

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA A MOTORES DE INDUCCIÓN
UTILIZANDO EL MÉTODO DE DESLIZAMIENTO**

POR

JOSUE ELIAS OBREGON LOZANO

T E S I S

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

ENERO DE 2005

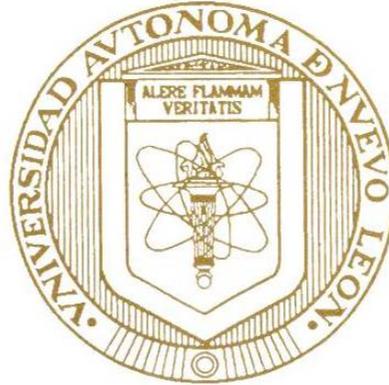
EFICIENCIA A MOTORES DE INDUCCIÓN UTILIZANDO EL MÉTODO DE DESLIZAMIENTO

TM
Z5853
.M2
FIME
2005
.0255



1020150560

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA A MOTORES DE INDUCCIÓN
UTILIZANDO EL MÉTODO DE DESLIZAMIENTO**

POR

JOSUE ELIAS OBREGON LOZANO

T E S I S

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA**

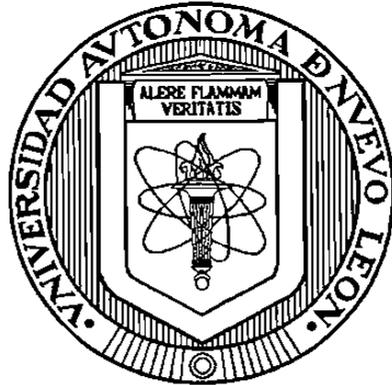
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

ENERO DE 2005



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



MEDICION DE LA EFICIENCIA A MOTORES DE INDUCCION
UTILIZANDO EL METODO DE DESLIZAMIENTO

POR

JOSUE ELIAS OBREGON LOZANO

TESIS

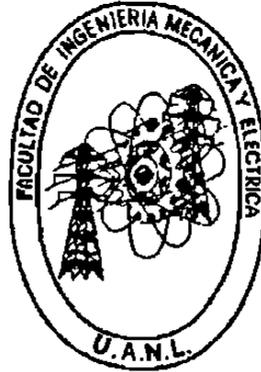
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L. ENERO DE 2005

TM
25853
.M2
FIME
2005
.0255

995863

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



MEDICION DE LA EFICIENCIA A MOTORES DE INDUCCION
UTILIZANDO EL METODO DE DESLIZAMIENTO

POR

JOSUE ELIAS OBREGON LOZANO

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L. ENERO DE 2005

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis. **“Medición de la Eficiencia a Motores de Inducción utilizando el Método de Deslizamiento”** realizada por el alumno **Josué Elías Obregón Lozano**, matrícula 1115115 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El comité de tesis



Asesor
Dr. Rogelio Ramírez Barradas



Coasesor
Dr. Ernesto Vázquez Martínez



Coasesor
M/C. Juan José Guerrero Garza



Vo.Bo
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
Subdirector de Post-grado

San Nicolás de los Garza, N.L., Enero de 2005

DEDICATORIA

A mi Esposa Cristina

Gracias por tu Amor, Comprensión y Apoyo brindado durante estos años que has compartido conmigo.

A Josué David mi hijo

Por todo el tiempo que te robe y te correspondía, prometo recompensarlo.

A mi Madre (†)

Gracias por Inculcarme el deseo de superación

A Santiaguito (†)

Con todo mi Amor te dedico este Trabajo, siempre te recordaremos

Pero sobre Todo, Gracias a Dios

AGRADECIMIENTOS

Dr. Rogelio Ramírez Barradas

Por su asesoría, apoyo y sus comentarios que enriquecieron este trabajo, así como la amistad brindada.

Dr. Ernesto Vázquez Martínez y M.C. Juan José Guerrero Garza

Por sus comentarios como sinodales en este trabajo, por su tiempo y conocimientos brindados.

A los tres quienes fueron mis Maestros gracias por sus enseñanzas y por compartir sus conocimientos.

Ing. Rolando Castillo

Por las facilidades brindadas para la realización de algunas pruebas a los motores de inducción, así como sus experiencias compartidas.

RESUMEN

MEDICION DE LA EFICIENCIA A MOTORES DE INDUCCION UTILIZANDO EL METODO DE DESLIZAMIENTO

Publicación No. _____

Josué Elias Obregón Lozano., M.C. en Ingeniería Eléctrica

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León

Profesor Asesor: Dr. Rogelio Ramírez Barradas.

En este trabajo de investigación se muestra que el método de deslizamiento es útil, bajo ciertas restricciones, para poder evaluar la eficiencia de motores de inducción que trabajan en un ambiente de tipo industrial. Para llegar a esta conclusión se presentan inicialmente los fundamentos teóricos del motor de inducción y se desarrollan las ecuaciones necesarias para describir la proporcionalidad entre la potencia de salida en p.u. y el factor de carga, utilizando el método de deslizamiento. En la investigación se consideró el desempeño del motor en forma detallada, debido a que las condiciones de operación pueden influir en el resultado de la eficiencia. También se consideran e investigan los diferentes tipos de pérdidas que afectan a los motores de inducción tipo jaula de ardilla. La calidad de la energía en el voltaje y el efecto de las armónicas son temas que se tratan de manera simplificada, pero cuyo efecto es importante, debido entre otros factores a que es un problema común de encontrar en la industria.

Se presentan las ecuaciones que determinan la caída y desbalance de voltaje, para evaluar el impacto de estas variables en la eficiencia de los motores.

Se determinó que la variación de la frecuencia durante la medición puede afectar al deslizamiento, por lo cual es necesario considerar este efecto en el proceso de medición. La metodología propuesta para la determinación de la eficiencia se aplicó en un gran número de casos de estudio, cuyos resultados se reportan en este trabajo. Las restricciones del método propuesto limitan el número de motores a medir.

Aunado a la metodología establecida se realizaron mediciones a un motor de 1½ caballos de fuerza en el cual se obtuvieron resultados mejores de lo esperado debido a las consideraciones efectuadas.

El método propuesto está diseñado para medir la eficiencia en condiciones específicas, pero la eficiencia puede variar cuando el factor de carga cambia. Considerando lo anterior, se realizó un cálculo para determinar la eficiencia a diferentes factores de carga que se pueden presentar en el motor en un determinado momento.

Toda la investigación aquí presentada fue útil para desarrollar un método alternativo al del método de deslizamiento, este nuevo método está basado en ecuaciones de segundo grado debido principalmente a que las pérdidas del motor tienen un comportamiento similar al de una parábola, Analizando el primer cuadrante de los ejes (x,y) se desarrollaron las ecuaciones necesarias a diferentes factores de carga del motor, tan solo se requiere conocer la eficiencia del motor al 100% de carga, este método calcula las pérdidas y eficiencias del motor a cualquier factor de carga, como la eficiencia varía en función de la carga, se utiliza el polinomio de Lagrange de segundo orden para determinar la eficiencia a cualquier valor no predeterminado por las ecuaciones de segundo grado.

Este método no mide en forma directa la eficiencia del motor más bien calcula la eficiencia de operación del motor con un método matemático, la finalidad de este cálculo es poder analizar en conjunto con el método de deslizamiento la eficiencia de operación del motor y determinar el desempeño del mismo así como tener un criterio más amplio para la toma de decisiones en la sustitución de un motor.

Se plantean las ecuaciones de los factores de ajuste a la eficiencia en los motores de inducción por una mala calidad del voltaje de alimentación al motor, y cuando los motores ya han sido reparados ó rebobinado se restan 2 puntos de eficiencia.

Los detalles de este cálculo así como sus ecuaciones son presentados en el *Anexo No.3*

Se presentan los resultados obtenidos de la medición a tres casos de estudio de motores en planta, con la metodología propuesta y el método alternativo desarrollado en esta investigación. Los resultados de estas pruebas son aceptables en términos generales. La forma en como se determinó si los resultados son satisfactorios se discuten y analizan en el capítulo 5.

El propósito de esta investigación es medir y desarrollar un método para determinar la eficiencia de los motores de inducción de una manera práctica, sencilla y con el respaldo de fundamentos teóricos. El diagnosticar la eficiencia y desempeño de los motores de inducción ayudará a determinar si es necesaria su sustitución por motores más eficientes, la idea primordial es reducir los costos de operación de la industria. Debido a la gran variedad y tipos de motores que existen en la actualidad, este estudio solo se enfocará a los motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla, también se hace mención de los motores de rotor devanado, pero éstos no se considerarán en estas mediciones.

INDICE

Dedicatoria	<i>i</i>
Agradecimientos	<i>ii</i>
Resumen	<i>iii</i>
Capítulo	
1. Introducción	1
2. Motores de Inducción	8
2.1 Introducción	8
2.2 La inducción electromagnética	9
2.3 La Ley de inducción electromagnética de Faraday	9
2.4 Elementos que constituyen a un motor de inducción	12
2.5 Principios de operación del motor de inducción	14
2.5.1 Deslizamiento.....	17
2.5.2 Velocidad en el Rotor	18
2.5.3 Frecuencia en el Rotor	19
2.5.4 Potencia desarrollada en el Rotor	20
2.6 El par del motor	24
2.7 Factor de servicio	27
2.7.1 Factor de carga	28
2.8 Factor de potencia	29
2.9 El desempeño de un motor de inducción	31
2.10 Motores Eficientes	34
2.10.1 Introducción	34
2.11 Eficiencia del motor de inducción	35
2.12 Las pérdidas en el motor	36
2.12.1 Clases de pérdidas de energía en un motor	37
2.12.2 Las pérdidas en el motor por variación en el voltaje	39
2.12.3 Las pérdidas en el motor por desbalance en el voltaje.....	42
2.12.4 Pérdida de eficiencia en la reparación de motores	44
2.12.5 Los efectos de las armónicas en motores de inducción	45

3. Cálculo de la eficiencia	47
3.1 Introducción	47
3.2 Comportamiento del deslizamiento en motores de inducción	48
3.3 Comportamiento del deslizamiento por variación de frecuencia	49
3.4 El método de deslizamiento	50
3.4.1 Ajustes en la carga por variación en la frecuencia	51
3.4.2 Ajustes en la eficiencia por variación de voltaje	52
3.4.3 Ajustes en la eficiencia por desbalance de voltaje	53
3.5 Cálculo de la eficiencia a los motores de inducción	54
3.6 Cálculo de la eficiencia por interpolación de segundo grado	56
4. Metodología de la medición	60
4.1 Introducción	60
4.2 Procedimiento para la medición de la eficiencia	61
4.3 Identificar el tipo de motor	62
4.4 Ciclo de carga del motor	62
4.5 Datos de placa del motor	63
4.6 Medición eléctrica	64
4.7 Medición de la velocidad del rotor	65
4.8 Registro de mediciones	66
4.9 Pruebas realizadas	67
4.10 Resultados obtenidos	71
4.11 Casos de estudio	73
5. Resultados y Análisis	80
6. Conclusiones y Recomendaciones	90
Anexos	94
Lista de figuras	110
Lista de tablas	111
Lista de referencias Bibliográficas	112

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Resulta importante para el sector industrial, en especial la industria automotriz, poder reducir cada año el costo de sus productos, esto es debido a que en este sector el mercado es muy agresivo y para poder estar dentro de éste, se requiere ofrecer descuentos en sus productos. Esto obliga a las industrias a optimizar gastos, siendo una medida muy socorrida el reajuste de personal. Lo ideal sería, buscar ser más eficientes en sus insumos, de los cuales la energía eléctrica representa uno de los principales costos de operación. Debido a los precios del petróleo, en el cual la electricidad y otras tarifas públicas son altamente dependientes, los costos de la energía eléctrica se han incrementado rápidamente.

Los motores de inducción son ampliamente usados en la industria, siendo una de las máquinas eléctricas más confiables. En nuestro país el mayor gasto de energía eléctrica a nivel industrial, recae en los motores ó bien en equipos que son accionados con motores, de éstos un alto porcentaje son motores de inducción.

Por consiguiente se vuelve imperativo el tener una mayor atención en la mejora de la eficiencia de los motores de inducción.

Típicamente los motores con grandes ciclos de carga de la industria y el comercio tienen una esperanza de vida de 15 a 20 años. El costo de funcionamiento de los motores en general excede su precio de compra, siendo cada vez más importante la alta eficiencia en los motores.

Las características de los motores de inducción son datos proporcionados por el fabricante como; rango de velocidad, potencia, voltaje, corriente y eficiencia. En el pasado el valor de la eficiencia fue de menor importancia, hoy en día existe un creciente énfasis en la conservación de la energía y el incremento en los precios de la misma han provocado que el valor de la eficiencia haya vuelto a ser muy importante y una aplicación cada vez más determinante para la industria.

Los valores de la eficiencia proporcionados por el fabricante son medidos y calculados de acuerdo a ciertos estándares

A lo ancho del mundo existen varios estándares para probar las máquinas eléctricas como los motores de inducción, los tres estándares más importantes son [2]:

- IEEE Estándar 112-1996
- IEC 34-2 y IEC 34-2A
- JEC

Varios estándares nacionales son similares a uno de estos tres estándares generales.

Para el caso de México, en la norma NOM-016-1997 se establecen las pruebas a motores de inducción tipo jaula de ardilla, por el método de segregación de pérdidas, este método es similar al método *E* de la norma *IEEE-112-1996*. [14]

Los valores obtenidos por los estándares de prueba ya considerados pueden diferir en varios puntos porcentuales entre sí.

Para poder medir la eficiencia de los motores de inducción con los métodos antes mencionados se deben realizar pruebas con equipos y aparatos altamente precisos y sofisticados, además si a esto se le agrega que se tiene que dejar fuera de servicio al motor para poder acoplar los instrumentos y equipos necesarios para estas pruebas, resulta poco atractivo para el sector industrial el medir la eficiencia de los motores de inducción.

La medición de la eficiencia es la única forma en la cual se puede evaluar y diagnosticar un motor de inducción, esto ayudará a evaluar las condiciones de operación del mismo y de ser necesaria su sustitución.

La manera en la cual se propone evaluar la eficiencia está basada en los principios de operación del motor de inducción tipo jaula de ardilla.

Se utilizará el método del deslizamiento, para poder conocer el factor de carga al cual trabaja el motor, esto es debido a que el factor de carga de un motor medido con el método de deslizamiento es aproximadamente proporcional, dentro de cierto rango, a la potencia de salida del motor, en por unidad (*p.u.*). De esta manera es posible conocer aproximadamente la potencia que entrega el motor en su flecha, también se medirá con un analizador de redes la potencia eléctrica en watts que el motor está demandando de la red, como se sabe, la eficiencia del motor varía conforme a la carga del mismo, por lo que se medirá la eficiencia a una determinada carga. También es necesario conocer los datos de placa del motor, en donde es registrada la eficiencia a plena carga. Con estos dos valores de eficiencia y dos factores de carga se propone utilizar una interpolación de segundo grado para conocer la eficiencia del Motor a cualquier factor de carga.

También se tomará en cuenta la variación y el desbalance de voltaje, que se presentan en redes de distribución y que afectan a los motores que se encuentran operando en el sector industrial y comercial. Estos problemas en el voltaje generan un decremento en la eficiencia de los motores eléctricos.

Toda la información recabada será procesada por un programa hecho en lenguaje de Matlab®, con esto se tendrá un diagnóstico claro de la situación que guarden los motores.

Aunado al método de deslizamiento se desarrolló un método alternativo para determinar la eficiencia de los motores con ecuaciones de segundo grado, este procedimiento no mide la eficiencia en forma directa, más bien calcula la eficiencia con una serie de ecuaciones y mediciones, *este método se puede observar a detalle en el Anexo No.3.*

El objetivo de esta investigación es el desarrollar un método para medir la eficiencia de los motores de inducción, diagnosticar si operan satisfactoriamente y reducir los costos de la energía eléctrica, la principal limitación del método de deslizamiento, es que solo aplica a motores de inducción tipo jaula de ardilla, además hay una serie de datos y factores a considerar para la medición, lo cual hace que sea una medición con ciertas restricciones.

A continuación se presenta una pequeña semblanza de los capítulos de esta investigación:

Capítulo 1 *Introducción.*

Se presenta el entorno ante la problemática de los altos costos de la energía eléctrica, así como las dificultades generadas en el sector industrial y comercial por esta situación, aunado a la falta de interés por el uso racional de la energía eléctrica.

Se consideran los distintos métodos con que se cuentan para medir la eficiencia de los motores de inducción, uno de estos métodos es utilizado en la República Mexicana, la dificultad para acoplar los equipos y aparatos para medir la eficiencia de los motores de inducción de la industria y el comercio, da como resultado una falta de interés para estos sectores conocer el desempeño y la eficiencia de sus motores de inducción.

Esta investigación trata de determinar la eficiencia de los motores de inducción tipo jaula de ardilla de una manera sencilla sin tener que dejar fuera de servicio al motor, pero basada en los principios de operación del mismo, tomando en cuenta todas las consideraciones necesarias para una correcta medición, teniendo como principal propósito el reducir los consumos de energía eléctrica.

Capítulo 2 *Motores de Inducción.*

Se presentan las bases teóricas del comportamiento del motor de inducción, su principio de operación y las ecuaciones matemáticas necesarias para entender el porque es posible medir la eficiencia del motor con el método propuesto, también se define la relación de la potencia de salida y el factor de carga medido con el método de deslizamiento.

Los factores con los cuales se puede medir el desempeño del motor (*Factor de Potencia, Factor de Carga, Factor de Servicio, el Par*) son temas que se presentan en este capítulo, las pérdidas del motor ya sean fijas ó variables, así como los diferentes tipos de pérdidas, el papel que juega en el comportamiento de la eficiencia la variación y desbalance de voltaje, el efecto de armónicas en el motor, son temas relevantes, todos los temas antes mencionados son fundamentos teóricos para la investigación hecha, y con esto entender todos los aspectos que pueden influir en las mediciones realizadas.

Capítulo 3 *Cálculo de la Eficiencia.*

En este capítulo se establecen las ecuaciones y las consideraciones para realizar la medición de la eficiencia, enfocándose en el comportamiento del deslizamiento, frecuencia, y cómo se ve afectado el método de deslizamiento por la variación de la frecuencia durante la realización de las pruebas.

Con el fin de mostrar el efecto de la calidad del voltaje sobre la eficiencia de un motor, en este capítulo se establecen las ecuaciones para calcular la variación que el desbalance del voltaje refleja en la eficiencia. Estas ecuaciones sirven para poder determinar un ajuste en la eficiencia por efectos en el voltaje, por último se determina mediante ecuaciones las eficiencias a diferentes factores de carga, conociendo como datos de base la eficiencia del motor al 100% de su capacidad y la eficiencia medida por el método de deslizamiento, también se requiere conocer la velocidad del rotor durante estos factores de carga y eficiencia.

Capítulo 4 *Metodología de la medición.*

Establecer la metodología y los procedimientos a seguir son parte fundamental del contenido de este capítulo, el procedimiento a seguir, indica la forma en la cual se identifican las características de operación del motor, conocer que datos de los motores son importantes para la medición, los parámetros a medir, la forma en como se llevará a cabo la medición, y sus restricciones.

Con esta información se realiza una prueba a un motor de inducción de alta eficiencia de una capacidad de 1½ hps.

La finalidad de estas pruebas es comprobar la investigación antes hecha, y verificar si el método propuesto es confiable, una vez que los resultados fueron satisfactorios, se procedió a medir los motores instalados en el desarrollo Industrial SanLuis Rassini.

Este capítulo se limitó a describir el procedimiento y la metodología a seguir para las pruebas hechas a los motores de inducción del desarrollo, más adelante se discuten los resultados obtenidos.

Capítulo 5 *Resultados y Análisis.*

Los resultados y análisis, son temas de discusión en este capítulo, una vez definidos los pasos a seguir para la medición de la eficiencia y el desempeño del motor de inducción se presentan los resultados obtenidos, la discusión de estos se da mediante el análisis comparativo de las gráficas de las eficiencias obtenidas entre el método de deslizamiento y el cálculo de la eficiencia con ecuaciones de segundo grado se determina la variación entre las eficiencias de ambos métodos tomando como limite aceptable una variación de +/- 3 puntos de eficiencia, si los valores obtenidos tiene una variación mayor a la de criterio antes definido, estos se consideran como dudosa y de ser necesario se recomienda volver a medir la eficiencia con el método de deslizamiento para descartar errores en la medición, se analizan los resultados con este criterio además

Se presenta los resultados del programa desarrollado en matlab que determinan la eficiencia con el método de deslizamiento y también calcula el desempeño que tiene el motor en el instante en el que se realizaron la medición.

Capítulo 6 *Conclusiones y Recomendaciones*

La investigación hecha, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, son temas en consideración para la presentación de las conclusiones y recomendaciones, en las cuales se señalan todos los aspectos relevantes de la investigación así como el mejor desempeño de los resultados obtenidos tanto por el método de deslizamiento como por el cálculo de la eficiencia con ecuaciones de segundo grado, también se consideran todas las dificultades que se presentaron durante las mediciones y sus posibles soluciones, posteriormente se establecen las recomendaciones necesarias a seguir para la sustitución de los motores estándares por motores de alta eficiencia.

Se hacen las recomendaciones de la forma en como se debe de seguir esta investigación para futuras mediciones, y las consideraciones a tomar durante las mediciones para obtener mejores resultados.

CAPÍTULO 2

MOTORES DE INDUCCIÓN

2.1 Introducción.

Primeramente se establecen las bases de la inducción y el papel que juegan los campos magnéticos en los equipos que operan bajo el principio de inducción electromagnética, los motores de inducción ó conocidos también como motores asíncronos; reciben este nombre debido a que nunca operarán a su velocidad síncrona, en este capítulo se analiza el comportamiento de los motores de inducción del tipo trifásico, por ser los motores más utilizados en la industria, también se presentarán las bases de la operación de los motores de inducción su clasificación de acuerdo a sus características de diseño, y se define mediante fórmulas matemáticas la potencia desarrollada por el rotor y el comportamiento de su deslizamiento.

El par mecánico del motor es un tema de interés en particular por ser la fuerza que hace girar al rotor, los motores de inducción debido a sus características de construcción son de tipo jaula de ardilla, ó rotor devanado.

A pesar de la gran variedad que existe entre los motores de inducción, solo se consideran los motores trifásicos ya que son éstos los que más energía consumen en la industria, en términos básicos el motor de inducción es un motor eléctrico que convierte la energía eléctrica en energía mecánica rotatoria.

2.2 La inducción electromagnética

Si un alambre conductor se mueve dentro de un campo magnético de manera que el conductor corte las líneas de dicho campo, se origina una fuerza electromotriz, producida en el conductor. Induciendo la fuerza electromotriz, mediante un movimiento relativo entre el conductor y un campo magnético, se presenta lo que se conoce como la inducción electromagnética.

Si una sección de conductor se mueve a través de líneas de fuerza magnética, de manera que el alambre cruce ó corte la trayectoria de flujo se inducirá un voltaje en este conductor, como se puede apreciar en la figura 2.1a.

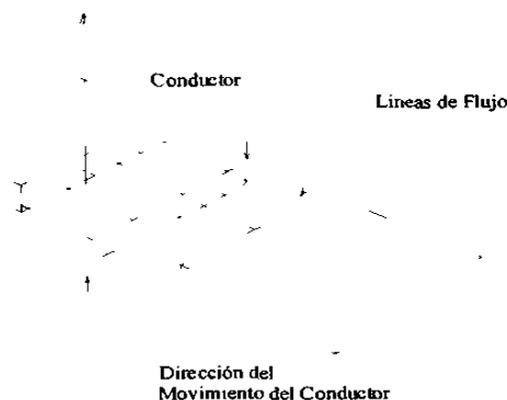


Figura 2.1a
El movimiento de un conductor a través de un flujo magnético al cortar la trayectoria del flujo, induce un voltaje en conductor

2.3 La ley de inducción Electromagnética de Faraday

Analizando ahora, una ley básica necesaria para el entendimiento de los aparatos que tienen campos magnéticos variables en el tiempo, se considera la configuración de la figura 2.2a que muestra a un conductor en forma de anillo y algunas líneas de flujo ó de inducción. Para simplificar se debe imaginar que las líneas de flujo son debido a un magneto ó a una bobina portadora de corriente, que no se muestran en la figura.

Las líneas de flujo se cierran sobre sí mismas y el conductor tiene forma de anillo, se puede decir que las líneas de flujo están enlazando al conductor. Este concepto de enlazamientos es muy útil, especialmente cuándo el conductor tiene más de una vuelta y por lo tanto enlaza a las líneas de flujo tantas veces como vueltas tiene.

En la figura 2.2a, el número de vueltas es 1 y el número de enlazamientos de flujo es igual al número de líneas de flujo. Otro ejemplo para entender más este concepto sería, si se tiene una bobina con tres vueltas, el número de enlazamientos de flujo será tres veces el número de líneas de flujo, en el sistema mks, el flujo está dado en webers y el eslabonamiento ó enlazamiento de flujo está por consiguiente expresado en webers-vuelta.

