

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**“Evaluación del impacto sobre el parámetro
eficiencia eléctrica en motores eléctricos
rebobinados de bajo voltaje”**

PRESENTADO POR:

MANUEL DE JESÚS QUIJANO HERNÁNDEZ

NELSON ALBERTO RIVAS NIÑO

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE, 2009

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO :

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

**“Evaluación del impacto sobre el parámetro
eficiencia eléctrica en motores eléctricos
rebobinados de bajo voltaje”**

Presentado por :

MANUEL DE JESÚS QUIJANO HERNÁNDEZ

NELSON ALBERTO RIVAS NIÑO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

San Salvador, Noviembre, 2009

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, 23 de Octubre de 2009, en la Sala de Lectura, a las 18:00 horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. José Wilber Calderón Urrutia
Director
2. Ing. Salvador de Jesús German
Secretario

Firma:



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- 1- Ing. Mauricio Quiñónez
- 2- Ing. Luis Roberto Chévez

Firma:


Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

“Evaluación del impacto sobre el parámetro eficiencia eléctrica en motores eléctricos rebobinados de bajo voltaje”

A cargo de los Bachilleres:

QUIJANO HERNÁNDEZ, MANUEL DE JESÚS
RIVAS NIÑO, NELSON ALBERTO

Habiendo obtenido el presente Trabajo una nota final, global de: 8.3

(ocho punto tres)

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco primeramente a Dios Jehová por haberme permitido culminar mi carrera, un logro que además de servirme de superación personal, me incorpora a una sociedad a la que espero ser útil. Agradezco a mi familia por el apoyo económico, fraternal e incondicional que me fortalecieron e inspiraron y a quienes dedico este trabajo en especial a mi madre Elba Esmeralda Hernández, a mi padre Pablo Quijano y mis Hermanos Pablo, Elihú, Isabel, Joquebed Quijano, al Sr. José Heriberto Calderón y Srita. Erlinda Martínez quienes alentaron y vivieron cada triunfo o tropiezo tal cual fuera suyo; a mis maestros de escuela, bachillerato y universidad por enseñarme lo que sé; a mis amigos por compartir y creer en mí y también agradezco a las personas que contribuyeron de una u otra forma al inicio, desarrollo y culminación de este trabajo de tesis que espero no sea el mejor si no que sirva para presentes y nuevas generaciones a enriquecer el conocimiento para dar su aporte en la construcción de un mejor país.

Manuel de Jesús Quijano Hernández.

AGRADECIMIENTOS:

- A Dios todo todopoderoso por haberme permitido culminar la carrera y darme fuerzas para no desistir en los momentos más difíciles.
- A mi madre Olivia Niño (Q.D.D.G) Y mi padre José Teódulo Rivas (Q.D.D.G), a quienes además de agradecerles por la vida les agradezco, por su apoyo y sacrificio, y me siento satisfecho de haber terminado mi carrera “ Les dedico mi logro Profesional”
- A mi hermana Domitila Rivas, por su apoyo incondicional y por darme ánimos de seguir adelante en momentos difíciles.
- A mi familia que siempre conté con su apoyo incondicional en toda circunstancia; motivándome a seguir adelante en los momentos difíciles del proceso de la carrera.
- A Oscar Enrique Rivera Vides, Elba Ludbina Vides, Alexandra María Rivera Rivas y Nelson Enrique Rivera Rivas, quienes me brindaron su apoyo y cariño, para seguir adelante.
- A todos mis amigos y amigas que me animaron siempre a no rendirme y luchar por coronar mi carrera.

Nelson Alberto Rivas Niño.

AGRADECIMIENTOS:

- **Personal de ANDA** (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados), por colaborarnos en el acceso a las estaciones de bombeo y facilitarnos las mediciones.
- **Ing. Tania Torres Rivera**, Colaboración en la Estadística del Trabajo.

INTRODUCCIÓN

Considerando que según estudios aproximadamente el 60% de la energía total generada en el mundo la consumen motores eléctricos y principalmente los motores asíncronos de jaula de ardilla es imperante aplicar medidas de ahorros energéticos que minimicen los costos de operación de los motores y que contribuyan a la preservación ambiental, en ese sentido el presente estudio, de la evaluación del impacto y cuantificación de reducción de eficiencia eléctrica en los motores que son llevados a talleres o centros de rebobinados, resulta ser un aporte al ahorro de la energía eléctrica.

En principio es sabido que las pérdidas eléctricas en la operación de los motores son inevitables, pero también se ha demostrado que estas pérdidas se pueden minimizar y que también pueden aumentar dependiendo de las condiciones de operación y del mismo diseño de fabricación de la máquina. Pero si el motor falla, entonces ocurre el dilema: ¿Es mejor repararlo o comprar uno nuevo? muchas veces la decisión puede ser equivocada o difícil, ya que la respuesta depende de muchos factores económicos y operativos.

El rebobinado o reparación de un motor que ha fallado es la solución que aparentemente es barata en comparación al precio del motor nuevo, pero a cambio la máquina después de la reparación sufre una disminución de eficiencia que puede hacer que los costos de operación de la máquina aumenten considerablemente, es por ello que el presente estudio se enfoca en cuantificar esa disminución de eficiencia por el trabajo de reparación desarrollado por los talleres en nuestro país, ese propósito se logró a través de varias etapas. La primera fue encuestar a los talleres para obtener información de procesos, pruebas, maquinaria o equipos y sobre prácticas estandarizadas o reconocidas de reparación que inciden en la calidad de reparación que se refleja directamente en la eficiencia eléctrica final de la máquina. La segunda etapa complementaria con la primera fue medir usando el método de carga-deslizamiento una muestra de una población de motores rebobinados propiedad de una entidad estatal. El resultado de las dos etapas anteriores se encuentran analizadas en las siguientes páginas, así como algunas consideraciones económicas sobre el costo de la reducción de eficiencia eléctrica y la adquisición de un motor nuevo de mayor eficiencia y por supuesto las recomendaciones a los talleres según la norma IEEE 1068-1996 sobre prácticas adecuadas de reparación de motores eléctricos.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Desarrollar el estudio del impacto de la reparación de los motores eléctricos sobre el parámetro eficiencia.

Objetivo específicos:

- Medir el parámetro rendimiento de la muestra de motores seleccionados, utilizando el método IEEE, carga-deslizamiento.
- Evaluar el procedimiento de las reparaciones de motores eléctricos de diferentes talleres para comparar con las recomendaciones de normas reconocidas.
- Determinar cuantitativamente el impacto de la reparación en el rendimiento de los motores eléctricos.
- Establecer la proyección de ahorros y de pérdidas de energía en este rubro.
- Establecer una recomendación sobre el procedimiento a seguir para los talleres de reparación de motores eléctricos.

GLOSARIO TÉCNICO

- **Motor eléctrico:** Es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas.
- **Desequilibrio de voltaje:**
- **Flecha:** sinónimo de eje del motor
- **Rodamiento:** cojinete, balinero o balero
- **Acoplamientos:** unión de dos piezas
- **Rotor:** parte giratoria de una maquina electromecánica (motor)
- **Devanado:** Sinónimo de embobinado
- **Espiras:** cada una de las vueltas de una bobina.
- **Núcleo:** empaquetamiento de chapas magnéticas.
- **Rebaba:** Materia sobrante cualquiera, que forma un resalte en los bordes de un objeto.
- **Aislamiento eléctrico:** En el que se impide el paso de la corriente eléctrica.
- **Aislamiento térmico:** Que se opone al paso del calor por conducción.
- **Epoxi:** polímero termoestable.
- **Estator:** es una parte fija de una máquina rotativa (motor).
- **Pirólisis:** La Pirólisis es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales excepto metales y vidrios.
- **Conductividad eléctrica:** Capacidad de un medio o espacio físico de conducir la electricidad.
- **Rotacional:** Inducir rotación alrededor de un punto.
- **Entrehierro:** Al espacio de aire existente entre el estator y el rotor se le denomina entrehierro.
- **Potencia nominal:** Es la potencia mecánica de salida, indicada en la placa de datos del motor.
- **Temperatura ambiente:** Es la temperatura del medio que rodea el motor, generalmente aire y que esta en contacto con sus partes externas, enfriándolo.
- **Armazón:** Es un código o clave formado por números y letras que definen las dimensiones mecánicas y la posición de montaje del motor.
- **Carcasa:** Es la envolvente del núcleo del estator que en le caso de los motores cerrados, lo protege del ambiente y hace funciones de intercambiador de calor con el exterior.
- **Clase de aislamiento 130 (Clase B):** Es la que comprende materiales aislantes o combinación de los mismos, que deben ser capaces de soportar la temperatura máxima de 403 K (130°C).

- **Clase de aislamiento 155 (Clase F):** Es la que comprende materiales aislantes o combinación de los mismos, que deben ser capaces de soportar la temperatura de 428 K (155°C).
- **Clase de aislamiento 180 (Clase H):** Es la que comprende materiales aislantes o combinación de los mismos, que deben ser capaces de soportar la temperatura de 453 K (180°C),
- **Corriente de arranque (rotor bloqueado):** Es la corriente que demanda el motor al arrancar, y que corresponde a condiciones de rotor bloqueado o velocidad cero. Aplicando tensión y frecuencia eléctricas nominales.
- **Deslizamiento:** Es la diferencia entre la frecuencia de rotación (velocidad) síncrona y de carga plena de un motor de inducción, expresada en por ciento.
- **Drene:** Ducto que permite la salida de fluidos.
- **Eficiencia:** Es el cociente entre la potencia mecánica disponible en el eje del motor y la potencia que toma de la línea, ambas expresadas en las mismas unidades, generalmente expresada en por ciento.

$$[\text{Potencia de salida} / \text{potencia de entrada}] \times 100.$$

$$[(\text{Potencia de entrada} - \text{pérdidas}) / \text{potencia de entrada}] \times 100.$$

$$[\text{Potencia de salida} / (\text{potencia de salida} + \text{pérdidas})] \times 100.$$
- **Eficiencia nominal:** Es el valor de la eficiencia mostrado en la placa de datos del motor, seleccionado de la columna A de la Tabla 5 por el fabricante. Este valor no debe ser mayor que la eficiencia promedio de una población grande de motores del mismo diseño.
- **Eficiencia Premium:** Es la eficiencia de los motores que igualan o superan los valores de la eficiencia de la Tabla 6, de acuerdo a su enclaustramiento y número de polos.
- **Factor De Potencia:** Es el cociente entre la potencia activa en watts y la potencia aparente en voltamperes, generalmente se expresa en por ciento.
- **Factor de servicio:** Es un factor por el que se multiplica la potencia nominal para conocer la capacidad de sobrecarga que el motor puede soportar sin exceder los límites de elevación de temperatura establecidos, en las tablas 7, 8 y 9, para la operación a carga de factor de servicio para la clase de aislamiento indicada en la placa de datos y construcción del motor.
- **Letra de clave:** Es la letra que designa los kVA por kW o cp de un motor a rotor bloqueado, de acuerdo a la Tabla 1, y debe de estar indicada en la placa de datos.
- **Letra de diseño:** Es la letra que identifica las características de corriente de arranque, par de arranque, par máximo y par mínimo de un motor.
- **Motor eléctrico:** Es una máquina rotatoria que transforma la energía eléctrica en energía mecánica.
- **Motor abierto:** Es un motor que permite el paso del aire exterior alrededor y a través de sus embobinados, para su enfriamiento.

- **Motor de inducción:** Es un motor eléctrico del cual solamente una parte (estator), se conecta a la fuente de energía, la otra (rotor) funciona por inducción electromagnética.
- **Motor tipo jaula de ardilla:** Es un motor de inducción cuyo circuito secundario está formado por barras colocadas en ranuras del núcleo secundario, permanentemente cerradas en circuito corto (corto circuito) por medio de anillos en sus extremos, dando una apariencia de una jaula de ardilla.
- **Motor totalmente cerrado a prueba de agua:** Es un motor construido en tal forma que el agua en forma de lluvia o chorro, aplicado al mismo, no haga contacto con sus partes internas.
- **Motor vertical:** Es aquel cuya posición de instalación debe ser con su eje de rotación perpendicular al plano de montaje.
- **RTD :** Resistance Temperature Detector (Detector de Temperatura por Resistencia)
- **NEMA:** National Electrical Manufacturers Association (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos)
- **MG 1:** Motors and Generators 1 (Motores y Generadores 1).
- **IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Electronicos y Electricistas).
- **NEC:** Código eléctrico nacional.

INDICE

Contenido

ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE EFICIENCIA Y REPARACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS	1
ANÁLISIS DEL BENEFICIO DE LA EFICIENCIA EN MOTORES ELÉCTRICOS.....	1
¿Qué es la eficiencia en un motor?	1
Aplicación de motores de alta eficiencia	3
REPARACIÓN DE MOTORES	4
REVISIÓN Y REPARACIÓN DE LOS NÚCLEOS DE LAMINACIONES.....	8
Generalidades	8
Rebobinado: Examen de las laminaciones.....	8
REEMPLAZANDO LOS MOTORES EN LUGAR DE REBOBINARLOS	9
CUIDADO CON LAS REPARACIONES.....	9
FACTOR POR REBOBINADO.....	10
ESTANDARES Y METODOS DE MEDICION DE EFICIENCIA EN MOTORES	11
METODO DE CARGA-DESLIZAMIENTO	12
DATOS ESTADÍSTICOS SOBRE MOTORES	17
Mercado de motores eléctricos industriales	17
Fabricantes y socios comerciales en motores	19
LISTADO DE TALLERES ENCUESTADOS.....	21
¿Cuál es el proceso de recepción de los motores a reparar?	21
¿Cuáles son las causas más comunes de daño en los motores?	23
¿Qué evaluación preliminar se hace al motor para efecto de desarrollar la reparación?	24
¿Qué tipo de evaluación se hace al hierro/núcleo del motor?	26
¿Se sigue una norma o técnica en el proceso de reparación de motores eléctricos?.....	27
¿Qué procedimiento usan para extraer las bobinas?.....	29
¿Se utiliza altas temperaturas para quitar las bobinas?	32
¿Qué pruebas son realizadas después de la reparación?	32
¿Qué garantías se dan respecto a la reparación?.....	34
¿Dónde se ha capacitado el personal que realiza los rebobinados?	34
¿Qué rango de capacidad de motores reparan?	34
RECOMENDACIONES PARA LOS TALLERES DE REPARACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS	35

MEDICIONES A MOTORES ELECTRICOS.....	38
METODO ESTADISTICO UTILIZADO	38
POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	38
MÉTODO DE MEDICIÓN	41
CORRECCIONES AL DESLIZAMIENTO PLENA CARGA DEBIDO A CAMBIOS EN EL VOLTAJE Y TEMPERATURA AMBIENTE	43
RESULTADO DE LAS MEDICIONES	47
Estudio de Eficiencia a Motores de 75 HP	49
Estudio de Eficiencia de Motores de 100 HP	51
Estudio de Eficiencia a Motores de 125 HP	53
Estudio de Eficiencia a Motores de 150 HP	54
Estudio de Eficiencia a Motores de 200 HP	56
Estudio de Eficiencia a Motores de 250 HP	58
RESUMEN DE PORCENTAJE DE REDUCCIÓN EN EFICIENCIA ESTIMADO POR CADA REBOBINADO.....	59
RESUMEN DE PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE EFICIENCIA TOTAL.....	61
CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.....	62
CONCLUSIONES SOBRE LAS MEDICIONES Y ESTUDIO DEL PARAMETRO EFICIENCIA ELECTRICA EN LOS MOTORES ELECTRICOS ASINCRONOS.	65
RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS.....	68

ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE EFICIENCIA Y REPARACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS

ANÁLISIS DEL BENEFICIO DE LA EFICIENCIA EN MOTORES ELÉCTRICOS

¿Qué es la eficiencia en un motor?

La eficiencia o rendimiento de un motor eléctrico es una medida de su habilidad para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea en potencia mecánica útil. Se expresa usualmente en porcentaje de la relación de la potencia mecánica entre la potencia eléctrica, esto es:

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ mecánica}{Potencia\ eléctrica} * 100$$

No toda la energía eléctrica que un motor recibe, se convierte en energía mecánica. En el proceso de conversión, se presentan pérdidas, por lo que la eficiencia nunca será del 100%. Si las condiciones de operación de un motor son incorrectas o este tiene algún desperfecto, la magnitud de las pérdidas, puede superar con mucho las de diseño, con la consecuente disminución de la eficiencia.

Para calcular la eficiencia, las unidades de las potencias deben ser iguales.

Como la potencia eléctrica se expresa usualmente en kilowatts (kW) en tanto que la potencia mecánica en caballos de potencia (CP o HP), las siguientes equivalencias son útiles para la conversión de unidades:

$$1\text{ HP} = 0.746\text{ KW}$$

$$1\text{ KW} = 1.34\text{ HP}$$

Si un motor de 100 HP toma de la línea 87.76 kw:

a. Potencia mecánica = $100 \times 0.746 = 74.6\text{ kW}$

b. Eficiencia = 85%

c. Pérdidas = $87.76 - 74.6 = 13.16\text{ kW}$

Esto es el motor convierte el 85% de su energía eléctrica en mecánica, perdiendo el 15% en el proceso de conversión. En términos prácticos, se consume (y se paga) inútilmente la energía utilizada para hacer funcionar al motor. Emplear motores de mayor eficiencia, reduce las pérdidas y los costos de operación. Por ejemplo si el motor anterior se sustituyera por otro con una eficiencia del 90%, la potencia ahorrada (PA) se puede calcular aplicando la siguiente ecuación **[8]**:

$$PA\ (KW) = 0.746 * CP \left(\frac{100}{E_1} - \frac{100}{E_2} \right)$$

Donde:

0.746 = Factor de conversión de CP a kW

HP = Caballos de potencia

E1 = Eficiencia del motor de rendimiento menor

E2 = Eficiencia del motor de rendimiento mayor

$$PA = 0.746 * 100 \left(\frac{100}{85} - \frac{100}{90} \right) KW = 4.87 KW$$

¿Qué es un motor eléctrico de alta eficiencia?

Los motores de alta eficiencia son normalmente más robustos y mejor construidos que los motores estándar, lo que traduce en menores gastos en mantenimiento y mayor tiempo de vida, los motores de alta eficiencia tienden a operar con una menor temperatura en sus bobinados, esto aumenta su tiempo de vida estos motores poseen generalmente un menor deslizamiento (mayor velocidad de operación) que los motores de eficiencia estándar. La mayor velocidad puede ser ventajosa en muchos casos, pues mejora la ventilación.

Más allá de la preservación ambiental y el desarrollo sustentable, un motor de alto rendimiento genera bajas pérdidas de energías, gracias a que poseen mayores cantidades de cobre.

Los motores eficientes poseen otros beneficios adicionales, como [5]:

- Trabajar a temperaturas menores y ser más resistentes a las variaciones de tensión que los motores convencionales.
- Tener un factor de potencia media superior al de los motores convencionales equivalentes.
- Ser más silenciosos que los motores convencionales.
- Adicionalmente, muchos fabricantes ofrecen garantías extendidas para motores eficientes.

Una característica importante de los motores en general es que el costo operacional suele ser superior a su costo de adquisición. Dependiendo del tiempo de funcionamiento y de la potencia de su rendimiento, un motor puede costar en consumo de 25 a 150 veces su valor de compra. Es por eso que vale la pena apostar a una política de administración de motores, minimizando los gastos con un uso eficiente y adecuado de la energía eléctrica.

En el mercado global, altamente competitivo, mantener costos de procesos reducidos puede significar una diferencia entre el éxito y el fracaso de muchos productos. Los motores eficientes ayudan a reducir los costos del negocio y el tiempo perdido en los procesos de producción.

La promoción de motores eficientes en la industria ha aumentado la competitividad del sector, ya que los sistemas electromotores representan un porcentaje significativo de sus costos.

Típicamente, el tiempo de retorno de la inversión en motores eficientes varía de 6 meses a 3 años, lo que justifica económicamente su utilización.

Los motores convierten la energía eléctrica en trabajo mecánico y durante este proceso se pierde inevitablemente una cierta cantidad de energía, pérdidas que pueden clasificarse en dos categorías: constantes y según la carga.

Las pérdidas constantes consisten en pérdidas por fricción en los cojinetes, en el ventilador de enfriamiento o simplemente en el núcleo de acero. En cambio, **las pérdidas por carga** se deben principalmente a la resistencia eléctrica de los bobinados.

Los motores eficientes fueron diseñados para reducir al mínimo las pérdidas constantes por carga. Con estos diseños, se genera menos calor residual y, por ende, se requiere menos energía para enfriar el motor. Esto permite emplear un ventilador más pequeño, obteniendo un doble ahorro y una operación mucho más silenciosa.

La carcasa de los motores eficientes tiene la misma altura entre centro, eje, diámetro y agujeros de fijación que los motores convencionales, pero se diferencia por ser más larga en el extremo opuesto al de la transmisión, para acomodar mejor y en forma más eficiente los bobinados y el núcleo.

La mayoría de los motores funcionan en forma muy eficiente durante casi todo el período de operación cuando están bajo régimen de plena carga. Los motores eficientes se diseñaron para ahorrar energía logrando una mejor eficiencia en un rango de entre media y plena carga.

