

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN
DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE MOTORES
ELÉCTRICOS EN OPERACIÓN**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

FERNANDO VICTOR BURNEO MENDOZA

**PROMOCIÓN
2007 - II**

**LIMA-PERÚ
2010**

**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN
DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE MOTORES
ELÉCTRICOS EN OPERACIÓN**

DEDICATORIA

Mis agradecimientos van dirigidos principalmente a mis padres, Raquel y Guillermo, que siempre me motivaron y apoyaron en la realización de esta tesis. Muchas gracias por el empuje y la paciencia que han tenido todo este tiempo. Los frutos de este estudio se los dedico totalmente a Ustedes.

Estoy muy agradecido con el Ing. Alberto Sandoval por su asesoría, y la confianza depositada en mí. Y de manera conjunta agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, y a todo el grupo humano que lo conforma, por haber contribuido en mi formación profesional.

Agradezco también a todos los integrantes de mi familia y a mis amigos que a su manera me hicieron sentir que era capaz y que con sus palabras me motivaron día a día. Un agradecimiento especial al Ing. Federico Vargas-Machuca por compartir sus conocimientos y consejos conmigo.

SUMARIO

Este documento es el resultado de un estudio de investigación sobre métodos para determinar la eficiencia de motores eléctricos en su lugar de operación. De los varios métodos que han sido desarrollados a nivel mundial se escogieron dos de ellos por su fácil implementación, bajo nivel de intrusión y nivel de precisión aceptable: El Método del Deslizamiento y el Método de las Eficiencias Ajustadas.

Se hace una explicación detallada del procedimiento de cálculo de cada uno de los métodos, presentando variantes favorables a la precisión, así como se indican los equipos y mediciones que se requieren tomar para la aplicación de cada uno. Con la intención de agilizar los cálculos en campo, cada método fue compilado de manera computacional y acomodado en hojas de cálculo que trabajan sobre la plataforma del programa Excel. Dichas herramientas también se adjuntan a este documento.

Todo nace de la motivación de contribuir al uso eficiente de la energía en todos los campos donde sea posible, y en el caso de los motores eléctricos de manera en especial, por ser en conjunto grandes consumidores de energía.

INDICE

PRÓLOGO	1
CAPITULO I	
PERFIL DE LA TESIS	4
1.1 Introducción	4
1.2 Problema	4
1.3 Antecedentes	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo Principal	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
1.5 Respaldo Normativo y Legal	5
1.6 Sistema Internacional de Unidades	5
1.7 Metodología de Investigación	6
1.8 Alcances del estudio	6
CAPITULO II	
CIRCUITOS MAGNÉTICOS	8
2.1 Introducción	8
2.2 Circuitos eléctricos y magnéticos	9
2.2.1 Parámetros equivalentes entre los circuitos eléctricos y magnéticos	9
CAPITULO III	
MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS	13
3.1 Introducción	13
3.2 Principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas rotativas	13
3.3 Elementos básicos de las máquinas eléctricas rotativas	16
3.3.1 Núcleo	16
3.3.2 Devanados	20
3.3.3 Elementos Mecánicos	22
3.4 Pérdidas de Energía en Motores Eléctricos	22
3.4.1 Tipos de Pérdidas de Energía	23
3.4.2 Técnicas para la reducción de pérdidas	27

CAPITULO IV

EFICIENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS EN OPERACIÓN	31
4.1 Magnitudes Características	31
4.1.1 Carga	31
4.1.2 Torque	32
4.1.3 Velocidad	33
4.1.4 Potencia	35
4.1.5 Eficiencia (η)	36
4.1.6 Factor de carga (fdc)	40
4.2 Métodos para la determinación de la eficiencia de motores eléctricos	44
4.2.1 Métodos Normados	45
4.2.2 Métodos de Campo	53
4.3 Método del Deslizamiento	61
4.3.1 Datos de placa	61
4.3.2 Datos Medibles	62
4.3.3 Factor de carga básico	63
4.3.4 Determinación de la eficiencia	63
4.3.5 Factor de carga corregido con respecto a la tensión	65
4.3.6 Factor de carga, propuesta alternativa	65
4.4 Método de las Eficiencias Ajustadas	68
4.4.1 Datos de placa	68
4.4.2 Datos medibles	69
4.4.3 Factor de carga	69
4.4.4 Eficiencia base	69
4.4.5 Factores de ajuste	70
4.4.6 Eficiencia Ajustada	72