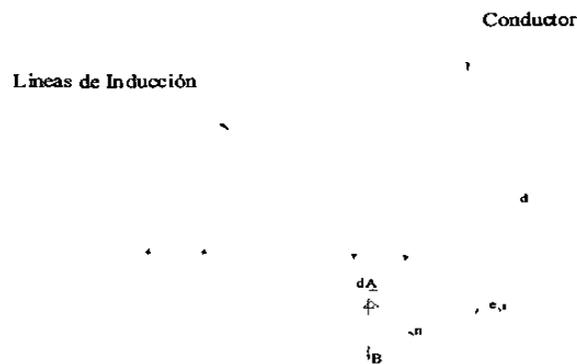


Figura 2.2a
Líneas de flujo enlazando a una bobina de una vuelta

En la primera parte del siglo XIX, el científico inglés Michael Faraday, hizo uno de los más importantes descubrimientos en electromagnetismo que en la actualidad se conoce como **La Ley de Inducción Electromagnética de Faraday** que relaciona fundamentalmente el voltaje y el flujo en el circuito, esta ley se puede definir de la siguiente forma:

- Si se tiene un flujo magnético que eslabona a una espira y además varía con el tiempo, se induce un voltaje en terminales
- El valor del voltaje inducido es proporcional al índice de cambio de flujo

Cuando el flujo de una espira varía en 1 weber por segundo, se induce un voltaje de 1 volt entre sus terminales, en consecuencia si un flujo varía dentro de una bobina de N espiras, el voltaje inducido se da por la siguiente expresión.

$$E = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

donde:

E = Voltaje inducido en volts.

N = Número de espiras en la bobina.

$\Delta\Phi$ = Cambio del flujo dentro de la espira o bobina (Weber).

Δt = Intervalo de tiempo durante el cuál el flujo cambia (S).

Otra ley conocida como la Ley de Lenz, permite determinar el sentido de la corriente inducida en el circuito. Este sentido es tal que genera un campo magnético que se opone a toda variación del campo magnético principal que lo origina.

2.4 Elementos que constituyen a un motor de inducción.

Un motor de inducción está constituido fundamentalmente por las siguientes partes.

- Estator.
- Rotor.
- Carcaza y partes auxiliares.

Estator

El estator es considerado como la parte estacionaria del motor de inducción, el estator está hecho de láminas de acero circulares, con ranuras a lo largo de su periferia interior, los lados de las bobinas se localizan en estas ranuras, la forma de las ranuras varía de acuerdo al tamaño ó al tipo de motor.

El estator representa una de las partes del circuito magnético del motor, en el caso de las máquinas trifásicas, los tres embobinados se localizan en el estator con separación entre ellos de 120° eléctricos. La figura 2.3a muestra el arreglo de un embobinado del estator

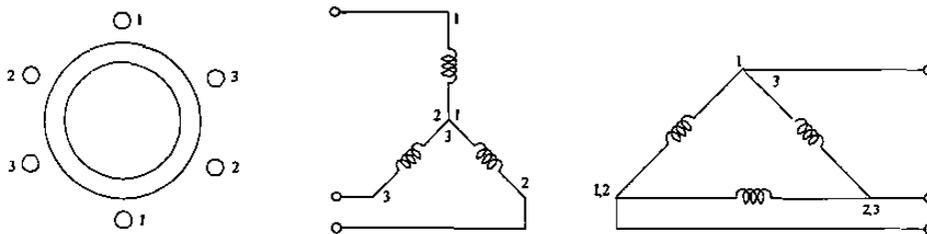


Figura 2.3 a
Arreglo de los embobinados de un estator trifásico

Rotor

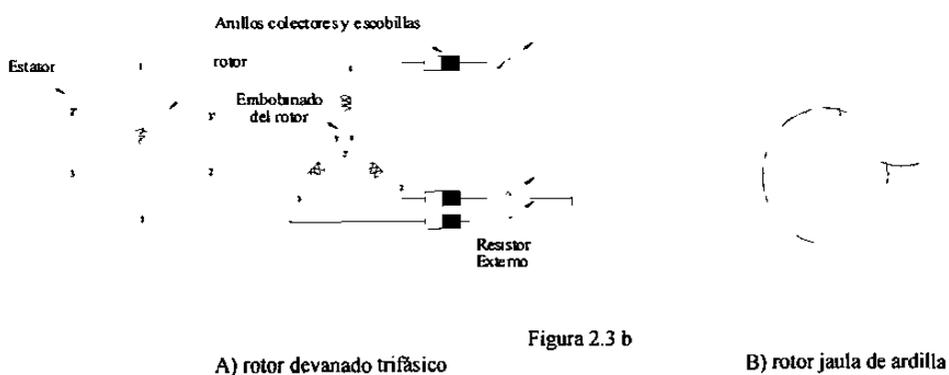
El rotor de una máquina de inducción puede ser ó un rotor devanado ó un rotor jaula de ardilla.

Rotor Devanado

Está provisto con embobinados similares a aquellos del estator con el cual está asociado, el rotor debe embobinarse con el mismo número de polos que el estator, el número de fases en el rotor no necesita ser el mismo que el estator, aunque en términos generales siempre es el mismo. El embobinado del rotor está conectado a anillos deslizantes montados en la flecha. Las escobillas estacionarias hacen contacto continuo con los anillos deslizantes y hacen posible para elementos externos, tales como resistencias ó fuentes de voltaje su conexión al rotor, para obtener un alto par de arranque a bajas corrientes ó para control de velocidad.

Rotor Jaula de Ardilla.

Este consiste de conductores colocados en ranuras e igualmente distribuidos a lo largo de la periferia del rotor, los extremos de los conductores se ponen en corto circuito por anillos metálicos terminales, la ventaja principal del rotor de jaula de ardilla aunado a su robustez, es que el número de polos del rotor es siempre igual al número de polos del estator con el cual está asociado, el mismo rotor puede usarse con un estator de una, de dos ó de tres fases. La desventaja es que no son posibles las conexiones externas al rotor, consecuentemente el control del motor deberá efectuarse externamente en el estator, la figura 2.3b muestra los diferentes tipos de rotores del motor de inducción



Carcaza y partes auxiliares

La carcaza recibe también el nombre de soporte por ser el elemento que contiene el estator y los elementos auxiliares del motor, estos elementos auxiliares son: tapas exterior y posterior, chumaceras, tornillos de sujeción, caja de conexiones, base ó soporte, los elementos auxiliares del motor de inducción son elementos necesarios para el funcionamiento de éste y dependen del tipo del motor.

2.5 Principios de operación del motor de inducción

El motor de inducción fue inventado por Nikola Tesla en 1888 y su principio de operación no requería conexiones a la parte rotatoria, la transferencia de energía de la parte estacionaria a la parte rotatoria es por medio de inducción electromagnética. Un campo magnético rotatorio producido por el devanado estacionario (estator) induce una fuerza electromotriz y una corriente en el rotor.

Aún cuando el flujo generado por cada bobina es únicamente un flujo alterno, las contribuciones de los flujos combinados de las tres bobinas superpuestas, llevan las corrientes en los ángulos de fase apropiados y produce un flujo rotatorio de dos polos, es este flujo rotatorio, el que produce la acción de inducción en el motor.

Haciendo un análisis de la operación de un motor de inducción, supongamos que el campo magnético rotatorio se produce aplicando un voltaje trifásico balanceado, a un estator trifásico si los voltajes giran en dirección contraria a las manecillas del reloj a una velocidad angular de ω radianes por segundo entonces el campo magnético girará en dirección de las manecillas del reloj con una velocidad angular de ω_s radianes por segundo donde la relación entre ω y ω_s esta dada por la siguiente expresión.

$$\omega = \omega_s = \frac{2\omega}{P} \quad (2.2)$$

donde:

ω = Radianes eléctricos por segundo.

ω_s = Radianes mecánicos por segundo.

P = Número de polos del motor de inducción.

Donde $\omega = 2\pi f$ siendo f la velocidad en ciclos por segundo y una revolución equivale a 2π radianes mecánicos, se concluye que la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio es:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.3)$$

donde:

N_s = Velocidad síncrona del campo magnético rotatorio.

f = Frecuencia en ciclos por segundo.

P = Número de polos del motor de inducción.

El campo magnético rotatorio puede representarse por un sistema de polos norte y sur girando con respecto al centro del estator; por simplicidad se usará un sistema de dos polos para representar al campo magnético, supongamos un rotor tipo jaula de ardilla como se puede apreciar en la figura 2.4a; para un mejor entendimiento se muestra una sola bobina del embobinado del rotor.

Al principio el rotor es estacionario. El campo magnético rotatorio recorre los conductores del rotor a ω_s radianes por segundo.

De acuerdo con la ley de Faraday de inducción electromagnética, una fuerza electromotriz se induce en la bobina del rotor.

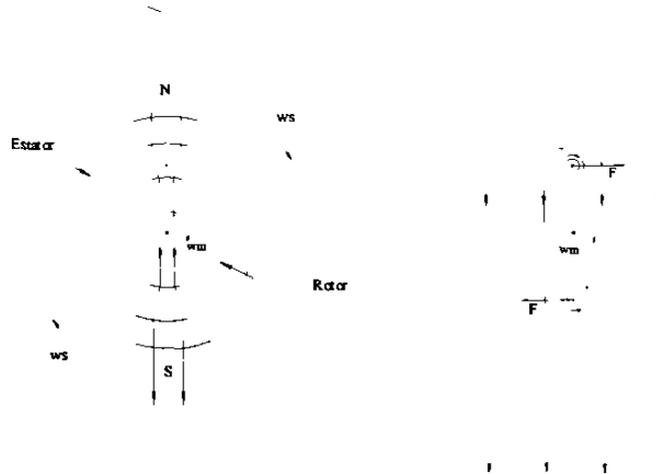


Figura 2.4a
Fuerzas ejercidas por el campo magnético rotatorio
en el rotor de un motor

Como se tiene una trayectoria cerrada. Empieza a circular una corriente en la bobina del rotor. Las direcciones del flujo de corriente, por la polaridad y la dirección de rotación del campo magnético supuesto, son como se muestran en la figura 2.4a, estas están de acuerdo con la ley de Lenz, la cual establece que la dirección de las corrientes inducidas debilita el campo magnético rotatorio en el lado delantero de los conductores y lo fortalecen en el lado de atrás. Una vez que se han establecido, las direcciones del flujo de la corriente, los conductores experimentan una fuerza cuando una corriente circula por el mismo. La magnitud de la fuerza varía directamente con la intensidad del campo magnético y la magnitud de la corriente que circula en el conductor de acuerdo con la expresión:

$$F = ILB \quad (2.4)$$

donde:

F = Fuerza en Newton.

B = Densidad de Flujo (weber/m²).

L = Longitud del conductor en metros.

I = Corriente en amperes.

Por efecto de estas fuerzas y utilizando la regla de la mano derecha, se observa que el rotor gira en la misma dirección que el campo magnético rotatorio y produce el par del motor. En el caso ideal cuando el rotor no tiene inercia ó pérdidas, alcanzará finalmente una velocidad de ω_s radianes por segundo. En éste estado será estacionario con respecto al campo magnético rotatorio y consecuentemente no se inducirá una fuerza electromotriz en la bobina del rotor y no circulará ninguna corriente y por lo tanto, el par desarrollado vale cero también.

Sin embargo, en la práctica el rotor tendrá alguna inercia y pérdidas y consecuentemente debe de recibir energía para vencer a ésta y aquellas. La energía puede transferirse al rotor de la fuente del voltaje conectada al estator solo si la velocidad angular del rotor es menor a la velocidad angular síncrona.

2.5.1 Deslizamiento.

Si N_s es la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio y N_r es la velocidad actual del rotor, la diferencia entre las dos se define como el deslizamiento, éste es frecuentemente expresado como una fracción de la velocidad síncrona.

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.5)$$

donde:

S = Deslizamiento.

N_s = Velocidad síncrona.

N_r = Velocidad del rotor.

El deslizamiento que sufre el rotor se ve afectado por la inercia y las pérdidas que tiene que vencer, debido a esto, la velocidad del rotor se ve disminuida con respecto a la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio.

La velocidad del rotor no podrá ser mayor a la velocidad síncrona, y si por alguna razón se da esto se dice que el rotor tiene un deslizamiento negativo, lo cual significa que la máquina está actuando como un generador.

2.5.2 Velocidad en el rotor.

Utilizando la ecuación (2.5) y despejando la velocidad del rotor N_r ; se obtendrá que:

$$N_r = N_s(1 - S) \quad (2.6)$$

Como se puede apreciar la velocidad del rotor depende del deslizamiento. Cuanto menor sea el deslizamiento, mas cerca estará el rotor trabajando a la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio, por consiguiente la carga de trabajo del motor será menor ó bien si el rotor tiene un alto deslizamiento esto es indicativo que el motor está sobrecargado, y la velocidad del rotor será menor a su velocidad nominal.

En la operación, la velocidad del rotor de un motor de inducción nunca será mayor a la velocidad síncrona, la cual es expresada por la ecuación (2.3), también es recomendable que el motor nunca opere por debajo de su velocidad de rotación nominal. La velocidad de rotación nominal es la velocidad del rotor a la cual está diseñado para entregar su máximo rendimiento.

El deslizamiento máximo permisible es del 15%. [5]

2.5.3 Frecuencia en el rotor.

La frecuencia del voltaje en el estator es la misma que la del voltaje en el rotor cuando el deslizamiento es unitario, en condiciones de marcha la frecuencia del rotor estará influenciada por el comportamiento del deslizamiento.

$$f_r = S \cdot f \quad (2.7)$$

donde:

S = Deslizamiento.

f_r = Frecuencia del rotor

f = Frecuencia del estator.

El deslizamiento puede ser medido con las frecuencias del rotor y el estator, esto solo puede ser posible en los motores de rotor devanado, ya que este tipo de motores tienen conexiones al rotor, en el caso de rotor tipo jaula de ardilla no es posible medir la frecuencia en el rotor, pero el comportamiento de la frecuencia del rotor es el mismo que en la ecuación (2.7).

2.5.4 Potencia desarrollada por el rotor.

P_{er} = Potencia de entrada al rotor transferida por el estator.

P_d = Potencia desarrollada por el rotor.

P_r = Pérdidas del devanado del rotor.

$$P_{er} = P_d + P_r \quad (2.8)$$

Despejando P_d de la ecuación (2.8).

$$P_d = P_{er} - P_r \quad (2.9)$$

donde:

$$P_{er} = q_1 I_r^2 \cdot R_r / S \quad (2.10)$$

$$P_r = q_1 R_r \cdot I_r^2 \quad (2.11)$$

q_1 es el número de fases del estator.

R_r es la resistencia del rotor.

Sustituyendo en la ecuación (2.9) las ecuaciones (2.10) y (2.11).

$$P_d = q_1 I_r^2 \cdot R_r / S - q_1 R_r \cdot I_r^2 \quad (2.12)$$

Factorizando los términos se obtendrá:

$$P_d = q_1 I_r^2 \cdot R_r (1 - S) / S \quad (2.13)$$

Por lo tanto Pd quedará de la siguiente forma.

$$Pd = Per(1 - S) \quad (2.14)$$

De la ecuación (2.14) despejamos el deslizamiento.

$$S = 1 - \frac{Pd}{Per} \quad (2.15)$$

Como:

$$S = (1 - Nr / Ns) \quad (2.16)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.15) la ecuación (2.16) y simplificando términos.

$$\frac{Nr}{Ns} = \frac{Pd}{Per} \quad (2.17)$$

Despejando Pd obtenemos:

$$Pd = \left(\frac{Per}{Ns} \right) \cdot Nr \quad (2.18)$$

Esto indica que Pd es proporcional a Nr , siempre y cuando Per sea constante, la constante de Per será 1.0 ($Per = 1.0$) ya que Per representa el 100% de la potencia de entrada al rotor, es decir:

$$Pd \propto Nr \quad (2.19)$$

Conociendo la velocidad del rotor podemos estimar la potencia que es desarrollada por el motor (Pd).

Esto es posible debido a que la velocidad que desarrolla el motor Nr varía conforme a la Pd que le es requerida. Una relación unitaria, entre la potencia desarrollada por el rotor y la velocidad del rotor sería de la siguiente forma:

$$Pd(pu's) = \frac{Ns - Nr_o}{Ns - Nr_n} \quad (2.20)$$

donde:

Ns es la velocidad síncrona del motor.

Nr_n es la velocidad nominal de operación del motor.

Nr_o es la velocidad real de operación el motor.

como:

$$Ps = Pd - \text{Pérdidas Rotacionales}$$

Siendo Ps la potencia mecánica de salida.

Entonces:

$$Ps(pu's) \cong \frac{Ns - Nr_o}{Ns - Nr_n} \quad (2.21)$$

como:

$Ns - Nr_o / Ns - Nr_n =$ Factor de caga por el método de Deslizamiento ($FCMD$).

Entonces:

$$Ps(pu's) \cong FCMD \quad (2.22)$$

Se debe entender que la potencia de salida en p.u. es aproximadamente igual al factor de carga medido por el método de deslizamiento.

Por otra parte, las pérdidas del rotor se pueden expresar como en la ecuación (2.11) de la siguiente manera.

$$Pr = q Rr \cdot I^2 r \quad (2.23)$$

Por lo tanto las pérdidas en el rotor pueden ser expresadas por la siguiente ecuación.

$$Pr = S \cdot Per \quad (2.24)$$

Como

$$Pd = Per - Pr \quad (2.25)$$

Entonces

$$Pd = \left[\frac{Pr}{S} - Pr \right] \quad (2.26)$$

Otra manera de conocer las pérdidas del rotor sin involucrar la Potencia de entrada del rotor (Per) es:

$$Pr = \left(\frac{Pd}{(1/S) - 1} \right) \quad (2.27)$$

2.6 El par del motor.

La potencia de salida del motor se define como P_s , esta potencia mecánica se mide tanto en hp como en watts, de esta forma se puede cuantificar la cantidad de trabajo que un motor es capaz de desarrollar en un periodo de tiempo.

Los factores que determinan la potencia mecánica de salida P_s son:

Nr = La velocidad del rotor.

T = El par del motor.

Por lo tanto podemos decir que:

$$P_s = T \cdot Nr \quad (2.28)$$

El par es la fuerza que tiende a producir la rotación, esta fuerza se mide en libras-pie ó Newton-metro. La velocidad del motor se establece comúnmente en rpm. La relación de la potencia, par y velocidad es de acuerdo a la ecuación (2.28). Como sabemos que un hp (746 Watts) es equivalente a 33,000 ft-lb por min., y que el par que se tiene, en una revolución de 360° es de $2\pi T$ ft-lb por lo tanto la ecuación de la relación potencia, par y velocidad se expresa de la siguiente forma;

$$P_s(\text{hp}) = \frac{2\pi \cdot NrT}{33,000} = \frac{Nr \cdot T}{5,252} \quad (2.29)$$

Si la potencia de salida P_s fuera expresada en Kwatts su ecuación será la siguiente:

$$P_s(Kw) = \frac{Nr \cdot T}{7,040} \quad (2.30)$$

Ahora, despejando el par T de la ecuación (2.29) se obtendrá:

$$T = 7,040 \frac{P_s}{Nr} \quad (2.31)$$

De acuerdo a las ecuaciones antes expresadas se observa que a menor velocidad de operación del motor, es mayor el par que se debe desarrollar para entregar la misma potencia de salida P_s .

El par en un motor de inducción se produce como lo establece la ecuación (2.31). Para soportar un par grande los motores de baja velocidad necesitan componentes más robustos que aquellos que operan a alta velocidad para la misma potencia nominal. La cantidad del par producido por un motor varía generalmente con la velocidad. Las características par-velocidad dependen del tipo y diseño de un motor, esta característica se muestra generalmente en una gráfica como la mostrada en la figura 2.5a.

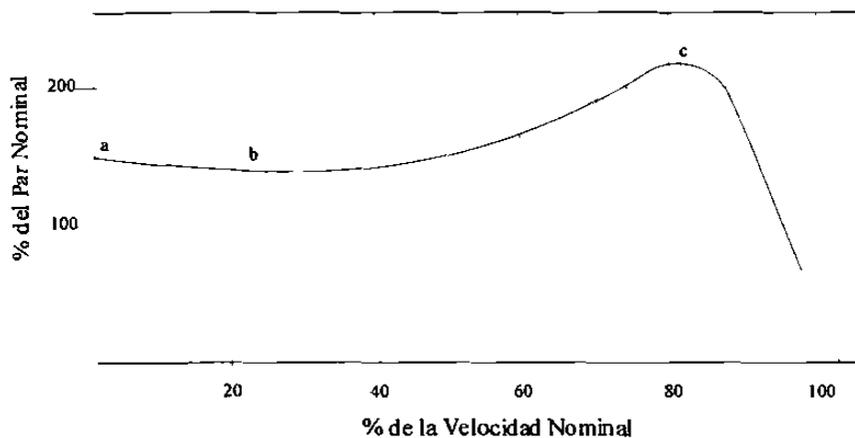


Figura 2.5 a
Curva Típica Par -Velocidad

A pesar de la no-linealidad del par-velocidad de la figura 2.5a, esta investigación se enfocó a medir la eficiencia del motor en condiciones de operación normal, durante la cual el par presenta una linealidad entre el 100% y 110% de su velocidad nominal, otros factores importantes indicados por la gráfica son los siguientes:

- (a) Par de Arranque. Es el par producido a velocidad cero.
- (b) Par de levantamiento. El mínimo par producido durante la aceleración del reposo a la velocidad de operación.
- (c) Par de ruptura. El máximo par que se puede producir en el motor antes de la caída.

De acuerdo a las curvas características de Par – Velocidad, los motores jaula de ardilla se diseñan en los tipos A, B, C y D, como se muestran en la figura 2.5b. El diseño tipo B es el más común y cubre la mayoría de las aplicaciones de los motores. En las curvas típicas de los motores jaula de ardilla se puede apreciar que la velocidad está expresada en porcentaje siendo el 100% la velocidad nominal de motor. Como se puede apreciar el par vale cero cuando la velocidad del motor de inducción tiende a ser una velocidad síncrona.

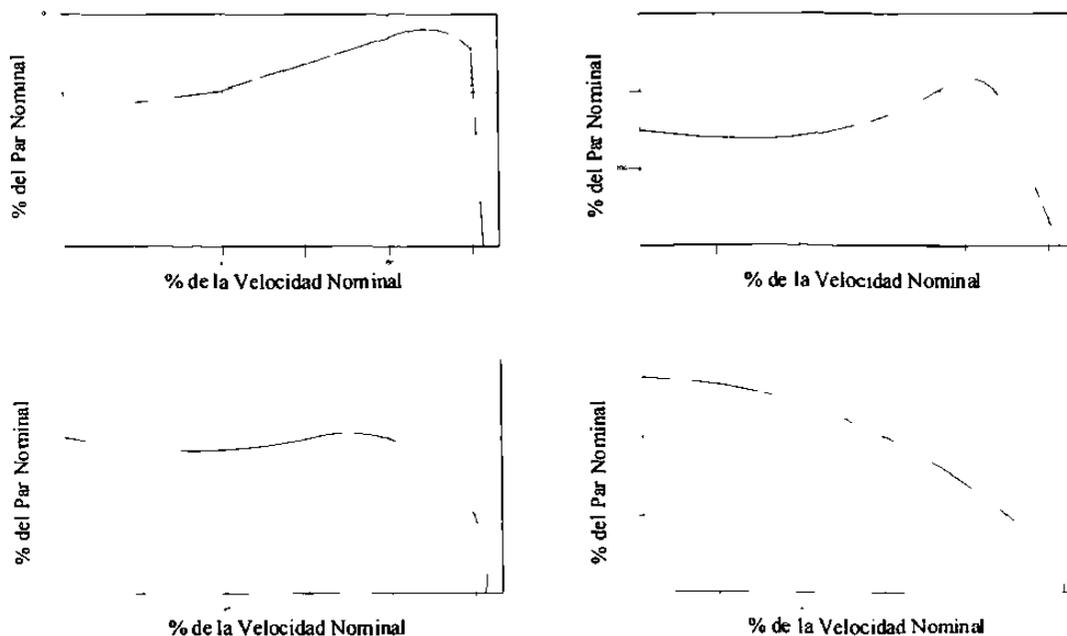


Figura 2.5b
Curvas Típicas Par-Velocidad
Para motores clase A,B,C y D

2.7 Factor de servicio.

El factor de servicio de un motor indica que tanto, sobre la capacidad en su potencia, puede operar el motor, sin que falle en forma inmediata.

La mayoría de los motores nuevos tienen un factor de servicio de 1.15, debido a la alta calidad de los materiales aislantes que pueden soportar temperaturas más elevadas. Sin embargo, antes de sobrecargar los motores para tomar ventaja de estos factores de servicios altos, hay algunos puntos que se deben de considerar. [5]

- La mayoría de los motores son ineficientes cuando operan por arriba de su potencia nominal, la mayoría de los motores tienen su máxima eficiencia a $\frac{3}{4}$ de carga, los factores de carga altos reducen la eficiencia.
- Aún cuando los motores no fallan en forma inmediata cuando operan entre su velocidad de plena carga y su factor de servicio nominal, tendrán una vida de operación más corta.
- Los problemas con la calidad de la energía eléctrica, tales como bajos voltajes, armónicas o desbalance de voltajes, provocarán en el motor un alto factor de servicio, por lo cual reducirá la eficiencia en los motores y su vida de operación.