Para lograr el máximo ahorro, es primordial especificar motores eficientes en la etapa inicial de todo proyecto [5].

Aplicación de motores de alta eficiencia

Los motores de alta eficiencia pueden aplicarse favorablemente en los siguientes casos [7]:

- Cuando el motor opera a una carga constante y muy cerca del punto de operación nominal.
- Cuando se usan para reemplazar a motores sobredimensionados.
- Cuando se aplican conjuntamente con Variadores electrónicos de frecuencia para accionar bombas y ventiladores como parte de un Programa de Uso eficiente de la Energía Eléctrica.

REPARACIÓN DE MOTORES

¿POR QUÉ SE AVERÍAN LOS MOTORES?

Cuando un motor llega a un taller especializado para su reparación, debe ser examinado con cuidado en busca de la posible causa de la falla. No es fácil localizar con precisión tal causa, pues muchas veces su origen se oculta bajo devanados quemados u otras averías engañosas. Por ejemplo, los devanados pueden estar muy quemados, pero un examen detenido puede descubrir un cojinete dañado que ocasionó el rozamiento del motor contra el devanado del estator. Llevando el análisis más a fondo, ¿por qué falló el cojinete? ¿Fue por desalineación, exceso de carga o sólo falta de lubricación?

Generalidades.

Es posible impedir desperfectos de los motores. O por lo menos prolongar la duración de éstos, por medio de un mantenimiento preventivo adecuado. Una parte importante del proceso consiste en saber por qué se averían los motores.

Se ha encontrado que los orígenes de los problemas en un motor suelen estar comprendidos en una de las siguientes categorías **[1]**:

- Condiciones ambientales adversas
- Selección o aplicación incorrectas
- Instalación inadecuada
- Desperfectos mecánicos
- Fallas eléctricas
- Desequilibrio de voltaje
- Mantenimiento impropio
- Una combinación de dos o más de los factores anteriores.

Condiciones ambientales adversas.

Con frecuencia, las temperaturas excesivas (ya sea la temperatura del ambiente o la que se deriva de un problema dentro del motor) son causa de avería de la máquina. Los motores deben funcionar dentro de la variación límite de su temperatura indicada en su placa de identificación, a fin de lograr una larga vida útil.

Por cada 10°C de aumento de la temperatura de operación del motor por encima de la nominal, la duración del aislamiento se reduce a la mitad.

Además de mantener la temperatura ambiente correcta, hay que localizar y eliminar otras fuentes de aumento de temperatura, como la desalineación, sobrecarga, voltaje incorrecto y muchas otras. Las condiciones ambientales perjudiciales suelen consistir en la presencia de vapores corrosivos, sal suspendida en el aire, y suciedad, polvo y otros contaminantes en exceso.

En lugares con tales condiciones es esencial contar con motores cuyas carcasas estén especialmente diseñadas.

La humedad es otra causa común de fallas de motores. Si se condensa en la superficie del aislamiento por cambios de temperatura o por contacto con agua, dicha superficie se volverá altamente conductora, se dañará y producirá la falla inmediata del motor. Además, es posible que el aislamiento absorba humedad con el paso del tiempo, hasta que la resistencia dieléctrica del aislamiento se reduce tanto que ocurre la falla.

Hay muchas formas en que la selección o aplicación de los motores pueden ser incorrectas. A veces, el error es tan pequeño que la máquina dura largo tiempo. Es esencial seleccionar el tamaño y tipo correctos de motor para la carga; el fabricante, un taller especializado y las normas proporcionarán orientación. Hay numerosos factores que deben considerarse. Por ejemplo, un ciclo severo de trabajo podría ocasionar falla prematura del motor. La marcha irregular a tirones, el frenado por contramarcha (inversión) y un prolongado tiempo de aceleración hacen que los motores trabajen a velocidad más baja que la normal. Debido a que los motores sometidos a este ciclo de servicio toman corrientes muy intensas en el arranque, éstas producen, a veces, calentamiento excesivo. Además, debido a la baja velocidad del rotor, el enfriamiento normal disminuye mucho y empeora el problema del sobrecalentamiento.

La altitud de la instalación es otro factor importante que a menudo no se toma en cuenta. A grandes altitudes, el aire es menos denso y menos eficaz para el enfriamiento; esto permite que en casi todos los motores la temperatura aumente alrededor del 5 % por cada 300 m (1000 pies) de altitud.

La selección de la carcasa también es importante; las hay disponibles y normalizadas para casi cualquier clase de situación **[1]**.

Instalación inadecuada.

Las deficiencias en el montaje del motor pueden ocasionar su falla. Si los pernos de montaje no son de la medida correcta o no están bien apretados, puede ocurrir una desalineación y vibraciones que ocasionarán daños en los cojinetes y el eje (flecha) y, en un momento dado, la quemadura de los devanados. Las placas de base de acero, los cimientos y deben tener suficiente resistencia para soportar los paros y arranques.

Acoplamientos, bandas, poleas y cualesquiera otras conexiones entre el motor y la carga impulsada deben estar bien alineados para evitar la vibración excesiva, que es tan dañina para los motores.

Desperfectos mecánicos.

Una carga excesiva puede dañar con rapidez un motor; éste quizá haya sido al principio del tamaño apropiado para la carga, pero una variación en ésta o en el mecanismo para impulsión puede producir sobrecarga del motor. Los cojinetes empezarán a fallar, los engranes pueden trabarse, o pueden presentarse otras causas de fricción o cargas extra.

En este caso, el motor consumirá más corriente y se incrementará su temperatura. Si la corriente del motor excede del amperaje nominal a plena carga, aunque sea por un tiempo breve, el rápido sobrecalentamiento reducirá la duración del motor.

Las fallas de los cojinetes se encuentran entre las más comunes en cualquier motor. Se calcula que casi el 50 % de las quemaduras de motores se deben a un cojinete dañado. Es necesario conocer a fondo los diversos motivos de las fallas de los cojinetes y los procedimientos correctos de mantenimiento para lograr un mayor aprovechamiento del motor.

La desalineación entre el motor y su carga en acoplamientos, engranajes, poleas y bandas es otra causa de fatiga mecánica.

Debe practicarse el balanceo o equilibrado dinámico de todos los componentes para obtener una larga duración del motor, lo cual, además, reducirá al mínimo la vibración y problemas asociados [1].

Fallas eléctricas.

El bajo voltaje hace que la corriente sea mayor que la normal. Si la reducción en la tensión aplicada es considerable, el exceso de corriente producirá sobrecalentamiento del motor.

Un alto voltaje de alimentación para el motor reduce las pérdidas en el cobre, pero el flujo magnético más intenso ocasiona mayores pérdidas en el hierro.

Un pequeño incremento en el voltaje de suministro podría reducir el consumo de corriente; sin embargo, un aumento del orden del 10 % o más respecto al valor de la placa producirá saturación del hierro y una intensificación considerable en la corriente con el consecuente sobrecalentamiento perjudicial del motor.

Desequilibrio de voltaje.

Según la norma STD IEEE-112 se permite hasta un 0.5% de desbalance de voltaje, ya que pueden ocasionar una grave alteración en la corriente, que puede producir un rápido sobrecalentamiento del motor. Es necesario instalar una protección contra este problema, para lo cual suelen ser adecuados los relevadores de sobrecarga.

Ya se utilizan nuevos tipos de tales relevadores para proteger a un motor no sólo contra voltajes desequilibrados, sino también contra la caída de fases o monofásico, que en realidad es la forma extrema del desbalance de la tensión aplicada.

Mantenimiento impropio.

Casi siempre, el buen mantenimiento preventivo evita, o cuando menos demora, una posible falla del motor. Se han encontrado en algunas instalaciones condiciones tales como polvo y suciedad en los motores, conductos de ventilación obstruidos, motores sobrecalentados, corriente incorrecta en estos, cojinetes ruidosos, humedad dentro y fuera de la máquina, debido todo ello a la falta de mantenimiento periódico.

En ocasiones, no todos los motores necesitan ni ameritan mantenimiento preventivo, en particular cuando el costo de este último puede ser mayor que el de reparar el motor. Por otra parte, cuando el motor se encuentra en una instalación crítica o es muy grande, costoso o difícil de sustituir, entonces sí se justifica un buen programa de mantenimiento. Se han realizado estudios en instalaciones industriales en las que se aplican un mantenimiento adecuado, y se ha descubierto que la producción no sufre interrupciones, los motores duran más y sus costos totales de operación son más bajos **[1]**.

Falla por operación con una sola fase.

Un caso de quemadura de tres motores de 100 hp en una planta industrial pone de relieve el hecho de que la protección usual contra sobrecarga en los controladores trifásicos, aunque tenga el ajuste adecuado, no es una seguridad total contra las costosas quemaduras de esos motores cuando quedan alimentados accidentalmente por una sola fase, lo que constituye un desastre demasiado común.

Aunque el *NEC* exige la protección de los motores contra la sobrecarga, no menciona en absoluto la necesidad de proteger contra daños debidos a la operación monofásica accidental que puede producirse en motores trifásicos, cuando uno de los tres hilos de fase del circuito se desenergiza al fundirse uno de los tres fusibles que protegen el circuito derivado, o la línea alimentadora de tal circuito. Con tres relevadores de sobrecarga en el arrancador del motor éste se encuentra protegido, porque abren el arrancador en las condiciones de apertura de una fase, pero la realidad es que sólo constituyen una protección parcial y en condiciones muy específicas de carga y aplicación del motor **[1]**.

Desperfectos más frecuentes en los devanados

Los defectos y averías que se encuentran con más frecuencia al revisar devanados son **[1]**:

1. Devanado con contacto a tierra
2. Espiras en cortocircuito en una o más bobinas
3. Bobinas con cortocircuito en sus extremos
4. Bobinas con conexión invertida
5. Grupos de bobinas invertidos, o toda una fase invertida
6. Distribución incorrecta de las bobinas en rotor o estator
7. Conexión del devanado para un voltaje distinto del de operación
8. Conexión del devanado para un número de polos incorrecto
9. Falta de continuidad en el circuito de alguna fase
10. Bobinas desconectadas en el devanado.

REVISIÓN Y REPARACIÓN DE LOS NÚCLEOS DE LAMINACIONES

Cuando se rebobina un motor averiado o cuando se realiza la inspección periódica de un motor, surgen en ocasiones dudas sobre el estado de la estructura o núcleo laminar del acero, y sobre si sus características habrán sido afectadas o no por algún desperfecto, por pequeño que parezca.

Generalidades

Las láminas delgadas o laminaciones de acero especial utilizadas para fabricar el núcleo magnético de un motor deben satisfacer ciertos requisitos mínimos, como son **[1]**:

- Espesor dentro de límites prefijados.
- Resistencia interlaminar aceptable.
- Pérdidas magnéticas por debajo de cierto valor.
- Características mecánicas aceptables.
- Ausencia de rebabas.
- Dimensiones dentro de tolerancias.

El núcleo laminar puede dañarse durante la operación del motor por varias causas, entre las que pueden citarse:

- Contacto a tierra de una parte del devanado.
- Inundación del local donde se encuentra el motor.
- Rozamiento del rotor durante el funcionamiento por desbalance, sobrecalentamiento, avería de rodamientos, etc.
- Daños superficiales producidos al montar o desmontar el rotor.
- Falla del aislamiento del devanado por sobrecarga, sobre elevación de temperatura, etc.

Rebobinado: Examen de las laminaciones

Cuando se va a rebobinar un motor, el objetivo básico consiste en reproducir el funcionamiento original, por lo que es necesario partir de un núcleo que tenga las mismas características que cuando la máquina fue construida originalmente.

Si no se tiene la precaución de verificar el estado del núcleo antes de iniciar el rebobinado, puede encontrarse al terminar dicho trabajo que ocurren calentamientos locales en partes en que se ha perdido la resistencia interlaminar, lo cual podría estropear el más cuidadoso trabajo de rebobinado. Lo menos que podría pasar en cualquier caso es que la máquina operara con menor eficiencia debido al incremento de las pérdidas por corrientes parásitas, y podría también ocurrir disminución del flujo magnético si hubiera un daño que afectara considerablemente el volumen de hierro.

Cuando se dañan las laminaciones, por ejemplo por la falla a tierra en una bobina, la solución más correcta sería sustituir las laminaciones averiadas por piezas nuevas de idénticas características, lo cual no siempre es posible. La alternativa consiste en desensamblar el paquete de laminaciones, re aislar las láminas dañadas y rehacer el paquete acomodando las hojas de forma que las porciones faltantes queden uniformemente distribuidas en el paquete, a fin de evitar hasta donde sea posible que se produzcan calentamientos locales, y obtener así una distribución más homogénea del flujo magnético. Cuando no es factible la operación de desensamblar el paquete de laminaciones, en algunos talleres se moldea la parte faltante del núcleo con una mezcla de resina epóxica cargada con limaduras de hierro, lo cual si bien no constituye una solución completamente satisfactoria, puede aminorar el problema y permitir la puesta en operación del motor en un tiempo relativamente corto [1].

REEMPLAZANDO LOS MOTORES EN LUGAR DE REBOBINARLOS

Cuando un motor falla y debe ser reparado es importante determinar si es conveniente repararlo o reemplazarlo por un motor de alta eficiencia. Es importante considerar que la eficiencia del motor cae en cada reparación, si esta es inadecuada, por lo que es importante conocer la eficiencia del motor fallado. Para analizar si el motor se reemplaza se recomiendan los siguientes criterios [4]:

- La condición y la edad del motor.
- Historia de la operación del motor y los rebobinados.
- El tipo del motor y de la aplicación.
- El potencial ahorro de energía que puede lograrse.

CUIDADO CON LAS REPARACIONES

La reparación inadecuada de un motor puede ocasionar un incremento en las pérdidas y adicionalmente en los motores de corriente alterna, la reducción del factor de potencia. Todo esto conduce a una disminución de su eficiencia. Por ejemplo un motor que sufrió un desperfecto en su devanado y que por ello hay que rebobinarlo, puede disminuir su eficiencia considerablemente, si durante el proceso de reparación se presenta:

- Calentamiento desmedido del hierro al quitar el devanado
- Daños en las ranuras al quitar el devanado dañado y montar el nuevo
- Diferente calidad y calibre del alambre
- Diferente número de vueltas
- Daños a los cojinetes y mal alineamiento.
- Mayor tiempo de secado final

Por esto es importante que cuando un motor sea reparado, los trabajos los efectúe personal calificado para garantizar que la compostura sea realizada correctamente y que los materiales empleados sean de calidad igualo superior a los originales.

La misma atención se debe prestar a las partes eléctricas del motor, como a los componentes mecánicos, tales como los cojinetes, el eje y el sistema de ventilación o enfriamiento. Con frecuencia los daños que sufren los devanados tienen su origen en desperfectos mecánicos.

Un motor mal reparado al ser instalado nuevamente, gastará más energía que antes. Cuando los daños sean mayores puede resultar más económico sustituir un motor que componerlo. Evalúe técnica y económicamente la posibilidad de hacerlo y si lo decide, utilice motores de alta eficiencia [8].

FACTOR POR REBOBINADO

Siempre que un motor sé rebobina, aunque se realice en un taller de calidad, se produce una disminución en la eficiencia del motor, ya que sus elementos se ven sometidos a sobre calentamiento, golpes, sobre –esfuerzos mecánicos, mala calidad de las refacciones, etc.

Se puede asegurar que cuando un motor se repara en un taller adecuado, su eficiencia disminuye hasta el 2%, mientras que si se realiza en un taller de mala calidad, puede disminuir hasta un 6%, sin embargo, es común que se considere un 1.5% de disminución de eficiencia por cada rebobinado realizado al motor [6].

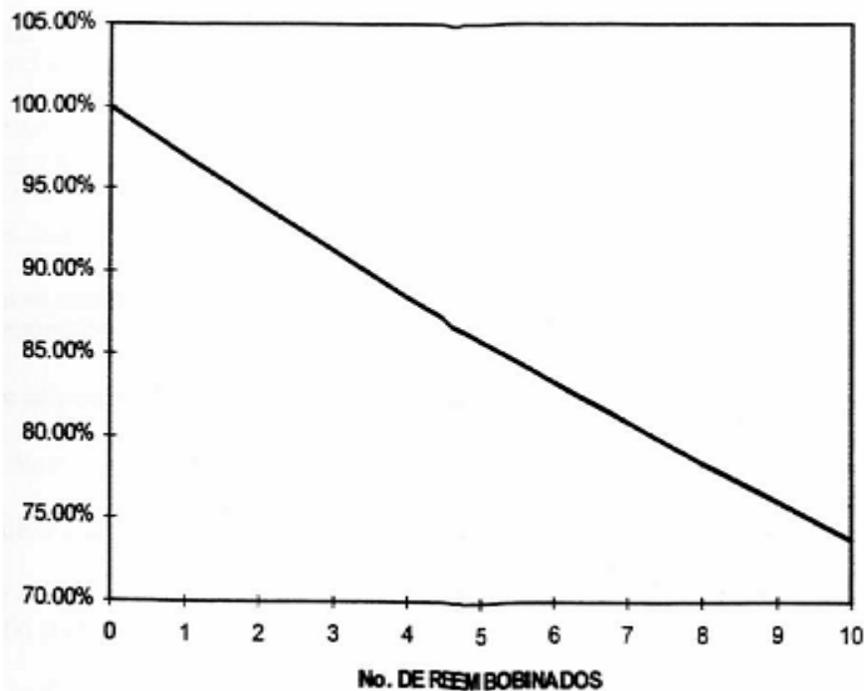


Figura 1. Reducción de la eficiencia por cada rebobinado en el motor.

Fuente: Fideicomiso Para el Ahorro de Energía Eléctrica. FIDE.

ESTANDARES Y METODOS DE MEDICION DE EFICIENCIA EN MOTORES

Documentos guías para la determinación de la eficiencia en los motores:

- STD IEEE 112-1996 Estándar Procedimiento De Medición para Motores Polifásicos de Inducción y Generadores.
- NEMA MG-1 2003 Asociación Nacional de Manufacturas Eléctricas, Motores y Generadores.
- STD IEEE 1068-1990 Práctica recomendada para la reparación y Rebobinado de motores para la Industria Petrolera y Química.
- Libro de Bronce IEEE 739-1995.
- Calidad en la Reparación de Motores Eléctricos, Vince Schueler and Johnny Douglas Washington State Energy Office.

Para determinar la eficiencia de los motores se utilizará como guía el STD IEEE 112-1996 (Estándar Procedimiento de medición para Motores Polifásicos de Inducción y Generadores), dicho documento detalla el procedimiento y cálculos de las mediciones correspondientes de entre 6 métodos posibles, en este proyecto se escoge el Método B descrito en STD IEEE 112 pág. 16 , para evaluar los diferentes parámetros del motor y los rangos tolerables de las condiciones de operación del motor en el momento en que se efectúan las mediciones, ± 0.5 % de desbalance de voltaje con respecto al nominal, $\pm 0.10\%$ variación en frecuencia del valor nominal(para el método A y B STD IEEE 112), así como la corrección, si aplica, de estos parámetros en función de la temperatura, La eficiencia de los motores estará normada por NEMA MG-1 2003(Asociación Nacional de Manufacturas Eléctricas),en su inciso 12 y con atención para el presente estudio las tablas 12-10, 12-11, 12-12, 12-13, citadas en anexos, para eficiencia estándar o Premium en función de su capacidad, numero de polos y su respectiva velocidad síncrona. El método propone completar un reporte cuyo formato esta dado en la págs. 47 Y 48 Figura 7 y en los anexos A y B formatos para reportes típicos sobre medición para maquinas de inducción que servirán para la presentación de los resultados obtenidos.

El Std. IEEE 1068-1990, describe paso a paso el procedimiento meticuloso para la reparación y rebobinado de motores con alto grado de calidad en los talleres, ambiente controlado, sustitución de piezas por otra igual o mejor, cumpliendo con los estándares originales de construcción y condiciones nominales de operatividad de la maquina, reduciendo al mínimo las perdidas, que son en cierta medida inevitables, con la consecuente mínima alteración posible de la eficiencia de la maquina, rebobinando con un calibre y calidad igual o superior al de fabrica, teniendo cuidado de no alterar el numero de vueltas o el ancho de la bobina con lo cual se altera la reactancia del motor lo que llevaría al motor a generar más perdidas, en este sentido es necesario apoyarse en el Std. IEEE 43-1974, Practica recomendada para medir la resistencia de aislamiento de maquinas

rotatorias, ver tabla 1, el método recomienda también hacer una corrección en función de la temperatura. Además la norma IEEE 1068-1990 hace referencia al mantenimiento predictivo en el cual se consideran aspectos como la vibración por mal asentamiento del motor a la base soporte y por supuesto que los cables de alimentación de la maquina se encuentren en buen estado y cumplan con los requerimientos establecidos por el NEC y NEMA MG-1, así como los terminales y la polarización de la maquina.

Tabla 1. Prueba de Aislamiento.

