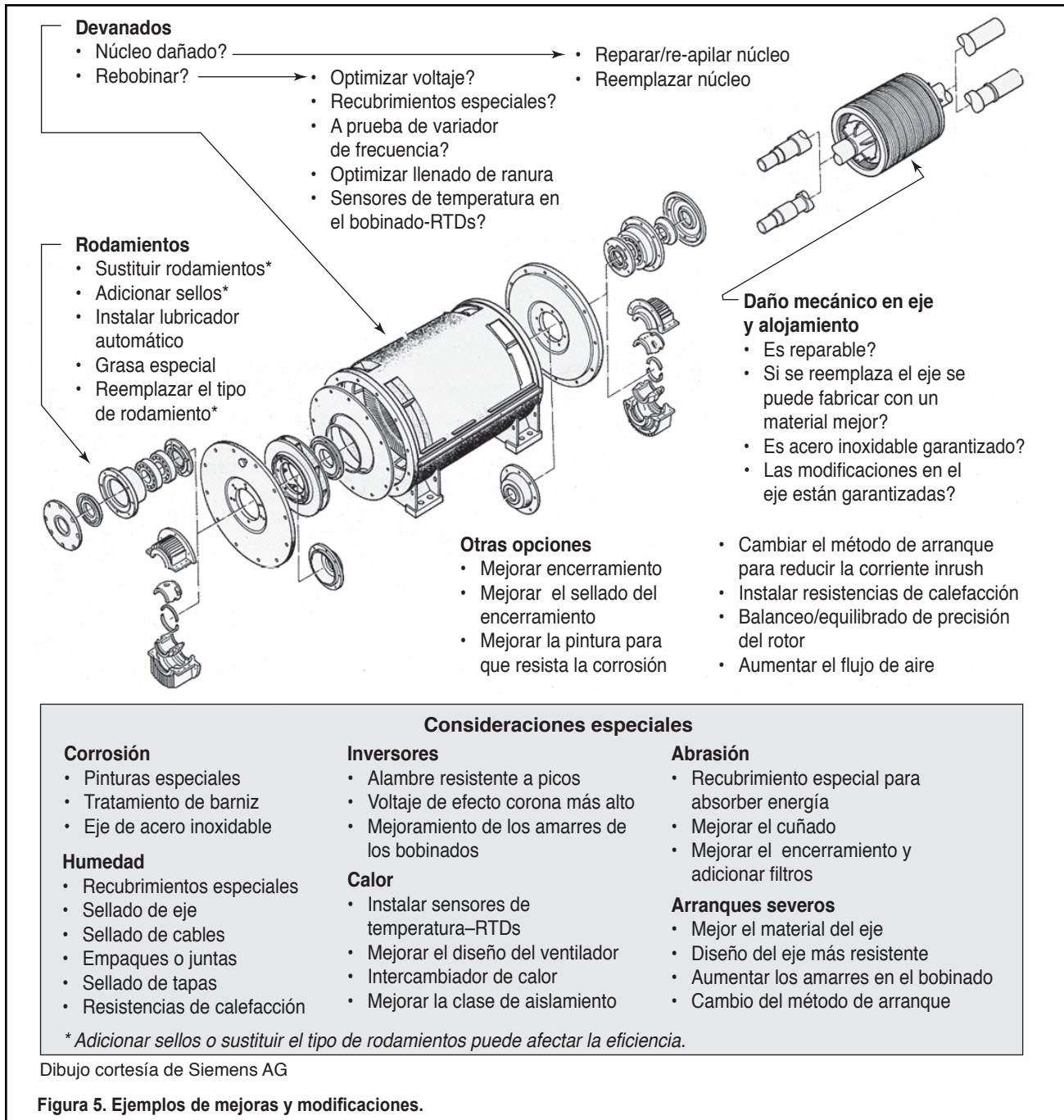
Si el problema está en las temperaturas de los rodamientos o del bobinado, durante el proceso de reparación se pueden instalar accesorios específicos para prolongar la vida del motor y permitir al usuario final hacer seguimiento de esta característica crítica.

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 un fallo. Actualmente se encuentran disponibles, sondas (sensores) que no necesitan contacto con el eje, acelerómetros para monitoreo continuo y toma periódica de datos y 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 fallo 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 del fallo y hacer una reparación de calidad del motor.

Ejemplos de mejoras y modificaciones

Una vez sea identificada la causa del fallo, el centro de puede trabajar conjuntamente con el dueño del motor, para identificar las soluciones específicas y prolongar el tiempo medio entre fallos (MTBF), vea la Figura 5. 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. El fallo 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 esta 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 ó 208 Voltios.

Agravando el problema, la fuente de 208 Voltios puede aún suministrar menos tensión. La Tabla 2 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 un fallo 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 ó 6 cables, existe más espacio en la caja de conexiones y menos posibilidades de dañar los cables o que ocurra un error en la conexión durante su instalación.

TABLA 2. EFECTOS EN LA EFICIENCIA Y LA TEMPERATURA DE LOS BOBINADOS		
Voltios	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 2. Los efectos de la variación del voltaje sobre la eficiencia y temperatura de los devanados.