Por estas razones no se recomienda que un motor opere a una capacidad mayor que la de su operación nominal, es posible que el motor por su factor de carga en determinados periodos opere más allá de su capacidad nominal, pero esta condición en algunos casos se interpreta como si ese motor se pudiera sobrecargar sin que haya deterioro en el motor. [5]

El Factor de servicio en un motor indica a qué capacidad es posible operar ese motor, pero es recomendable que sea en periodos de tiempo cortos "*picos de carga.*"

2.7.1 Factor de Carga.

Como ya es conocido la carga se define como la salida mecánica de un motor. Esta carga se mide en hp ó watts, la potencia nominal en hp indica la potencia máxima de salida que normalmente debe producirse, el factor de carga es un indicador de la capacidad a la cual está trabajando el motor.

Es importante determinar el factor de carga de los motores para estar seguros que están dimensionados en forma apropiada para sus aplicaciones y para ayudar a identificar problemas potenciales, como los mencionados con anterioridad cuando los motores están sobrecargados.

La fórmula para determinar el factor de carga en un motor es:

$$\%Fc = \frac{\text{Potencia de Entrada}}{\text{Potencia Nom. / Eff nom}} \cdot 100 \quad (2.32)$$

Los motores de inducción operan a una mayor eficiencia cuando trabajan cerca de su potencia nominal, sobrecargarlos no solo representa mayores pérdidas sino el deterioro acelerado de su aislamiento y si no se toman provisiones el motor puede fallar. [5]

Sin embargo en las instalaciones industriales es más frecuente encontrar motores que operan con baja carga que sobrecargados, esto es sobre dimensionados, las razones van desde una selección inadecuada de origen de la potencia del motor, hasta la sustitución de un motor averiado, por otro de mayor potencia que se dispone en ese momento y que, desafortunadamente se deja conectado de manera permanente.

2.8 Factor de potencia.

El factor de potencia ó el porciento del factor de potencia, mide la relación de cuanta potencia aparente es transformada a potencia real.

$$\%Fp = \frac{Kw}{Kva} \cdot 100 \quad (2.33)$$

La forma en como la energía eléctrica se consume se conoce como carga y ésta se divide en tres tipos; resistiva, inductiva y capacitiva.

Estás cargas determinarán el tipo de potencia que se consume: Kw, Kva, Kvar(i) y Kvar(c). En la figura 2.6a, se muestra un diagrama de potencias en la cual se puede apreciar la relación que existe entre cada una de ellas.

Cada una de las potencias mostradas en el diagrama de bloques equivale a una suma vectorial, las potencias reactivas guardan un ángulo de 180° entre sí, de modo que su suma vectorial equivale a una resta escalar, la potencia reactiva total y la potencia activa se suman vectorialmente (entre ellas habrá siempre un ángulo de 90°).

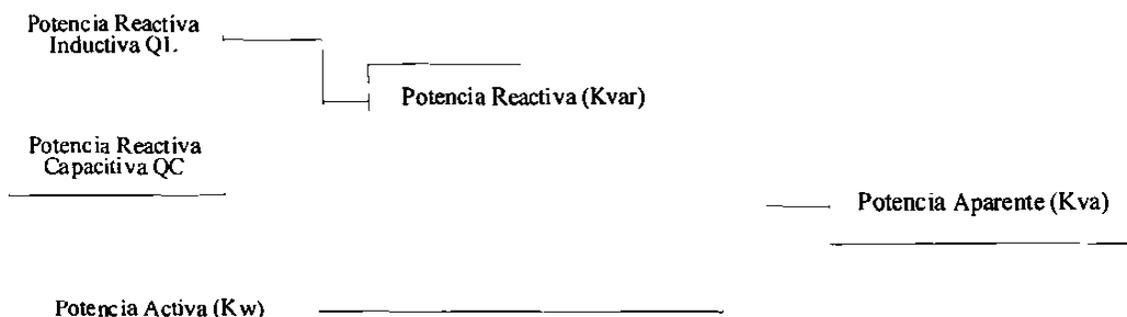


Figura 2.6 a
Diagrama de bloques de potencias

El factor de potencia en un motor de inducción es un indicador de cuanta potencia aparente se está transformando en potencia activa. El motor se considera una carga inductiva. El factor de potencia en un motor varía conforme al factor de carga, esto es debido a que en condiciones de vacío, el motor tiene un consumo de potencia reactiva mayor que el consumo de la potencia activa, haciendo que el factor de potencia disminuya considerablemente.

En la medida que el motor empieza a tomar carga su potencia reactiva disminuye la potencia activa se incrementará, por consiguiente el factor de potencia tenderá a mejorar. La figura 2.6b, muestra el comportamiento del factor de potencia conforme al incremento de la carga del motor. Como se puede apreciar en la figura antes mencionada, conforme se incrementa la carga del motor el factor de potencia mejora, por esta razón, para determinar el factor de carga del motor se necesita un wáttmetro, ya que de utilizar un amperímetro, la medición no sería válida por debajo del 60% de la carga del motor, debido a la porción grande de corriente reactiva que está demandando. Tampoco es válido calcular la potencia de entrada de un motor utilizando un amperímetro, a pesar de que es una práctica muy común.

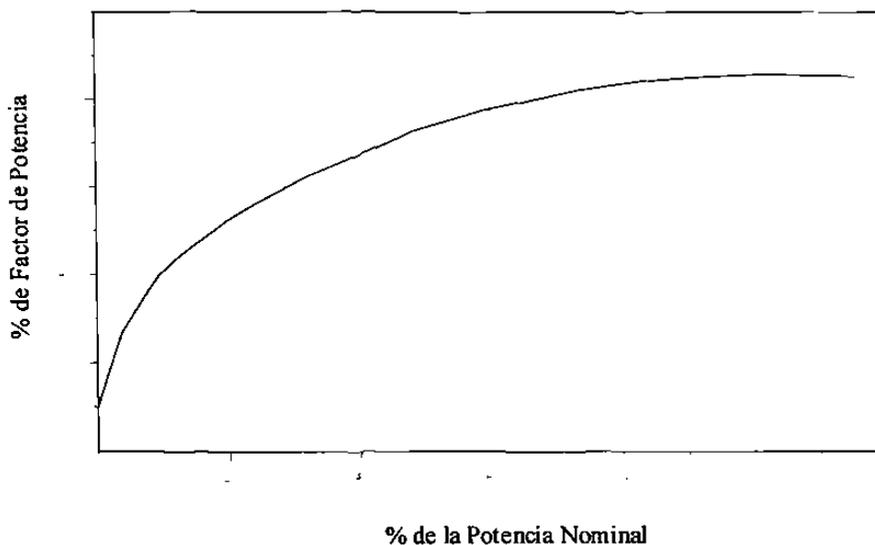


Figura 2.6b
Comportamiento típico del Factor de Potencia
en un Motor de Inducción

2.9 El desempeño de un motor de inducción.

A continuación se presentan las pruebas realizadas a un motor de 5 hp, clase b de 4 polos, los resultados son gráficos en la figura 2.7a, la cual muestra el desempeño de este motor de inducción, arrojando un comportamiento típico para este tipo de motores.

Gráfica (A), *La Potencia de salida.*

Se puede apreciar como la potencia de salida se incrementa, en la medida en que la velocidad del rotor aumenta, y cuando la velocidad del rotor es igual ó cercana a la velocidad síncrona, la potencia de salida disminuye hasta un valor cercano a cero.

Gráfica (B), *La Eficiencia de motor.*

En esta gráfica se puede apreciar el valor de la eficiencia con respecto a la velocidad del rotor, esta eficiencia varía ya que la velocidad está en función de la carga del motor lo destacable de esta gráfica es observar como el motor obtiene su mejor eficiencia cerca de su velocidad nominal ó a $\frac{3}{4}$ de carga.

Gráfica (C), *El Par desarrollado.*

De acuerdo a la gráfica el Par que desarrolla el motor es del tipo B, en el cual se pueden apreciar las características de Par- Velocidad, así como los diferentes pares que se presentan en el motor como el par de arranque, levantamiento y ruptura, también se observan las características no lineales de par velocidad en esta gráfica, hay que destacar que esta investigación se limita a medir la eficiencia del motor en condiciones de operación normal cuando el par tiene un comportamiento lineal.

Gráfica (D), *El Factor de potencia.*

En esta gráfica se observa que en la medida en que se incrementa la carga del motor el factor de potencia mejora debido a que disminuyen los reactivos que el motor toma de la red, como se había mencionado con anterioridad.

Gráfica (E), *La Corriente del motor.*

Se puede observar cómo disminuye la corriente del motor conforme gira la flecha con menor esfuerzo, la corriente se incrementa a medida que la carga del motor aumenta, en condiciones de rotor bloqueado la corriente puede alcanzar hasta 5 veces su valor nominal, también durante el arranque de un motor, la fem. es cero y se requiere una gran cantidad de corriente para romper la inercia y aumentar la velocidad.

Gráfica (F), *La Relación Potencia de Salida – Método de Deslizamiento.*

Esta es la gráfica más interesante para nuestra investigación debido a que los resultados arrojados muestran la medición de la potencia de salida y junto con esta se midió el factor de carga utilizando el método de deslizamiento, ambos en función del deslizamiento del rotor, los resultados fueron graficados y muestran como la potencia de salida y el factor de carga por el método de deslizamiento son aproximadamente iguales, excepto cuando el motor tomó una carga mayor a la nominal, en este caso se pierde la proporcionalidad ya que la potencia de salida tenderá a disminuir y el factor de carga seguirá con la misma tendencia en forma de pendiente.

Graficas del desempeño de un motor de Inducción.

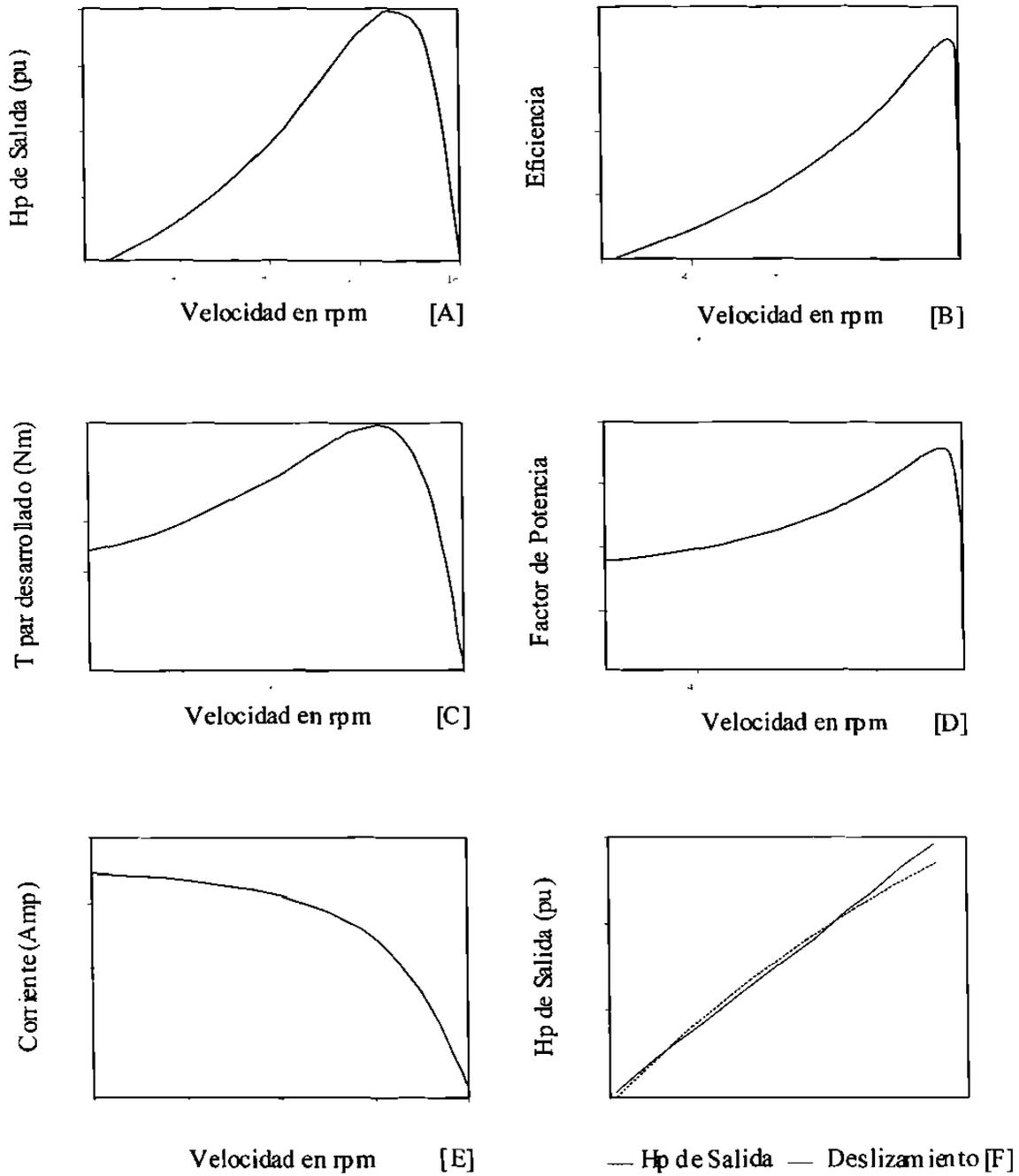


Figura 2.7 a
 Desempeño de un motor de inducción
 5 hp Clase B, 4 polos [1]

2.10 MOTORES EFICIENTES.

2.10.1 Introducción.

Se estima que los motores eléctricos representan un 70% de la energía consumida por una industria [5]. De estos consumos, un alto porcentaje corresponde a los motores tipo jaula de ardilla. Como se sabe los motores de inducción convierten la energía eléctrica a energía mecánica, este proceso de conversión nunca es perfecto, por consiguiente existen las pérdidas en los motores, estas pérdidas representan un costo de energía que se está desperdiciando.

Debido a estas pérdidas los fabricantes de motores, se dieron a la tarea de mejorar sus diseños, creando el concepto de los motores de alta eficiencia, el resultado ha sido disponer de motores con pérdidas menores de hasta un 45% que las de los motores estándar, la manufactura y el uso de mejores materiales se traduce en un costo mayor, los motores de alta eficiencia tienen un precio entre 15 y 30 % mayor que los motores convencionales, pero estos sobrepagos pueden ser recuperados en un periodo razonable, con los ahorros que se obtengan al reducir su consumo de energía eléctrica.

2.11 Eficiencia del motor de Inducción.

En el caso de los motores eléctricos no es exactamente correcto decir que consumen energía eléctrica, más bien convierten la energía eléctrica a potencia mecánica. Este proceso de conversión nunca es perfecto, ya que una porción de la energía de entrada se convierte en calor.

La relación de energía mecánica de salida dividida entre la energía eléctrica de entrada, se le llama Eficiencia, un incremento en la eficiencia de un motor se manifiesta cuando una cantidad dada de potencia eléctrica de entrada disminuye, y la potencia mecánica de salida no cambia, la siguiente ecuación muestra la forma en como se determina la eficiencia de los motores.

$$\text{Eficiencia} = \frac{P.\text{salida}}{P.\text{entrada}} = \frac{P.\text{entrada} - \text{pérdidas}}{P.\text{entrada}} = \frac{P.\text{salida}}{P.\text{salida} + \text{pérdidas}} \quad (2.34)$$

La eficiencia sirve para conocer cuanta de la energía eléctrica se convierte en energía mecánica y también conocer cuanta energía eléctrica se desperdicia en forma de calor. A medida que los motores tienen una mayor eficiencia sus pérdidas serán menores, reflejándose en un menor consumo. La eficiencia de los motores no tiene un comportamiento constante ya que ésta varía conforme al factor de carga del motor.

La figura 2.7a (Gráfica B) muestra el desempeño de un motor de inducción, se puede apreciar el comportamiento de la eficiencia de un motor conforme a la velocidad del rotor, como se observa la velocidad del rotor varía conforme a la carga del mismo.

2.12 Las pérdidas en el motor.

Las pérdidas en los motores son básicamente de dos tipos: fijas y variables.

Las fijas no cambian en función de la carga del motor.

Las pérdidas variables son las de carácter eléctrico y dependen de la carga aplicada al motor; se manifiestan en los conductores del estator y rotor y varían en proporción al cuadrado de la corriente, con resistencia esencialmente constante (RI^2)

Las pérdidas de energía son un factor determinante en la eficiencia del motor, y en la justificación del cambio de un motor convencional por uno de alta eficiencia.

Las pérdidas pueden dividirse en cinco clases, como se indica en la figura 2.8a.

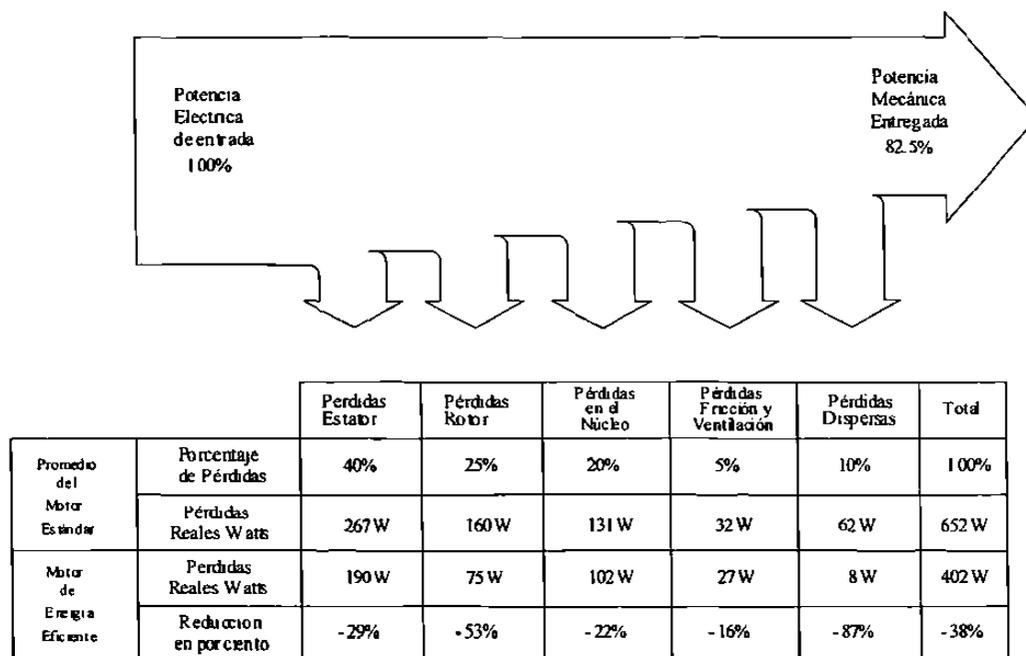


Figura 2 8 a
Comparación de pérdidas para un motor de 5 hp de 4 polos, Estándar y de Energía Eficiente
Esta información es recabada de un censo elaborado por la fuente citada en [5]

2.12.1 Clases de pérdidas de energía en un motor.

Las pérdidas consumen sólo una fracción de la potencia de entrada y se pueden agrupar de la siguiente manera:

- Pérdidas eléctricas en los devanados (RI^2).
- Pérdidas magnéticas ó en el núcleo.
- Pérdidas por fricción y ventilación.
- Pérdidas dispersas.

En condiciones normales de tensión y frecuencia las pérdidas de fricción, ventilación y núcleo se mantienen casi constantes, independiente de la carga impulsada, no así las pérdidas eléctricas y dispersas que varían con la potencia exigida en la flecha del motor, la máxima eficiencia se obtiene cuando las pérdidas constantes son similares a las pérdidas variables, la gráfica 2.9a muestra el comportamiento de las pérdidas con respecto al factor de carga del motor.[4]

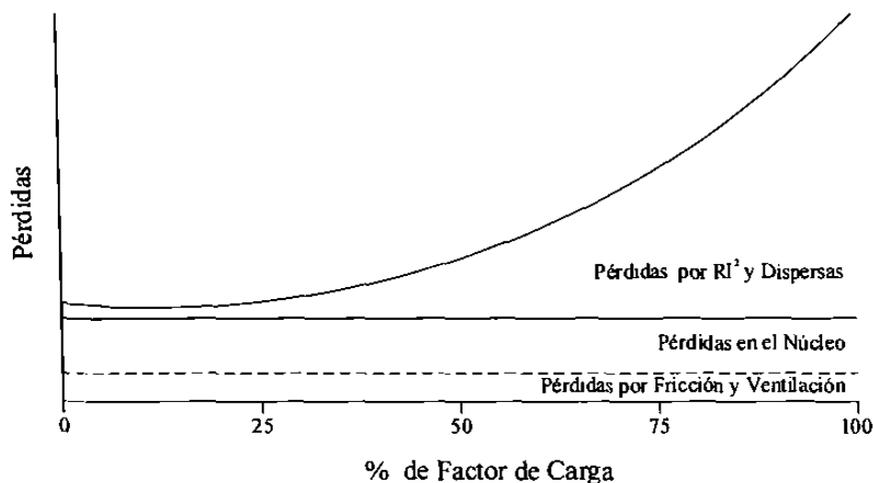


Figura 2.9 a
Comportamiento de las pérdidas
En función de la Carga de un motor

Estas pérdidas se pueden describir en términos de sus características como se indica en la tabla siguiente.

Tabla 2.9b

Tipos de pérdidas y sus Características [5]

<i>Nombre</i>	<i>Porcentaje del total de pérdidas</i>	<i>Descripción</i>	<i>Fijas ó Variables</i>	<i>Como Reducirlas</i>
Pérdidas en el núcleo	15 - 25%	Energía requerida para magnetizar el núcleo	Fijas	Mejorando la permeabilidad del acero (silicio) usando laminaciones más delgadas, modificando la longitud del núcleo
Fricción y ventilación	5 - 15%	Pérdidas debidas a la fricción de las chumaceras y a la resistencia del aire, las cuales se producen en primer lugar por el ventilador	Fijas	Usando chumaceras de baja fricción y mejorando el diseño de los ventiladores
Pérdidas en el devanado de estator	25 - 40%	Calentamiento debido al flujo de corriente (I) a través de la resistencia (R) del devanado del estator. También se conoce como RI^2	Variables	Aumentando el volumen del cobre en el devanado del estator, mejorando el diseño de las ranuras y usando un aislamiento más delgado
Pérdidas en el Rotor	15 - 25%	Calentamiento debido a las pérdidas RI^2 en la barra del rotor	Variables	Aumentando el tamaño de las barras conductoras del rotor y anillos terminales
Pérdidas dispersas	10 - 20%	Flujo disperso inducido por las corrientes de cargas y otras corrientes menores	Variables	Mejorando varios detalles en el diseño y manufactura

Aún cuando algunas de estas pérdidas representan una porción relativamente pequeña de la energía usada por el motor, su total es significativo, estas pérdidas son un desperdicio de energía que produce calor. Debido a que el calor producido acelera el envejecimiento de las chumaceras y del aislamiento, finalmente las pérdidas reducen la vida del motor y su confiabilidad.

2.12.2 Las pérdidas en el motor por variación en el voltaje.

La variación del voltaje existe cuando hay diferencia entre el voltaje de operación del motor y el voltaje nominal del mismo.

La variación del voltaje ocasiona que las características de operación de los motores cambien, provocando mayores pérdidas.

En la figura 2.10a, se determina el porcentaje de cambio en la eficiencia, factor de potencia y corriente, provocado por la variación de voltaje, el criterio para definir el porcentaje de variación en el voltaje fue establecido en la ecuación (3.5).

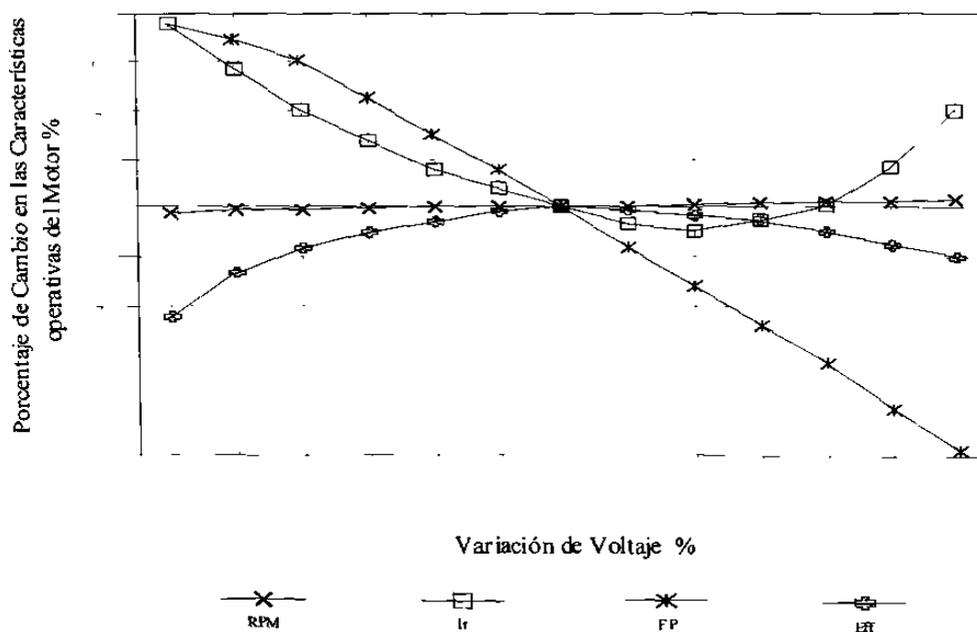


Figura 2.10 a
Porcentaje de cambio en las características de operación del motor

Como resultado de los bajos voltajes el motor no desarrolla la potencia nominal. El deslizamiento del motor también aumenta con el cuadrado de la caída del voltaje debido a esto el motor gira más lentamente con una potencia de salida menor.[3]

La corriente del motor se incrementa debido a los bajos voltajes, las pérdidas en el motor están influenciadas por la RI^2 y estas se verán incrementadas, y la potencia de salida se verá ligeramente disminuida por la caída del voltaje, ya que el par del motor es proporcional al cuadrado del voltaje y el deslizamiento es inversamente proporcional al par, por lo cual el motor sufrirá cambios en su velocidad por el incremento ó la disminución del voltaje, todo esto se puede apreciar en las siguientes ecuaciones. [5]

$$T_n = T_o \cdot \left(\frac{V_n}{V_o} \right)^2 \quad (2.34)$$

donde:

T_n = el nuevo par por la variación de voltaje.