Voltaje Nominal del Motor	Prueba de Voltaje DC
240-2400	500
3000-4800	2500
5200-13800	2500 o 5000

Fuente IEEE Std. 43-1974

METODO DE CARGA-DESLIZAMIENTO

Tabla 2. Muestra la velocidad de motores típicos en la industria [12], [13]

· Velocidades de motor típicas

Número de polos	Velocidades síncronas
2	3600
4	1800
6	1200
8	900
10	720
12	600

Deslizamiento

El fenómeno de deslizamiento es muy importante para el funcionamiento de motores de inducción. En condición de sin carga, el rotor casi se las arregla para mantenerse a la velocidad síncrona del campo magnético rotativo del estator. La única energía transferida a través del entrehierro es la requerida para vencer la fricción en los cojinetes y la resistencia del aire. Al aumentar la carga, la velocidad del rotor tiende a caer cada vez más y más detrás del campo magnético, provocando que se corten más líneas de flujo y que más energía se transfiera a través del entrehierro y al eje del rotor. La velocidad real del rotor es siempre a la tasa correcta para transferir la cantidad de energía necesaria para manejar la carga en aquel preciso momento.

A plena carga, la velocidad del motor ha caído hasta alcanzar el valor de placa del motor.

La diferencia en velocidad entre el campo magnético rotatorio síncrono y la velocidad real del rotor es lo que se conoce como **deslizamiento (slip en inglés)**. Un motor de cuatro polos trifásico de bajo deslizamiento típico (velocidad síncrona de 1800 rpm), tendría una velocidad nominal a plena carga de 1750 rpm. La norma NEMA (National Electrical Manufacturer Association) para motores de bajo deslizamiento (diseño de torque A y B) requiere que el deslizamiento no exceda 5% a plena carga.

Los fabricantes de motores pueden cambiar la curva velocidad-torque de sus motores. Cuatro diferentes características velocidad-torque han sido parcialmente normalizadas por NEMA como motores de diseño A, B, C, y D. (ver tabla 3 y figura 2). Esas características cuando la frecuencia fija de 60 Hz era la dominante en la industria. La figura 2 (a) muestra las curvas torque-velocidad para esos motores a 60 Hz. [12], [13]

Tabla 3. Características de diseño de motores NEMA

Diseño NEMA	Corriente arranque	Torque arranque	Deslizamiento a carga nominal
A	Normal	Normal	Bajo
B	Normal	Normal	Bajo
C	Normal	Elevado	Bajo
D	Bajo	Muy alto	Alto

El motor de diseño B es el más usado en la industria. La figura 2 (b) muestra sus curvas velocidad-torque con puntos importantes identificados.

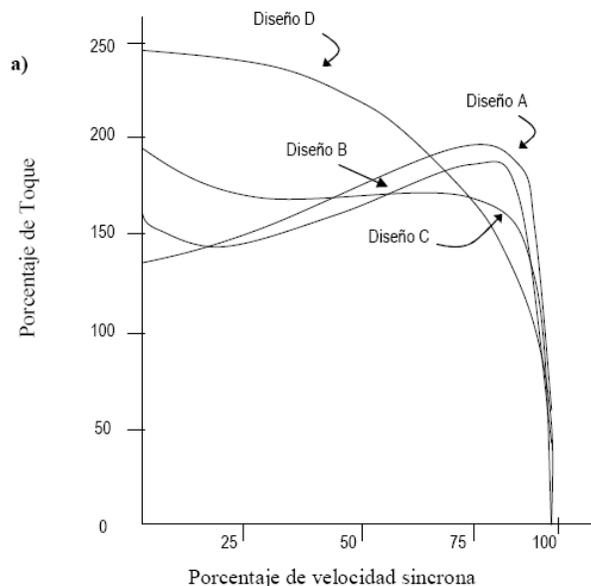


Figura 2(a) - Curvas velocidad-torque típicas para motores de diseño NEMA

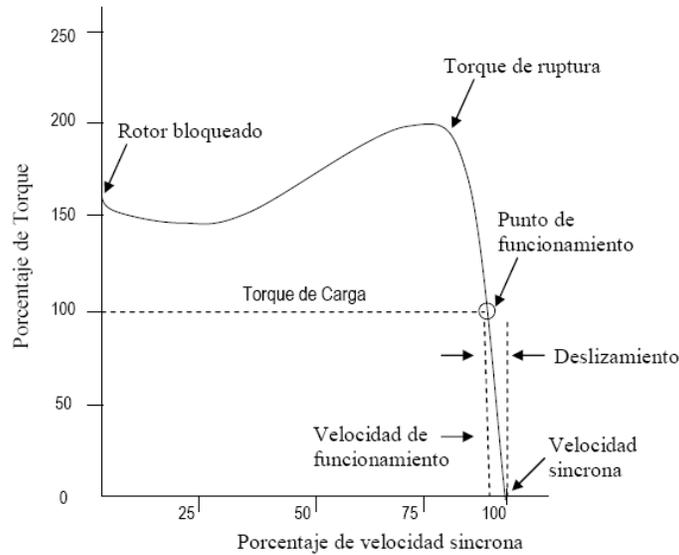


Figura 2(b) - Curvas velocidad-torque para motores de diseño NEMA B.

Algunas fórmulas para determinar los hp incluyen las siguientes: [12],[13]

$$Hp = (\text{Velocidad en rpm}) \times (\text{Torque en lb-pie}) / 5252$$

$$Hp = (\text{Trabajo hecho en una hora [en pie-lb/h]}) / 1\,980\,000$$

$$Hp = (\text{Número de kW}) / (0.746)$$

Estudios de Motores

La exactitud de los datos de placa es tratada en la norma NEMA MG-1 1993 en la sección 12.46, y el texto no ha sido cambiado desde los años sesenta. La norma establece: “La variación en los datos de placa o datos publicados sobre la velocidad de motores monofásicos o polifásicos, de corriente alterna no debe exceder 20 por ciento de la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad nominal cuando se miden a voltaje, frecuencia y carga nominales, a una temperatura ambiente de 25°C. En la práctica la mayoría de fabricantes puede conseguir mantenerse dentro del 5% de los datos de placa, pero existen excepciones.

Una prueba del motor que también puede ser hecha es tomar la relación entre los amperios medidos y los amperios de placa a plena carga. Esta relación es válida si los amperios medidos se encuentran por arriba del 55-65 % del valor nominal a plena carga, el cual es el rango en que los amperios son lineales con la carga.

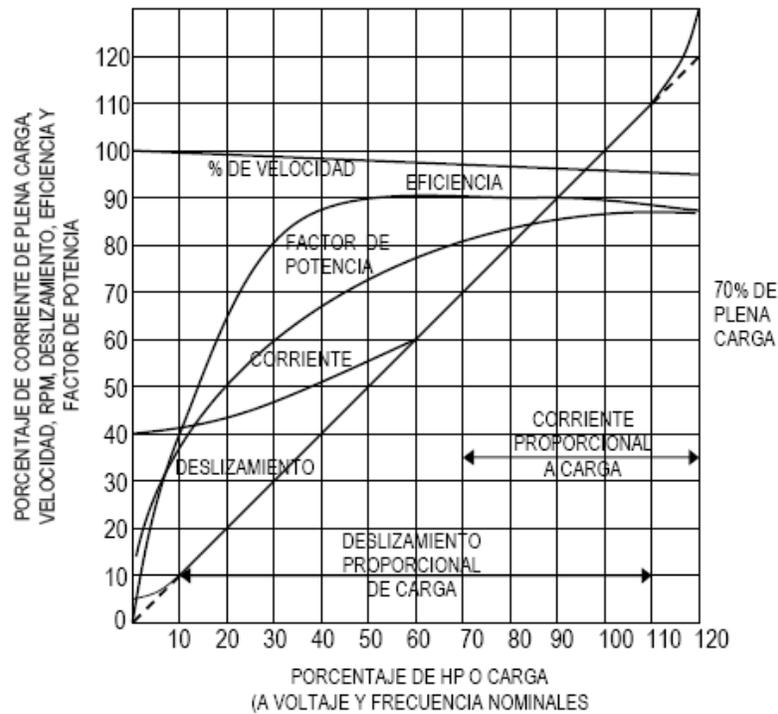


Figura 3. Curva típica para motor de inducción de diseño NEMA B, [12].

Realizando un estudio de motor

En la figura 3, se observa que el factor de potencia y la eficiencia disminuyen a medida que el motor maneja menos carga. Así, un estudio de motores es una de las áreas primarias de consideración en una auditoría de energía inicial en una instalación. Para ayudar en este estudio un formato como el de la figura 4, es recomendable para garantizar que toda la información pertinente es recogida.

Los datos del motor pueden obtenerse del fabricante, o por medio de herramientas tales como el software *Motor máster* desarrollado para el Departamento de Energía de EE.UU. [12]

HOJA DE DATOS DE PRUEBA PARA MOTOR DE INDUCCION

Compañía	ABC	Planta	XYZ	Fecha	MM/DD/AÑO
Edificio	TEXTIL	Depto.	S.S	Aplicación	CWPUMP8
Numero de Taller de Motor	1998		Numero de Fase y Hz	3 / 60	
Marca	GE		Tamaño del cuadro	4444 U	
Modelo/Tipo	5K4445C22		Clase de aislamiento	B	
Numero de Serie	BA093031		Eficiencia nominal		
Factor de Servicio	1.0		Tipo de torque NEMA	B	
Tipo de Caja	ODP		Incremento de temp.	55 °C	
a) HP a plena carga	100	Valores Calculados			
b) Voltios	440/220	n) Deslizamiento de operación (e-k)	22		
c) Amperios	122.5/245	p) Porcentaje de I carga (n/f)(100%)	88%		
d) Velocidad a plena carga	1775	q) HP de salida (a)(p)(100%)	88%		
e) Velocidad sincrona	1800	r) kW de salida (q)(0.746)	65.6		
		s) Porcentaje de Eficiencia (r/j)(100%)	82%		
2 polos = 3,600, 4 polos= 1,800, 6 polos = 1,200		t) kVA de entrada (g)(h)(1.732)(1000)	87.6		
f) Deslizamiento a plena carga (e - d)	25	u) Factor de potencia (j)/(t)(100%)	91%		
Valores Medidos		v) Perdidas en kW (j-r)	14.4		
g) Voltios promedio	440	w) \$ /año de Operación (j)(l)(m)	\$28,000		
h) Amperios promedio	115	x) \$/año de Perdidas (v)(l)(m)	\$ 5,040		
j) kW promedio	80	y) Ahorros de energía anuales debido			
k) Velocidad de operación, rpm	1775				
i) Horas de operación a plena carga	7000	a cambio a un motor de $\frac{100}{100/EFF}$ hp de alta eficiencia (r)(l)(m)(100/s-100/EFF)	\$ 2,489		
m) Precio promedio de la electricidad (\$kWh)	0.05	Z) Costo del motor	\$ 4,000 + \$ 600 = \$ 4,600		
		Retorno simple, años	1.85		

Figura 4. Hoja de datos de prueba para motores de inducción. [13]

DATOS ESTADÍSTICOS SOBRE MOTORES

Mercado de motores eléctricos industriales

A fin de definir claramente las clases de productos de motores eléctricos industriales, este estudio considera únicamente los motores trifásicos de más de 1 HP (750W) para este análisis de mercado; no se consideran los motores de corriente directa, por las razones arriba mencionadas en la sección que describe los datos de agencias aduaneras.

Tampoco se consideran los motores pequeños de menos de 1 HP de capacidad, porque se usan más frecuentemente como piezas de otro equipo y, por ende, quizá sean más complicados de reglamentar. Además, los motores más pequeños suelen ser utilizados en aplicaciones comerciales y residenciales.

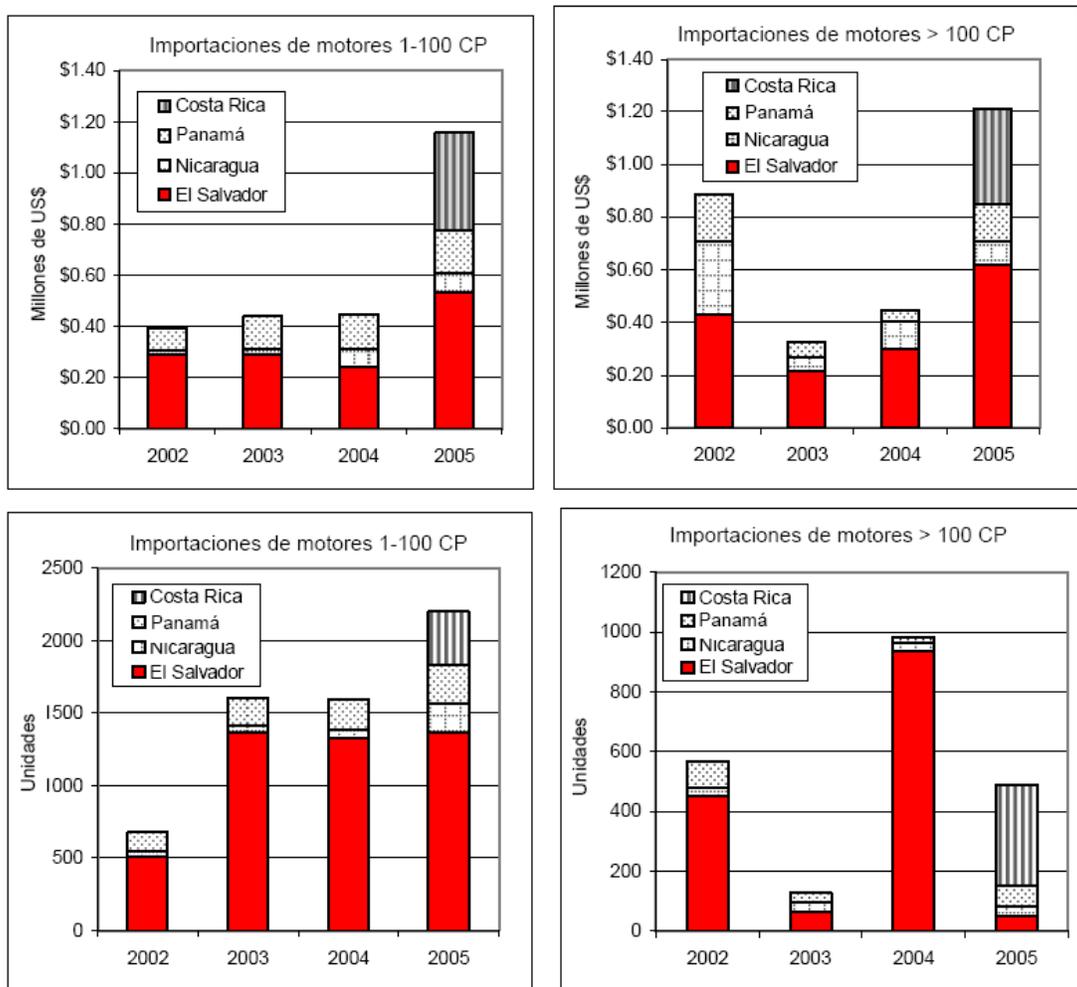
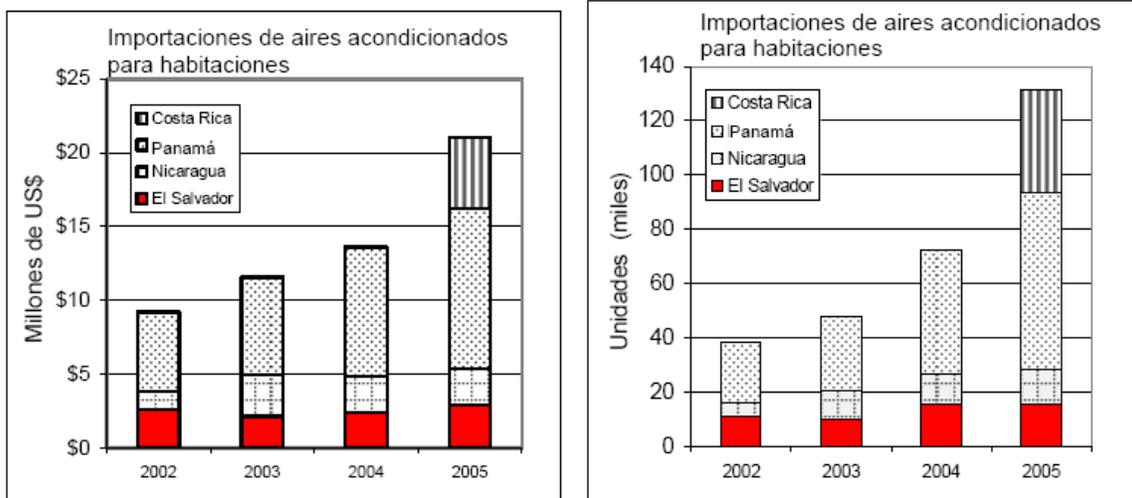


Fig. 5 Importaciones de motores industriales por país y año [9].

Fuente: Datos aduanales recopilados por el equipo de BUN-CA/CLASP, 2006.

A partir de los gráficos, se puede ver la importancia de la industria pesada en El Salvador. Además, las ventas de motores en el año para el cual se disponía de datos en Costa Rica también muestran importaciones elevadas. Las importaciones de motores son muy pequeñas en Nicaragua, aunque muestran señales de crecimiento, al menos para los motores más pequeños. Al compararse con la Figura 6, el valor monetario total de las importaciones de motores es apenas una fracción del aire acondicionado, que se están volviendo un producto generalmente difundido. Sin embargo, el consumo eléctrico del parque de motores es similar al del aire acondicionado.



Fuente: Datos aduanales recopilados por el equipo de BUN-CA/CLASP, 2006

Fig. 6. Importaciones de aire acondicionado habitacional por país y año.

Las importaciones de motores grandes de AC son parecidas a las de los pequeños, en términos monetarios; pero constituyen sólo la mitad en términos de unidades, lo que refleja el mayor costo de los motores más grandes. Existen fluctuaciones anuales significativas en las importaciones de los motores de gran capacidad en El Salvador; esto se debe al hecho de que este equipo suele comprarse en grandes cantidades, como parte de una sola inversión grande en una planta industrial.

La tabla 4 resume las importaciones de motores, en términos monetarios y en volumen de unidades, en 2002 y 2005.

En El Salvador, la tasa de crecimiento fue no menos del 17%, lo que indicaría un fuerte crecimiento en la capacidad industrial y en el consumo eléctrico. No obstante, debe tenerse cuidado al interpretar este valor, porque sólo se disponía de unos cuantos años de datos de importación. Las importaciones de motores en Panamá mostraron un crecimiento moderado, mientras que las de Nicaragua disminuyeron de manera considerable [9].

Tabla 4. Valor monetario de las importaciones por país.

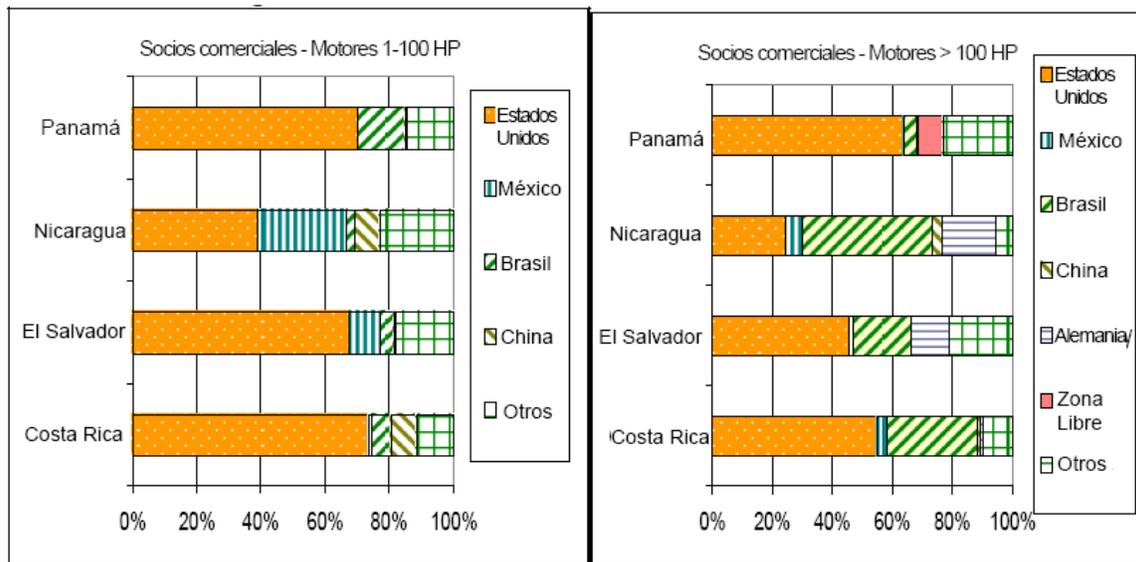
País/ Importaciones	Importaciones 2002	Importaciones 2005	Importaciones 2002	Importaciones 2005	TAPC
	\$Millones	\$Millones	Unidades	Unidades	(base \$)
Costa Rica	N/D	\$0.7	N/D	705.0	N/D
El Salvador	\$0.72	\$1.15	960	1,421	17%
Nicaragua	\$0.29	\$0.17	64	229	-17%
Panamá	\$0.26	\$0.31	222	332.4	5%

Fuente: Datos aduanales recopilados por el equipo de BUN-CA/CLASP, 2006

Fabricantes y socios comerciales en motores

Los motores eléctricos industriales se importan de una variedad de socios comerciales, aunque unos cuantos exportadores dominan el mercado. Como lo muestra la Figura 7, Estados Unidos es el socio comercial más importante para motores. Esto se aplica especialmente a los motores que están en la gama de 1-100 CP, en donde las empresas estadounidenses controlan más del 60% del mercado en todos los países, excepto Nicaragua.