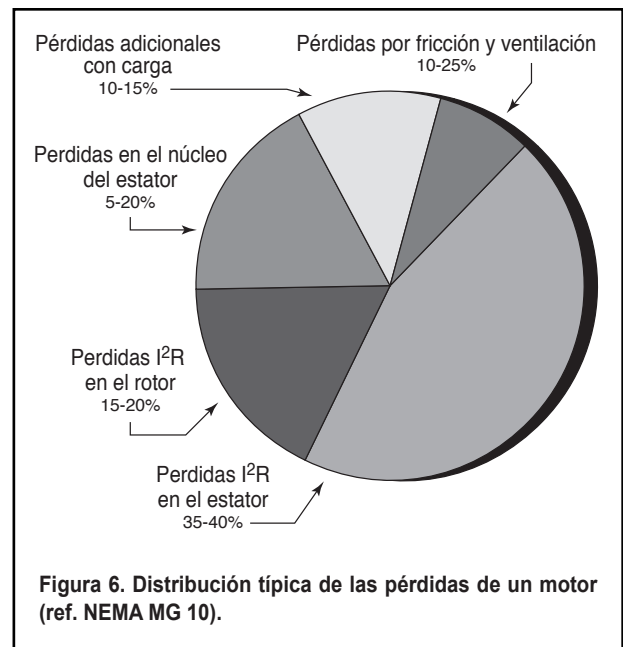
Note: Los motores que funcionan con tres tensiones diferentes son una solución para las posibles tensiones de red disponibles. Esto permite contar con más recursos, pero la eficiencia del motor disminuye al utilizar ciertas tensiones.

En la unión europea, el rango de tensiones disponibles se encuentra entre 380-420 Voltios. 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 y el aumento de la sección de los conductores (alambres).

En muchos diseños, las pérdidas I²R son las mayores com-



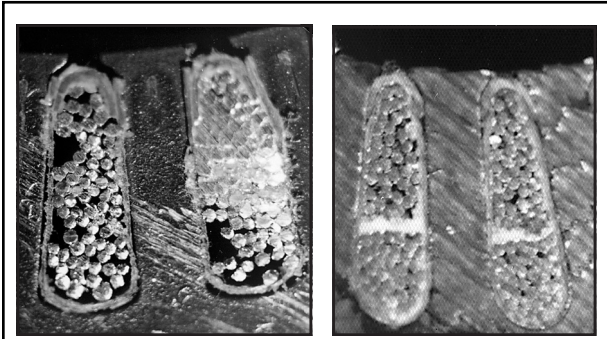


Figura 7. Aumento del llenado de ranura, de uno menor (a la izquierda) a otro mayor a la derecha. El aumento en la sección de los conductores reduce las pérdidas I²R.

ponentes pérdidas totales (ver Figura 6). Algunas veces, estas pérdidas se pueden reducir convirtiendo un bobinado a máquina en otro tradicional hecho a mano. La Figura 7 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%).

Esta modificación mejorará la transmisión de calor, reduciendo la temperatura del devanado y las pérdidas I²R, 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. Basándonos en el coste de la energía y el tiempo de operación del motor, al comparar los ahorros de energía obtenidos tendremos 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 ó 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 8).

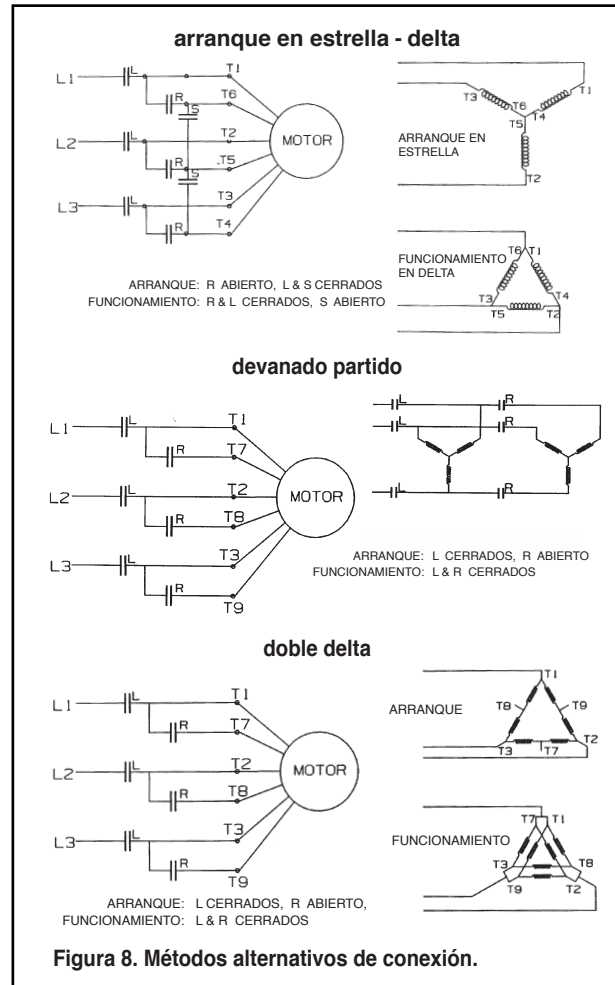


Figura 8. Métodos alternativos de conexión.

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 costes 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 ayudarlo con esa tarea.

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

Electrical Apparatus Service Association, Inc.

1331 Baur Blvd.
St. Louis, Missouri 63132 U.S.A.
314-993-2220 • Fax: 314-993-1269
www.easa.com • easainfo@easa.com

Association of Electrical and Mechanical Trades (AEMT Ltd)

Co. Reg. No. 00397289 (England and Wales)
St. Saviours House
St. Saviours Place
York, YO1 7PJ
England, UK
44 (0) 1904 674897 • Fax: 44 (0) 1904 674896
admin@aemt.co.uk • www.aemt.co.uk