T_o = el par original a voltaje nominal.

V_n = el voltaje de variación.

V_o = el voltaje nominal.

Ahora bien el deslizamiento se comporta de la siguiente forma.

$$S_n = S_o \cdot \left(\frac{T_o}{T_n} \right) \cdot \left(\frac{R_{rn}}{R_o} \right) \quad (2.35)$$

donde:

T_n = el nuevo par por la variación de voltaje.

T_o = el par original a voltaje nominal.

S_n = el nuevo deslizamiento por la variación de voltaje.

S_o = el deslizamiento original a voltaje nominal.

R_{rn} = la nueva resistencia del rotor.

R_r = la resistencia original del rotor.

Normalmente es verdad que los motores tiendan a operar mas fríos a voltajes nominales, con un *10%* de sobrevoltaje el motor estará sobrecargado en aproximadamente un *10%*, la pérdida medular será de *20%* a *30%* más alta que la normal y esto podrá causar que la máquina se sobrecaliente. [3]

Una situación muy común de encontrar en la industria es la siguiente:

La Industria cuenta con motores trifásicos de diferentes voltajes *desde 220/440-460V* etc., por lo que se debe tener el cuidado de elegir un voltaje adecuado. Es muy común encontrar en la industria motores que requieren *460V* y el transformador que suministra el voltaje a ese motor se encuentra en el Tap de *440V* y si ha esto se le agrega un bajo FP más la caída del voltaje en la línea por la RI^2 , se tendrá un motor con un voltaje de alimentación menor al cual fue diseñado, por consiguiente la eficiencia de los motores se verá disminuida a pesar de que se cuenten con motores de alta eficiencia.

En la Industria se debe de tomar en cuenta, que la variación de voltaje afecta el desempeño del motor y consecuentemente su eficiencia, solo así se tomarán medidas a fondo ante esta problemática.

2.12.3 Las pérdidas en el motor por desbalance en el voltaje.

Un indicador del desbalance de voltaje entre las fases se puede obtener evaluando la máxima desviación del voltaje de línea al voltaje promedio de un sistema trifásico, dividido entre el voltaje promedio. El desbalance de voltaje provoca un mal funcionamiento en los motores, la figura 2.11a muestra el factor de ajuste a la eficiencia del motor por desbalance de voltaje.

De acuerdo al porcentaje del desbalance en el voltaje es el factor de ajuste a la eficiencia del motor.

El desbalance del voltaje generalmente es provocado por la mala distribución de las cargas monofásicas, un mal funcionamiento en los capacitores, circuitos abiertos en el lado primario (aunque estos son muy esporádicamente), el criterio para definir el porcentaje del desbalance en el voltaje fue establecido en la ecuación (3.10).

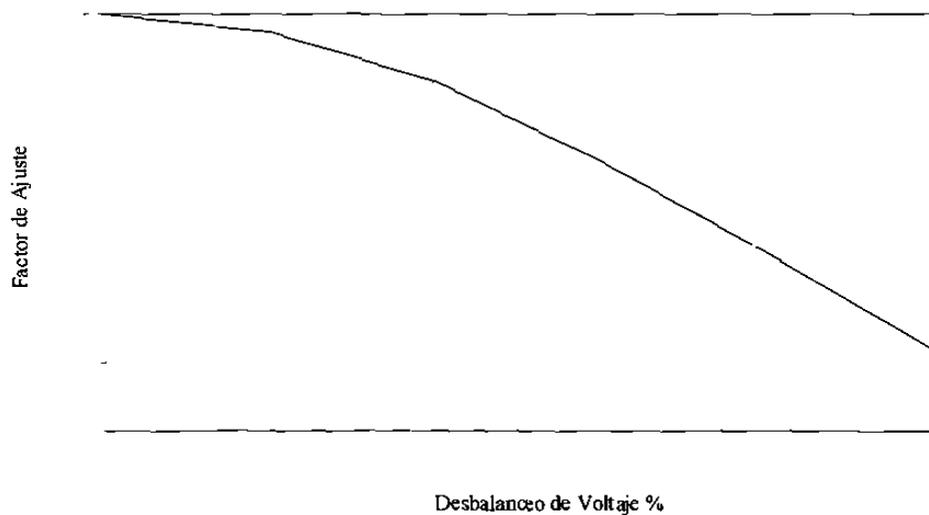


Figura 2.11 a
Factores de ajuste al funcionamiento del motor
por desbalanceo de voltaje

Los voltajes desbalanceados producirán corrientes de secuencia negativa, y provocan un calentamiento excesivo del embobinado del estator y en las barras del rotor, pero no producirán potencia de salida útil, es necesaria la disminución de la carga del motor cuando el desbalanceo de voltaje exceda el 1% como se define en la figura 2.11a [3].

En el desbalance de voltaje se presenta una situación similar como en la variación del voltaje, la eficiencia disminuirá conforme se incrementen las pérdidas RI^2 , la potencia de entrada se incrementará, y el factor de carga cambia provocando disminución en la eficiencia, a un valor menor que la nominal. En los casos de la variación y desbalanceo en el voltaje se tendrá un mayor factor de carga en el motor. Como se aprecia la calidad de la energía juega un papel fundamental para el buen desempeño de los motores.

La idea primordial de mencionar las pérdidas de eficiencia por desbalance está enfocada, en que la industria reconozca las consecuencias que provoca el tener este problema en los voltajes.

Otra situación por la cual no se tiene un mayor cuidado en la calidad de la energía es que las pérdidas provocadas por este tipo de problemas son difíciles de cuantificar. En términos generales el desbalance de voltaje no es relevante cuando no supera el 1.0% de su magnitud, sin embargo al detectarse algún problema por desbalance de voltajes mayor al 1.0%, se debe de corregir inmediatamente. [11]

2.12.4 Pérdida de eficiencia en la reparación de motores.

Las fallas en los motores tienen con frecuencia su origen en los desperfectos mecánicos, muchas veces acompañadas por daños severos en el aislamiento de los devanados, por lo que es necesario su reembobinado ó su sustitución.

Si bien es técnicamente posible reparar un motor para que mantenga sus condiciones generales de desempeño, en la práctica se ha demostrado que la eficiencia se reduce en un promedio del 1 al 2 %, [15] cada vez que un motor se reembobina en talleres especializados, y porcentajes bastantes mayores en lugares donde no se cuenta con el equipo adecuado ni personal calificado para realizar las composturas.

Cuando un motor sufre un desperfecto en su devanado y que por ello hay que reembobinarlo, puede disminuir su eficiencia considerablemente si durante el proceso de reparación se presentan las siguientes condiciones:

- 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 en el 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 igual o superior a los originales. Un motor reembobinado al ser instalado nuevamente, gastará más energía que antes, por esta razón puede ser más económico sustituir un motor que mandarlo a reembobinar.

2.12.5 Efectos de las armónicas en los motores de inducción.

Fundamentalmente las armónicas producen en los motores de inducción efectos de pérdidas y la disminución en el par generado.

Si el voltaje que se alimenta a un motor de inducción contiene componentes armónicas, entonces se incrementan sus pérdidas de RI^2 en el rotor y el estator, pérdidas en el núcleo (eddy e histéresis) y pérdidas adicionales, en tanto que las pérdidas de fricción y ventilación no son afectadas por las armónicas. En forma más detallada se presenta el siguiente análisis de las pérdidas.

Pérdidas RI^2 en el estator: al operar estas máquinas de inducción con voltajes de contenido armónico no solo aumentan estas pérdidas por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aun más las pérdidas RI^2 .

Pérdidas RI^2 en el rotor: estas aumentan de maneras más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.

Pérdidas del núcleo: estas pérdidas son en función de la densidad de flujo en la máquina. Estas aumentan con excitación de voltaje no senoidal puesto que se tienen densidades de flujo picos más elevadas, sin embargo su aumento es menor que las pérdidas mencionadas anteriormente e incluso son más difíciles de cuantificar.

Pérdidas adicionales: son muy difíciles de cuantificar aun bajo condiciones de voltaje senoidal. Al aplicar voltajes no senoidales, estas aumentan en forma particular para cada máquina.

Referente al par en el motor de Inducción. Las armónicas de secuencia positiva producen en el motor de inducción un par en el mismo sentido de la dirección de rotación, en tanto que las de la secuencia negativa tienen el efecto opuesto.

En caso de que se tenga conectado el neutro, el par producido por las armónicas múltiplo de tres es igual a cero; dependiendo del contenido armónico del voltaje aplicado, el par promedio de operación puede verse disminuido considerablemente sin embargo en la mayoría de los casos el efecto producido por las armónicas de secuencia negativa se cancela con el efecto de la secuencia positiva por lo que su efecto neto en el par promedio puede despreciarse.

En la interacción de las corrientes armónicas del rotor con el flujo de entrehierro de otra armónica se producen pares (T) pulsantes en los motores, lo que puede afectar a la calidad del producto donde las cargas de los motores son sensibles a este tipo de variaciones. Estos pares (T) pulsantes también pueden excitar una frecuencia de resonancia mecánica lo que resultaría en oscilaciones que pueden causar fatiga en la flecha y otras partes mecánicas conectadas.

En algunos casos la magnitud de estos pares es generalmente pequeña y su valor promedio tiende a cero. [6]

CAPÍTULO 3

CÁLCULO DE LA EFICIENCIA

3.1 Introducción

En este capítulo se analizan las ecuaciones con las cuales es posible determinar la eficiencia de los motores de inducción en función del deslizamiento, y se calcula también la eficiencia a cualquier factor de carga con una interpolación cuadrática, este capítulo está enfocado en establecer las bases para la realización de una metodología a la medición de la eficiencia de los motores de inducción tipo jaula de ardilla (trifásicos).

Se establecen las ecuaciones y los aspectos relevantes en la calidad de la energía, debido a que juega un papel primordial en el comportamiento de la eficiencia de los motores de inducción, ya que ésta puede disminuir considerablemente de presentarse este problema, otro punto en consideración para determinar la eficiencia son los ajustes por la variación y desbalance en el voltaje, también se considera la variación en la frecuencia porque esta afecta al método de deslizamiento y a su vez provoca un resultado erróneo al calcular la potencia de salida.

El efecto de las armónicas en los motores es difícil de cuantificar, el método propuesto no establece las ecuaciones para determinar las pérdidas por armónicas. Pero esto no limita la medición de la eficiencia a los motores con estos tipos de problemas.

3.2 Comportamiento del deslizamiento en motores de inducción.

El factor de carga medido por el deslizamiento de un motor es aproximadamente proporcional a la carga del mismo, esto es debido a que la potencia de salida P_s viaja a una velocidad asíncrona, la del rotor N_r como se puede apreciar en la ecuación (2.21), debido a que la velocidad del rotor varía conforme a la carga del motor de inducción, la velocidad N_r tendrá un deslizamiento (con respecto a la velocidad síncrona del motor) provocado por las pérdidas y la carga del motor, ya que el deslizamiento del motor es un reflejo de la carga del mismo.

La siguiente figura muestra el comportamiento del deslizamiento del motor y la potencia de salida en la flecha, a pesar de no ser iguales, conociendo el deslizamiento se puede predecir con cierta certeza la potencia mecánica de salida del motor, el método de deslizamiento sirve para conocer el factor de carga del motor e indirectamente calcular la eficiencia, considerando ciertas restricciones y limitaciones.

La figura 3.1a muestra la potencia de salida en pu's.

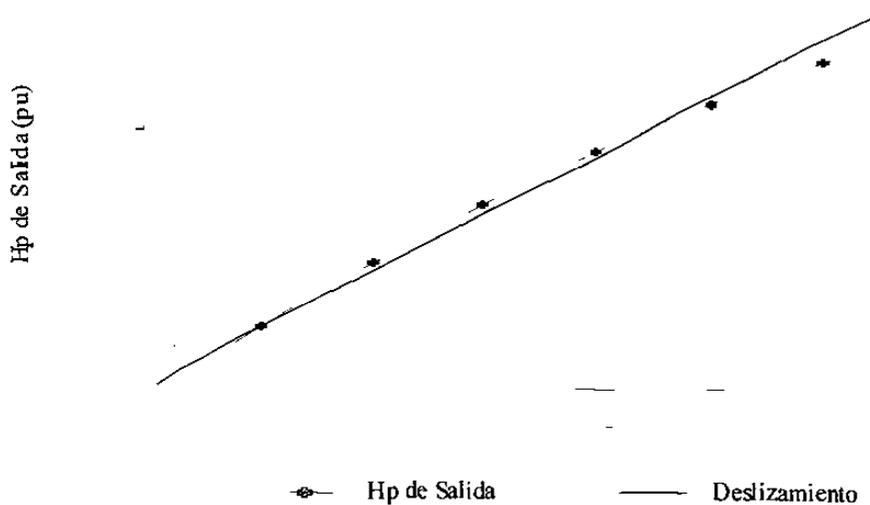


Figura 3.1 a
Motor de Inducción clase B

3.3 Comportamiento del deslizamiento por variación de frecuencia.

La velocidad síncrona del motor está dada por la ecuación (2.3) la cual establece la relación entre la frecuencia y el número de polos del motor, la frecuencia puede sufrir una variación de $\pm 0.8\%$, (*alrededor de ± 0.5 hz, variación basada en contratos de suministro de energía eléctrica que establece CFE con la Industria*).

Esta variación provoca cambios en la velocidad síncrona del motor, por consiguiente su deslizamiento de operación será mayor ó menor viéndose afectado por la variación de la frecuencia, así mismo el cálculo del factor de carga no será preciso.

La gráfica 3.2a, muestra el comportamiento de un motor de inducción de 4 polos en el cual se simuló la variación de la frecuencia y se observó como ésta, afecta a su velocidad síncrona, de presentarse esta variación en la frecuencia y si no se considera para el cálculo del factor de carga con el método de deslizamiento, se tendrá un error en el cálculo antes mencionado como se puede apreciar en la siguiente figura.

Se consideró un motor de 5 hp a (1725 rpm *nom.*), velocidad de operación: 1760 rpm.

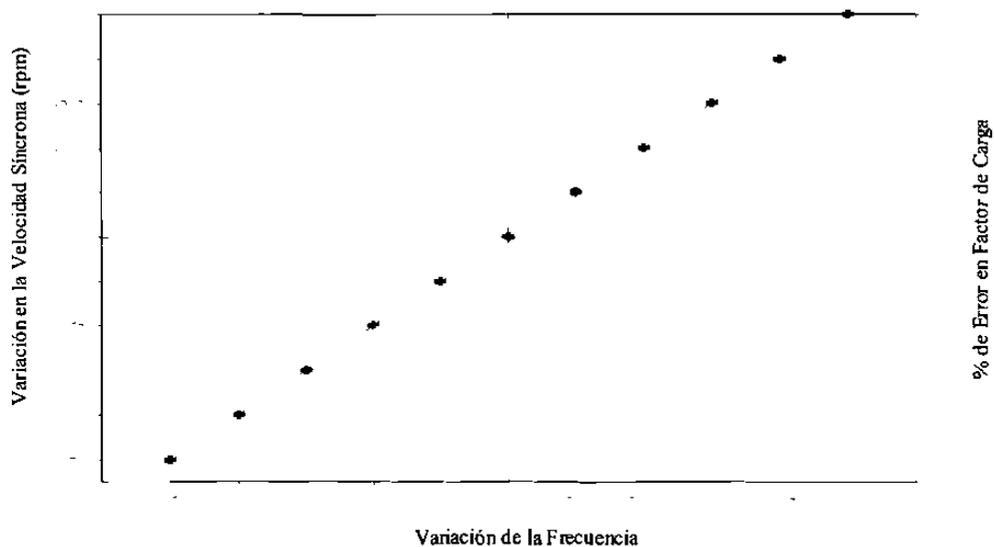


Figura 3.2a
Comportamiento del motor clase B
5 hps 4 polos

3.4 El método de deslizamiento.

De acuerdo a la figura 3.1a, el factor de carga medido con el deslizamiento del motor es aproximadamente proporcional a la carga, por ejemplo, si el motor opera a $\frac{3}{4}$ de carga es alrededor de un 75 % de su deslizamiento a plena carga, a $\frac{1}{2}$ carga tiene un 50% del deslizamiento a plena carga etc. *(esto es debido a que ambas son lineales)*

La fórmula para calcular la carga de operación a partir del deslizamiento es:

$$(\%)Fc = \frac{\text{Deslizamiento operación}}{\text{Deslizamiento al } 100\%} \cdot 100 \quad (3.1)$$

donde:

Deslizamiento de Operación es $(Ns - Nr\text{-operación})$

Deslizamiento a plena carga es $(Ns - Nr\text{-plena carga})$

Por lo tanto, el factor de carga con el método de deslizamiento es expresado en la siguiente fórmula

$$FC_{MMD} = \frac{Ns - Nr(\text{operación})}{Ns - Nr(100\% \text{ carga})} \quad (3.2)$$

Conociendo el factor de carga en la flecha del motor se puede considerar que la potencia de salida será:

$$Ps = FC_{AVF} \cdot Pnom \quad (3.3)$$

donde

FC_{AVF} es el factor de carga ajustado por la variación de la frecuencia

La velocidad a plena carga es aquella que el motor desarrolla cuando se encuentra a potencia nominal. Generalmente esta información se obtiene de los datos que el fabricante establece. En la ecuación (3.3) se identifica la potencia nominal como “ P_{nom} ” la cual es expresada en HP ó KW. Como se sabe este método no es 100% preciso principalmente por las pérdidas rotacionales ó de fricción en la chumacera de los motores y la variación de la frecuencia, que se pueden presentar y afectar al deslizamiento del motor.

3.4.1 Ajuste en la carga por variación de la frecuencia.

La variación en la frecuencia puede afectar a la medición del deslizamiento del motor debido principalmente por la variación de la velocidad síncrona.

La fórmula para ajustar la carga por la variación de la frecuencia esta expresada en la siguiente ecuación:

$$FC_{AVF} = \frac{N_{SAVF} - N_r(\text{operación})}{N_{S60hz} - N_r(100\% \text{ carga})} \quad (3.4)$$

donde:

N_{SAVF} - es la velocidad síncrona ajustada a la frecuencia que se tenga en el preciso momento de la medición del motor, ecuación (2.3)

N_r - operación.- es la velocidad que se obtenga de la medición del motor

N_{S60hz} - es la velocidad síncrona a 60 hz, ecuación (2.3)

N_r plena Carga.- es la velocidad a plena carga del motor la cual aparece en los datos de placa del mismo.

3.4.2 Ajustes en la eficiencia por variación de voltaje.

La variación del voltaje, es la relación que existe entre el voltaje nominal con respecto al voltaje promedio de operación entre fases y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\%AVV = \left[\frac{\text{Voltaje promedio o Entre fases}}{\text{Voltaje nominal}} - 1 \right] \cdot 100 \quad (3.5)$$

Donde el voltaje promedio ó voltaje promedio de fases, esta dado por la siguiente expresión. (*estos voltajes están expresados en valores rms*)

$$V_{\text{promedio}} = \frac{[(V_{1-2}) + (V_{2-3}) + (V_{3-1})]}{3} \quad (3.6a)$$

ó

$$V_{\text{promedio de fases}} = \frac{[(V_{f1}) + (V_{f2}) + (V_{f3})]}{3} \quad (3.6b)$$

Por lo tanto el voltaje entre fases será:

$$\text{Voltaje entre fases} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{promedio de fases}} \quad (3.7)$$

Una vez obtenido el ajuste al porcentaje de la variación de voltaje se procede a consultar en la figura 2.10a, la cual determina el porcentaje de cambio en la eficiencia del motor.

3.4.3 Ajustes en la eficiencia por desbalance de voltaje.

El desbalance de voltajes es la diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje promedio ó entre el voltaje promedio y el voltaje mínimo, tal y como se puede apreciar en la siguiente ecuación.

$$MD \text{ al promedio} = (\text{Voltaje máximo} - \text{Voltaje promedio}) \quad (3.8)$$

ó

$$MD \text{ al promedio} = (\text{Voltaje promedio} - \text{Voltaje mínimo}) \quad (3.9)$$

donde:

$MD \text{ al promedio}$ es la máxima diferencia al promedio.

$\text{Voltaje}_{\text{promedio}}$ es el voltaje promedio entre fases de acuerdo a la ecuación. (3.6a).

$\text{Voltaje}_{\text{máximo}}$ es el voltaje máximo entre fases.

$\text{Voltaje}_{\text{mínimo}}$ es el voltaje mínimo entre fases.

Por lo tanto la ecuación del ajuste al desbalance de voltaje queda expresada de la siguiente forma:

$$\%ADV = \left[\frac{MD \text{ al promedio}}{\text{Voltaje promedio}} \right] \quad (3.10)$$

ADV es el ajuste al desbalance de voltaje.

Si las fases presentan desbalance de voltaje, la eficiencia junto con las características del motor disminuirá conforme aumenta el desbalance, como se puede apreciar en la figura 2.11a.

3.5 Cálculo de la eficiencia a los motores de inducción.

Una vez definidas las ecuaciones de los ajustes a la eficiencia de los motores de inducción, el paso a seguir es expresar las ecuaciones donde se utilizarán los ajustes antes mencionados.

La eficiencia del motor está definida de la siguiente forma.

$$n_{MMD} = \frac{P_s}{P_e} \quad (3.11)$$

donde:

P_e es la potencia de entrada al motor, la cual será medida con un analizador de redes que se conectará a la alimentación del motor.

P_s es la potencia mecánica de salida del motor, expresada en la ecuación (3.3).

n_{MMD} es la eficiencia medida utilizando el método de deslizamiento.

Con el deslizamiento se conocerá la carga del motor y este deslizamiento se podrá ver ligeramente afectado por la variación del voltaje y el desbalance del mismo, el mayor problema se reflejará en la potencia de entrada que se medirá (P_e) debido principalmente a las pérdidas de RI^2 , y por consiguiente la eficiencia disminuirá.

La idea primordial de realizar un ajuste en la eficiencia, es analizar las áreas de oportunidad que se tienen para mejorar la eficiencia del motor, sin la necesidad de cambiar un motor estándar por uno de alta eficiencia.

La eficiencia η_{MMD} es menor que $\eta_{ajustada}$ debido a que la eficiencia medida con el método de deslizamiento se ve afectada directamente por la variación y desbalance de voltaje, por lo tanto la ecuación para determinar la eficiencia ajustada se expresa de la siguiente forma:

$$\eta_{ajustada} = [\eta_{MMD} + (\eta_{MMD} \cdot AVV)] + \left[\frac{1}{ADV} - 1 \right] \quad (3.12)$$

donde:

ADV es el ajuste por desbalance de voltaje, ecuación (3.10).

AVV es el ajuste por variación de voltaje, ecuación (3.5).

El ajuste a la variación de la frecuencia no se considera en estas ecuaciones, ya que es un ajuste aplicable al factor de carga del motor y está considerado en la ecuación (3.3).

3.6 Cálculo de la eficiencia por interpolación de segundo grado.

Para realizar una interpolación de segundo grado, se requieren conocer tres puntos para determinar una parábola, cuya ecuación general es: $y = ax^2 + bx + c$.

En este análisis la ecuación general se puede expresada como: $y = ax^2 + b$, donde $y = Ly$ (pérdidas del motor).

$x = FC_{(0-100\%)}$ (factor de carga del motor).

La gráfica 3.3a, muestra el comportamiento de las pérdidas de un motor de inducción, esta gráfica tiene forma de parábola debido a las pérdidas variables por la RI^2 .

Con este principio de operación se calculan las ecuaciones para determinar las pérdidas de un motor a diferentes factores de carga; conociendo los coeficientes a y b se habrán calculado las ecuaciones y se conocerán los puntos por los cuales pasa la parábola.