La situación para los motores más grandes es algo diferente. Los EE.UU. tienen menos predominio en el mercado de este equipo. En contraste, Brasil es un participante muy significativo. Finalmente, Alemania y otros países europeos poseen una fracción considerable del mercado de motores eléctricos industriales grandes.



Fuente: Datos aduanales recopilados por el equipo de BUN-CA/CLASP, 2006

Fig. 7 Socios comerciales en motores industriales [9].

Los datos de las agencias aduaneras no proporcionan el nombre de los fabricantes; pero los principales actores en el mercado de motores se obtuvieron mediante entrevistas personales y

respuestas de encuestas. Una lista parcial de los principales fabricantes, por país de origen, incluye [9]:

- EE.UU.: Baldor, US Motors, General Electric, A.O. Smith,
- Brasil: WEG7, Kolbach
- Alemania: Siemens8, ABB

ENCUESTA A TALLERES DE REPARACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS

Con el objetivo de conocer y evaluar el proceso de reparación de motores eléctricos, se realizó una encuesta a ciertos talleres los cuales se listan a continuación:

LISTADO DE TALLERES ENCUESTADOS
BOBINSAL
TALLER CARPIO
TALLER SANTA FE
MOTOR PLAN
TALLER MUNGUIA
TALLER CASTILLO
TALLER MARTINEZ

Dicha encuesta a la que fueron sometidos los talleres anteriores, pretendía explorar aspectos generales y técnicos en cuanto al proceso que utilizan para la reparación de motores eléctricos, comparando estos procedimientos, con normas internacionales para la reparación adecuada de motores eléctricos y así establecer las necesidades existentes en los procesos o prácticas de reparación para disminuir al mínimo posible el impacto en la eficiencia de los motores que son reparados en dichos talleres.

ENCUESTA REALIZADA

¿Cuál es el proceso de recepción de los motores a reparar?

R/ Tomar datos de la empresa o propietario, al igual que los datos de placa del motor, los cuales son anotados en un cuaderno y luego realizan una inspección completa del motor para establecer un diagnóstico.

Sugerencia según norma IEEE 1068.

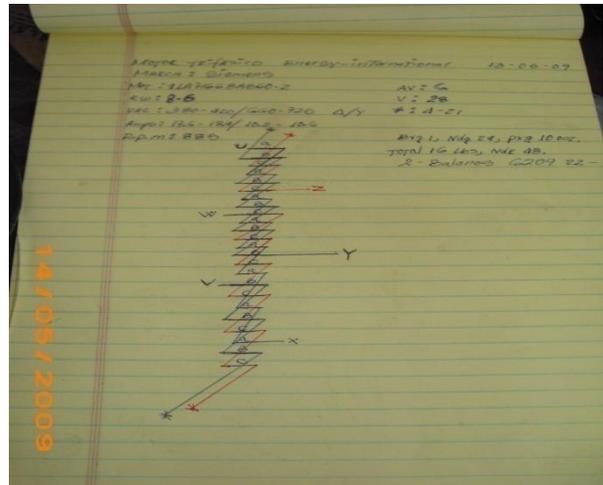
- 1) Según IEEE 1068 secc. 4.2.1. con respecto al proceso de recepción de motores a reparar dice lo siguiente:

Antes de desmontar la máquina, ambas partes (propietario y reparador) deben de inspeccionar la máquina por daños que pueden haber ocurrido durante el traslado.

- a) Debe llenarse un reporte de recepción e incluir partes quebradas o faltantes y/o problemas inusuales.
- b) Para condiciones que no pueden ser adecuadamente descritas, se deben tomar fotografías para claridad.
- c) Registrar toda la información disponible del dato de placa. Se deben obtener los siguientes datos.

- I. Tipo.
- II. Manufactura (fabricante).
- III. Modelo.
- IV. Numero de serie.
- V. Hp / KVA / KW / FP
- VI. Rpm
- VII. Numero de fases.
- VIII. Frecuencia.
- IX. Voltaje.
- X. Corriente a plena carga.
- XI. Incremento de temperatura / clase de aislamiento / temperatura ambiente base.
- XII. Tipo de baleros y fabricante.
- XIII. Código o amperios a rotor bloqueado.
- XIV. Factor de servicio.
- XV. Tipo de encapsulado.

Fotografías que muestran la forma en que se procede en los talleres:



Libretas en las cuales se lleva el control de los motores a reparar.



Ejemplo de placa de la cual se toman datos.

Recomendación:

Utilizar una ficha técnica en la cual se lleve ordenadamente los datos del motor así como los del cliente, en la cual se incluyan fotografías con las cuales se justifique dicha reparación y de esta manera poder tener un control del historial de reparaciones y aspectos técnicos del motor, facilitando así una próxima reparación.

¿Cuáles son las causas más comunes de daño en los motores?

R/ Entre las fallas que son atendidas con más frecuencia se tienen:

- a) Mal aislamiento.
- b) Baleros.
- c) Diferencia de voltaje.
- d) Platinos.
- e) Bobinas fundidas.
- f) Capacitores.
- g) Núcleos fundidos.

Fotografías de algunos daños más comunes:



Capacitor dañado



Bobinas quemadas



Bobinas quemadas



Bobinas retiradas del motor

¿Qué evaluación preliminar se hace al motor para efecto de desarrollar la reparación?

R/ Se realizan pruebas de aislamiento, también una revisión visual de los devanados, baleros y partes mecánicas. Si es posible, averiguar el historial de trabajo y si ya fue rebobinado.

Sugerencia según norma IEEE 1068.

Según IEEE 1068 secc. 4.2.2. Con respecto a la evaluación previa a la reparación de motores lo siguiente:

Antes de ponerlo en marcha, se debe realizar lo siguiente, tomando datos de lo que sea necesario:

- a) Verificar que el eje y los baleros no estén dañados.
- b) Verificar que los baleros estén lubricados.
- c) Se debe realizar la prueba de resistencia de aislamiento. Ver la secc. 4.3.1 los literales
i) para los valores mínimos de resistencia de aislamiento, requerimientos de

compensación de temperatura y pruebas de voltajes. Ver anexo A para registrar el dato de resistencia de aislamiento del motor.

d) Examinar el aislamiento de las bobinas en concordancia con el estándar IEEE 432-1992.

e) Otras pruebas requeridas antes de energizar el motor son las siguientes:

- I. Continuidad en las bobinas.
- II. Verificar el estado e instalación de las escobillas.
- III. Monofásico, prueba a bajo voltaje (aproximadamente del 10% al 20 % de voltaje nominal) voltaje AC sobre rotores de jaula de ardilla para encontrar defectos en las barras del rotor. La máxima variación de corriente de línea aceptada es $< 3\%$, cuando el eje gira a carga completa.
- IV. Prueba de pérdida en el núcleo.
- V. Índice de polarización (Cuando sea apropiado).
- VI. Prueba de arranque (Cuando sea apropiado).

Si las condiciones lo permiten, el motor debe ser puesto en marcha a voltaje reducido, inicialmente (25% al 50% de voltaje nominal). Si la prueba es satisfactoria, completar la hoja de datos de los anexos A y B, y luego poner en marcha el motor a voltaje nominal, si es posible.

Fotografías del este proceso:



Bobinado que sufrió exceso de temperatura



Motor con bobinas quemadas

Recomendación:

Utilizar una hoja o ficha técnica como la presentada en anexo A y B, en las cuales se recopila información vital del estado en el cual el motor se encuentra, tanto en aspectos eléctricos como mecánicos y así realizar una reparación enfocada a daños específicos.

¿Qué tipo de evaluación se hace al hierro/núcleo del motor?

R/ Se realiza una inspección visual, con el objetivo de determinar el estado de las ranuras y chapas del estator, es decir que el núcleo no esté deteriorado. En cuando al rotor, se verifica que no estén abiertas las barras de la estructura jaula de ardilla.

En ocasiones se realiza un diagnostico escrito, el cual incluye fotografías para sustentar la falla.

Sugerencia según norma IEEE 1068.

Según IEEE 1068 secc. 4.2.2. Con respecto a la evaluación que se hace al hierro/núcleo del motor en el literal e) IV, especifica hacerle prueba de perdidas en el núcleo.

Fotografías que muestran las condiciones de algunos núcleos:



Rotor



Daños muy graves en el estator



Verificación del estado de los anillos del rotor jaula de ardilla



Recomendación:

Realizar prueba de perdidas en el núcleo, determinando así el estado en el que se encuentre y posible reparación según lo requiera. Además de una inspección minuciosa de aislamiento interlaminar, barras de rotor, y todo el núcleo en general del rotor y del estator.

¿Se sigue una norma o técnica en el proceso de reparación de motores eléctricos?

R/ Se sigue un proceso pero no es en base a alguna norma o técnica existente para la reparación de motores. El procedimiento que se sigue es determinado por el taller a través de la experiencia de la persona encargada o propietario.

Fotografías que ilustran algunos procedimientos de reparación:



Extracción de las bobinas manualmente



Papel aislante para las ranuras



Estator con papel aislante en las ranuras



Moldes para las bobinas



Conos con alambre esmaltado



Haciendo las bobinas de forma artesanal



Bobinadora artesanal que tiene un dispositivo que cuenta las vueltas.



Montando las bobinas



Bobinado terminado

Recomendación:

Seguir los procedimientos establecidos por **IEEE Std. 1068**, para garantizar procesos óptimos de reparación y disminuir el impacto en la eficiencia eléctrica de los motores que son sometidos a recombinación.

¿Qué procedimiento usan para extraer las bobinas?

R/ Se cortan las bobinas por un extremo con un cincel y se extraen a golpes con un instrumento artesanal hecho de metal.

En otras ocasiones se utiliza un químico (thinner), temperatura y luego se corta la bobina con una sierra, para poder extraerla manualmente hilo a hilo con tenaza o a golpes con instrumentos artesanales.

Sugerencia según norma IEEE 1068.

Según IEEE 1068 secc. 6.1.2 Con respecto al procedimiento para extraer las bobinas se refiere a los siguientes tres métodos:

- I. **Sección 6.1.2.1 (calentamiento en horno) dice:** Algunos tipos de aislamiento interlaminar son severamente dañados por la exposición de las laminaciones a temperaturas arriba de 650°F (343°C) durante este proceso de horneado antes de rebobinar. Las pruebas muestran que esto puede resultar en incremento de las pérdidas del núcleo (con una correspondiente reducción en la eficiencia) o sobre calentamientos de los nuevos bobinados después de instalados o ambos.
Manteniendo la temperatura del horno abajo de 650°F (343°C). No necesariamente reducirá los daños. La temperatura de los laminados no necesariamente es la misma. Los controles de temperatura de un horno convencional son a menudo insuficientes para mantener los límites de seguridad. Además, apagar la fuente de calor, no necesariamente limita la temperatura del núcleo a un valor seguro. Algunos aisladores de epoxi, por ejemplo, emitirán cantidades grandes de calor (aún a falta de oxígeno) hasta que se queme todo el aislamiento, aun si los quemadores del horno han sido apagados.
A sido demostrado que aun con el horno puesto a 650°F (343°C), la temperatura del hierro puede exceder los 800°F (426°C). El uso de una termocupla empotrada o resistencia detectora de temperatura (RTD) es recomendada para monitorear la temperatura actual del hierro. Es preferible un registro apropiado de calibración de la temperatura del horno y motor. La temperatura del horno debe ser capaz de controlarse automáticamente.
Por consiguiente el calentamiento por horno es solo recomendado si la temperatura del núcleo no excede 650°F (343°C). Con el uso de agua o inyección de vapor en el horno se

puede realizar la rápida supresión de las llamas provenientes del calentamiento del aislamiento.

Nota: el uso de antorchas manuales o flama directa no es recomendado.

II. **Sección 6.1.2.2 (bombardeo de agua) dice:** Cuando el procedimiento usado para remover el aislamiento es el bombardeo de agua, se debe observar lo siguiente.

Debe tenerse excesivo cuidado al dirigir el chorro de agua para no forzar las laminaciones y no se produzca humedad. En conjunto con esto los motores no deben ser dejados de noche y después del bombardeo con agua sin remover las bobinas y comenzar alguna forma de secado artificial en baja temperatura (menos de 500°F (260°C)). Cualquier solución de limpieza agregada al agua debe ser compatible con los materiales usados en la construcción del motor. El usuario y el reparador deben ser conscientes que hay peligros de seguridad al usar este método, y se deben tomar las precauciones apropiadas.

III. **Sección 6.1.2.3 (extracción por método mecánico) dice:** Usando técnicas mecánicas de extracción, debe tenerse cuidado para no causar separación de las laminaciones cuando se tire de las bobinas. Cuando es usado calor para suavizar el aislamiento (como lo indica el método de calentamiento en horno) no se debe permitir que la flama dañe las laminaciones.

Fotografías que muestran el proceso de extracción de bobinas en los talleres encuestados:



Extracción manual de bobinas



Herramientas para extraerlas bobinas



Instrumento artesanal para extraer las bobinas



Aplicación de llama directa



Resultado de la aplicación de una llama directa para extraer las bobinas

Recomendación:

Si no es posible llevar a cabo requerimientos estandarizados, retirar las bobinas procurando no ocasionar daños de ninguna índole a las ranuras y núcleo.

Ante todo evitar aplicar fuego directo a las ranuras puesto que se daña gravemente el hierro, esto solo es posible en procesos en los cuales se puede controlar la temperatura a niveles inferiores a 343°C.

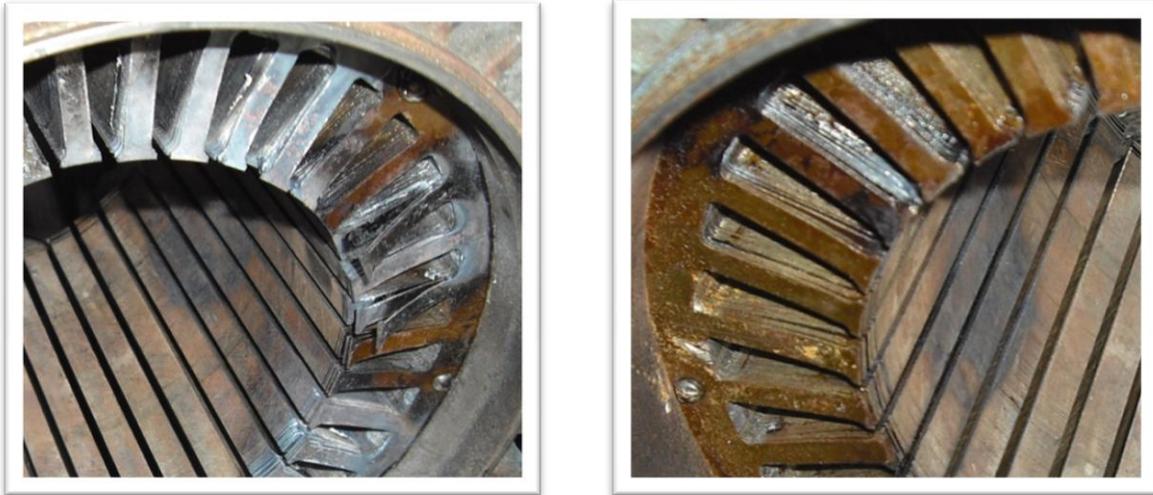
El uso de químicos también es posible, pero con sustancias compatibles con la fabricación del motor y que no dañe el metal, desgastándolo y se produzca corrosión.

¿Se utiliza altas temperaturas para quitar las bobinas?

R/Se aplica dependiendo del estado en que se encuentren las bobinas o cuando las bobinas tienen una resina epoxi, se aplica una llama directa a temperatura entre 98°C y 200°C aun cuando se tiene el conocimiento que esto daña el núcleo.

Algunas veces se utiliza solventes (thinner) para ablandar el aislamiento y facilitar la extracción.

Fotografías que muestran el efecto al usar una llama directa:



Daño severo por la aplicación directa de altas temperaturas en el estator.

Recomendación:

Según IEEE 1068 secc. 6.1.2.1, no es recomendable la aplicación de altas temperaturas (superiores a 343°C.), tampoco el aplicar llama directa sobre el núcleo, esto daña el hierro, perdiendo sus características magnéticas.

¿Qué pruebas son realizadas después de la reparación?

R/

- a) Aislamiento.
- b) Resistencia óhmica.
- c) Velocidad.
- d) Vibración.
- e) Medición en vacío.

Otros: voltaje por fase, amperaje, verificar temperatura de núcleo, eje, tapaderas y baleros. La prueba de vibración se realiza solo escuchando el motor.

Sugerencia según norma IEEE 1068.

Según IEEE 1068 secc. 7.1 Con respecto a las pruebas que se deben realizar después de la reparación de un motor dice lo siguiente:

Después de la reparación se debe proporcionar un reporte escrito que incluya lo siguiente:

- a) Condición del motor cuando fue recibido.
- b) Una descripción detallada del trabajo realizado.
- c) Condición del motor (eléctrico y mecánico) cuando es entregado al cliente.
- d) Datos de pruebas realizadas para demostrar que el motor fue reparado adecuadamente.
- e) Fotografías que se estime necesario para claridad.

El reporte de reparación del motor (anexo B) pretende demostrar la información mínima que debe ser presentada, este reporte debe ser protegido por un sobre resistente al agua, este debe ser entregado junto al motor.

Foto de instrumento utilizado para algunas mediciones:



Medidor (resistencia de aislamiento)



Bobinado listo para mediciones

Recomendación:

Presentar un reporte escrito según IEEE 1068 secc. 7.1 en el cual se detallen los aspectos como la condición en que el motor fue recibido y una descripción detallada de la reparación a la que fue sometido. A demás especificar pruebas realizadas luego de repararlo, sustentando todo esto con fotografías.

¿Qué garantías se dan respecto a la reparación?

R/La garantía solo aplica para motores grandes, entre 30 y 90 días, en fallas como (potencia, velocidad, conexión, aislamiento). Esto si el cliente tiene las debidas protecciones y una constante revisión del sistema eléctrico.

Recomendación:

Dar garantía en cuanto a la calidad de los materiales que se utilizan para la reparación del motor. De esta manera obtener un mayor prestigio en las reparaciones y del taller.

¿Dónde se ha capacitado el personal que realiza los rebobinados?

R/Todo el personal ha aprendido empíricamente, es un proceso en el cual la persona de mayor experiencia le transmite conocimientos a otra, existen algunos que cursaron bachillerato industrial, pero el aprendizaje siempre es empírico. No se tiene una base teórica o capacitación en el proceso de rebobinado.

Recomendación:

Tratar de obtener algún tipo de capacitación técnica ya sea individual o formar parte de algún gremio de talleres o entidades relacionadas al tema, donde se discutan temas relacionados a mejorar las prácticas de reparación y acuerdos de estandarización de procesos de reparación y equipamiento mínimo.

¿Qué rango de capacidad de motores reparan?

R/El rango de capacidad de motores que se reparan es desde fracciones de Hp hasta 400 Hp. Existen trabajos de capacidades mayores, pero no es en todos los talleres.

RECOMENDACIONES PARA LOS TALLERES DE REPARACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS

- 1) En cuanto al proceso de recepción de los motores a reparar **según IEEE 1068**, es necesario que se lleve un control estricto de los datos del motor en cuestión, dichos datos deben ser tomados de la placa, además de datos técnicos y mecánicos. Se debe hacer una inspección del estado en que el motor es llevado al taller y hacer un reporte escrito en el cual se determine la falla.

De ser posible tomar fotografías en las cuales se presente información de la falla o fallas encontradas.

De preferencia este control se debería llevar en una computadora en la cual se ingresen los datos y que sea capaz de imprimir una hoja con todos los datos para ser presentados al cliente, de esta manera generar un historial de los motores que han sido reparados en el taller, facilitando el trabajo cuando un motor es reparado mas de una ocasión. Puede utilizarse el formato que se presenta en el anexo A y B.

- 2) Utilizar una hoja o ficha técnica como la presentada en anexo A y B, en las cuales se recopila información vital del estado en el cual el motor se encuentra, tanto en aspectos eléctricos como mecánicos y así realizar una reparación enfocada a daños específicos. Debe realizarse una serie de pruebas al motor mediante las cuales se determine las posibles fallas y así proceder a la reparación.

Entre las pruebas que deben realizarse según **IEEE 1068 secc. 4.2.2. Tenemos**

- a) Verificar que el eje y los baleros no estén dañados.
- b) Verificar que los baleros estén lubricados.
- c) Se debe realizar la prueba de resistencia de aislamiento. Ver la secc. 4.3.1 Continuidad en las bobinas.
- d) Verificar el estado e instalación de las escobillas.
- e) Prueba de pérdida en el núcleo.
- f) Índice de polarización (donde sea apropiado).
- g) Prueba de arranque (donde sea apropiado).