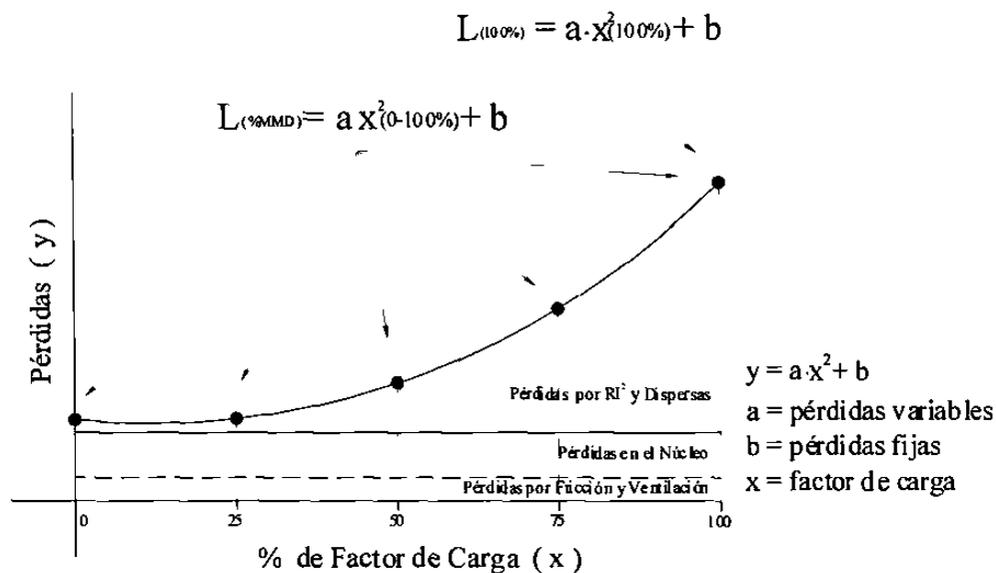


Figura 3.3a
Gráfica del Comportamiento de las pérdidas
En función de la carga de un motor

Con el procedimiento que a continuación se detalla se puede estimar la eficiencia a cualquier porcentaje de carga, con una muy aceptable precisión.

Se requiere conocer dos puntos de eficiencia del motor a cualquier tipo de carga, el primer punto de eficiencia será el dato de placa que proporciona el fabricante, el otro punto de eficiencia es el que se obtenga con la medición del método de deslizamiento.

Se obtendrán las pérdidas a plena carga y también las pérdidas al porcentaje de carga medido con el método de deslizamiento, como lo muestran las siguientes ecuaciones.

$$L_{(100\%)} = P_{nom}(kW) \cdot \left[\frac{1}{\eta_{(100\%)}} - 1 \right] \quad (3.13)$$

$$L_{(\%MMD)} = P_{nom}(kW) \cdot F_{CAVF} \cdot \left[\frac{1}{\eta_{MMD}} - 1 \right] \quad (3.14)$$

Las pérdidas en los motores son de dos tipos: las fijas y las variables. Las fijas como su nombre lo dice no cambian en función de la carga mientras que las variables cambian en función de (RI^2) .

Por lo tanto las ecuaciones para determinar el porcentaje de pérdidas en función de la carga son expresadas bajo el principio de operación que muestra la figura 3.3a

$$L_{(100\%)} = a \cdot (FC_{100\%})^2 + b \quad (3.15)$$

$$L_{(\%MMD)} = a \cdot (FC_{AVF})^2 + b \quad (3.16)$$

donde:

a = pérdidas variables.

b = pérdidas fijas.

$FC_{(100\%)} = 1.0$.

$FC_{\%AVF}$ ecuación (3.4) y n_{MMD} ecuación (3.11).

Por lo tanto:

$$L_{(100\%)} = a + b \quad (3.17)$$

$$L_{\%MMD} = a \cdot (FC_{\%AVF})^2 + b \quad (3.18)$$

Despejando las pérdidas variables en las ecuaciones (3.17) y (3.18.)

$$L_{(100\%)} - L_{(\%MMD)} = (1 - FC_{\%AVF}^2) \cdot a \quad (3.19)$$

Las pérdidas variables son:

$$a = \frac{L_{(100\%)} - L_{(\%MMD)}}{(1 - FC_{\%AVF}^2)} \quad (3.20)$$

Las pérdidas fijas quedarán de la siguiente forma:

$$b = L_{(100\%)} - a \quad (3.21)$$

Se puede concluir que el punto b' representa las pérdidas fijas por unidad de potencia en (pu's) a plena carga.

$$b' = \frac{b}{L_{(100\%)}} \quad (3.22)$$

las pérdidas variables en valor unitario son:

$$a' = (1 - b') \quad (3.23)$$

Ahora es posible obtener una fórmula para las pérdidas a cualquier factor de carga desde cero hasta plena carga y está expresada por la siguiente ecuación:

$$Ly = L_{(100\%)} \cdot \left[a' \cdot (FC_{(0-100\%)})^2 + b' \right] \quad (3.24)$$

La eficiencia para cualquier factor de carga ($FC_{(0-100)}$) quedaría de la siguiente manera:

$$n = \frac{1}{\left[\frac{Ly}{FC_{(0-100)} \cdot P_{nom}(Kw)} \right] + 1} \quad (3.25)$$

donde:

$FC_{(0-100)}$ es el factor de carga de la eficiencia a la cual se quiere conocer.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE LA MEDICIÓN

4.1 Introducción.

La medición de la eficiencia en los motores de inducción en especial los del tipo jaula de ardilla, se mide utilizando la metodología descrita en la norma mexicana. *NOM-016-ENE-1997*, en este método se mide indirectamente las pérdidas dispersas, ya que estas pérdidas son difíciles de cuantificar y varían en forma particular para cada motor de inducción.

En este capítulo se describe la forma en la cual se mide la eficiencia de los motores de inducción utilizando la metodología que se describirá a continuación, con este método será posible estimar la eficiencia con cierta precisión, este servirá como una buena referencia para conocer a qué eficiencia están trabajando los motores de inducción. En este capítulo se establecen las limitaciones y restricciones del método propuesto.

La idea primordial es el desarrollar un método para medir la eficiencia a motores de inducción tipo jaula de ardilla que sea práctico, sencillo, que no implique el dejar fuera de servicio la unidad, y además ayude a evaluar el desempeño del motor.

4.2 Procedimiento para la medición de la eficiencia.

La finalidad de detallar el procedimiento para la medición de la eficiencia es el establecer las bases de la medición, definir las limitaciones y restricciones de la misma. A continuación se describe el procedimiento y la metodología a seguir para efectuar la medición a los motores de inducción tipo jaula de ardilla.

Puntos claves de la medición

- (1) Identificar el tipo de motor (Jaula de Ardilla trifásico).
- (2) Identificar el ciclo de trabajo del motor (constante – variable).
- (3) Recopilación de datos de placa del motor, tabla N0.1 (Anexo).
- (4) Medición de los parámetros eléctricos y de la velocidad del rotor (4.6, 4.7).
- (5) Registrar las mediciones obtenidas en tabla N0.2 (Anexo).

Toda la información recabada será procesada por un programa diseñado para la evaluación de la eficiencia y el desempeño de los motores, escrito en lenguaje *MATLAB* [13], la figura 4.1a muestra algunos de los puntos claves de la medición.

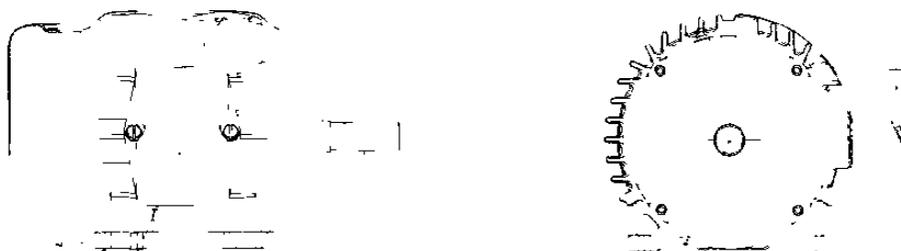


Figura 4.1 a
Puntos claves para la
medición de la eficiencia

4.3 Identificación del tipo de motor. (1)

Los motores de inducción por sus características de diseño se clasifican en dos tipos, jaula de ardilla y rotor devanado.

El método propuesto para la medición a la eficiencia del motor de inducción esta enfocado en los motores de jaula de ardilla, debido principalmente a que el rotor devanado es un motor que puede ser manipulada su velocidad de operación, la clasificación del motor generalmente se obtiene en el dato de placa.

4.4 Ciclo de carga del motor. (2)

Para medir la eficiencia de los motores de inducción tipo jaula de ardilla es necesario tener identificado el ciclo de trabajo de los motores, principalmente porque la eficiencia varía conforme a la carga del motor.

El ciclo de carga del motor puede ser constante ó variable.

Ciclo de carga constante.

En este ciclo de carga en particular, la medición de la eficiencia se puede realizar sin ningún problema, es necesario un pequeño lapso de tiempo para registrar los parámetros obtenidos por la medición; como se ha mencionado con anterioridad, se requiere la eficiencia en un determinado factor de carga y después se utilizará la interpolación de segundo grado para conocer la eficiencia al cualquier factor de carga.

Ciclo de carga variable.

Cuando el ciclo de carga sea variable es importante tenerlo bien identificado. Generalmente estos ciclos de carga son repetitivos, es posible que un ciclo de trabajo dure 15 minutos, y después de este tiempo el ciclo de carga se repita, consumiendo aproximadamente la misma energía eléctrica en cada ciclo.

Es necesario conocer el factor de carga del motor para calcular la eficiencia, se requiere que el motor mantenga la carga por un lapso de 5 a 10 segundos, para poder registrar las mediciones.

Cuando el ciclo de trabajo del motor sea muy rápido, y no se puedan registrar las mediciones, no será posible medir la eficiencia a los motores, siendo ésta una de las varias restricciones del método.

4.5 Datos de placa del motor. (3)

En los datos de placa de los motores de inducción se obtendrán las características de operación que son particulares para cada uno de los motores.

Uno de los datos de placa más relevantes es la velocidad a plena carga de motor, la cual será necesaria para determinar el factor de carga del motor con el método de deslizamiento, y después estimar la potencia de salida.

Sin esta información no es posible medir a la eficiencia con el método de deslizamiento. No es difícil encontrar motores que no cuentan con su placa de datos, debido principalmente al deterioro del motor que provoca que esta información no se pueda apreciar ó bien que ya no tenga la placa de datos.

En el Anexo, se incluye un formato de recopilación de información (Tabla A1. 1), para recabar los datos de placa necesarios para realizar la medición de la eficiencia de los motores de inducción.

4.6 Medición eléctrica. (4)

Para poder evaluar un motor es necesario medir sus parámetros eléctricos. La efectividad de las mediciones dependerá de la precisión, forma y condiciones en que éstas sean tomadas, por lo que habrá que cuidar que las mediciones se realicen cuando la operación del motor sea representativa o típica de su operación normal.

Cuando los motores tienen ciclo de trabajo con carga constante, como lo sería en el caso de los motores para bombas, abanicos de aire, motores de aires acondicionados, etc., es suficiente medir con un analizador de redes en un lapso de tiempo determinado, para los motores que operan con carga variable se recomienda tener bien identificado el ciclo de trabajo, además es necesario el registro de los parámetros en un instante de tiempo.

Otro aspecto importante, es el punto donde se hagan las mediciones. El punto de medición más adecuado en el motor es la caja de conexiones, en este punto se miden las condiciones reales de alimentación del motor, además se pueden realizar las mediciones trifásicas que se requieren.

Para realizar una correcta evaluación de los motores es necesario medir los siguientes parámetros eléctricos:

- Corriente por fase: I_1, I_2, I_3 (Amperes).
- Voltaje entre fases: $V_{1-2}, V_{1-3}, V_{2-3}$ (Volts).
- Factor de potencia trifásico. (%FP)
- Potencia activa trifásica: Pot_{Activa} (kW).
- Distorsión de Armónicas en voltajes THD (%).
- Frecuencia (Hz).

4.7 Medición de la velocidad del rotor. (4)

Esta medición se realiza simultáneamente con la medición eléctrica, las condiciones de la medición se deben de realizar con las referencias antes vistas.

La velocidad del rotor se medirá con un tacómetro digital el cual tiene un margen de error de $\pm 0.025\%$, En nuestro caso, el tacómetro tiene las opciones de medir en contacto con la flecha ó sin contacto, es decir en forma óptica

La medición de la velocidad del rotor se realizará en el abanico del motor el cual está sujeto a la flecha, y viaja a la misma velocidad del rotor.

De no ser posible esta medición se medirá en el lado de la flecha con la opción sin contacto (óptica).

Para los motores con ciclo de carga constante se medirá la velocidad en un lapso de tiempo, y en los motores que operan con carga variable se recomienda tener identificado el ciclo de trabajo ya que se requiere el registro de los parámetros en un instante de tiempo, *(aproximadamente de 10 a 15 segundos)*.

Para realizar una correcta evaluación de los motores es necesario medir y obtener los siguientes datos.

- Velocidad del rotor (rpm).
- Deslizamiento del motor.
- Factor de carga del motor por el método de deslizamiento.

4.8 Registro de mediciones. (5)

Durante las mediciones eléctricas y la del rotor, es muy importante el registrar los parámetros de estas mediciones simultáneamente, ya que la medición de la eficiencia depende de la exactitud del registro de éstos datos.

Si la carga del motor es constante, es decir, que no exista variación en la potencia, se recomienda realizar al menos cinco lecturas y obtener el valor promedio de las mediciones, al utilizar los valores promedios resulta difícil identificar los errores en las mediciones individuales y se pueden obtener resultados erróneos, por esta razón es importante que se tomen las lecturas durante los mismos valores de potencia y se tengan en cuenta todas las consideraciones antes vistas.

Los registros obtenidos deberán capturarse en la tabla A1.2 (*Anexo*).

Todos los registros obtenidos serán procesados en un programa diseñado en *Matlab*, el cual resolverá las ecuaciones y fórmulas necesarias para poder obtener la eficiencia y las características del desempeño del motor.

El instrumento de medición recomendado para medir los motores es un analizador de redes eléctricas en conexión trifásica. Este equipo mide los siguientes parámetros: corriente, voltaje, factor de potencia, potencia activa, potencia aparente, potencia reactiva, frecuencia y la distorsión armónica, tanto en voltaje como en corriente.

El instrumento de medición recomendado para medir la velocidad de los motores es un tacómetro digital. Este equipo mide la velocidad en revoluciones por minuto, también tiene una opción de medir y almacenar la velocidad máxima, mínima y promedio.

Todos los equipos utilizados son calibrados anualmente para eliminar errores en la medición y/o registros.

4.9 Pruebas Realizadas.

Para poder tener un mejor resultado en la medición de la eficiencia se realiza una prueba de ensayo, después de analizar los resultados obtenidos y comprobar que toda la investigación antes hecha es confiable, se puede proceder a realizar pruebas en campo, llamadas también casos de estudio, estas son las pruebas a los motores instalados en la planta.

Para la realización de estas pruebas se utilizarán los siguientes equipos:

- Analizador de redes (kw).
- Tacómetro digital (rpm).
- Freno magnético (6.2 Lb-pie).
- Motor Baldor Alta Eficiencia (1.5hp).
- Secuencimetro de fase.
- Multímetro de gancho.

El procedimiento a utilizar para registrar la medición, es el descrito con anterioridad en este mismo capítulo, solo se realizan algunos cambios debido a que en este tipo de pruebas se puede controlar el deslizamiento del motor. $S = 1$ ó $S \cong 0$

De esta forma se conoce el valor de la eficiencia a cualquier tipo de carga.

Utilizaremos la corriente nominal del motor, la cual representará el 100% de la carga, considerando que el voltaje de alimentación al motor es su voltaje nominal.

Al registrar la capacidad nominal de amperaje en el motor, se establece que en ese punto el motor entrega su máximo rendimiento y la velocidad registrada será ahora nuestra velocidad a plena carga, esta velocidad deberá ser igual ó similar a la velocidad de plena carga del motor que aparece en los datos de placa.

Para conocer los demás factores de carga se utilizará el método de deslizamiento, despejando la velocidad del rotor de la ecuación. 3.2, (esta velocidad es la que desarrolla el motor a un determinado factor de carga), la fórmula quedará expresada de la siguiente manera:

$$Nr_{(0-100\%)} = [(Nr - Ns) \cdot Fc_{(0-100\%)}] + Ns \quad (4.1)$$

donde:

$Nr_{(0-100\%)}$ es la velocidad del motor a un determinado factor de carga

Nr es la velocidad que desarrolla el motor al 100% de su amperaje nominal

Ns es la velocidad síncrona del motor

$Fc_{(0-100\%)}$ es el factor de carga en el cual se realizan las mediciones.

Para la realización de la prueba se mide la eficiencia al 25,50,75,100 y 125% de la carga del motor, el fabricante de motores **Baldor** proporciona la eficiencia del motor, a los porcentajes de carga antes mencionados, esto sirve como referencia para conocer la exactitud del método propuesto.

La figura 4.2a muestra el motor de inducción y el freno magnético que se utiliza para las pruebas, así como los datos de placa.

datos de placa	
Potencia nominal	1.5 Hp
Velocidad nominal	2280
Factor de potencia	0.85
Corriente nominal	7.5 A
Tensión nominal	230 V
Frecuencia nominal	60 Hz
Clase de aislamiento	F
Grado de protección	IP 54

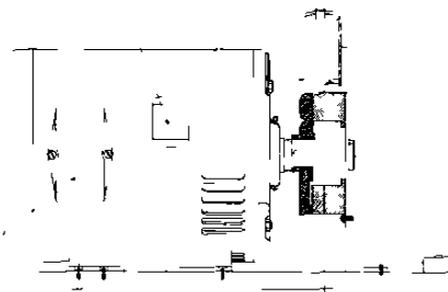


Figura 4.2 a
Motor de Alta Eficiencia
Baldor 1.5 hps, 4 polos y freno magnético

La Identificación de los puntos claves en la figura 4.2a son:

- (1) Caja de conexión para la medición de la potencia de entrada (P_e).
- (2) Datos de placa.
- (3) Medición de la velocidad del rotor.
- (4) Mecanismo de frenado.
- (5) Bobina magnética.
- (6) Tabla para la fijación del equipo.
- (7) Potenciometro para la variación del magnetismo a la bobina.

La figura 4.2b muestra el Diagrama de Flujo del procedimiento de prueba

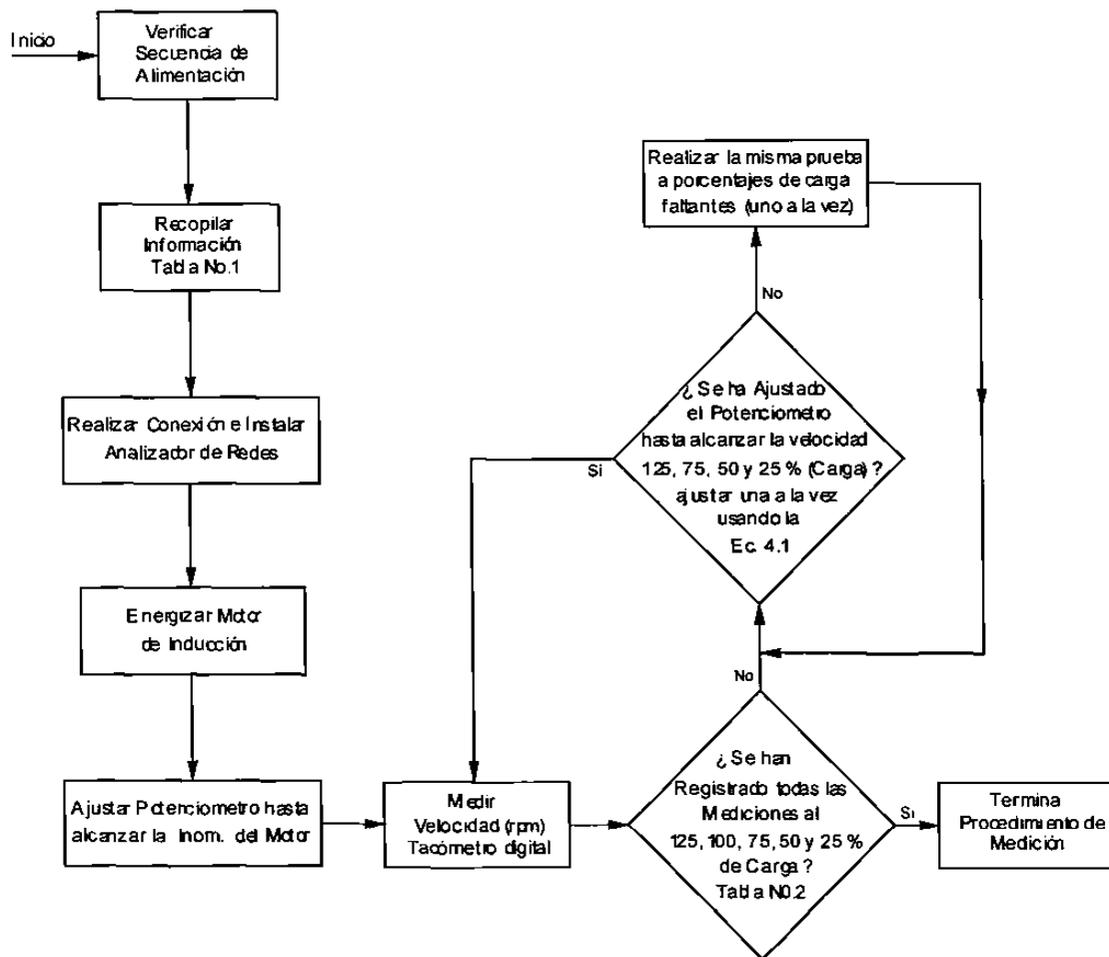
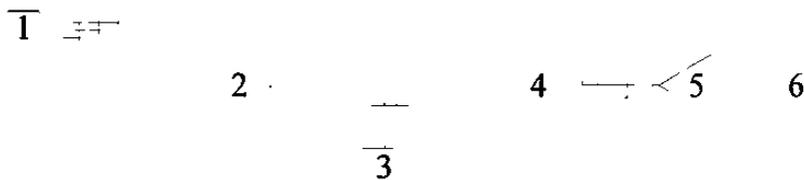


Figura 4.2b
Diagrama de Flujo
del procedimiento de pruebas

Observaciones de la prueba

- Se utilizó un multímetro de gancho para medir la frecuencia del motor. En esta prueba no se requiere el programa hecho en lenguaje *MATLAB* ya que solo se enfocó a medir la eficiencia del motor.
- El voltaje de alimentación al motor fue el nominal, por lo cual no se tienen los efectos secundarios en el motor por un bajo voltaje.
- No existió desbalance en el voltaje durante la realización de la prueba.
- La frecuencia varió entre 59.99 - 60.01 hz. por lo cual el efecto en la velocidad fue despreciado.

En la figura 4.2c se detalla el diagrama esquemático de la prueba para un mejor entendimiento.



[1] Secuencimetro de fase, [2] Analizador de redes, [3] Multímetro de gancho, [4] Motor de inducción Baldor.
[5] Freno electromagnético, [6] Tacómetro digital

Figura 4.2 c
Diagrama esquemático
de prueba

4.10 Resultados obtenidos

Las eficiencias obtenidas en cada uno de los porcentos de carga antes mencionados, se compararon con las eficiencias proporcionados por el fabricante del motor.

Con los resultados obtenidos se utiliza la interpolación de segundo grado, y se obtiene la eficiencia del motor utilizando solo la información del 100 y 75% de la carga del motor, como se aprecia en la tabla 4.3a.

Se incluyen los resultados del cálculo a la eficiencia utilizando ecuaciones de segundo grado (CEESG).

Tabla 4.3a

Resultados de la prueba realizada.

<i>Pruebas Realizadas</i>					
<i>Parámetros</i>	<i>% Factor de Carga de la prueba</i>				
	25	50	75	100	125
<i>Corriente de línea</i>	2.52	2.90	3.46	4.20	4.86
<i>Factor de potencia (%)</i>	36	57	71	78	83
<i>Velocidad del rotor (rpm)</i>	1787	1774	1762	1749	1736
<i>Potencia de entrada (KW)</i>	0.361	0.658	0.978	1.30	1.60
<i>Potencia de salida (pu's)</i>	0.25	0.50	0.75	1.00	--
<i>Deslizamiento (S)</i>	0.0072	0.0144	0.0211	0.0283	0.0356
<i>Eficiencia medida MD</i>	77.49	85.03	85.76	85.75	--
<i>Eficiencia Calculada Int.²</i>	76.47	84.06	85.76	85.75	85.05
<i>CEESG</i>	80.63	86.11	87.72	87.40	86.41
<i>Eficiencia del Fabricante</i>	79.70	86.40	87.70	87.40	86.70
	<i>% de Error en la Eficiencia</i>				
	25	50	75	100	125
<i>Eft. medida MD Vs. Fabricante</i>	2.770	1.585	2.212	1.887	--
<i>Eficiencia Int.² Vs. Fabricante</i>	4.052	2.708	--	--	1.903
<i>CEESG Vs. Fabricante</i>	1.153	0.337	0.022	--	0.334
<i>Observaciones</i>					
<i>Eficiencia medida MD es la eficiencia medida utilizando el método de deslizamiento</i>					
<i>Eficiencia Calculada Int.²/ Eficiencia del Fabricante Int.² es el cálculo de la eficiencia utilizando la interpolación de segundo grado</i>					
<i>CEESG es la eficiencia calculada con ecuaciones de segundo grado (ANEXO No.3)</i>					

Las gráficas 4.3b muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, así como también una comparación entre las eficiencias del método de deslizamiento, la eficiencia calculada con ecuaciones de segundo grado (*CEESG*) y la eficiencia que proporciona el fabricante del motor, otra gráfica compara la eficiencia calculada por la interpolación de segundo grado contra la eficiencia del fabricante y el *CEESG*. También se observa en estas gráficas el comportamiento del factor de potencia y la corriente de línea con respecto al factor de carga del motor.