Es necesario invertir en equipos que garanticen que estas pruebas se realizan de la manera adecuada, este equipamiento debe incluir:

- Amperímetros.
- Medidores de Potencia.
- Fuente de Voltaje Regulable AC trifásica y DC.
- Medidor de Resistencia de Aislamiento
- Equipo para medir Vibración.
- Equipo para hacer pruebas de perdidas en el núcleo.

- Torno.
 - Extractor Hidráulico de Baleros.
 - Horno con control automático de temperatura.
 - Así como materiales con asilamiento F o H, existencia de variedad en calibres de la mejor calidad.
- 3) Realizar prueba de perdidas en el núcleo. Además de una inspección minuciosa de ranuras, rotor, y todo el núcleo en general, verificar que este en condiciones aptas para seguir en operación. Estas pruebas pueden realizarse en un banco de prueba de motores.

- 4) El apearse a la **norma IEEE 1068**, garantiza que el proceso de reparación es el adecuado para lograr en lo posible una baja reducción en el rendimiento de un motor. Pero existe la necesidad de invertir en equipo que ayude a realizar esta tarea, esto es desde computadoras, medidores de resistencia de aislante, herramientas adecuadas, medidores de vibración, diferentes calibres de alambre, extractor de baleros, bobinadoras, hornos, y algo muy importante como es los materiales de buena calidad con que se rapara los motores.

En cierta manera los métodos fuera de una norma funcionan, pero existe una caída mayor en la eficiencia de la maquina.

- 5) Uno de los pasos más delicados en la rebobinada de motores es la extracción de las bobinas, en este paso de debe tener mucho cuidado de no dañar el núcleo. Un procedimiento inadecuado ocasionaría daños notorios al núcleo y ranuras (con las consecuentes perdidas por corrientes de Eddy) disminuyendo la eficiencia o generando calentamientos excesivos en el hierro. Una práctica común es la utilización de temperatura pero esta tiene mucho riesgo de dañarlo, aun más, si se le aplica una llama directa, ya que esto ocasiona que el hierro pierda sus características magnéticas. Otro caso es el uso de solventes para ablandar las bobinas, pero esto también puede dañar el metal, si el solvente no es compatible con las especificaciones del fabricante, ocasionando que las chapas se separen y corroan.

Es por eso que se debe seguir uno de los métodos que propone **IEEE 1068 secc. 6.1.2** la cual establece tres métodos:

1. **Sección 6.1.2.1 (calentamiento en horno)**
2. **Sección 6.1.2.2 (bombardeo de agua)**
3. **Sección 6.1.2.3 (extracción por método mecánico)**

La utilización del método 1 y 2 implica una mayor inversión en equipo, puesto que son procesos en los cuales hay que tener control de ciertos parámetros para obtener los resultados deseados y que el motor no sea afectado en una forma drástica.

En nuestro medio el proceso que se hace factible es el método 3. Usando técnicas mecánicas de extracción, debe tenerse cuidado para no causar separación de las laminaciones cuando se tire de las bobinas. Cuando es usado calor para suavizar el aislamiento, no se debe permitir que la flama incida directamente en las laminaciones.

El proceso de extracción de Bobinas por medio del uso de un horno (método 1) es recomendable, siempre que la temperatura del horno se controle hasta un máximo de 343°C y se disponga de un sistema de inyección de agua como método de enfriamiento cuando la temperatura exceda el límite permitido.

- 6) La aplicación de altas temperaturas de una forma directa en secciones del núcleo para extraer las bobinas, daña gravemente la estructura de aislamiento del empaquetado de chapas y ocasiona pérdida de las propiedades magnéticas, con lo cual se está afectando al motor en su rendimiento, puesto que se generan mucho más pérdidas por corriente de Eddy.

- 7) Con el objetivo de tener claridad y mejor control de las reparaciones se debe presentar un reporte escrito, en el cual se detalle, el tipo de reparación a la cual fue sometido el motor, además las condiciones eléctricas y mecánicas en que se devuelve, datos de pruebas realizadas después de la reparación, todo esto se debe sustentar con la presentación de fotografías.
El reporte de reparación del motor (anexo B) pretende demostrar la información mínima que debe ser presentada, este reporte debe ser protegido por un sobre resistente al agua adjunto al motor cuando es entregado.

- 8) Capacitar al personal en temas que cubran aspectos de rebobinado de motores, aspectos eléctricos y mecánicos. Con esto se obtendría un menor índice de reducción de eficiencia en el motor que se repare, sirviendo esto de garantía al taller, posicionándolo competitivamente. Se tendrían mayores oportunidades de ganar licitaciones de reparaciones y/o optar a representar a una marca de algún fabricante de motores interesado en brindar sus servicios de garantía a sus clientes en nuestro país. Además si la mayoría de talleres siguiera estas recomendaciones se podría reducir el consumo de energía a nivel global reduciendo el impacto ambiental.

MEDICIONES A MOTORES ELECTRICOS

METODO ESTADISTICO UTILIZADO

El Método estadístico Utilizado para amparar las mediciones y la evaluación de Eficiencia a los Motores Rebobinados es: EL MÉTODO ESTRATIFICADO PROPORCIONAL PARA POBLACIONES FINITAS. Este método estadístico se aplica a aquellas poblaciones finitas en las que se divide la muestra total en estratos donde se espera un comportamiento homogéneo con respecto a la variable de estudio. Por lo tanto la elección de este método obedece a que para efectuar las mediciones fue necesario dividir la población de motores rebobinados en estratos en función de su capacidad.

POBLACIÓN DE ESTUDIO:

El desarrollo del Estudio de evaluación de la eficiencia a motores rebobinados fue a una población finita de la Entidad Estatal de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) de 35 motores de capacidades superiores e iguales a 75HP, así un total de 6 estratos fue obtenido en las capacidades de 75,100,125,150,200 y 250 HP.

Tamaño de la Muestra:

Para la estimación del tamaño de la muestra se usó una probabilidad de ocurrencia de 0.95 con un nivel de confianza de 95%(valor típico y recomendado, con valores correspondientes a $\alpha=0.05$ y $Z=1.96$) con un error del 3%, por lo que el tamaño de la muestra se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

MUESTREO ALEATORIO ESTRATIFICADO TAMAÑO DE LA MUESTRA: PROPORCIÓN

Asignación proporcional:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^K N_i p_i q_i}{N \sigma_{\hat{p}}^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K N_i p_i q_i}; \text{ con } \sigma_{\hat{p}}^2 = \frac{\varepsilon^2}{z_{\alpha/2}^2}$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra total.

N = Tamaño de la población,

N_i = Tamaño del Estrato i,

$P_i = 0.95,$
 $q_i = 0.05,$
 $\varepsilon = 0.03,$
 $\alpha = 0.05,$
 $Z = 1.96$

Obteniéndose la siguiente tabla resume para el tamaño de la muestra total:

p=	0.95			
e=	0.03		$\sigma^2=$	0.00023428
n=	30			

La siguiente tabla especifica el tamaño de la muestra por estrato proporcional al tamaño de la muestra total:

Total	Capacidad	Muestra de cada Estrato
7	motores de 75 HP	6
4	motores de 100 HP	3
5	motores de 125 HP	4
6	motores de 150 HP	5
10	motores de 200 HP	9
3	motores de 250 HP	3
35		30

De esta manera se obtuvo el siguiente listado de 30 estaciones a medir:

CORRELATIVO	PLANTA	HP	EQUIPO
1	SIERRA MORENA 1	75	2
2	SIERRA MORENA 1	75	1
3	MONTES 4	75	1
4	CIRCULO ESTUDIANTIL	75	1
5	SAN PATRICIO	75	3
6	CALIFORNIA	75	1
7	RIO URBINA	100	1
8	REBOMBEO EL MILAGRO	100	1
9	POZO 9 NEJAPA	100	1
10	CUAYA 2B	100	1
11	MARGARITAS 3	125	1
12	ZACAMIL 2	125	1
13	ALTA VISTA 2	150	9
14	SAN MIGUEL MEJICANOS	150	1
15	ALTA VISTA 2	150	4
16	CASTAÑO 2	150	1
17	ALTAMIRA POZO 3	150	1
18	GULUCHAPA 1	150	4
19	CANCHA	200	4
20	JOYA GRANDE	200	2
21	EL COLEGIO	200	1
22	CUMBRES DE CUSCATLAN 1	200	1
23	ESTADIO 1	200	1
24	SANTA LUCIA	200	3
25	CAFETAL	200	2
26	SANTA LUCIA	200	12
27	JOYA GRANDE	200	1
28	GULUCHAPA 1	250	1
29	JOYA GRANDE	250	4
30	JOYA GRANDE	250	3

MÉTODO DE MEDICIÓN:

El método de medición utilizado es el Método del Deslizamiento, descrito en IEEE Std. 739-1995 sección 6.16, auxiliándose con IEEE Std. 112-1996 y NEMA MG-1 rev. 2004.

El método del deslizamiento descrito en IEEE Std. 739, es un procedimiento mediante el cual es posible la evaluación del parámetro eficiencia de un motor de una manera rápida y con una aceptable aproximación, recomendado cuando no es factible desmontar el motor, ya que implicaría que se dejaría de prestar algún servicio o se tendrían pérdidas económicas de producción, debido al tiempo de suspensión que conlleva la evaluación si se efectúa con otros métodos, como los que se describen en IEEE Std. 112-1996^[1].

El método del Deslizamiento consiste en medir la velocidad de operación en carga real en el sitio donde la maquina este funcionando, de esa manera, obtener el deslizamiento de operación y dividirlo con el deslizamiento de plena carga, especificado en el dato de placa del motor, y así determinar el porcentaje de carga de operación del motor y conocer la potencia de salida desarrollada en el eje del motor(ver grafica 1) basándose en el principio de que el deslizamiento es lineal desde el 10% al 110% de carga^[2].

Apoyándose de un equipo de medición de potencia, voltaje y corriente a la entrada del motor es posible conocer la eficiencia del motor dividiendo la potencia activa de salida entre la potencia activa de entrada. Estos procedimientos se deben hacer en condiciones de frecuencia y Voltaje Nominal, y que el desbalance de voltaje no exceda el 0.5%(según IEEE 112 sección 4.1.5) a temperatura ambiente de 25°C.

[1] Los métodos descritos en IEEE Std. 112-1996 son más exactos y recomendados que el del deslizamiento, pero tienen el inconveniente de que la maquina tiene que ser desmontada y trasladada hasta el laboratorio para efectuar los procedimientos de evaluación, según se requiera estos métodos pueden ser A, B, C, D, E y F.

[2] Se manejan como validos los datos de eficiencia que se obtengan en motores cuyas cargas de trabajo se encuentren superiores a 55% de la nominal.

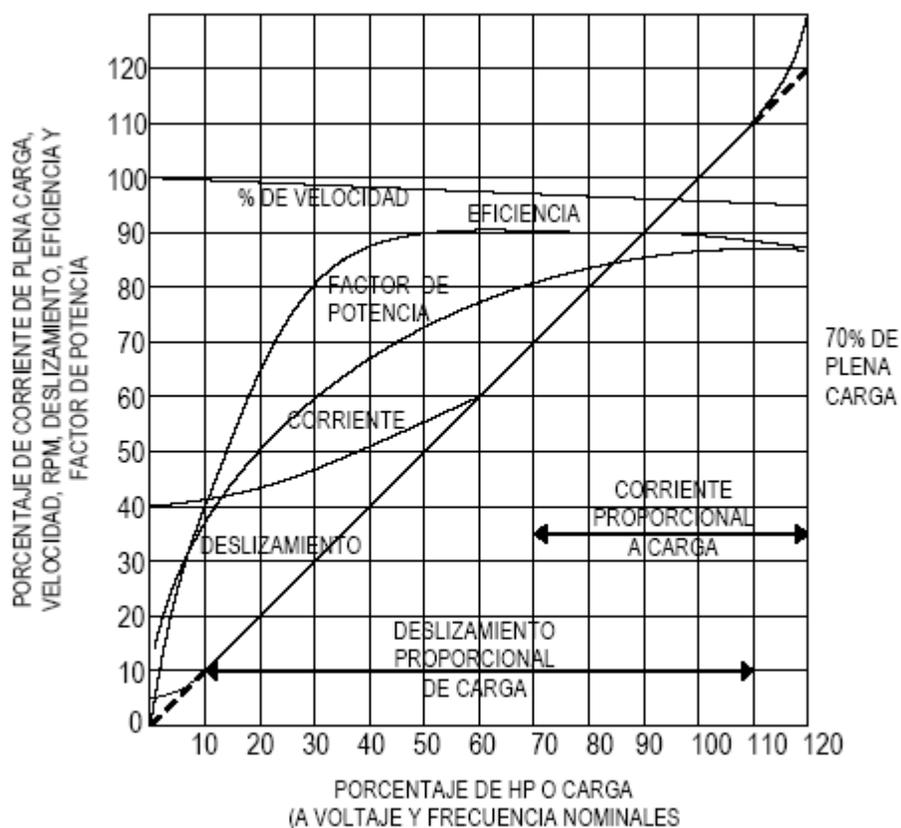


Figura 8. Curva Típica para Motores de Inducción de Diseño B

Para ilustrar la grafica de la figura 8 se estudia el siguiente ejemplo:

Un motor de 10HP de 4 polos, velocidad a plena carga de 1700 rpm. Trabajando a una velocidad de 1760rpm ¿Cuál es la potencia real de salida?

Solución:

Deslizamiento de Plena Carga = $1800 - 1700 \text{ rpm} = 100 \text{ rpm} = 100\%$ de plena carga.

Deslizamiento de Operación = $1800 - 1760 \text{ rpm} = 40 \text{ rpm}$.

Carga Real = $\text{Deslizamiento de Operación} / \text{Deslizamiento plena carga} = 40 / 100 = 0.40$

Carga de Salida = $0.40 * 10 \text{ HP} = 4 \text{ HP}$.

CORRECCIONES AL DESLIZAMIENTO PLENA CARGA DEBIDO A CAMBIOS EN EL VOLTAJE Y TEMPERATURA AMBIENTE

Cuando el motor a evaluar se encuentra operando a un voltaje diferente del nominal, superior o inferior al nominal, el motor recibe un impacto en el deslizamiento de plena carga en un factor igual al cuadrado del inverso de la proporción de voltaje con respecto al nominal^[3], de esa manera un aumento en variación de voltaje implica una disminución en deslizamiento de plena carga, y una disminución en el voltaje de alimentación con respecto al nominal se traduce a un aumento del deslizamiento de plena carga.

Ejemplo:

Un motor con voltaje de placa nominal de 460V operando a 437V (5% de reducción de voltaje) experimentaría un aumento en el deslizamiento de plena carga como se calcula a continuación:

$$\frac{1}{[0.95]^2} * 100\% = 110.8\% \text{ incremento en el deslizamiento plena carga de dato de placa.}$$

De manera que un aumento del 5% de voltaje de trabajo (483V) reduciría el valor del deslizamiento de plena carga en:

$$\frac{1}{[1.05]^2} * 100\% = 90.7\% \text{ de decremento en el deslizamiento plena carga de dato de placa.}$$

Por lo que la correspondiente corrección debido a variación de voltaje se debe hacer cuando se calcule el deslizamiento de plena carga cuando sea requerido.

Otra corrección que hay que hacer para determinar el deslizamiento de plena carga es cuando el motor se encuentra trabajando fuera de la temperatura ambiente de 25°C. Ya que un incremento en la temperatura ambiente conduce a un incremento de 0.342% a 0.380% en el deslizamiento de plena carga por cada grado centígrado superior a la de 25°C.

La corrección se debe hacer por tanto cuando sea requerido. Así, un motor operando a una temperatura ambiente de 45°C incrementaría su deslizamiento de plena carga como sigue:

$$\text{°C de Incremento} = 45 - 25 = 20\text{°C.}$$

$$\text{\% de Incremento} = 20\text{°C} * 0.342\%/^{\circ}\text{C} = 6.84\% \text{ de Incremento.}$$

$$\text{\% de Incremento de desl. Plena carga en relación al dato de placa} = 106.84\%.$$

[3] Ver tabla de variaciones debido a cambios en el voltaje en Anexo, consultar tabla 6-6 de IEEE 739-1995.

PROCESO DE MEDICIÓN

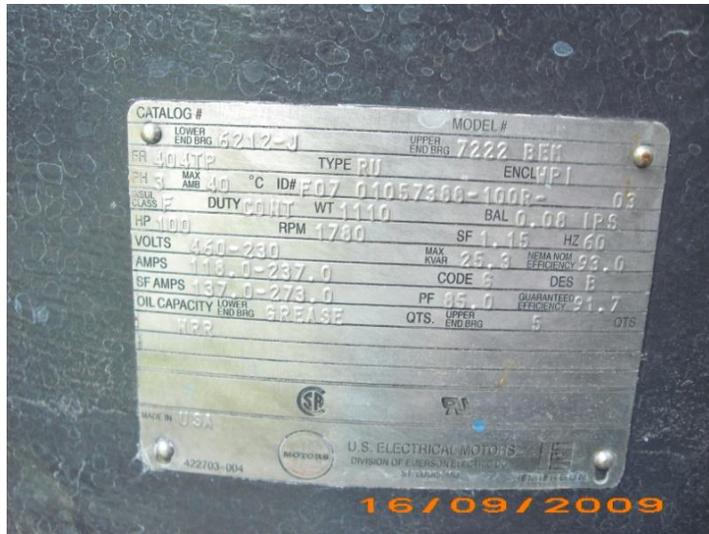
El proceso de medición consistió en visitas a las diferentes estaciones de bombeo en compañía de personal de ANDA, con el propósito de identificar los motores rebobinados para efectuar la correspondiente aplicación del método. Los pasos a seguir para la recopilación de datos en cada motor fue la siguiente:

- 1) Medición de parámetros de entrada al motor (potencia, voltaje corriente, etc.) utilizando el DRANETZ 4400. En este paso se procedió a conectar el equipo a la entrada del motor y grabar datos en un periodo promedio de 15 minutos por motor, la medición se efectúa aguas abajo del capacitor de corrección de factor de potencia en el caso de que lo hubiera.



FOTOGRAFÍA QUE MUESTRA EL EQUIPO DRANETZ 4400 MIDIENDO EN UN TABLERO DE CONTROL DE UNA BOMBA DE AGUA.

- 2) Obtención de Datos de Placa, en este paso se procedió a la recopilación de datos en el formulario sugerido por Std. IEEE 739 para motores de inducción.



FOTOGRAFÍA QUE MUESTRA UNA PLACA DE MOTOR DE UNA BOMBA.

3) Registro Fotográfico por cada motor.



FOTOGRAFÍAS QUE MUESTRAN A LA IZQ. UNA ESTACION DE BOMBAS EN PARALELO. A LA DER. LOS
TABLEROS DE CONTROL PARA CADA BOMBA.

4) Medición de Temperatura Ambiente y del estator del motor utilizando un Termómetro Óptico digital FLUKE.



TERMÓMETRO OPTICO FLUKE.

- 5) Medición de velocidad de operación en el eje del motor utilizando un Tacómetro óptico Estroboscópico SKF TMOT6.



FOTOGRAFÍA QUE MUESTRA LA LECTURA DE RPM EN EL EJE DE UN MOTOR.



FOTOGRAFÍA QUE MUESTRA LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN EN UNA BOMBA DE AGUA.

RESULTADO DE LAS MEDICIONES

Posterior a la recopilación de datos en las mediciones a los 30 motores se procede a la descarga, en hojas de cálculo de Excel de Microsoft Office, de cada archivo registrado por el DRANETZ, así como la elaboración de una plantilla, tomada de IEEE Std. 739, en una hoja de cálculo para la presentación de los datos correspondiente a cada motor resaltando la eficiencia obtenida por el método del deslizamiento en cada motor, dicha plantilla toma en cuenta correcciones debido a variaciones de voltaje y temperatura ambiente según lo especificado por Std. IEEE 739.

A continuación se presenta un estudio estadístico de la Reducción de eficiencia de los motores medidos debido a un número estimado de rebobinados. Para reflejar mejor los resultados y en concordancia con el método estadístico utilizado (Método de estratificación proporcional para poblaciones finitas) se manejan los datos particularizándolos para cada estrato correspondiente a cada capacidad.

Las consideraciones tomadas en cuenta para el proceso de comparación y estimación de la reducción de eficiencia por cada rebobinado para un motor dado de cualquier estrato son establecidas por las tablas 12-10 y 12-11 de la NEMA MG-1 rev. 2004 ^[4](ver anexos), el valor de eficiencia estampado en la placa del motor, así como la información proporcionada por algún historial que contabilice el número de veces que la maquina ha sido reparada.

Toda la información necesaria es reunida en el formulario tomado de IEEE Std. 739 y modificada para ingresar datos complementarios como se puede apreciar en la figura siguiente.

[4] En dichas tablas se presentan valores nominales y mínimos en cuanto a la eficiencia de los motores que en el presente estudio se caracterizan por formar parte de las categorías de eficiencia PRE-EPAct y Energy efficient en su mayoría.

HOJA DE DATOS DE PRUEBA PARA MOTORES DE INDUCCION			
Fecha:	23/09/2009	Nombre de la Planta:	San Patricio
Compañía:	ANDA	Departamento:	S.S.
Aplicación:	Rebombeo	# de fase y Hz:	3/60 Hz
# Equipo:	3	Tamaño del cuadro:	L364TP16
Marca:	General Electric	Clase de aislamiento:	F
Modelo:	5ke364dt5008	Eficiencia nominal(%):	93
# de serie:	30039527	Tipo de torque NEMA:	A
Factor de servicio:	1.15	Incremento de Temp:	-
Tipo de caja:	WPI	VALORES CALCULADOS	
* HP plena carga:	75	Voltios promedio:	477.43
* Voltios:	460	¹ Desvalance de Voltaje (%):	0.22
* Amperios:	90	² Variacion de Voltaje(%):	3.79
* rpm plena carga:	3560	³ Desl. Plena Carga Correg. por Voltaje(rpm):	37.13
* Velocidad síncrona(rpm):	3600	⁴ Desl. Plena Carga Corregido por Temp(rpm)	40.70
# polos:	2	Desl. Plena Carga Corregido Total(rpm):	37.78
Des. Plena carga(rpm):	40	Deslizamiento de operación(rpm):	38.00
VALORES MEDIDOS		Porcentaje de carga(%):	100.58
* Voltios AB	477.8	HP de salida:	75.44
* Voltios BC	476.4	KW de salida:	56.28
* Voltios CA	478.1	% de eficiencia:	85.92
* Amperios promedio:	94.1	KVA de entrada:	77.81
* KW promedio:	65.5	Factor de Potencia:	0.84
* rpm de operación:	3562	Perdidas en KW:	9.22
* temp. Ambiente(°C):	30.1	\$/año de operación:	80,860.54
* temp.Estator(°C):	59.1	\$/año de pérdidas:	11,387.04
# rebobinados posibles:	2	Ahorros de energía anuales US\$:	7,031.10
Energía en Punta US\$/KWh:	0.150913	debido a cambio de un motor de (HP): de	75
Energía en Resto US\$/KWh:	0.151689	alta eficiencia.	
Energía en valle US\$/KWh:	0.117113	Eficiencia del motor reemplazo(%):	94.1
Hrs. De Operac. en Punta anual:	1800	⁵ Costo de Reemplazo de Motor US\$:	7,000.00
Hrs. De Operac. en Resto anual:	4680	Retorno simple (años):	1.00
Hrs. De Operac. en Valle anual:	2160		
Observación:			

Nomenclatura:

*

Datos a Ingresar

Datos Calculados

Datos Obligatorios a Ingresar

¹ El Desvalance de Voltaje recomendado debe ser menor o igual al 0.5% según IEEE 112 Sección 4.1.5.

² La Variación de Voltaje con respecto al nominal recomendado debe ser menor o igual al 10% según IEEE 112 Sección 4.1.2.

³ La Corrección por voltaje se hace según IEEE Std 739-1995. Sección 6.16 Tabla 6-6.

⁴ La Corrección por Temperatura Ambiente se hace según IEEE 739-1995. Sección 6.16.

⁵ El Costo del Reemplazo del Motor debe incluir instalación.

Hoja de Datos Tomada de IEEE Std 739-1995.

Figura 9. HOJA DE DATOS UTILIZADA PARA REGISTRAR TODA LA INFORMACIÓN REQUERIDA PARA CADA MOTOR.

Estudio de Eficiencia a Motores de 75 HP:

Tabla 5. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 75 HP.

MOTOR	% CARGA	% EFF MEDIDA	% EFF Placa Nominal	% EFF NEMA SEGÚN CARGA **	%Dism. en EFF	# De Reb. Equivalentes	%Dism. Equiv. Por cada Reb.
Montes 4 eq#1 *	44.13	76.44	91.7	90.2	13.76	3	4.6
San Patricio eq#3	100.6	85.9	93	93	7.1	2	3.6
California eq#1	82.7	83.5	91.7	91.7	8.2	2	4.1
Sierra Morena 1 eq#1	83	82.2	90.2	90.2	8	2	4.0
Sierra Morena 1 eq#2	59	71.7	93	91.7	20	4	5.0
Circulo Estudiantil *	52.6	87.1	93.6	92.4	5.3	1	5.3
Promedio							4.2

* Este equipo no cumple con los requerimientos del método de evaluación utilizado por encontrarse a una carga menor de 55% y no es tomado en cuenta para estimar la EFF promedio.

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994.

Nota: En las casillas de # de reb. Correspondiente a las filas marcadas en verde se logró encontrar datos precisos de acuerdo a un historial del número de veces que la máquina ha sido rebobinada, los demás datos del # de reb. de los motores restantes se estimaron a partir de los que sí se sabe cuántas veces fueron rebobinados.

Estudio de Eficiencia a Motores de 75 HP (continuación):

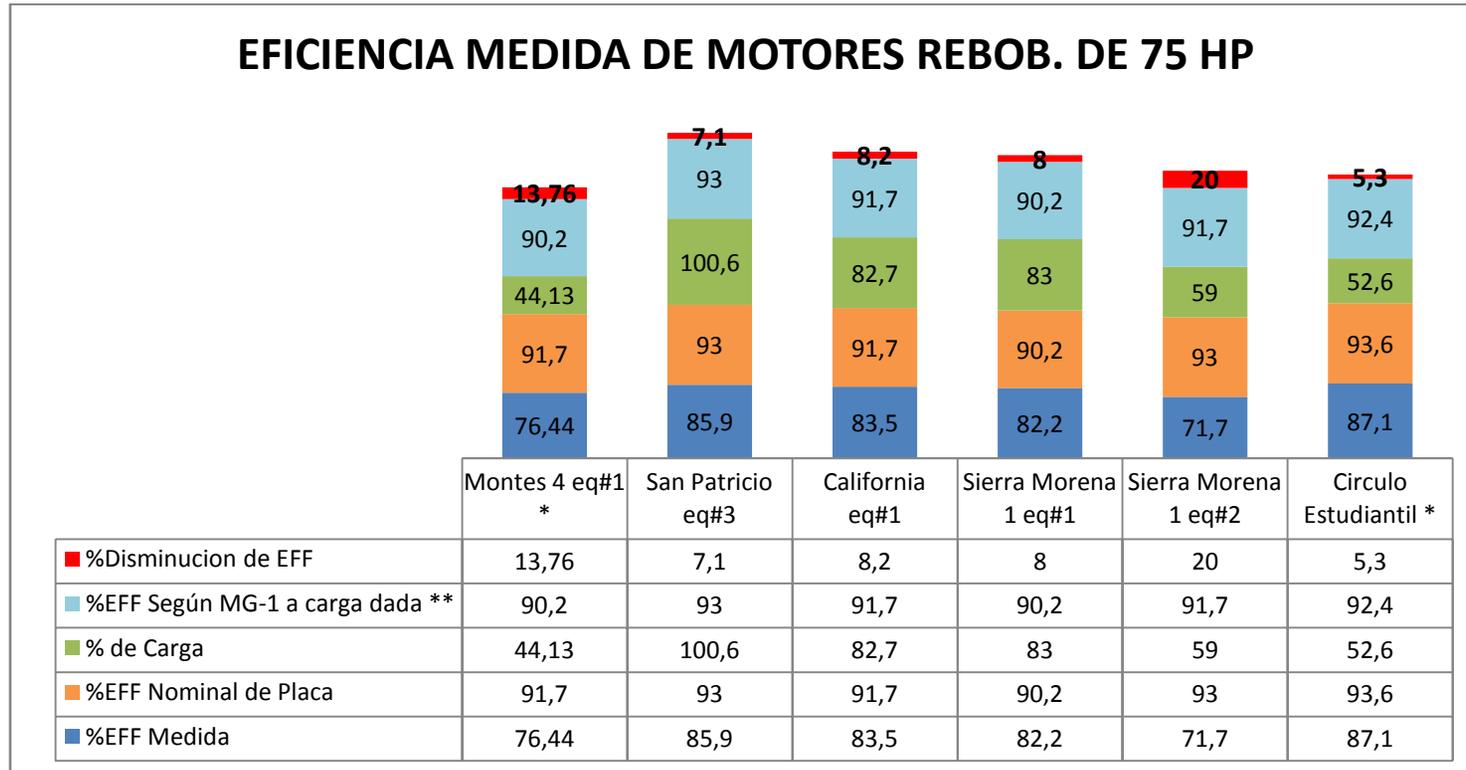


Figura 10. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 75 HP.

* Este equipo no cumple con los requerimientos del método de evaluación utilizado por encontrarse a una carga menor de 55% y no es tomado en cuenta para estimar la EFF promedio.

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994

Estudio de Eficiencia de Motores de 100 HP:

Tabla 6. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 100 HP.

MOTOR	% CARGA	% EFF MEDIDA	% EFF Placa Nominal	% EFF NEMA SEGÚN CARGA **	%Dism. en EFF	# De Reb. Equivalentes	%Dism. Equiv. Por cada Reb.
Rio Urbina eq#1 *	31.3	71.38	93	91.7	20.32	4	5.1
Pozo 9 de Nejapa *	47.27	82.97	91.7	90.2	7.23	2	3.6
Cuaya 2b	74.87	89.14	93	93	3.86	1	3.9
Rebombero El Milagro	81.7	85.32	91.7	91.7	6.38	2	3.2
Promedio							3.5

* Este equipo no cumple con los requerimientos del método de evaluación utilizado por encontrarse a una carga menor de 55% y no es tomado en cuenta para estimar la EFF promedio.

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994.

Estudio de Eficiencia de Motores de 100 HP (continuación):

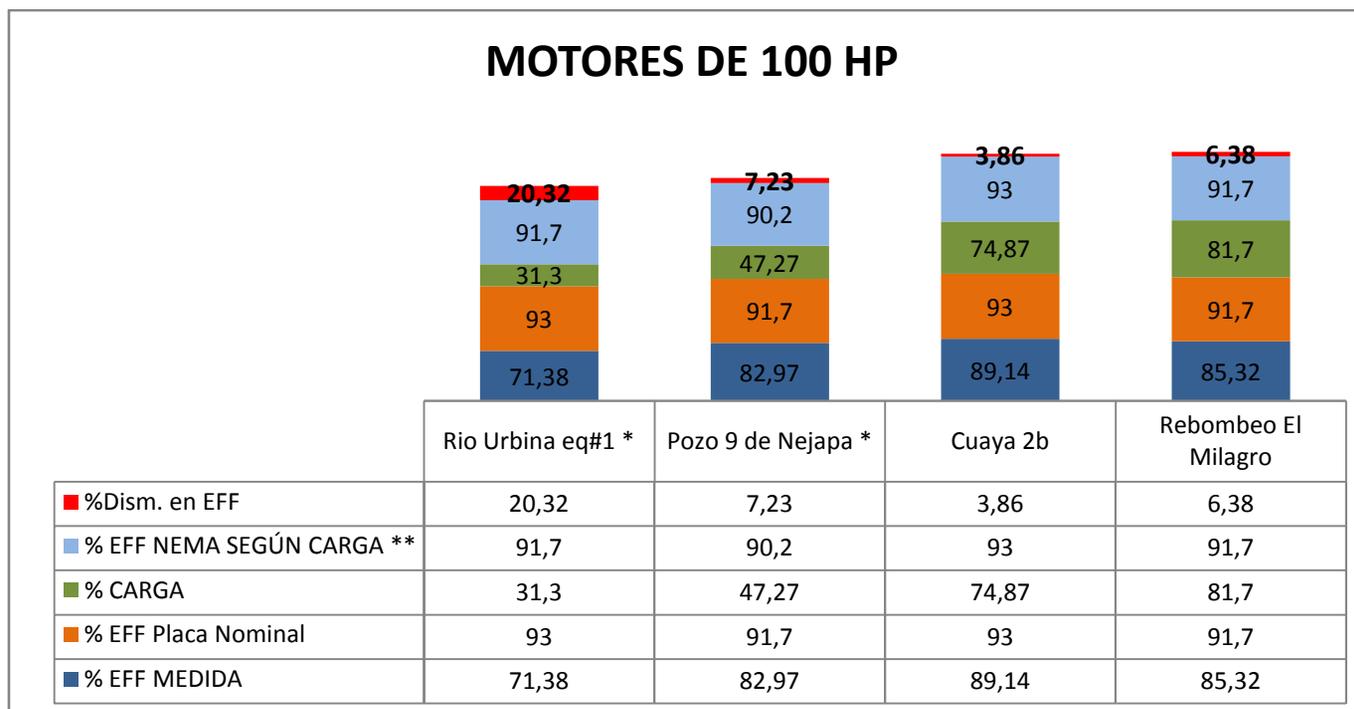


Figura 11. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 100 HP.

* Este equipo no cumple con los requerimientos del método de evaluación utilizado por encontrarse a una carga menor de 55% y no es tomado en cuenta para estimar la EFF promedio.

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994

Estudio de Eficiencia a Motores de 125 HP:

Tabla 7. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 125 HP.

MOTOR	% CARGA	% EFF MEDIDA	% EFF Placa Nominal	% EFF NEMA SEGÚN CARGA **	%Dism. en EFF	# De Reb. Equivalentes	%Dism. Equiv. Por cada Reb.
Margaritas 3	74.52	84.4	93	93	8.6	2	4.3
Zacamil 2	87.9	88.14	92.4	92.4	4.26	1	4.3
Promedio							4.28

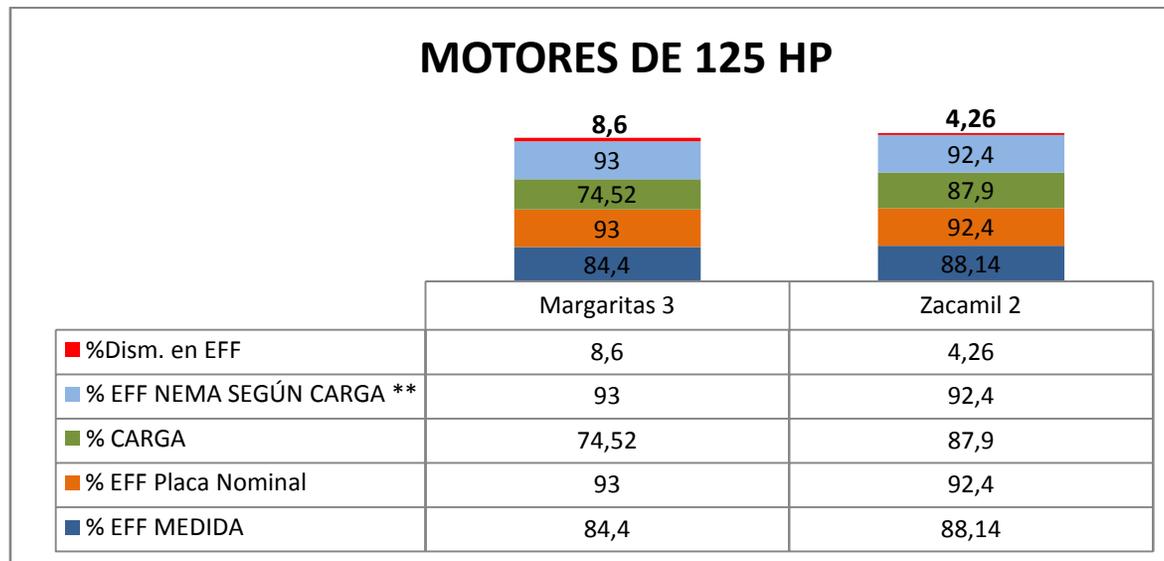


Figura 12. DE ESTUDIO DE EFICIENCIA A MOTORES DE 125HP.

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994

Estudio de Eficiencia a Motores de 150 HP:

Tabla 8. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 150 HP.

MOTOR	% CARGA	% EFF MEDIDA	% EFF Placa Nominal	% EFF NEMA SEGÚN CARGA **	%Dism. en EFF	# De Reb. Equivalentes	%Dism. Equiv. Por cada Reb.
Alta Vista 2 eq#9	58.92	85.29	-	91	5.71	2	2.9
San Miguel Mejicanos	58.53	68.65	-	91	22.35	5	4.5
Guluchapa 1 eq#4	65.84	77.28	-	91	13.72	3	4.6
Altamira Pozo3	60.1	79.25	-	91	11.75	3	3.9
Altavista 2 eq#4	61.4	74.52	92.4	91.7	17.18	4	4.3
Castaño 2	59.2	76.7	95	94.1	17.4	4	4.4
Promedio							4.1

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994

Nota: En los datos de EFF placa Nominal que aparecen con “cero” o el signo “-” significan que no presentaban dicho dato en placa.

Estudio de Eficiencia a Motores de 150 HP (continuación):

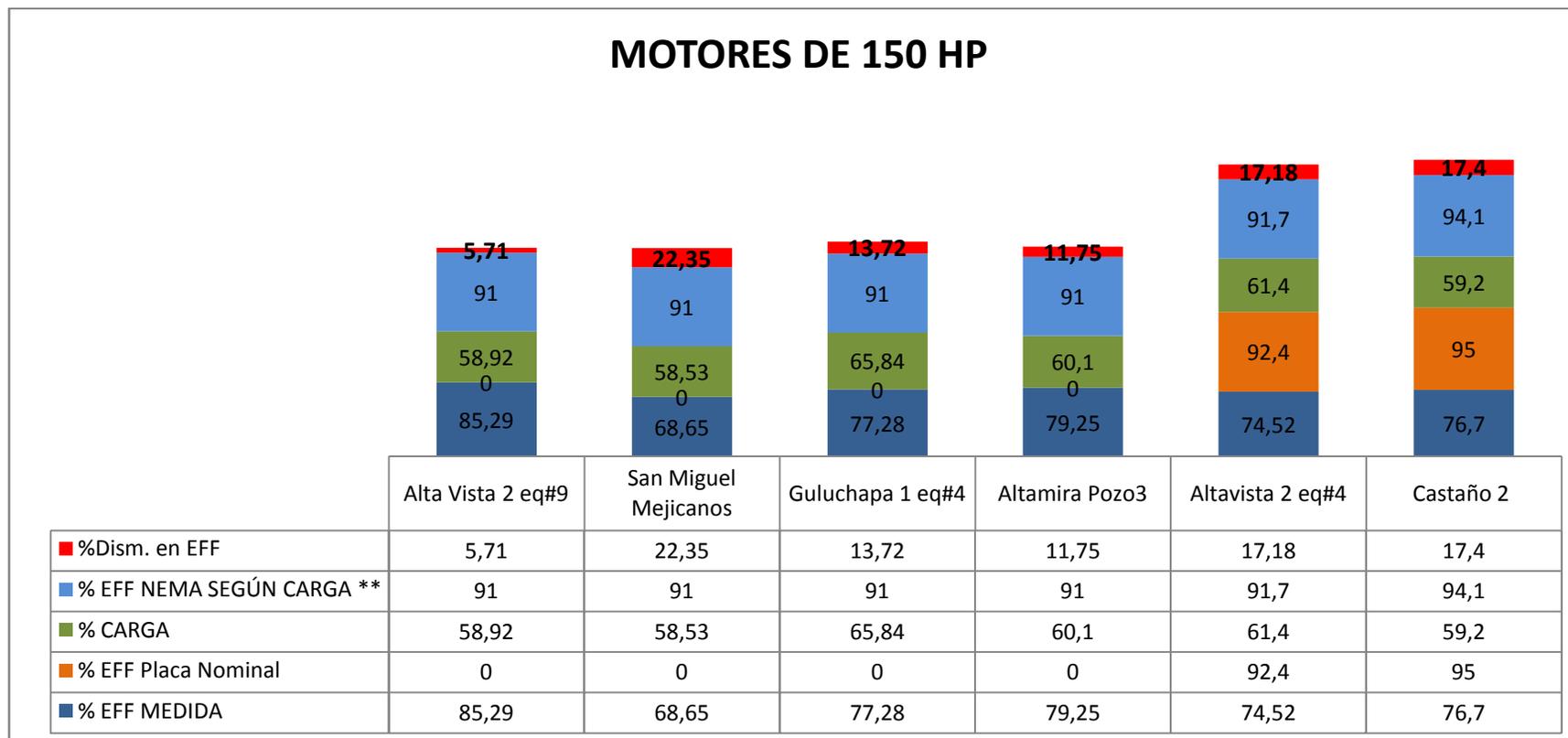


Figura 13. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 150 HP.

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994

Nota: En los datos de EFF placa Nominal que aparecen con "cero" o el signo "-" significan que no presentaban dicho dato en placa.

Estudio de Eficiencia a Motores de 200 HP:

Tabla 9. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 200 HP.

MOTOR	% CARGA	% EFF MEDIDA	% EFF Placa Nominal	% EFF NEMA SEGÚN CARGA **	%Dism. en EFF	# De Reb. Equivalentes	%Dism. Equiv. Por cada Reb.
La Cancha eq#4 *	49.63	71.89	92.4	91	19.11	4	4.8
El Colegio eq#1	55.24	77.03	-	91	13.97	3	4.7
Cumbres de Cuscatlán	55.91	73.05	92.4	91	17.95	4	4.5
Estadio 1	60.89	81.7	-	91	9.3	2	4.7
Santa Lucia eq#3	45.67	62.8	-	91	28.2	6	4.7
Cafetal eq#2	70.97	79.25	-	91	11.75	3	3.9
Santa Lucia eq#12	59	89.56	93.6	92.4	2.84	1	2.8
Joya Grande eq#2	78	81	-	91	10	3	3.3
Promedio							4.1

* Este equipo no cumple con los requerimientos del método de evaluación utilizado por encontrarse a una carga menor de 55% y no es tomado en cuenta para estimar la EFF promedio.