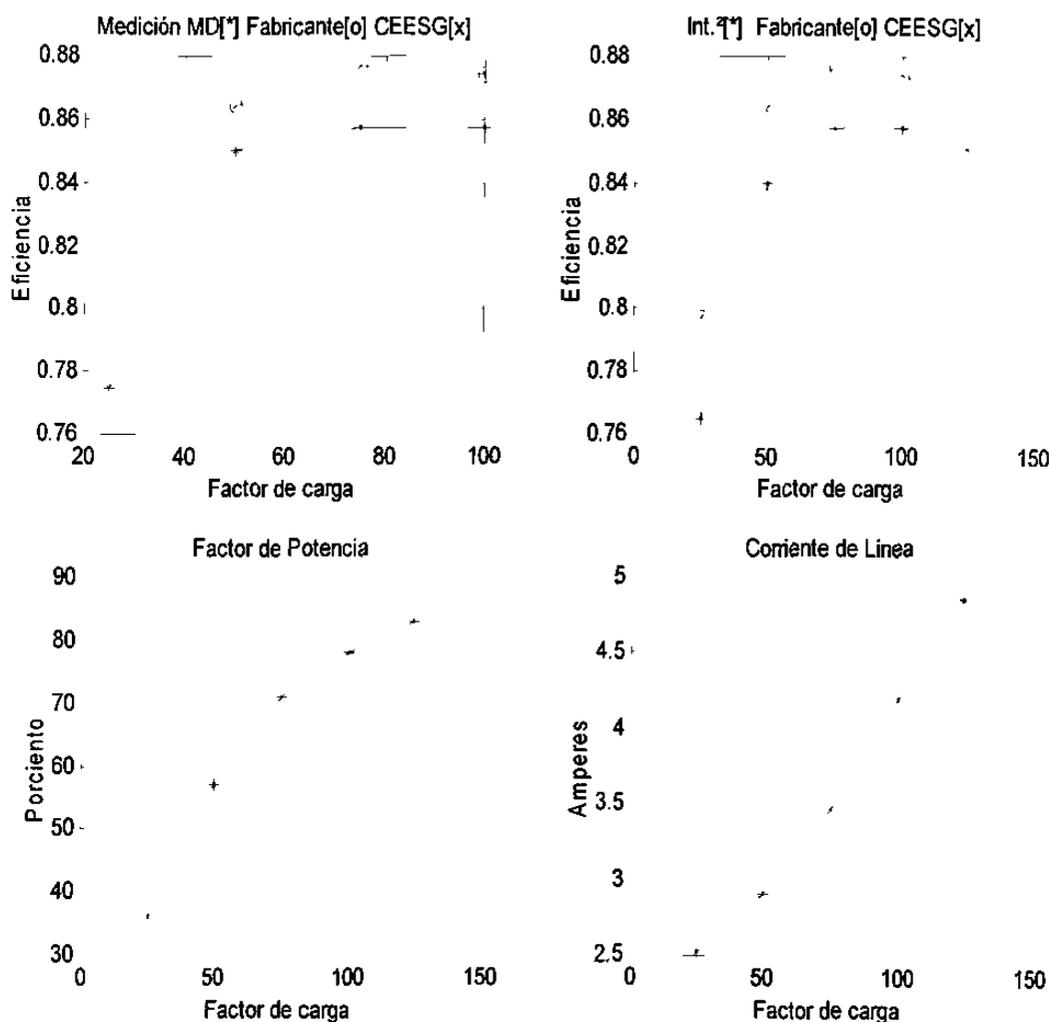


Figura 4.3b
Gráficas del resultado
de las pruebas

4.11 Casos de Estudio.

Una vez realizadas las pruebas en las cuales queda demostrado que si bien el método no es exacto, pero puede dar una buena referencia de la eficiencia a la cual trabajan los motores de inducción, hay que destacar que fue una prueba muy controlada ya que los voltajes y las corrientes fueron los adecuados.

Ahora se realizan las pruebas a los motores dentro de la planta ó dicho de otra manera los casos de estudio, se medirán tanto los motores con carga fija como los de carga variable, por ser los tipos de cargas que se pueden presentar.

Todos los resultados obtenidos y el análisis se discutirán en el siguiente capítulo, por lo cual solo se describirá y documentara la medición.

CASO No.1.

Motor bomba (*Torre de Enfriamiento*).

Para este tipo de caso en particular, el método propuesto es ideal para medir el desempeño y la eficiencia del motor, ya que se puede variar el flujo de agua que el motor esta mandando a la torre de enfriamiento, esto varía la potencia de salida del motor y a su vez la carga de trabajo.

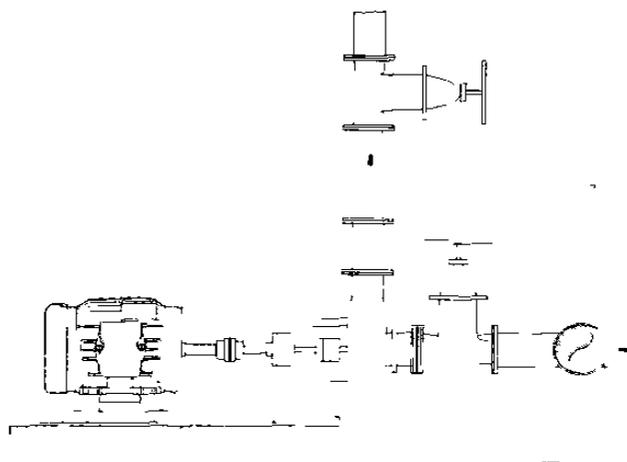
Se utiliza el método descrito en las pruebas realizadas con anterioridad, el cual se enfoca a variar la carga del motor hasta que alcance su corriente nominal, en ese punto se registra la medición de la velocidad del rotor.

En este caso de estudio se registrarán todos los datos necesarios para poder medir la eficiencia y el desempeño.

Procedimiento de la medición.

1. Se recopila la información necesaria de los datos de placa del motor de acuerdo a la Tabla No. A1. 1 (Anexo).
2. Se verifica la secuencia de fase para conectar apropiadamente el analizador de redes.
3. La medición de la velocidad del rotor se realizó en el abanico del motor por lo cual se desacopló la tapa trasera para medir la velocidad.
4. Se ajusta la válvula de paso hasta que el motor alcance su corriente nominal, una vez alcanzada la corriente nominal se registra la velocidad del motor y todos los parámetros necesarios de acuerdo a la Tabla No.A1. 2 (Anexo).
5. Se restringe el paso del agua cerrando la válvula hasta que el motor alcance su velocidad de operación al 75% de su carga de acuerdo a la ecuación 4.1 (*se registran los parámetros obtenidos*).
6. Se realiza la misma prueba al motor bomba al 50 y 25% de la carga, toda la información es registrada en la tabla A1.2

La figura 4.4a, muestra los puntos clave de la medición.



[1] Datos de placa del motor, [2] Caja de conexión para medición de Pe, [3] Medición de la velocidad del rotor,
[4] Válvula de paso de agua la cual se utilizó como ajuste de la carga al motor

Figura 4.4a
Puntos claves para la medición
del motor bomba

Observaciones de la medición.

- El voltaje de alimentación al motor no era su voltaje nominal tenía una variación de un 4% con respecto al nominal.
- No existió desbalance de voltaje durante la realización de la medición por lo cual no se tiene los efectos secundarios por este tipo de problemas.
- La frecuencia no varió por lo cual el efecto en la velocidad fue despreciado.
- Al cerrar toda la válvula de paso se observó que el motor trabajaba al 30% de su capacidad debido a que esta conectada a la transmisión de la bomba por lo cual el motor nunca opera en vacío.
- Se utilizó este mismo procedimiento para medir más motores tipo bomba pero no se documenta la medición por ser muy parecida.

CASO No.2

Motor de Compresor (*Compresor de Aire*).

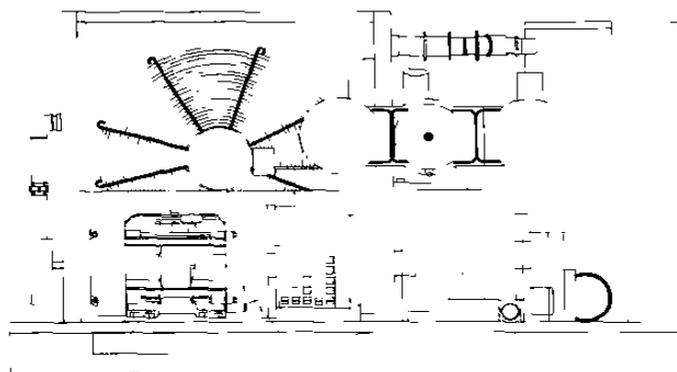
En este caso de estudio, la medición de la eficiencia y el desempeño del motor se realizaran con la carga variable, se pudo medir los parámetros requeridos ya que la carga varía por lapsos de hasta 45 segundos, y no será posible medir la eficiencia a diferentes factores de carga, por lo cual solo se medirá la eficiencia al factor de carga al cual esté trabajando este motor, es importante tener identificada la eficiencia del motor, para este caso se utilizara la eficiencia obtenida por el método de deslizamiento, y se calculará la eficiencia a diferentes factores de carga con la interpolación de segundo grado, es necesario conocer la eficiencia del fabricante al 100% de la carga.

El compresor cuenta con un motor de 300HP's de una eficiencia del 94.5%, además tiene un medidor de energía, en la parte frontal de la unidad, este equipo se utilizó como una referencia para la medición, la velocidad del motor se midió en la parte posterior ya que cuenta con un orificio en el centro de la tapa trasera, el cual permite sin ningún problema medir con el tacómetro digital, en posición de contacto.

Procedimiento de la medición.

1. Se recopila la información necesaria de los datos de placa del motor de acuerdo a la tabla A1.1
2. Se verifica la secuencia de fases en la conexión del motor para conectar apropiadamente el analizador de redes.
3. Se mide la velocidad del rotor y la potencia eléctrica simultáneamente, y toda la información es registrada en la tabla A1.2
4. Toda la información recabada es procesada por el programa de *Matlab* el cual arroja el diagnóstico de operación del motor de inducción

La figura 4.4b, muestra los puntos clave de la medición.



[1] Datos de placa del motor. [2] Caja de conexión para medición de Pe. [3] Medición de la velocidad del rotor
[4] Medición de referencia de la potencia de entrada Pe. [5] Unidad de compresión

Figura 4.4b
Puntos claves para la medición
del motor compresor

Observaciones de la medición.

- El voltaje de alimentación al motor no era su voltaje nominal tenía una variación de un 4.4% con respecto al nominal.
- No existió desbalance de voltaje durante la realización de la medición por lo cual no se tiene los efectos secundarios por este tipo de problemas.
- La frecuencia varió entre 59.99 - 60.00 hz. por lo cual el efecto en la velocidad fue despreciado.
- Se realizaron un total de cinco lecturas obteniendo el valor promedio, se tuvo cuidado de tomar estas lecturas cuando el motor estaba trabajando con la misma carga constante.
- Se utilizó este procedimiento para medir más motores de compresores

CASO No.3

Motor Abanico (*Abanico tipo Cañón*).

El abanico tipo cañón es muy utilizado en el desarrollo Industrial *SanLuis Rassini*, en particular en los meses de verano, en la actualidad existen más de 150 unidades de este tipo en todo el desarrollo.

Este tipo de abanicos cuentan con motores que van de *1 a 2 hps.*, en la mayoría de los casos estos motores se han reembobinado hasta más de una ocasión.

Para medir la eficiencia del motor se utilizará un procedimiento similar al del caso no. 2 debido a que no se puede variar la carga del motor, no podrá ser posible medir la eficiencia a diferentes factores de carga.

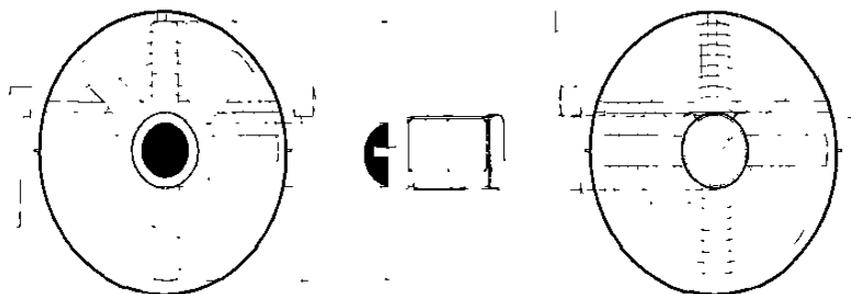
Es difícil encontrar en los datos de placa del motor la eficiencia al 100% de la carga ya que son motores viejos, pequeños, y anteriormente se omitía esta información en el motor de inducción.

Esto lleva a utilizar las tablas publicadas en la *NOM-016-ENE-1997* donde se establecen los valores mínimos de eficiencia que deben de tener todos los motores de inducción tipo jaula de ardilla que se comercializan en la República Mexicana, que son de eficiencia estándar ó alta eficiencia, por su tipo de carcazas, número de polos, y sus potencias que van de *1 a 200 HP's.* (Tabla A2.1)

Procedimiento de la medición.

1. Se recopila la información necesaria de los datos de placa del motor de acuerdo a la Tabla No. A1. 1, si no se cuenta con la información de la eficiencia se consulta en las siguientes Tablas: *A2. 1, A2. 2, A2. 3, A2. 4 (Anexo No.2)*
2. Se verifica la secuencia de fases en el arrancador del motor para conectar apropiadamente el analizador de redes.
3. Se mide la velocidad del rotor y la potencia eléctrica simultáneamente, y toda la información es registrada en la Tabla A1. 2
4. Toda la información recabada es procesada por el programa de *Matlab* el cual arroja el diagnóstico de operación del motor de inducción

La figura 4.4c, muestra los puntos clave de la medición.



[1] Datos de placa de motor. [2] Medición de la velocidad del rotor. [3] Medición de la potencia de entrada P_e
[4] Abanico de aire

Figura 4.4 c
Puntos claves de la medición
del abanico cañón

Observaciones de la medición.

- El voltaje de alimentación al motor fue el nominal, el motor trabaja a 460 volts y no se tienen los efectos secundarios en el motor por un bajo voltaje.
- No existió desbalance de voltaje durante la realización de la medición por lo cual no se tiene este tipo de problema.
- La frecuencia varió entre 59.98 - 60.02 Hz.
- Se realizaron un total de cinco lecturas obteniendo el valor promedio, en este tipo de motor la carga siempre es la misma además que trabaja con un bajo factor de carga y por consiguiente una eficiencia deficiente, como se puede apreciar en los resultados obtenidos.
- Se utilizó este procedimiento para medir más motores de este tipo.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Es difícil analizar los resultados de la metodología propuesta, ya que los casos de estudios aquí presentados no representan una muestra significativa de pruebas, se tendrán que medir más motores para poder determinar la confiabilidad de este método, además hay una serie de restricciones en la medición que limita el número de muestras en las cuales se puede utilizar.

Una forma sencilla para poder analizar y evaluar los resultados de la medición consiste en graficar las eficiencias obtenidas a diferentes factores de carga, y comparar los resultados del método de deslizamiento contra los resultados del cálculo de la eficiencia con ecuaciones de segundo grado (*CEESG*), si los resultados entre ambos métodos arrojan valores similares $\pm 3\%$, esto es un indicador que la eficiencia medida es muy cercana a la eficiencia de operación del motor.

Esto se debe a que el *CEESG* es un método estadístico y determina el valor de eficiencia con mayor precisión, sin embargo el Método de Deslizamiento presenta ciertas ventajas sobre el *CEESG* ya que mide la eficiencia de operación del motor y el método se puede implementar en campo.

Por otra parte, si los resultados arrojados tienen una gran discrepancia entre ambos métodos mayor a $\pm 3\%$, se deberán considerar los resultados obtenidos del método de deslizamiento como dudosos y de ser necesario se deberán repetir las mediciones para descartar un error en la ejecución de la metodología de esta investigación.

La finalidad de comparar ambos métodos es poder determinar en conjunto la eficiencia del motor de inducción, si bien ambos métodos no son precisos el error no deberá ser significativo cuando se mida correctamente la eficiencia del motor.

En contra parte cuando se tenga una amplia diferencia en la medición por alguna circunstancia, esta se considera poco confiable.

Retomando el análisis de los resultados obtenidos del método de deslizamiento, y a pesar de haber demostrado matemáticamente la relación de la proporción entre el método del deslizamiento y el factor de carga del motor, los valores obtenidos no fueron los esperados, esto se debe en mayor parte a los valores de la velocidad del rotor impreso en el dato de placa que no concuerda con el valor de la velocidad real de operación. El NEMA (*Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, EUA*) permite una variación del 20% de la velocidad de operación contra la velocidad impresa en el motor, si las condiciones de voltaje, temperatura ambiente y frecuencia difieren de los valores de prueba del motor.

La forma en como se aborda esta problemática en la prueba de ensayo indica el camino a seguir para poder obtener resultados más aproximados en la eficiencia, la limitación de esta metodología en particular, se debe a que los motores instalados en la industria no permiten manipular la carga del motor, para conocer la velocidad real al 100% de su capacidad, es necesario que los motores en la industria en algún determinado momento opere al 100% de su carga y que esta sea variable. Hay que señalar que los motores en la industria en promedio operan al 60% de su capacidad. [8]

La presentación de los resultados obtenidos está basada en la evaluación y diagnóstico que arroja el programa que fue diseñado en el lenguaje Matlab, excepto para el caso de estudio del motor bomba de agua, ya que en este se utilizó la metodología de las pruebas realizadas en el capítulo 4.

Los tres casos de estudio son analizados y comparados con los dos métodos propuestos (*MDInt²* y *CEESG*) en conjunto se determina la confiabilidad de los resultados obtenidos, esto se puede apreciar en la gráfica 5.1C.

Cuando los motores ya han sido rebobinados se utilizó el criterio de restar el 2 % a su eficiencia nominal, [15] debido a las pérdidas por reparación en los motores

Resultados

La Tabla 5.1a muestra los resultados obtenidos de las mediciones al motor compresor y abanico cañón, además se anexo la simulación hecha en Matlab para estos dos casos de estudio en particular.

Tabla 5.1a
Resultados obtenidos de las mediciones a los casos de estudio

<i>Mediciones Realizadas</i>					
MOTOR COMPRESOR					
<i>Parámetros</i>	<i>% Factor de Carga de la prueba</i>				
	25	50	60	100	125
<i>Corriente de linea</i>			252		
<i>Factor de potencia (%)</i>			86		
<i>Velocidad del rotor (rpm)</i>			1785		
<i>Potencia de entrada (KW)</i>			161.0		
<i>Potencia de salida (pu's)</i>			0.60		
<i>Deslizamiento (S)</i>			0.0083		
<i>Eficiencia medida MD</i>			0.853		
<i>Eficiencia Calculada Int.²</i>	0.689	0.824	0.853	0.925	
<i>CEESG</i>	0.871	0.910	0.916	0.922	
<i>Eficiencia del Fabricante</i>	--	--	--	0.945	
<i>*Solo se pudo medir la eficiencia al 60% de la carga ya que fue imposible variar la carga del motor</i>					
<i>Mediciones Realizadas</i>					
ABANICO CAÑON					
<i>Parámetros</i>	<i>% Factor de Carga de la prueba</i>				
	25	50	67	100	125
<i>Corriente de linea</i>			1.33		
<i>Factor de potencia (%)</i>			65		
<i>Velocidad del rotor (rpm)</i>			1739		
<i>Potencia de entrada (KW)</i>			0.70		
<i>Potencia de salida (pu's)</i>			0.678		
<i>Deslizamiento (S)</i>			0.0339		
<i>Eficiencia medida MD</i>			0.72		
<i>Eficiencia Calculada Int.²</i>	0.57	0.69	0.72	0.73	
<i>CEESG</i>	0.61	0.71	0.74	0.73	
<i>Eficiencia del Fabricante</i>	--	--	--	0.75	
<i>*Se considero una eficiencia mínima al 100% de la carga de acuerdo a la NOM-016-ENE-1997</i>					

La Tabla 5.1b muestra los resultados obtenidos de las mediciones al motor bomba.

Tabla 5.1b

Resultados obtenidos de las mediciones a los casos de estudio

<i>Mediciones Realizadas</i>					
MOTOR BOMBA					
<i>Parámetros</i>	<i>% Factor de Carga de la prueba</i>				
	<i>25</i>	<i>50</i>	<i>75</i>	<i>100</i>	<i>125</i>
<i>Corriente de linea</i>		<i>18.5</i>	<i>24.9</i>	<i>31.4</i>	<i>--</i>
<i>Factor de potencia (%)</i>		<i>0.78</i>	<i>0.82</i>	<i>0.87</i>	<i>--</i>
<i>Velocidad del rotor (rpm)</i>		<i>1785</i>	<i>1777</i>	<i>1770</i>	<i>--</i>
<i>Potencia de entrada (KW)</i>		<i>11.5</i>	<i>16.3</i>	<i>21.3</i>	<i>--</i>
<i>Potencia de salida (pu's)</i>		<i>0.50</i>	<i>0.75</i>	<i>1.00</i>	<i>--</i>
<i>Deslizamiento (S)</i>		<i>0.0083</i>	<i>0.0133</i>	<i>0.0161</i>	<i>--</i>
<i>Eficiencia medida MD</i>		<i>0.810</i>	<i>0.858</i>	<i>0.875</i>	<i>--</i>
<i>Eficiencia Calculada Int.²</i>	<i>0.708</i>	<i>0.818</i>	<i>0.858</i>	<i>0.875</i>	
<i>CEESG</i>	<i>0.829</i>	<i>0.877</i>	<i>0.891</i>	<i>0.887</i>	
<i>Eficiencia del Fabricante</i>	<i>--</i>	<i>--</i>	<i>--</i>	<i>0.91</i>	
<p><i>*debido a que el motor opera al 30% de su carga cuando la valvula esta cerrada, no es posible medir la eficiencia del motor al 25% de su capacidad.</i></p>					

Evaluación al Desempeño de Motores de Inducción
Motor Abanico Cañón
Matlab 5.0

16-Nov-2002

Potencia Nominal=.746

Voltaje en Fase A =458

Voltaje en Fase B =457

Voltaje en Fase C =458

Voltaje Nominal=460

Potencia aparente en Kva durante la Medición=1.08

Potencia de Entrada Kw =.70

Número de Polos del motor =4

Velocidad de operación=1739

Velocidad nominal 100% de Carga=1710

Frecuencia Medida =59.99

Eficiencia al 100% =.75

Voltaje Máximo entre Fases=458

Voltaje Mínimo entre Fases=457

El motor es reembobinado[1]Si,[2]No=1

FcMD =

0.6744

nMD =

0.7188

Vprom =

457.6667

Avv =

-0.5072

Porcentaje de Variación de voltaje de
acuerdo a gráfica 2.10a=.001

Adv =

0.0728

Porcentaje de Desbalance de voltaje
de acuerdo a gráfica 2.10b=.9999

Eficiencia Ajustada

0.7196

Eficiencia con Ajuste en el Voltaje

	25	50	75	100
	0.5737	0.6919	0.7254	0.7300

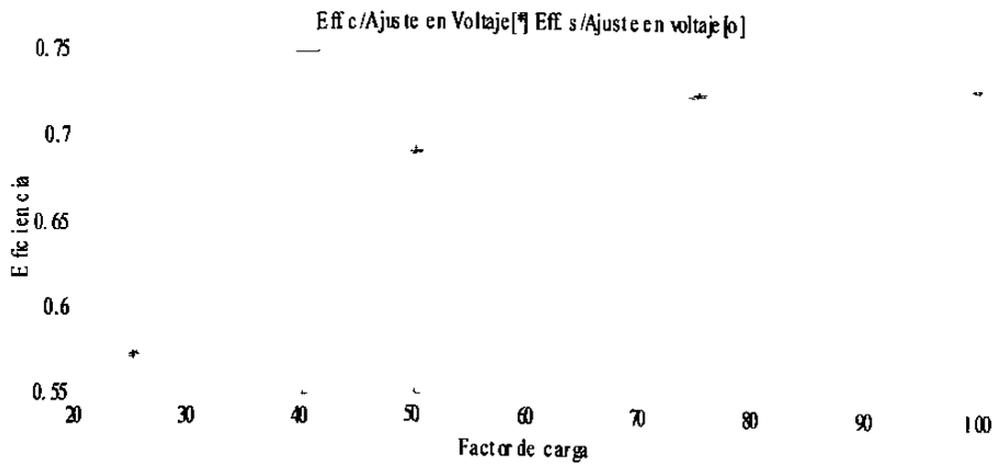
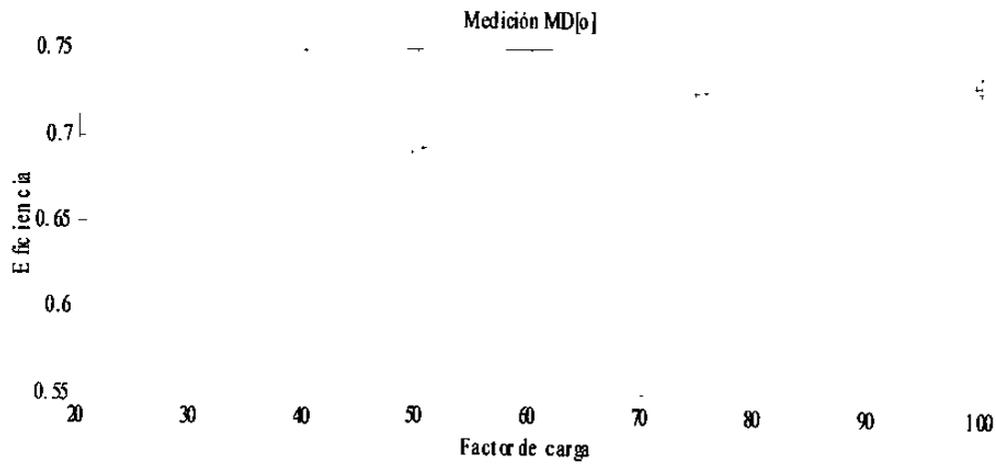
Eficiencia sin Ajuste en el Voltaje