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994

Nota 1: En las casillas de # de reb. Correspondiente a las filas marcadas en verde se logró encontrar datos precisos de acuerdo a un historial del número de veces que la máquina ha sido rebobinada, los demás datos del # de reb. de los motores restantes se estimaron a partir de los que sí se sabe cuántas veces fueron rebobinados.

Nota 2: En los datos de EFF placa Nominal que aparecen con "cero" o el signo "-" significan que no presentaban dicho dato en placa.

Estudio de Eficiencia a Motores de 200 HP (continuación):

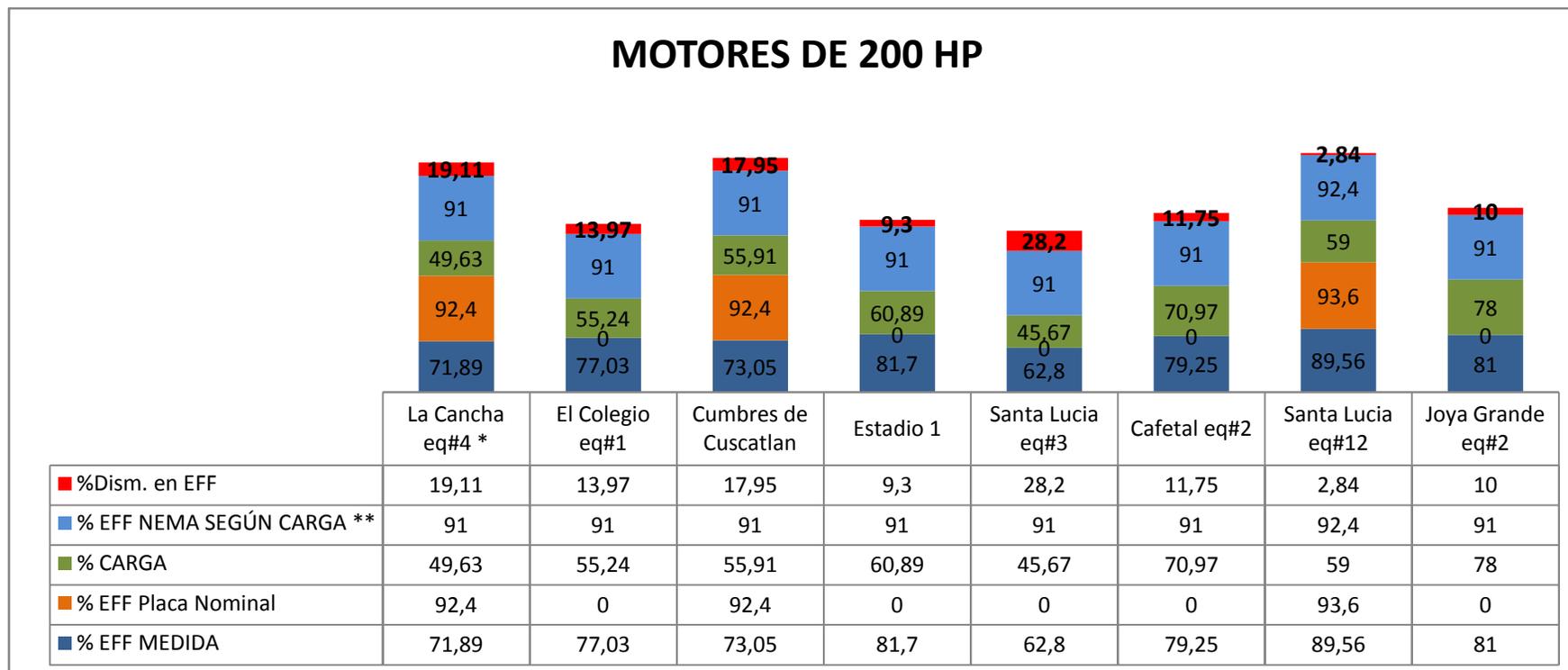


Figura 14. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 200 HP.

* Este equipo no cumple con los requerimientos del método de evaluación utilizado por encontrarse a una carga menor de 55% y no es tomado en cuenta para estimar la EFF promedio.

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994

Nota: En los datos de EFF placa Nominal que aparecen con “cero” o el signo “-” significan que no presentaban dicho dato en placa.

Estudio de Eficiencia a Motores de 250 HP:

Tabla 10. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 250 HP.

MOTOR	% CARGA	% EFF MEDIDA	% EFF Placa Nominal	% EFF NEMA SEGÚN CARGA **	%Dism. en EFF	# De Reb. Equivalentes	%Dism. Equiv. Por cada Reb.
Guluchapa eq#1	74.24	89.79	94.1	94.1	4.31	1	4.3
Joya Grande Eq#3	61.3	73	-	91	18	4	4.5
Promedio							4.40

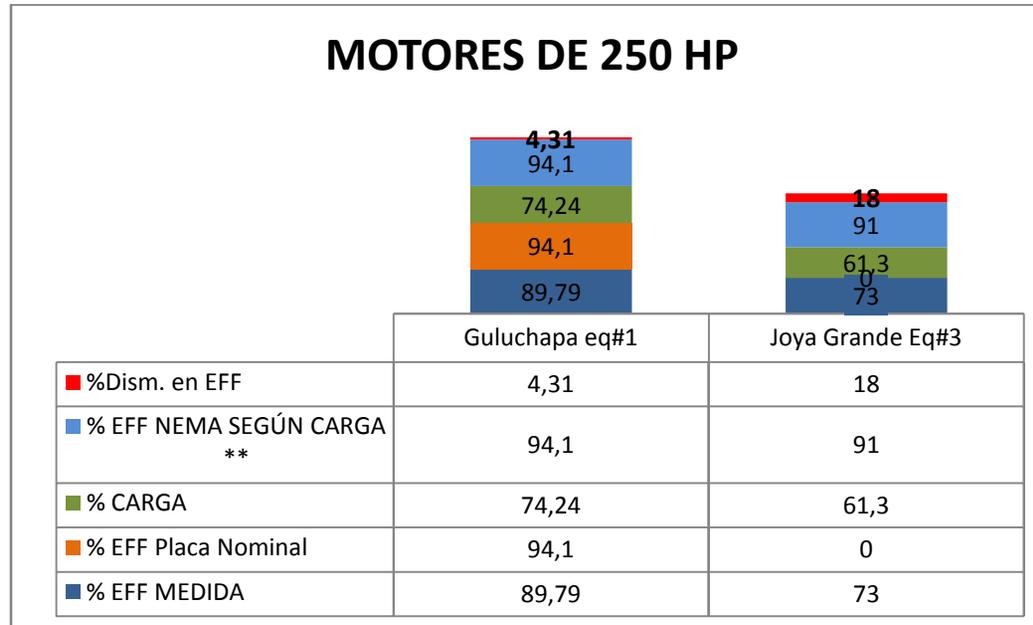


Figura 15. RESUMEN DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA PARA LOS MOTORES DE 250 HP.

** Fuente: Tabla 12-10 y 12-11 NEMA MG-1 Rev. 1994

Nota: En los datos de EFF placa Nominal que aparecen con "cero" o el signo "-" significan que no presentaban dicho dato en placa.

RESUMEN DE PORCENTAJE DE REDUCCIÓN EN EFICIENCIA ESTIMADO POR CADA REBOBINADO:

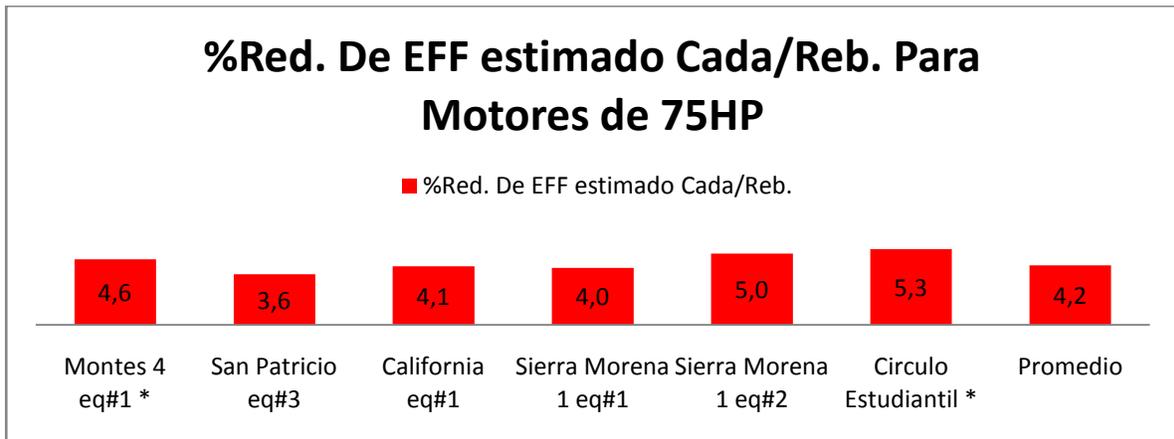


Figura 16.

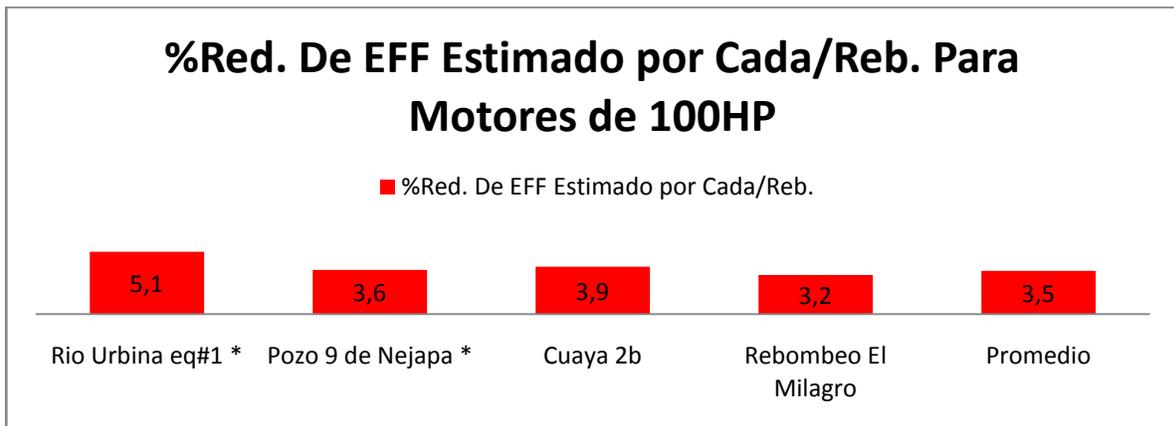


Figura 17.

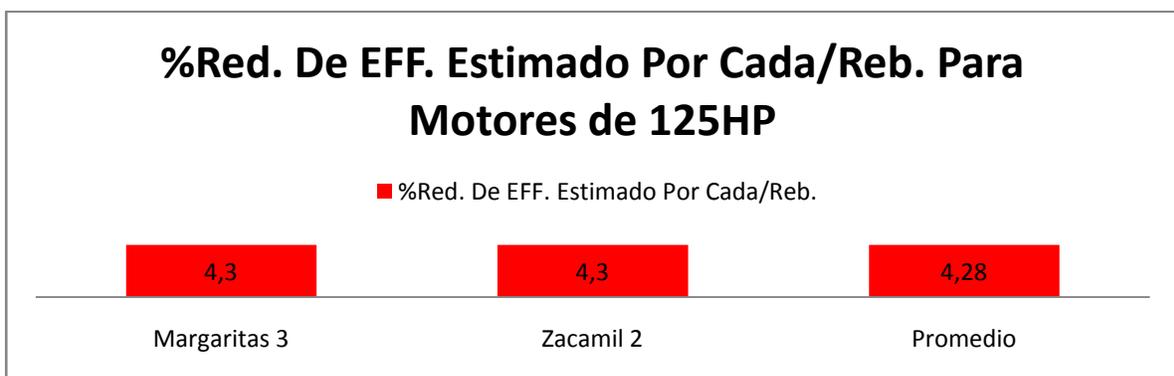


Figura 18.

RESUMEN DE % DE REDUCCIÓN EN EFICIENCIA ESTIMADO POR CADA REBOBINADO (CONTINUACIÓN):

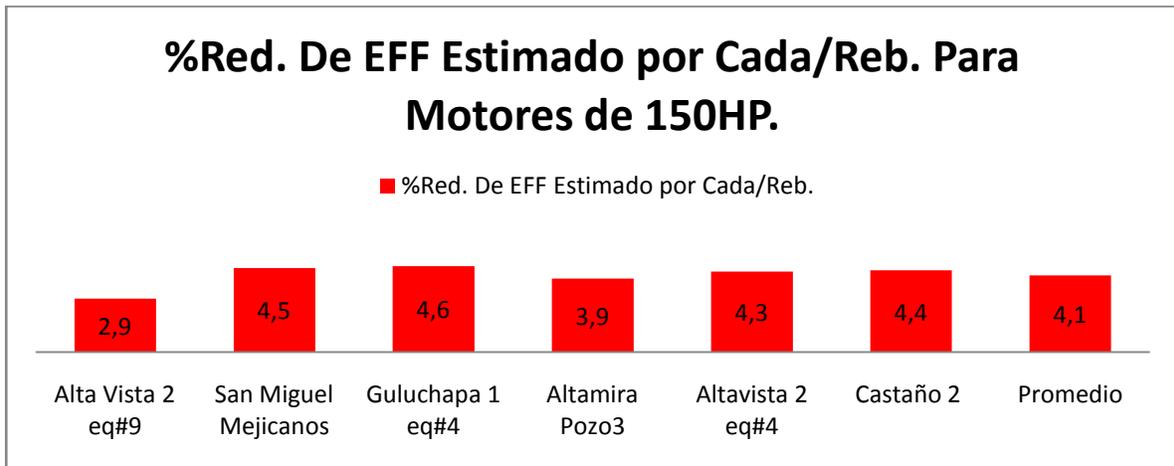


Figura 19.

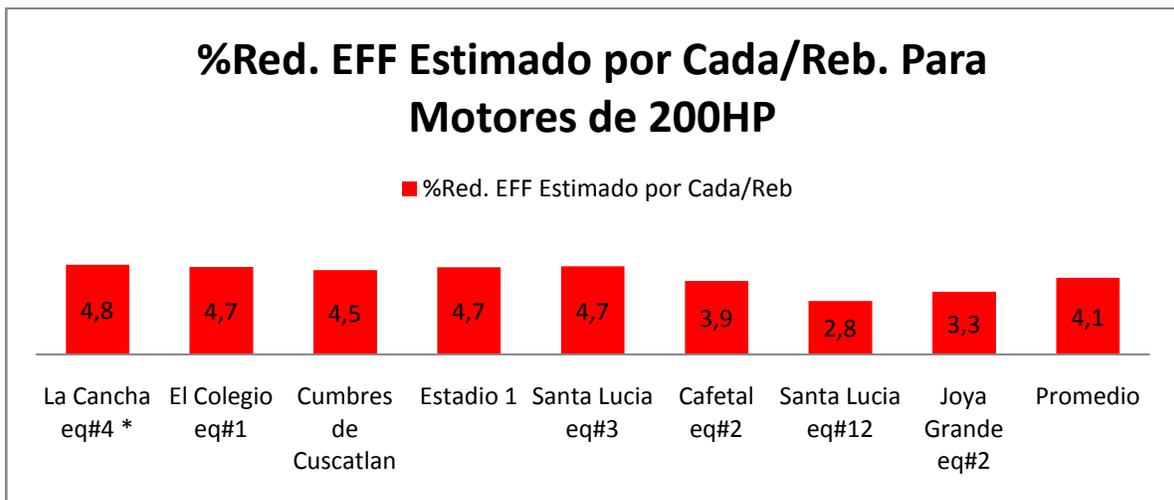


Figura 20.

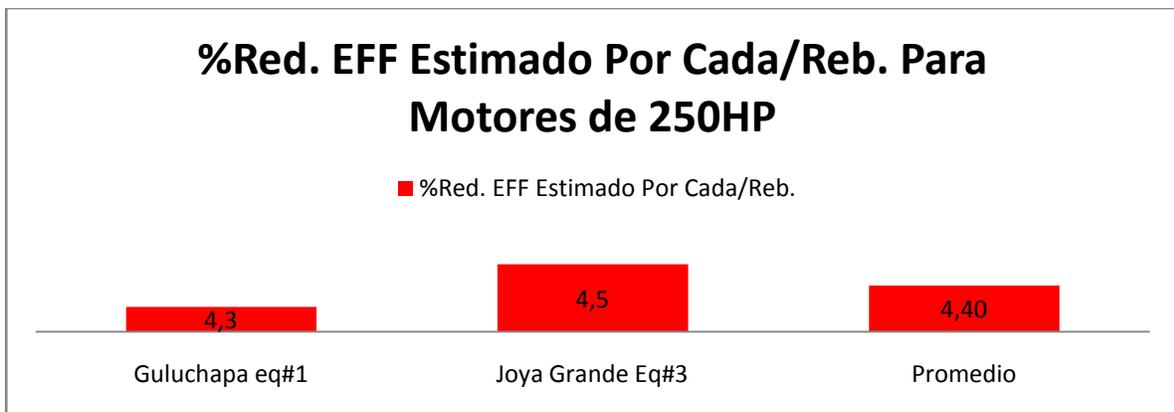


Figura 21.

RESUMEN DE PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE EFICIENCIA TOTAL

Tabla 11. RESUMEN DE REDUCCIÓN DE EFICIENCIA ESTIMADA DE MOTORES POR CADA REBOBINADO

HP de Motor	Rango de %Reducción de EFF Medida	%Red. EFF Min. Estimada cada/Reb.	%Red. EFF Max. Estimada de Cada/Reb.	%Red EFF Promedio Estimada Cada/Reb.
75	7.1% a 20%	3.60	5.00	4.2
100	3.86% a 6.38%	3.2	3.90	3.5
125	4.26% a 8.26%	4.3	4.30	4.3
150	5.71% a 22.35%	2.9	4.60	4.1
200	2.8% a 28.2%	2.8	4.70	4.1
250	4.31% a 18%	4.3	4.50	4.4
POMEDIO TOTAL		3.52	4.50	4.1

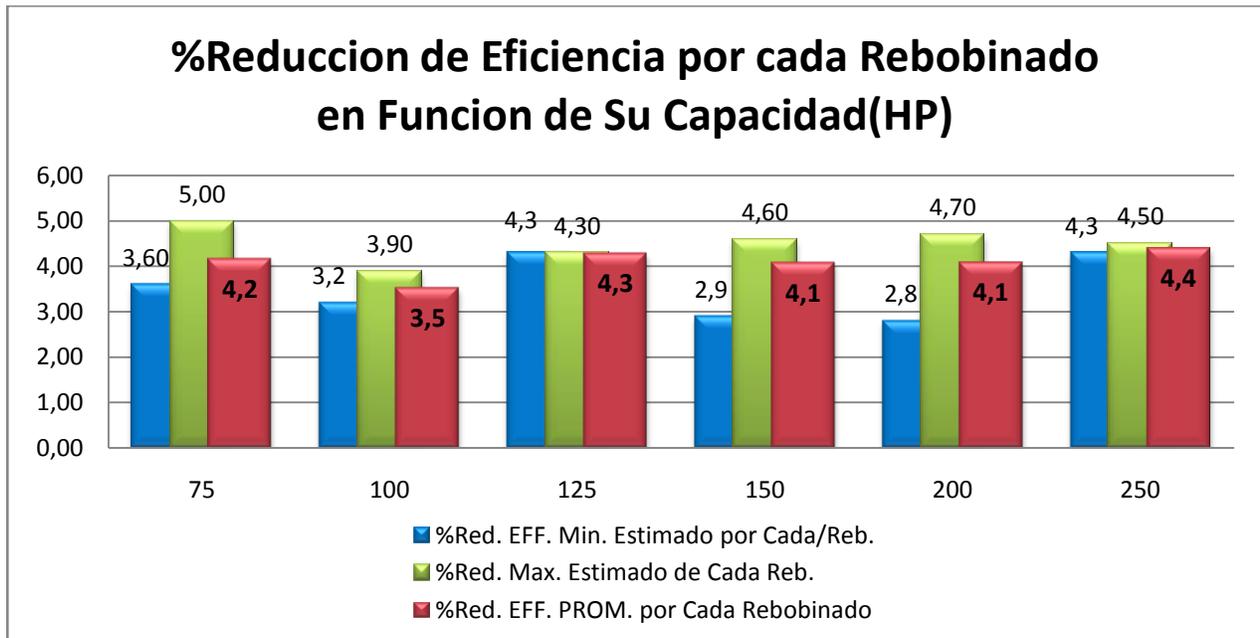


Figura 22. RESUMEN TOTAL DE PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE EFICIENCIA ESTIMADA POR CADA REBOBINADO

CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

En este apartado se pretende hacer una breve evaluación del impacto económico de la reducción de eficiencia en los motores estudiados.