	25	50	75	100
	0.5713	0.6905	0.7248	0.7308

Desempeño del motor en el punto de medición

T(Lb-pie)	Fc	Fp
2.0368	0.7038	0.6481

Observaciones:
Condiciones de operación normal



Evaluación al Desempeño a Motores de Inducción
Motor Compresor
Matlab 5.0

16-Nov-2002

Potencia Nominal=223.80

Voltaje en Fase A =428

Voltaje en Fase B =429

Voltaje en Fase C =430

Voltaje Nominal=460

Potencia aparente en Kva durante la Medición=187

Potencia de Entrada Kw =159

Número de Polos del motor =4

Velocidad de operación=1785

Velocidad nominal 100% de Carga=1775

Frecuencia Medida =60

Eficiencia al 100% =.945

Voltaje Máximo entre Fases=430

Voltaje Mínimo entre Fases=428

El motor es rebobinado[1]Si, [2]No=1

FcMD =

0.6000

nMD =

0.8445

Vprom =

429

Avv =

-6.7391

Porcentaje de Variación de voltaje
de acuerdo a gráfica 2.10a=.0110

Adv =

-0.2331

Porcentaje de Desbalance de voltaje
de acuerdo a gráfica 2.10b=.9999

Eficiencia Ajustada

0.8539

Eficiencia con Ajuste en el Voltaje

25	50	75	100
0.6893	0.8246	0.8867	0.9250

Eficiencia sin Ajuste en el Voltaje

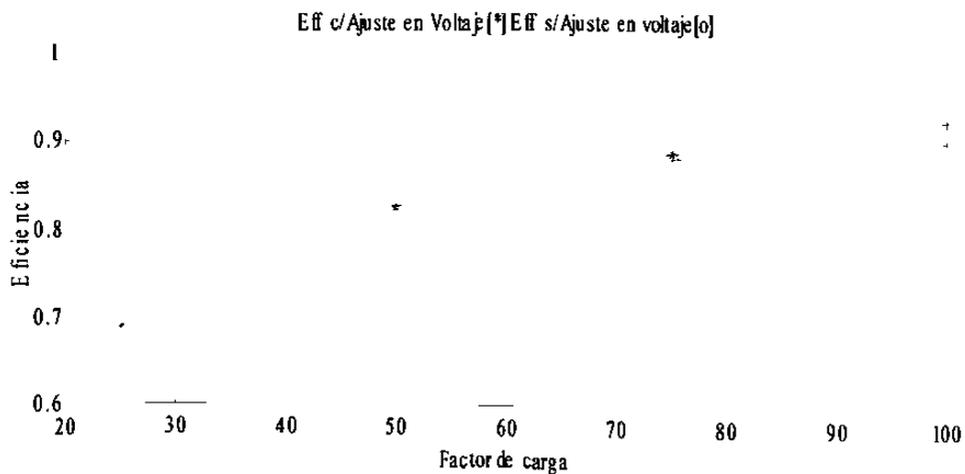
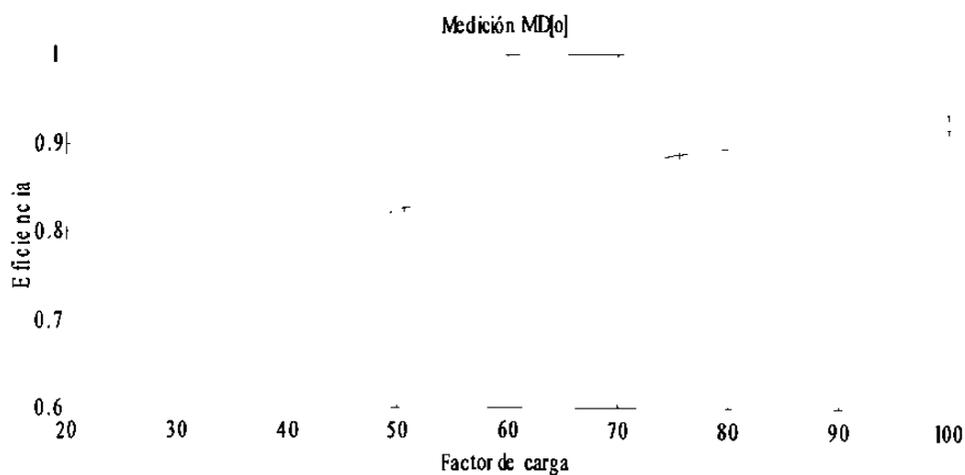
25	50	75	100
0.6683	0.8123	0.8811	0.9147

Desempeño del motor en el punto de medición

T(Lb-pie)	Fc	Fp
529.5973	0.6714	0.8503

Observaciones:

Severa variación de voltaje en el motor, condiciones de operación inapropiadas, esto repercute en la eficiencia y la vida residual del motor.



Resultados y Análisis de las gráficas de Eficiencias

Las gráficas de la figura 5.1C muestran un comparativo de los resultados de las eficiencias entre los dos métodos establecidos, las gráficas de barras indican la variación de la eficiencia entre los resultados obtenidos, también indican la variación entre ambos métodos además indica la máxima variación a la cual se considera un resultado aceptable (3 puntos de eficiencia).

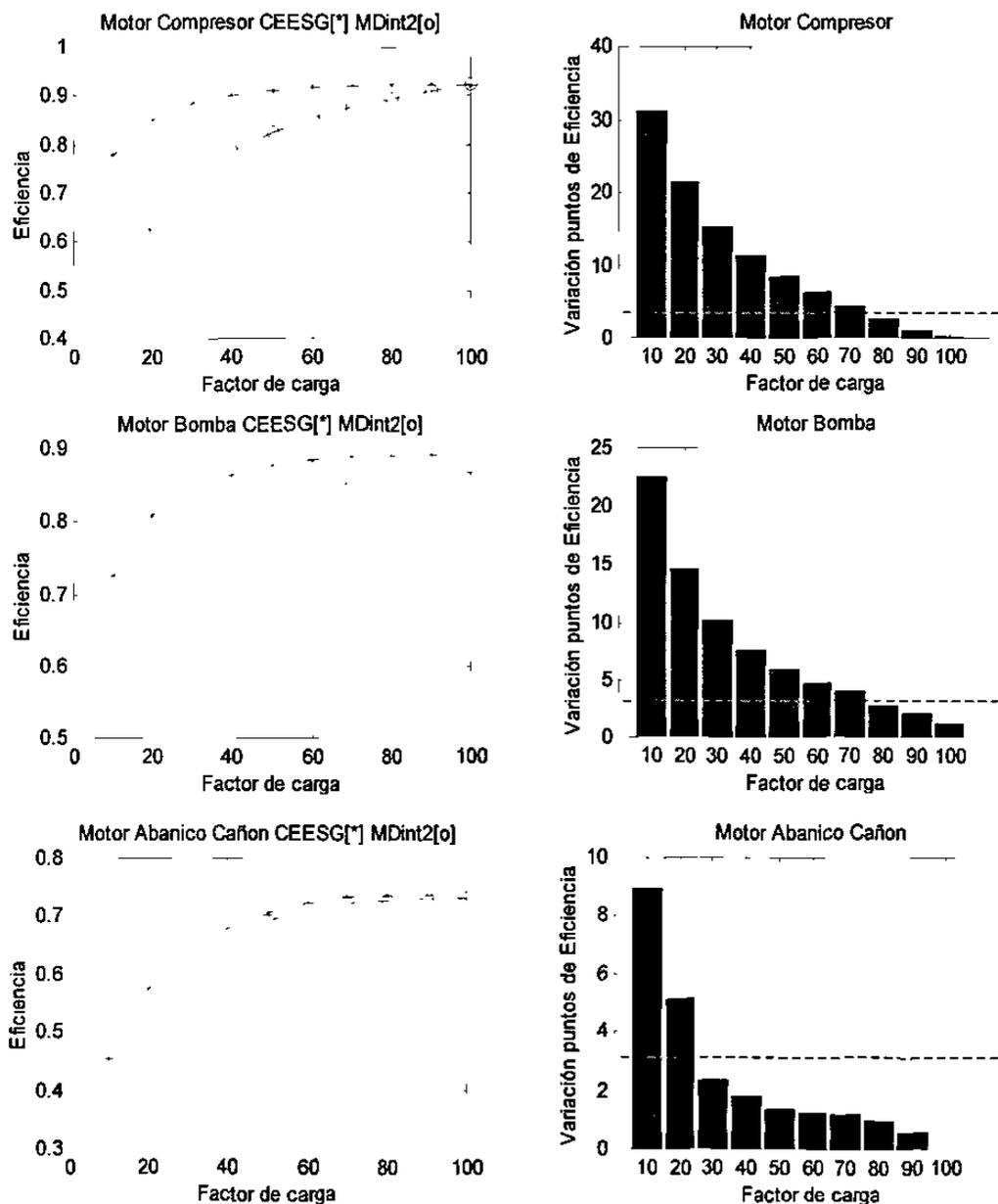


Figura 5.1c
Gráficas de Eficiencias

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El método propuesto cumplió con las expectativas generadas, sin embargo sobre la marcha se observó que en la mayoría de los casos la velocidad del motor al 100% de carga, impresa en los datos de placa, no concuerda con la velocidad real de operación, esto se debe principalmente a que los fabricantes no registran, el valor real de la velocidad, y se limitan a estimar un valor aproximado ó redondeándolo cada 5 rpm's, Esta situación se puede contrarrestar utilizando el procedimiento descrito a las pruebas realizadas a un motor de $1\frac{1}{2}$ hps, pero es necesario que el motor opere en un determinado momento al 100% de la carga, como lo indica este método.

La variación de la frecuencia y el desbalance de voltaje no fueron un factor determinante en la medición, principalmente por la buena calidad de la energía con la que se cuenta en el suministro de alta tensión.

No se presentó ningún caso de armónicas en los motores de inducción. Este efecto es difícil de cuantificar, y el método no determina las ecuaciones para conocer estas pérdidas en forma directa, sin embargo es posible conocer la eficiencia de un motor con armónicas debido a que este tipo de pérdidas se verán reflejadas en las mediciones hechas con el método propuesto.

Las mediciones realizadas arrojaron resultados aceptables en términos generales, se consideró que las mediciones tienen un margen de error de $\pm 3\%$, cuando se mide la eficiencia del motor entre el 100% y 70% de carga, estas conclusiones se dan después de observar la gráfica 5.1C que compara los resultados obtenidos de los métodos de deslizamiento y el cálculo con ecuaciones de segundo grado, la variación en la eficiencia se incrementa cuando los factores de carga son bajos, sin embargo esta variación en términos generales es despreciable ya que típicamente los motores en la industria operan a un 60% de su capacidad, a estos factores de carga el resultado obtenido utilizando el método de deslizamiento aun es aceptable. Es recomendable que de presentarse factores de carga por debajo del 60% , utilizar el cálculo de la Eficiencia con ecuaciones de segundo grado (*CEESG Anexo N0.3*), debido a que este método demostró arrojar resultados más precisos que el método originalmente propuesto.

Las dificultades en las mediciones de esta investigación se dan al medir la velocidad del rotor ya que esta varía por las pérdidas de fricción, se encontraron motores con chumaceras que presentan alta fricción generada por la mala calidad en las mismas, en la industria es común encontrar motores con problemas en las chumaceras por el desbalance que se puede tener en la flecha al acoplarla con la carga, esta situación de desbalance ó fricción se aprecia en forma de ruido ó calor, provocando una disminución en la velocidad del rotor, generándose una mala medición de la velocidad y consecuentemente errores al estimar la potencia de salida del motor, deberá ser necesario medir la temperatura de la flecha del motor y poder definir, si esta temperatura, está dentro de rangos normales de operación y establecer un patrón que este afectando a la medición.

Otra situación que se presentó fue la falta de datos de placa en algunos motores de los cuales ya han sido reembobinados y por alguna circunstancia no cuentan con esta información, sin estos datos es imposible realizar la medición con el método propuesto.

Respecto a las mediciones que se realizaron al motor de alta eficiencia de $1\frac{1}{2}$ hps. Se obtuvieron resultados muy aceptables, este método puede servir para medir los motores de inducción, utilizando el procedimiento descrito en las pruebas realizadas en el

capítulo 4, con el inconveniente de tener que desacoplarlos, es suficiente medir la eficiencia al 100% y al 75% de la capacidad del motor, y utilizar el cálculo de interpolación cuadrática para conocer la eficiencia al resto de los factores de carga.

Este método de ensayo recalcula la velocidad del motor sin embargo contiene el mismo principio de operación que el método originalmente planteado en esta investigación, la diferencia radica en que se puede variar la carga y llevar al motor a su capacidad nominal, conocer la velocidad real de operación al 100% de la corriente y de su voltaje nominal, estos dos últimos parámetros (*voltaje y corriente*) representan la potencia del motor en kw ó hps.

Las limitaciones del método de deslizamiento reducen el margen de motores a los cuales se puede aplicar esta metodología, esta investigación es útil para los motores con carga fija ó poco variable, además la medición de la velocidad del rotor se debe realizar a los motores en los cuales sea posible medir con el tacómetro en posición de contacto, y con la mayor seguridad para el personal que realiza las pruebas.

El criterio para determinar si un motor debe ser cambiado ó sustituido será utilizando una eficiencia mínima de 86% al 100% de su capacidad y puede depender de la capacidad del motor y de un análisis costo beneficio, es necesario considerar las pruebas al desempeño del motor para su sustitución, la variación y el desbalance en el voltaje se deben corregir para tener una mejor eficiencia en los motores sin la necesidad de cambiarlos, en la sustitución de los motores estándares por motores de alta eficiencia, se deben considerar aquellos motores que operan más de 1,000 horas al año y que cumplan con uno de los siguientes puntos.

- Los motores rebobinados son candidatos idóneos para su sustitución.
- Los motores que operan significativamente, sobredimensionados ó sobrecargados se pueden sustituir por motores de alta eficiencia.
- Los motores que operan moderadamente, sobredimensionados ó sobrecargados se recomienda reemplazarlos cuando estos fallen.
- Todos los motores que tengan 15 años o más de operación se pueden reemplazar.

Un motor sobredimensionado es aquel que opera al 50% de su carga, y el criterio para determinar si un motor esta sobrecargado será cuando opere al 120% de su capacidad, ambos en periodos de tiempo prolongados.

La siguiente etapa de esta investigación, será el desarrollar un dispositivo para medir la eficiencia del motor en *tiempo real*, toda la información recabada será procesada por una computadora la cual evaluará mediante un software las condiciones de la eficiencia y el desempeño.

Se pueden programar todas las necesidades de medición como medir la eficiencia a diferentes factores de carga, siendo la carga fija ó variable, e incluso conocer las condiciones de operación del motor, y prevenir una falla.

Para una medición de la eficiencia en tiempo real es recomendable utilizar el método con ecuaciones de segundo grado (*CEESG*).

Una recomendación importante para continuar con esta investigación es la de utilizar todas las técnicas posibles para determinar la carga del motor, y así contar con más recursos para definir a que factor de carga esta trabajando, el método aquí propuesto se limita a ciertas características de operación de los motores, además en las pruebas en campo se demostró que este no es tan preciso como se esperaba por las dificultades antes mencionadas, algunas de las técnicas que se pueden utilizar aunadas al método de deslizamiento son, la relación en la potencia y la técnica de la relación en la corriente, ambas deben ser compensadas por la variación y desbalance de voltaje.

Se requiere mayor tiempo para perfeccionar los métodos aquí propuestos, las consideraciones y las investigaciones realizadas son útiles para continuar con un proyecto similar.

ANEXO No. 1

Recopilación de datos de placa

Tabla No.A1. 1

<i>Datos de Placa</i>	<i>Motor de Inducción</i>	<i>Observaciones</i>
<i>No. de serie del motor</i>		
<i>Marca</i>		
<i>Potencia nominal(Kw)</i>		
<i>Voltaje nominal</i>		
<i>Corriente nominal</i>		
<i>Velocidad a plena carga (rpm)</i>		
<i>Eficiencia nominal</i>		
<i>Par del motor (Lb - pie)</i>		
<i>Diseño (NEMA)</i>		
<i>Factor de potencia</i>		
<i>Factor de servicio</i>		
<i>Motor rebobinado</i>		

Registro de mediciones

Tabla No. A1. 2

<i>Número de Medición</i>	<i>Voltaje entre fases</i>			<i>Corriente de línea</i>			<i>% Factor de potencia (3f)</i>	<i>Frecuencia Hz</i>
	<i>V₁₂</i>	<i>V₂₃</i>	<i>V₃₁</i>	<i>I₁₃</i>	<i>I₂₃</i>	<i>I₃₁</i>		
<i>Número de Medición</i>	<i>Vel. Operación (rpm)</i>	<i>Potencia</i>		<i>Armónicas</i>		<i>Observaciones</i>		
		<i>(Kw)</i>	<i>(Kva)</i>	<i>THDi</i>	<i>THDv</i>			

ANEXO N0. 2

Tabla No.A2. 1 Valores de Eficiencia Nominal a Plena Carga para Motores Cerrados de Eficiencia Estándar

Potencia Nominal (kW)	Potencia Nominal (hp)	3600 (RPM) 2 polos	1800 (RPM) 4 polos	1200 (RPM) 6 polos	900 (RPM) 8 polos
0.746	1	74.0%	75.5%	75.5%	72.0%
1.119	1.5	77.0%	80.0%	78.5%	75.5%
1.492	2	80.0%	81.5%	78.5%	75.5%
2.238	3	81.5%	81.5%	80.0%	75.5%
3.730	5	82.5%	84.0%	81.5%	82.5%
5.595	7.5	84.0%	86.5%	82.5%	84.0%
7.460	10	85.5%	86.5%	84.0%	85.5%
11.19	15	85.5%	87.5%	85.5%	85.5%
14.92	20	86.5%	87.5%	86.5%	86.5%
18.65	25	86.5%	89.5%	86.5%	86.5%
22.38	30	87.5%	90.2%	87.5%	87.5%
29.84	40	88.5%	90.2%	88.5%	88.5%
37.30	50	88.5%	91.0%	88.5%	89.5%
44.76	60	89.5%	91.7%	89.5%	89.5%
55.95	75	89.5%	91.7%	90.2%	89.5%
74.60	100	90.2%	92.4%	90.2%	90.2%
93.25	125	91.0%	92.4%	91.0%	91.0%
111.9	150	91.0%	92.4%	91.0%	91.7%
149.2	200	91.7%	93.0%	91.7%	91.7%

Tabla No. A2. 2 Valores de Eficiencia Nominal a Plena Carga para Motores Abiertos de Eficiencia Estándar

Potencia Nominal (kW)	Potencia Nominal (hp)	3600 (RPM) 2 Polos	1800 (RPM) 4 Polos	1200 (RPM) 6 Polos	900 (RPM) 8 Polos
0.746	1	72.0%	72.0%	72.0%	72.0%
1.119	1.5	72.0%	74.0%	74.0%	74.0%
1.492	2	74.0%	75.5%	75.5%	75.5%
2.238	3	80.0%	81.5%	80.0%	78.5%
3.730	5	80.0%	81.5%	80.0%	80.0%
5.595	7.5	81.5%	82.5%	81.5%	81.5%
7.460	10	82.5%	82.5%	82.5%	82.5%
11.19	15	84.0%	84.0%	84.0%	84.0%
14.92	20	84.0%	84.0%	84.0%	84.0%
18.65	25	86.5%	86.5%	86.5%	86.5%
22.38	30	87.5%	88.5%	87.5%	87.5%
29.84	40	88.5%	89.5%	88.5%	88.5%
37.30	50	89.5%	89.5%	89.5%	89.5%
44.76	60	90.2%	90.2%	90.2%	90.2%
55.95	75	90.2%	90.2%	90.2%	90.2%
74.60	100	90.2%	91.0%	90.2%	90.2%
93.25	125	91.0%	92.4%	91.0%	91.0%
111.9	150	91.0%	92.4%	91.0%	91.0%
149.2	200	91.7%	93.0%	91.7%	91.7%

Tabla No. A2. 3 Valores de Eficiencia Nominal a Plena Carga para Motores Cerrados de Alta Eficiencia

Potencia Nominal (kW)	Potencia Nominal (hp)	3600 (RPM) 2 polos	1800 (RPM) 4 polos	1200 (RPM) 6 polos	900 (RPM) 8 polos
0.746	1	75.5%	82.5%	80.0%	74.0%
1.119	1.5	82.5%	84.0%	85.5%	77.0%
1.492	2	84.0%	84.0%	86.5%	82.5%
2.238	3	85.5%	87.5%	87.5%	84.0%
3.730	5	87.5%	87.5%	87.5%	85.5%
5.595	7.5	88.5%	89.5%	89.5%	85.5%
7.460	10	89.5%	89.5%	89.5%	88.5%
11.19	15	90.2%	91.0%	90.2%	88.5%
14.92	20	90.2%	91.0%	90.2%	89.5%
18.65	25	91.0%	92.4%	91.7%	89.5%
22.38	30	91.0%	92.4%	91.7%	91.0%
29.84	40	91.7%	93.0%	93.0%	91.0%
37.30	50	92.4%	93.0%	93.0%	91.7%
44.76	60	93.0%	93.6%	93.6%	91.7%
55.95	75	93.0%	94.1%	93.6%	93.0%
74.60	100	93.6%	94.5%	94.1%	93.0%
93.25	125	94.5%	94.5%	94.1%	93.6%
111.9	150	94.5%	95.0%	95.0%	93.6%
149.2	200	95.0%	95.0%	95.0%	94.1%

Tabla No.A2. 4 Valores de Eficiencia Nominal a Plena Carga para Motores Abiertos de Alta Eficiencia

Potencia Nominal (kW)	Potencia Nominal (hp)	3600 (RPM) 2 polos	1800 (RPM) 4 polos	1200 (RPM) 6 polos	900 (RPM) 8 polos
0.746	1	—	82.5%	80.0%	74.0%
1.119	1.5	82.5%	84.0%	84.0%	75.5%
1.492	2	84.0%	84.0%	85.5%	85.5%
2.238	3	84.0%	86.5%	86.5%	86.5%
3.73	5	85.5%	87.5%	87.5%	87.5%
5.595	7.5	87.5%	88.5%	88.5%	88.5%
7.46	10	88.5%	89.5%	90.2%	89.5%
11.19	15	89.5%	91.0%	90.2%	89.5%
14.92	20	90.2%	91.0%	91.0%	90.2%
18.65	25	91.0%	91.7%	91.7%	90.2%
22.38	30	91.0%	92.4%	92.4%	91.0%
29.84	40	91.7%	93.0%	93.0%	91.0%
37.3	50	92.4%	93.0%	93.0%	91.7%
44.76	60	93.0%	93.6%	93.6%	92.4%
55.95	75	93.0%	94.1%	93.6%	93.6%
74.6	100	93.0%	94.1%	94.1%	93.6%
93.25	125	93.6%	94.5%	94.1%	93.6%
111.9	150	93.6%	95.0%	94.5%	93.6%
149.2	200	94.5%	95.0%	94.5%	93.6%

ANEXO No. 3

CALCULO DE LA EFICIENCIA A MOTORES DE INDUCCIÓN CON ECUACIONES DE SEGUNDO GRADO

INTRODUCCION.

En este trabajo de investigación se plantea un procedimiento para calcular la eficiencia de los motores de inducción en forma indirecta utilizando una serie de ecuaciones de segundo grado a diferentes factores de carga del motor.

Para obtener la eficiencia de los motores de inducción es necesario desarrollar una constante de proporcionalidad.

Esta constante de proporcionalidad K está basada en la proporción de pérdidas variables que tiene un motor al 100% de su carga, y fue establecida por el comportamiento de la eficiencia típica, esta constante representa el valor de las pérdidas variables de los motores más comercializados del país.