Para ello es necesario consultar las hojas de datos de cada motor ya que en cada una de ellas se encuentra una valoración en cuanto a gastos de operación de consumo de energía y perdidas en dólares debido a la reducción de eficiencia que involucre y por supuesto la recomendación del reemplazo por otro motor a una eficiencia mayor especificado a la carga real según determinada por medición en campo desarrollada con el método del deslizamiento.

Para un caso particular de Estudio se presenta la siguiente hoja de datos (elaborada en Excel con sus respectivas formulas) que tiene toda la información requerida por este estudio:

HOJA DE DATOS DE PRUEBA PARA MOTORES DE INDUCCION			
Fecha:	23/09/2009	Nombre de la Planta:	San Patricio
Compañía:	ANDA	Departamento:	S.S.
Aplicación:	Rebombeo	# de fase y Hz:	3/60 Hz
# Equipo:	3	Tamaño del cuadro:	L364TP16
Marca:	General Electric	Clase de aislamiento:	F
Modelo:	5ke364dtt5008	Eficiencia nominal(%):	93
# de serie:	30039527	Tipo de torque NEMA:	A
Factor de servicio:	1.15	Incremento de Temp:	-
Tipo de caja:	WPI	VALORES CALCULADOS	
* HP plena carga:	75	Voltios promedio:	477.43
* Voltios:	460	¹ Desvalance de Voltaje (%):	0.22
* Amperios:	90	² Variacion de Voltaje(%):	3.79
* rpm plena carga:	3560	³ Desl. Plena Carga Correg. por Voltaje(rpm):	37.13
* Velocidad sincrona(rpm):	3600	⁴ Desl. Plena Carga Corregido por Temp(rpm):	40.70
# polos:	2	Desl. Plena Carga Corregido Total(rpm):	37.78
Des. Plena carga(rpm):	40	Deslizamiento de operación(rpm):	38.00
VALORES MEDIDOS		Porcentaje de carga(%):	100.58
* Voltios AB	477.8	HP de salida:	75.44
* Voltios BC	476.4	KW de salida:	56.276
* Voltios CA	478.1	% de eficiencia:	85.92
* Amperios promedio:	94.1	KVA de entrada:	77.81
* KW promedio:	65.5	Factor de Potencia:	0.84
* rpm de operación:	3562	Perdidas en KW:	9.2239
* temp. Ambiente(°C):	30.1	\$/año de operación:	80,860.54
* temp.Estator(°C):	59.1	\$/año de perdidas:	11,387.04
# rebobinados posibles:	2	Ahorros de energia anuales US\$:	7,031.10
Energia en Punta US\$/KWh:	0.150913	debido a cambio de un motor de (HP): de	75
Energia en Resto US\$/KWh:	0.151689	alta eficiencia.	
Energia en valle US\$/KWh:	0.117113	Eficiencia del motor reemplazo(%):	94.1
Hrs. De Operac. en Punta anual:	1800	⁵ Costo de Reemplazo de Motor US\$:	7,000.00
Hrs. De Operac. en Resto anual:	4680	Retorno simple (años):	1.00
Hrs. De Operac. en Valle anual:	2160		
Observacion:			

Nomenclatura:

*

Datos a Ingresar

Datos Calculados

Datos Obligatorios a Ingresar

¹ El Desvalance de Voltaje recomendado debe ser menor o igual al 0.5% según IEEE 112 Seccion 4.1.5.

² La Variacion de Voltaje con respecto al nominal recomendado debe ser menor o igual al 10% según IEEE 112 Seccion 4.1.2.

³ La Corrección por voltaje se hace según IEEE Std 739-1995. Seccion 6.16 Tabla 6-6.

⁴ La Correccion por Temperatura Ambiente se hace según IEEE 739-1995. Seccion 6.16.

⁵ El Costo del Reemplazo del Motor debe incluir instalación.

Hoja de Datos Tomada de IEEE Std 739-1995.

Figura 23.

El análisis de costos de operación se efectúa en función de las horas de servicio que presta el motor de 75HP, cuyos datos se encuentran en la hoja de datos de la figura 23, en medición horaria esto es si el motor opera las 24 horas del día durante todo el año, implica que sus horas de trabajo son:

Punta: 1800 Hrs.

Resto: 4680 Hrs.

Valle: 2160 Hrs.

Si el pliego tarifario actualizado hasta la fecha de elaboración de este documento para grandes demandas en medición horaria por energía suministrada por la distribuidora CAESS específica:

Costo de la Energía en Punta: 0.150913 US\$/KWH

Costo de la Energía en Resto: 0.151689 US\$/KWH

Costo de la Energía en Valle: 0.117113 US\$/KWH.

Por lo que el costo de la Energía en los diferentes horarios con una demanda de 65.5KW para esta estación es:

Costo de operación anual en punta: $0.150913 * 1800 * 65.5 = \$17,792.64$

Costo de operación anual en Resto: $0.151689 * 4680 * 65.5 = \$46,498.75$

Costo de operación anual en Valle: $0.117113 * 2160 * 65.5 = \$ 16,569.15$

Costo total de operación anual del motor = \$ 80,860.54 ^[1]

Costo de Reducción de Eficiencia en el Motor de 75 HP

Las Pérdidas anuales están dadas por la siguiente fórmula:

$$(\text{KW de salida}) * (\text{Hrs operación anual} * \text{costo de energía}) * (100/\text{EFF1} - 100/\text{EFF2})$$

Sustituyendo datos para encontrar el costo de reducción (EFF1=93% a EFF2 = 85.92%) en eficiencia:

Costo de Reducción:

$$= 56.276 * (1800 * 0.150913 + 4680 * 0.151689 + 2160 * 0.117113) * (100/93 - 100/85.92)$$

= \$ 6,155.66 de pérdidas anuales por reducción de 93 a 85.92% en eficiencia, lo cual resulta ser aproximadamente el costo de un motor nuevo de eficiencia premiada.

[1] Todos los costos están dados sin IVA.

Si se reemplaza el motor con otro motor Energy Efficient de 94.1% que cuesta \$6,000.00 mas \$1,000.00 en gastos de instalación ^[1] ¿Cuánto seria el ahorro anual?

El Ahorro anual estaría dado por:

$$(\text{KW de salida}) * (\text{Hrs operación anual} * \text{costo de energía}) * (100/\text{EFF1} - 100/\text{EFF2})$$

Sustituyendo datos:

$$56.276 * (1800 * 0.150913 + 4680 * 0.151689 + 2160 * 0.117113) * (100/85.918 - 100/94.1) \\ = \$ 7,030.79 \text{ de Ahorros anuales}$$

$$\text{Retorno simple} = (\text{Inversión en motor de reemplazo}) / (\text{Ahorros Anuales})$$

$$\text{Retorno Simple} = (7,000 \text{ \$/año}) / (7,030.79 \text{ \$/año}) = 0.996 \text{ años.}$$

La inversión se recupera en 1 año y se continuaría ahorrando \$7,030.8 de energía eléctrica por año durante la vida útil del motor que se reemplaza. ^[2]

[1] Gastos aproximados de costo de motor US según pagina web www.emersonmotors.com y de instalación.

[2] Una profunda evaluación económica se encuentra descrita en capítulo 3 de IEEE Std. 739-1995.

CONCLUSIONES SOBRE LAS MEDICIONES Y ESTUDIO DEL PARAMETRO EFICIENCIA ELECTRICA EN LOS MOTORES ELECTRICOS ASINCRONOS.

- ***“Los resultados obtenidos por el presente estudio sobre la reducción de eficiencia eléctrica para los motores de inducción de capacidades en el rango de 75 hp a 250 hp, de bajo voltaje, utilizando el método del deslizamiento de carga en el motor, varían de entre un promedio mínimo de 3.5% a un máximo de 4.5% de reducción de eficiencia equivalente por cada rebobinado, siendo el promedio total 4.1% de reducción equivalente por cada rebobinado”.***

- Una de las cuestiones que determinan el mantener e incrementar la eficiencia de los motores trifásicos asincrónicos durante su reparación, es el logro de una alta calidad en la parte del proceso concerniente al devanado del estator.

- Durante la reparación del devanado se pueden tomar medidas que lleven a reducir las pérdidas, aumentar la potencia nominal del motor o incrementar su capacidad de sobrecarga.

- Los motores eléctricos son de suma importancia en la actualidad, debido a las diferentes aplicaciones industriales a los que son sometidos, es por ellos, que se deben tomar en cuenta todas las fallas que se presentan para el correcto funcionamiento de los mismos.

- La falla en los motores puede ser ocasionada por múltiples factores o condiciones de operación por lo que la aplicación de un método de medición de eficiencia tiene que apoyarse también en un historial de comportamientos y sucesos relacionados con el motor en cuestión, sin embargo dicho historial muchas veces no se posee.

RECOMENDACIONES

- ❖ Los motores que se encuentren con cargas inferiores al 55% se recomienda que deben ser reemplazados por otro motor a su correspondiente capacidad real de trabajo y una eficiencia Energy Efficient o Nema-Premium. Esto debido a que, según IEEE Std. 739, mas corriente reactiva es usada para generar campo magnético a medida que la carga disminuye, con un decremento de factor de potencia y decremento de eficiencia.
- ❖ Un historial de reparaciones debe ser implementado, como el sugerido en Std. IEEE 1068 Anexo B, donde se lleve un control del número de veces que la maquina es sometida a rebobinados.
- ❖ Evaluaciones económicas y operativas deben ser hechas para decidir de entre rebobinar o reemplazar un motor, pero es recomendable, según los resultados de reducción de eficiencia eléctrica obtenidos, no rebobinar el motor más de 2 veces.
- ❖ Los valores encontrados de reducción de la eficiencia eléctrica en los motores se pueden disminuir (reducir al mínimo el impacto en la eficiencia) si se mejoran o implementan adecuadas prácticas de reparación descritas en el Std IEEE 1068 en los talleres.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://pdf/repuracion-de-motores.html>
- [2] Viego P.R et al, "Efficient Induction Machine Repair for Energy Efficiency In Proceedings of SATIS 2001, Kingston, (2001), pp.
- [3] Viego, Percy y Quispe, Enrique APLICACIÓN EFICIENTE DE MOTORES ASINCRÓNICOS. LIBRO. Editor: Contactos Mundiales. Cali – Colombia. 2000.
- [4] Campbell B. "Failed Motors: Rewind or Replace?". IEEE Industry Applications Magazine. January/February 1997. Pp 45-50.
- [5] Aplicaciones del cobre /Energía sustentable.
- [6] Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica. (Ing. Javier Ortega Solis).
- [7] Motores de alta eficiencia: características electromecánicas, ventajas y aplicabilidad, E. Quispe y L Mantilla 2004, Pág. 11-19, Revista Energía y Computación. Volumen XII. No.1, Edición No.21, ISSN 0121-5299, Cali, Colombia.
- [8] <http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA> 2403 motores eléctricos
- [9] Fundación Red de Energía - BUN-CA
Estudio de Mercado sobre: Motores Eléctricos Industriales y Aire Acondicionado en Costa Rica, El Salvador, Nicaragua y Panamá [En línea] / Fundación Red de Energía. – 1 ed. — San José, C.R. : Biomass Users Network (BUN-CA) ; Fundación Red de Energía, 2007.
37 p. ; 27 X 21 cm. (Serie Estudios de Mercado)
ISBN: 978-9968-904-09-4
1. Recursos Energéticos – Estudios de Mercado. 2. Eficiencia Energética. I. Título.
- [10] Notas de clase de administración de energía (Capítulo 5. Administración de energía para motores, sistemas y equipo eléctrico) , Ing. José Ramos López, Universidad de El Salvador, NEMA MG-1, rev 1993
- [11] NEMA MG-1, rev 2004, Motors and Generators
- [12] Notas de clase de administración de energía, tel-115 (capitulo 6. mediciones para administración de energía), Ing. José Ramos López, Universidad de El Salvador.
- [13] IEEE Std 739-1995 Bronze Book-Energy Management.

ANEXOS

IEEE
Std 1068-1996

IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR THE REPAIR AND REWINDING OF

Annex A

(informative)

Motor data insulation resistance record

Motor Number _____ Date received _____

Serial Number _____ Shop ID number _____

Temperature _____ Humidity _____

Surge test _____ passed _____ failed _____

	Before	After
Voltage		
Megohms		
Microamperes		

	Before	After
Series field		
Shunt field		
Armature field		

Bearings

	Drive-end bearing	
	Found	Left
Bearing size		
Shaft size		

	Opposite drive-end bearing	
	Found	Left

Rotor air gap

	Before	
	Opp. Drive end	Drive end
Vertical		
Horizontal		
Diagonal		

	After	
	Opp. drive end	Drive end

Vibration analysis

Location	Opposite Drive-end bearing housing			Shaft V H	Drive-end bearing housing			Shaft V H
	V	H	A		V	H	A	
(Mils)								
(IPS)								

Note—Values entered shall include initials of tester.

Cause of Failure/Notes/Comments: _____

ANEXO A. Hoja de Datos Para Pruebas de Aislamiento del Motor.

Fuente: IEEE 1068-1996.

**Table 12-10
EFFICIENCY LEVELS**

Nominal Efficiency	Minimum Efficiency Based on 20% Loss Difference	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency Based on 20% Loss Difference
99.0	98.8	91.0	89.5
98.9	98.7	90.2	88.5
98.8	98.6	89.5	87.5
98.7	98.5	88.5	86.5
98.6	98.4	87.5	85.5
98.5	98.2	86.5	84.0
98.4	98.0	85.5	82.5
98.2	97.8	84.0	81.5
98.0	97.6	82.5	80.0
97.8	97.4	81.5	78.5
97.6	97.1	80.0	77.0
97.4	96.8	78.5	75.5
97.1	96.5	77.0	74.0
96.8	96.2	75.5	72.0
96.5	95.8	74.0	70.0
96.2	95.4	72.0	68.0
95.8	95.0	70.0	66.0
95.4	94.5	68.0	64.0
95.0	94.1	66.0	62.0
94.5	93.6	64.0	59.5
94.1	93.0	62.0	57.5
93.6	92.4	59.5	55.0
93.0	91.7	57.5	52.5
92.4	91.0	55.0	50.5
91.7	90.2	52.5	48.0
		50.5	46.0

ANEXO C. Tabla de Eficiencias Nominal y Minima de Motores.

Fuente: NEMA MG-1-1993.

Table 12-11 (Continued)
FULL-LOAD EFFICIENCIES OF ENERGY EFFICIENT MOTORS

ENCLOSED MOTORS								
Hp	2 POLE		4 POLE		6 POLE		8 POLE	
	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency
1.0	75.5	72.0	82.5	80.0	80.0	77.0	74.0	70.0
1.5	82.5	80.0	84.0	81.5	85.5	82.5	77.0	74.0
2.0	84.0	81.5	84.0	81.5	86.5	84.0	82.5	80.0
3.0	85.5	82.5	87.5	85.5	87.5	85.5	84.0	81.5
5.0	87.5	85.5	87.5	85.5	87.5	85.5	85.5	82.5
7.5	88.5	86.5	89.5	87.5	89.5	87.5	85.5	82.5
10.0	89.5	87.5	89.5	87.5	89.5	87.5	88.5	86.5
15.0	90.2	88.5	91.0	89.5	90.2	88.5	88.5	86.5
20.0	90.2	88.5	91.0	89.5	90.2	88.5	89.5	87.5
25.0	91.0	89.5	92.4	91.0	91.7	90.2	89.5	87.5
30.0	91.0	89.5	92.4	91.0	91.7	90.2	91.0	89.5
40.0	91.7	90.2	93.0	91.7	93.0	91.7	91.0	89.5
50.0	92.4	91.0	93.0	91.7	93.0	91.7	91.7	90.2
60.0	93.0	91.7	93.6	92.4	93.6	92.4	91.7	90.2
75.0	93.0	91.7	94.1	93.0	93.6	92.4	93.0	91.7
100.0	93.6	92.4	94.5	93.6	94.1	93.0	93.0	91.7
125.0	94.5	93.6	94.5	93.6	94.1	93.0	93.6	92.4
150.0	94.5	93.6	95.0	94.1	95.0	94.1	93.6	92.4
200.0	95.0	94.1	95.0	94.1	95.0	94.1	94.1	93.0
250.0	95.4	94.5	95.0	94.1	95.0	94.1	94.5	93.6
300.0	95.4	94.5	95.4	94.5	95.0	94.1	...	...
350.0	95.4	94.5	95.4	94.5	95.0	94.1	...	...
400.0	95.4	94.5	95.4	94.5	...	...	...	...
450.0	95.4	94.5	95.4	94.5	...	...	...	...
500.0	95.4	94.5	95.8	95.0	...	...	...	...

ANEXO D. Tabla de Eficiencias Nominal y Minima de Motores Cerrados Energy Efficient.

Fuente: NEMA MG-1-1993.

Table 12-12 (Continued)
FULL-LOAD EFFICIENCIES FOR NEMA PREMIUM™ EFFICIENCY ELECTRIC MOTORS
RATED 600 VOLTS OR LESS (RANDOM WOUND)

ENCLOSED MOTORS						
HP	2 POLE		4 POLE		6 POLE	
	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency
1	77.0	74.0	85.5	82.5	82.5	80.0
1.5	84.0	81.5	86.5	84.0	87.5	85.5
2	85.5	82.5	86.5	84.0	88.5	86.5
3	86.5	84.0	89.5	87.5	89.5	87.5
5	88.5	86.5	89.5	87.5	89.5	87.5
7.5	89.5	87.5	91.7	90.2	91.0	89.5
10	90.2	88.5	91.7	90.2	91.0	89.5
15	91.0	89.5	92.4	91.0	91.7	90.2
20	91.0	89.5	93.0	91.7	91.7	90.2
25	91.7	90.2	93.6	92.4	93.0	91.7
30	91.7	90.2	93.6	92.4	93.0	91.7
40	92.4	91.0	94.1	93.0	94.1	93.0
50	93.0	91.7	94.5	93.6	94.1	93.0
60	93.6	92.4	95.0	94.1	94.5	93.6
75	93.6	92.4	95.4	94.5	94.5	93.6
100	94.1	93.0	95.4	94.5	95.0	94.1
125	95.0	94.1	95.4	94.5	95.0	94.1
150	95.0	94.1	95.8	95.0	95.8	95.0
200	95.4	94.5	96.2	95.4	95.8	95.0
250	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
300	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
350	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
400	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
450	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0
500	95.8	95.0	96.2	95.4	95.8	95.0

ANEXO E. Tabla de Eficiencias Nominal y Minima de Motores Cerrados Eficiencia Premiada.

Fuente: NEMA MG-1-1993.

Table 6-6 —The effects of voltage and frequency variation on induction motors

Variation	Starting & max. running torque	Synchronous speed	% slip	Full-load speed	Full-load efficiency	Full-load power factor	Full-load current	Starting current	Temp. rise, full load	Max. overload capacity	Magnetic noise, no load in particular
Voltage variation: 120%	Increase 44%	No change	Decrease 30%	Increase 1.5%	0-6% decrease	Decrease 5-15 points	Increase 12%	Increase 20%	Increase 5-6 °C	Increase 44%	Noticeable increase
110% voltage	Increase 21%	No change	Decrease 17%	Increase 1%	Slight decrease	Decrease 5-10 points	Increase 2-4%	Increase 10-12%	Increase 3-4 °C	Increase 21%	Increase slightly
Functions of voltage	(Voltage)	Constant	$\frac{1}{(\text{Voltage})^2}$	(Synchronous speed slip)	—	—	—	Voltage	—	(Voltage)	—
90% voltage	Decrease 19%	No change	Increase 23%	Decrease 1.5%	Decrease 2 points	Increase 5 points	Increase 10-11%	Decrease 10-12%	Increase 6-7 °C	Decrease 19%	Decrease slightly
Freq. variation 105% freq.	Decrease 10%	Increase 5%	Practically no change	Increase 5%	Slight increase	Slight increase	Decrease slightly	Decrease 5-6%	Decrease slightly	Decrease slightly	Decrease slightly
Function of frequency	$\frac{1}{(\text{Frequency})}$	Frequency	—	(Synchronous speed slip)	—	—	—	$\frac{1}{(\text{Frequency})}$	—	—	—
95% frequency	Increase 11%	Decrease 5%	Practically no change	Decrease 5%	Slight decrease	Slight decrease	Increase slightly	Increase 5-6%	Increase slightly	Increase slightly	Increase slightly
1% unbalance	Slight decrease	Slight decrease	—	Slight decrease	2% decrease	5-6% decrease	1.5% increase	Slight decrease	2% increase	—	—
2% unbalance	Slight decrease	Slight decrease	—	Slight decrease	8% decrease	7% decrease	3% increase	Slight decrease	8% increase	—	—

NOTE — This table shows general effects, which will vary somewhat for specific ratings. From Engineer's Digest, September 1989.

ANEXO F. Efecto de Variación de Voltaje y Frecuencia sobre los Motores de Inducción.

Fuente: IEEE Std. 739-1995.