Se requiere conocer el valor de la eficiencia del fabricante impreso en el dato de placa al 100% de su carga y utilizar las ecuaciones aquí establecidas para calcular la eficiencia a diferentes factores de carga.

Con ayuda de la interpolación de Lagrange de segundo orden es posible conocer el valor de la eficiencia a cualquier factor de carga, también se considera la variación de eficiencia que presentan los motores a diferentes números de polos, aunque estos sean de la misma capacidad, se mide el factor de carga, aunado a la variación y desbalance de voltaje para determinar la eficiencia real de operación de los motores de inducción.

Cuando los motores ya hayan sido rebobinados se restan dos puntos porcentuales a su eficiencia nominal.

1.0 LAS PÉRDIDAS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Las pérdidas consumen sólo una fracción de la potencia de entrada del motor de inducción, para la realización de este cálculo las pérdidas se agrupan en tres tipos:

- Pérdidas eléctricas variables (I^2R).
- Pérdidas fijas.
- Pérdidas dispersas.

Las pérdidas Eléctricas varían en función del cuadrado de la corriente con una resistencia esencialmente constante, en cambio las pérdidas fijas en condiciones normales de tensión y frecuencia se mantienen casi constantes, independientemente de la carga impulsada, por otra parte las pérdidas dispersas son difíciles de cuantificar y se manifiestan como un flujo disperso debido a las corrientes de carga y otras corrientes menores, en este cálculo se consideran las pérdidas dispersas equivalentes a un valor porcentual de la potencia de salida de los motores y este valor puede variar de acuerdo a su potencia nominal.

La tabla A3.1 muestra el valor porcentual de las pérdidas dispersas.

Tabla A3.1 Valor Porcentual de las Pérdidas Dispersas.

Este criterio esta basado en la publicación del estándar IEEE 112-1996.

Rango de Potencia del Motor	Porcentaje de Pérdidas dispersas relativas a la Potencia de Salida
0.750 – 90 KW	1.8%
91 – 375 KW	1.5%
376 – 1800 KW	1.2%
Mayores a 1800KW	0.9%

2.0 LA CONSTANTE DE PROPORCIONALIDAD “K”

La constante de proporcionalidad representa las pérdidas variables de los motores de inducción más comercializados en el país.

Esta constante es el resultado obtenido de las pérdidas variables que tienen los motores al 100 y 75 % de carga, los fabricantes de motores dan a conocer las listas de las eficiencias de sus motores de inducción a diferentes tipos de carga.

El *FIDE (Fideicomiso para el Ahorro de Energía)* recopila y publica los resultados promedios de las eficiencias de los fabricantes de motores que más se comercializan en el país. Utilizando estas publicaciones, se determina la constante *K*.

La ecuación que establece esta proporcionalidad está dada por la siguiente expresión:

$$K = \left(\frac{(Lt - Lx) - (b \cdot (1 - x))}{(1 - x^2)} \right) \div Lt \quad (A3. 1)$$

donde:

K = constante de proporcionalidad de pérdidas variables.

Lt = pérdidas totales del motor al 100% de carga.

Lx = pérdidas totales al 75 % de carga.

b = pérdidas dispersas establecidas por la Tabla A3. 1.

x = factor de carga equivalente 0.75

Para conocer los valores de las pérdidas totales se deberá utilizar la siguiente fórmula:

$$Lt = P_{nom}(kw) \cdot \left[\frac{1}{\eta_{(100\%)}} - 1 \right] \quad (A3. 2)$$

En el caso de las pérdidas al 75 % de cargas la fórmula es la siguiente

$$Lx = P_{nom}(kW) \cdot x \cdot \left[\frac{1}{n(x)} - 1 \right] \quad (A3. 3)$$

donde:

P_{nom} = Potencia nominal del motor.

x = Factor de Carga del motor 75%.

n = Eficiencia del motor al 100% ó al 75% de carga respectivamente.

Los datos obtenidos de las tablas publicadas por el *FIDE* dan como resultado una constante K establecida en la Tabla A3. 2.

Tabla A3. 2 Valor de la constante K .

Eficiencia de los motores de Inducción al 100% de Carga	Constante K de Proporcionalidad
80 – 83	0.60
84 – 88	0.55
89 – 90	0.50
91 – 92	0.45
93 – 94	0.40
95 ó mayores	0.30

Conociendo esta constante las pérdidas variables quedan definidas de la siguiente forma.

$$a = Lt \cdot K \quad (A3. 4)$$

La determinación de las pérdidas fijas está dada por la siguiente expresión:

$$c = Lt - (a + b) \quad (A3. 5)$$

3.0 ECUACIONES DE SEGUNDO GRADO.

Las pérdidas de los motores de inducción típicamente muestran un comportamiento parabólico, principalmente por las pérdidas variables por la (I^2R).

Para la realización de estas ecuaciones se considera el número de polos de los motores de inducción, esto es debido al cambio que sufre la eficiencia en los motores de inducción a diferentes números de polos, aunque estos sean de la misma capacidad.

La ecuación que determina las pérdidas al 100% de carga considerando a $x = 1.0$ es:

$$Ly(1) = a + b + c \quad (A3. 6)$$

La ecuación que determina las pérdidas al 75% de carga es:

$$Ly(2) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (A3. 7)$$

La ecuación para determinar las pérdidas de un motor al 50% de carga es la siguiente:

$$Ly(3) = a \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot x^2 + \frac{1}{4} \cdot x \right) + b \cdot x + c \quad (A3. 8)$$

donde:

a = pérdidas variables.

b = pérdidas dispersas.

c = pérdidas fijas.

x = factor de carga.

Las ecuaciones que determinan las pérdidas del motor al 50% de carga contienen una componente lineal dentro de las pérdidas variables del motor, ésta componente lineal se incrementa a razón del número de polos del motor de inducción al 25% de carga, la justificación de esta componente se da por el bajo factor de potencia que presentan los motores en condiciones de vacío, la corriente en estos factores de carga no muestra un comportamiento cuadrático, además si el motor tiene un mayor número de polos este tendrá un mayor consumo de corriente reactiva por las condiciones antes mencionadas.

Para motores de 2 y 4 polos.

$$Ly(4) = a \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot x^2 + \frac{1}{4} \cdot x \right) + b \cdot x + c \quad (\text{A3. 9})$$

Para motores de 6 polos.

$$Ly(5) = a \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot x^2 + \frac{1}{2} \cdot x \right) + b \cdot x + c \quad (\text{A3. 10})$$

Para motores de 8 polos.

$$Ly(6) = a \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot x^2 + \frac{3}{4} \cdot x \right) + b \cdot x + c \quad (\text{A3. 11})$$

4.0 MEDICION DEL FACTOR DE CARGA.

En términos generales el factor de carga es un indicador que determina la capacidad a la cual está trabajando un equipo, la carga puede cambiar a través del tiempo, conociéndose también como una carga constante ó variable.

En este método se determina el factor de carga utilizando una relación de la corriente de operación entre la corriente nominal del motor, además se multiplica esta relación de corriente, con la relación de variación de voltaje debido principalmente a que la corriente se ve afectada por la variación de voltaje que puede presentar el motor.

$$\%FC = \left(\frac{I_p \cdot V_p}{I_n \cdot V_n} \right) \cdot 100 \quad (A3. 12)$$

donde:

I_p = Corriente Promedio en las tres fases (RMS).

I_n = Corriente Nominal del motor.

V_p = Voltaje Promedio en las tres fases (RMS).

V_n = Voltaje Nominal del motor.

Aunado a la medición de la corriente, se utilizará la ecuación (2.32) que también determina, con otros parámetros el factor de carga, esta ecuación establece una relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida nominal arrojando incluso mejores resultados que el método que utiliza la medición de la corriente.

5.0 LA INTERPOLACION DE LAGRANGE

Cuando se requiera conocer las pérdidas del motor a un factor de carga no predeterminado en las ecuaciones anteriores, es necesario utilizar una interpolación de segundo grado, para esto se utiliza la interpolación de Lagrange, la cual simplemente es una reformulación del método de Newton para la interpolación de polinomios.

La ecuación de Lagrange se puede representar concretamente como:

$$f_n(X) = \sum_{i=0}^n Li(X) \cdot f(X_i) \quad (\text{A3. 13})$$

donde:

$$Li(X) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{X - X_j}{X_i - X_j} \quad (\text{A3. 14})$$

y la ecuación de segundo orden para cuatro puntos esta expresada en la siguiente forma:

$$f(X_a) = \frac{(X - X_1) \cdot (X - X_2) \cdot (X - X_3)}{(X_0 - X_1) \cdot (X_0 - X_2) \cdot (X_0 - X_3)} \cdot f(X_0) \quad (\text{A3. 15})$$

$$f(X_b) = \frac{(X - X_0) \cdot (X - X_2) \cdot (X - X_3)}{(X_1 - X_0) \cdot (X_1 - X_2) \cdot (X_1 - X_3)} \cdot f(X_1) \quad (\text{A3. 16})$$

$$f(X_c) = \frac{(X - X_0) \cdot (X - X_1) \cdot (X - X_3)}{(X_2 - X_0) \cdot (X_2 - X_1) \cdot (X_2 - X_3)} \cdot f(X_2) \quad (\text{A3. 17})$$

$$f(X_d) = \frac{(X - X_0) \cdot (X - X_1) \cdot (X - X_2)}{(X_3 - X_0) \cdot (X_3 - X_1) \cdot (X_3 - X_2)} \cdot f(X_3) \quad (\text{A3. 18})$$

El resultado del polinomio de Lagrange es la suma de todas las ecuaciones:

$$f_2(X) = f(X_a) + f(X_b) + f(X_c) + f(X_d) \quad (\text{A3. 19})$$

donde:

$f_2(X) = Ly(x)$ (Las pérdidas obtenidas del factor de carga medido).

$f(X_0) = L(y_1)$.

$f(X_1) = L(y_2)$.

$f(X_2) = L(y_3)$.

$f(X_3) = L(y_4, \text{ ó } y_5, \text{ ó } y_6)$.

$X =$ (factor de carga determinado por una medición real).

$X_0 = 1.0$ factor de carga.

$X_1 = 0.75$ factor de carga.

$X_2 = 0.50$ factor de carga.

$X_3 = 0.25$ factor de carga.

La figura A3. 1 muestra las ecuaciones que determinan las pérdidas de los motores a diferentes factores de carga, se pueden observar los 4 puntos que se utilizan para la interpolación de segundo orden con el polinomio de *Lagrange*.

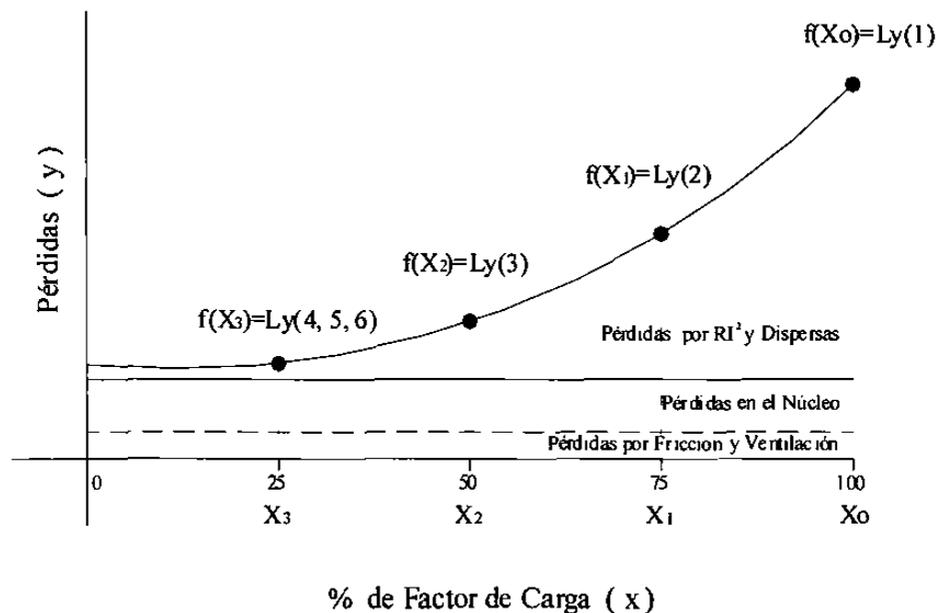


Figura A3 1
Determinación de los 4 puntos
para la interpolación de Lagrange

6.0 FACTORES DE AJUSTE A LA EFICIENCIA.

Los factores de ajuste que pueden influir en el comportamiento de la eficiencia del motor utilizando este método son tres:

- **FAre** (*Factor de Ajuste por Rebobinado al motor*).
- **FAvv** (*Factor de Ajuste por variación de voltaje*).
- **FAdv** (*Factor de Ajuste por desbalanceo de voltaje*).

El Factor de Ajuste por Rebobinado al motor (FAre).

Todo motor que ha sido rebobinado sufre un deterioro en su eficiencia. Cuando se realiza en talleres sin las características necesarias o que no cuentan con los materiales adecuados.

Las pérdidas del núcleo de un motor que ha sido rebobinado pueden ó no incrementarse dependiendo del proceso de limpieza en el estator, fuentes fidedignas dedicadas al diseño de motores indican que después de haber sido rebobinado un motor este pierde dos puntos porcentuales de eficiencia.

Otras fuentes indican que las pérdidas se pueden reducir si se toman en cuenta los estándares establecidos para este tipo de reparaciones.

El Factor de Ajuste cuando el motor ha sido rebobinado es:

$$FAre = 0.02 \quad (A3.20)$$

En cambio cuando el motor no ha sido reparado el valor del factor de ajuste a la eficiencia será cero.

$$FAre = 0 \quad (A3.21)$$

El Factor de Ajuste a la eficiencia por variación de voltaje (F_{Avv}).

La variación de voltaje se define como la relación del voltaje trifásico promedio de línea y el voltaje indicado en la placa, tal como lo indica la ecuación (3.5).

Una vez medida la variación de voltaje en el motor, es posible calcular el factor de ajuste a la eficiencia por medio de la siguiente expresión:

$$F_{Avv} = \text{abs}\{ (AVV) \cdot [0.07 - (1.334 \cdot (AVV))] - 0.0009 \} \quad (\text{A3. 22})$$

donde:

F_{Avv} = es el factor de ajuste a la eficiencia por variación de voltaje.

AVV = es el Ajuste por variación de voltaje establecido en la ecuación (3.5).

El Factor de Ajuste a la eficiencia por desbalance de voltaje (F_{Adv}).

El desbalance de voltaje se define como la máxima desviación de voltaje de línea al voltaje promedio tal y como lo indica la ecuación (3.10).

Una vez medido el desbalance en el voltaje se puede calcular el factor de ajuste a la eficiencia por desbalance de voltaje el cual queda expresado en la siguiente ecuación.

$$F_{Adv} = \text{abs}\{ (ADV) \cdot [0.0113 + (0.073 \cdot (ADV))] \} \quad (\text{A3. 23})$$

donde:

F_{Adv} = es el factor de ajuste a la eficiencia por desbalance de voltaje.

ADV = es el Ajuste por desbalance de voltaje establecido en la ecuación (3.10).

El factor de ajuste a la eficiencia es expresado en la siguiente ecuación:

$$F_{An(x)} = F_{Avv} + F_{Adv} + F_{Are} \quad (\text{A3. 24})$$

donde:

$F_{An(x)}$ = Factor de Ajuste a la eficiencia.

7.0 LA EFICIENCIA DE MOTOR DE INDUCCIÓN.

Una vez establecidas las ecuaciones para calcular las pérdidas de los motores a diferentes factores de carga y después de haber sido medido ó calculado el factor de carga, es necesario determinar la ecuación que defina la eficiencia estimada de los motores de inducción.

La ecuación es establecida en la siguiente expresión:

$$n(x) = \frac{(Ps \cdot x)}{(Ps \cdot x) + Ly(x)} \quad (\text{A3. 25})$$

donde :

n(x) = La eficiencia estimada a un determinado factor de carga.

Ps = Potencia de salida.

Ly(x) = Pérdidas a un determinado factor de carga.

x = Factor de carga.

Eficiencia Real de Operación.

Para conocer la eficiencia real de operación es necesario aplicar los factores de ajuste a la eficiencia, la ecuación es definida de la siguiente forma:

$$nr(x) = n(x) - FAn(x) \quad (\text{A3. 26})$$

8.0 SECUENCIA PARA EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA.

La Secuencia de operación para obtener el cálculo de la eficiencia de los motores de inducción se divide principalmente en dos bloques, el primero define la secuencia para el cálculo de las ecuaciones necesaria para determinar la eficiencia, el segundo bloque determina los factores de ajuste y de carga, necesarios para conocer la eficiencia real de operación usando como base mediciones de corriente, voltaje y potencia del motor. La figura No.3 muestra la secuencia de operación.

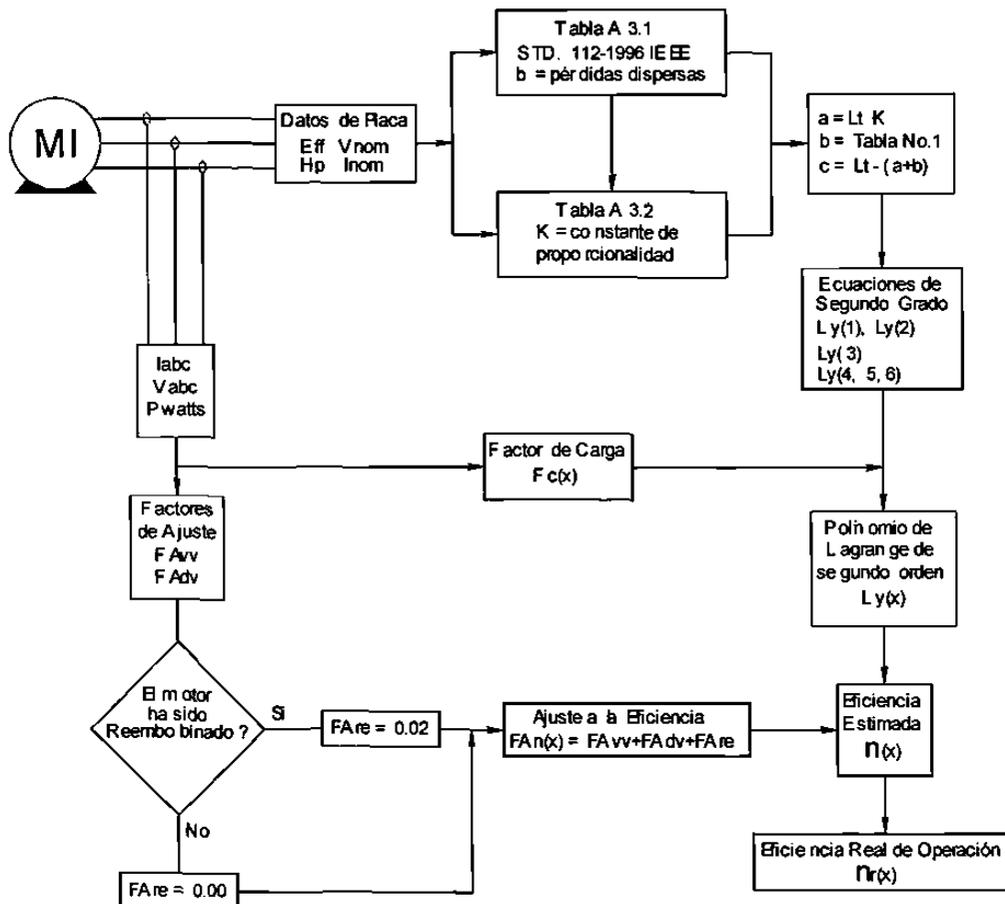


Figura A3. 2
Diagrama de Bloques de la secuencia
para el cálculo de la eficiencia

LISTA DE FIGURAS

- 2.1 a El movimiento de un conductor a través de un flujo magnético.
- 2.2 a Líneas de flujo enlazando a una bobina de una vuelta.
- 2.3 a Arreglo de los embobinados de un estator trifásico.
- 2.3 b (A) Rotor devanado trifásico (B) Rotor jaula de ardilla.
- 2.4 a Fuerzas ejercidas por el campo magnético rotatorio en el rotor de un motor.
- 2.5 a Curva típica par-velocidad.
- 2.5 b Curvas típicas par-velocidad para motores clase *A, B, C y D*.
- 2.6 a Diagrama de bloques de potencia.
- 2.6 b Comportamiento típico del factor de potencia en un motor de inducción.
- 2.7 a Desempeño de un motor de inducción 5 hps clase B, 4 polos.
- 2.8 a Comparación de pérdidas para un motor de 5 hps, 4 polos, estándar y E.E.
- 2.9 a Comportamiento de las pérdidas en función de la carga de un motor.
- 2.10 a Porcentaje de cambio en las características de operación del motor.
- 2.11 a Factor de ajuste al funcionamiento del motor por desbalanceo de voltaje.
- 3.1 a Motor de inducción clase B.
- 3.2 a Comportamiento del motor clase B 5 hps, 4 polos.
- 3.3 a Gráfica del comportamiento de las pérdidas en función de la carga de un motor.
- 4.1 a Puntos clave para la medición de la eficiencia.
- 4.2 a Motor alta eficiencia Baldor 1.5 hps, 4 polos y freno magnético.
- 4.2 b Diagrama de flujo del procedimiento de pruebas.
- 4.2 c Diagrama esquemático de pruebas.
- 4.3 b Gráfica de resultados de las pruebas.
- 4.4 a Puntos clave de la medición del motor bomba.
- 4.4 b Puntos clave para la medición del motor compresor.
- 4.4 c Puntos clave de la medición del motor abanico cañón.
- 5.1 c Gráficas de eficiencias.
- A3. 1 Determinación de los 4 puntos para la interpolación de Lagrange.
- A3. 2 Diagrama de bloques de la secuencia para el cálculo de la eficiencia.

LISTA DE TABLAS

- 2.9 b Tipos de pérdidas y sus características.
- 4.3 a Resultados de las pruebas realizadas.
- 5.1 a Resultados obtenidos de las mediciones a los casos de estudio.
- 5.0 b Resultados obtenidos de las mediciones a los casos de estudio.
- A1. 1 Recopilación de datos de placa.
- A1. 2 Registro de mediciones.
- A2. 1 Valor de eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados estándar.
- A2. 2 Valor de eficiencia nominal a plena carga para motores abiertos estándar.
- A2. 3 Valor de eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados alta eficiencia.
- A2. 4 Valor de eficiencia nominal a plena carga para motores abiertos alta eficiencia.
- A3. 1 Valor porcentual de pérdidas dispersas.
- A3. 2 Valor de la constante K .

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Notas del Centro de Estudios de Energía. ITESM Campus Monterrey.
Armando Llamas, *Monterrey Nuevo León, 2002.*
- [2] *IEEE* 'Comparison of standars for determining efficiency of three Phase induction. motors' B.Renier,K Hameyer, R. Belmans. *Transaction, Vol. 14, 19 Sept. 1999.*
- [3] "Control de Motores Eléctricos", Grupo Noriega Editores.
Enriquez Harper *Editorial Limusa, México DF, 2000.*
- [4] Conversión de la Energía Electromecánica.
Vembu Gourishankar, *Editorial Alfaomega, México DF, 1997.*
- [5] Curso de Transformadores y Motores de Inducción, Grupo Noriega Editores.
Enriquez Harper, *Cuarta Edición Editorial Limusa México DF, 2001.*
- [6] *Artículo* "Efectos de las Armónicas en los Sistemas Eléctricos."
ITESM Campus Monterrey N.L. A. Tejeda, A. Llamas.
Monterrey Nuevo León, 1999.
- [7] *IEEE* 'Efficiency increase of an induction motor by improving cooling performance'
M.K. Yoon, C.S. Jeon, and S. Ken Kauh. *Transaction, Vol. 17, March 2002.*
- [8] Energy Efficient Electric Motor Selection Handbook.
McCoy, Gilbert A. and John G. Douglass,
U.S. Department Energy DOE/GO-10096-290, August 1996.
- [9] *Artículo* "Evaluación Energética de Motores Eléctricos de Inducción."
Fideicomiso para el ahorro de energía *FIDE, México D.F, 2000.*

- [10] Induction Machine, Gordon and Breach Science Publishers Inc.
Philip. L. Alger, *Second Edition 1970, New York NY.*
- [11] *IEEE* 'Proper Specification and Installation of Inductions Motors.'
W. R. Finley, R. R. Bruke. *Industry Aplicatcions Magazine, Vol 3. Feb. 1997.*
- [12] Norma Oficial Mexicana NOM-016-ENER-1997, *Eficiencia energética de motores de corriente alterna trifásico de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en Potencia nominal de 0.746 a 149.2 KW.*
- [13] The Student Edition of Matlab, The Language of Technical Computing.
Version 5.0 User's Guide, The Math Work Inc.
D. Hanselman, B. Littlefield, *Published by Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1997.*
- [14] *IEEE* 'Standard Test Procedure for Polyhase Inducción Motors and Generators.'
Std 112-1996, *IEEE Power Engineering Society, New York, NY.*
- [15] *IEEE* 'Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods.'
John S. Hsu, John D. Kueck, Mitchell Olszewski, Don A. Casada, Pedro J. Otaduy
Leon M. Tolbert, *Transactions on Industry Applications. Vol. 34 No.1 Feb. 1998.*