CAPITULO V

CONSIDERACIONES PARA EL REEMPLAZO DE UN MOTOR	74
5.1 Introducción	74
5.2 Potencial de ahorro de energía	76
5.3 Cuando comprar motores de eficiencia energética	76
5.4 Datos previos necesarios	77
5.4.1 Facturación eléctrica	78
5.4.2 Factor de Carga	78
5.4.3 Horas Anuales de Operación	78
5.4.4 Cálculo de los Ahorros Energéticos Anuales	80

5.5	Ahorros económicos anuales	81
5.6	Evaluación de la viabilidad económica	81
CAPITULO VI		
DESARROLLO DE SOFTWARE		83
6.1	Generalidades	83
6.2	Método del Deslizamiento	84
6.2.2	Datos de Placa	84
6.2.3	Datos Medidos	85
6.2.4	Datos Extras	85
6.2.5	Cálculo de la eficiencia del motor en estudio, Motor 1	86
6.2.6	Datos del motor de reemplazo, Motor 2	86
6.2.7	Viabilidad económica	86
6.3	Método de Eficiencias Ajustadas	87
6.3.2	Datos de Placa	88
6.3.3	Datos Medibles	92
6.3.4	Datos Extras	92
6.3.5	Factores de Ajuste	93
6.3.6	Cálculo de la eficiencia del motor en estudio, Motor 1	94
6.3.7	Cálculo de la eficiencia del motor de reemplazo, Motor 2	98
6.3.8	Viabilidad de inversión	107
CAPITULO VII		
TRABAJO DE CAMPO		108
7.1	Generalidades	108
7.2	Aplicación del Método del Deslizamiento propuesto	109
7.2.1	Comparación entre las variantes existentes	115
7.3	Aplicación del Método de las Eficiencias Ajustadas	120
7.4	Comparación entre los dos métodos propuestos	129
CAPITULO VIII		
PROPUESTA DE LABORATORIO		132
8.1	Objetivo	132
8.2	Principios Generales	132
8.3	Equipos e Instrumentos a utilizar	132
8.4	Procedimiento	133
8.4.1	Método del Deslizamiento.	133
8.4.2	Método de las Eficiencias Ajustadas	133
8.5	Preguntas	134

CAPITULO IX	
APORTES DEL ESTUDIO	136
9.1 Aporte personal	136
9.2 Contribución del estudio	136
9.3 Limitaciones del estudio	136
9.4 Futura investigación	137
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
ANEXOS	141
BIBLIOGRAFÍA	154

PRÓLOGO

La actual situación energética mundial, sumada a sus consecuencias climatológicas y económicas, hace que la Eficiencia Energética se haya convertido en un tema de mucha importancia y que merezca la atención de todos a nivel internacional. Claro ejemplo de lo mencionado es la creación y aprobación de legislaciones respecto al uso de la energía en países como Estados Unidos y algunos países de Europa.

En el Perú, la demanda eléctrica viene teniendo un crecimiento mayor a la oferta, la misma que requiere de una buena política energética por parte del gobierno o de lo contrario podría desencadenarse un colapso energético, situación que muchos especialistas vienen advirtiendo en diferentes espacios de diálogo [1].

Eficiencia energética significa realizar un mismo trabajo con menos energía, o hacer más trabajo con una misma cantidad de energía. La creación de nuevas fuentes de energía es la solución más adecuada pero no la más rápida. El uso eficiente de la energía que ya tenemos es también una solución adecuada, que debe mantenerse siempre presente, y que puede aplicarse de manera casi inmediata. Es por ello el esfuerzo e interés de promover todos los conocimientos relacionados a la eficiencia energética.

Casi el 60% de la energía eléctrica generada en el Perú es consumida por el sector industrial [2], y el 70% de esa energía es destinada a la operación de motores eléctricos, siendo el motor asíncrono de jaula de ardilla el de mayor presencia. Por lo que conseguir un ahorro en el consumo energético de este sector, exige el incremento obligatorio de la eficiencia de dichos motores. Para conseguir ese ahorro se necesita previamente conocer las condiciones en las que se encuentran los motores para luego realizar las acciones adecuadas y necesarias. Esta idea fue reforzada cuando un estudio realizado en 1990 por el Departamento de Energía de EEUU mostró que en 10 años, su industria podría ahorrar 240 mil millones de kWh anualmente, reemplazando motores y accionamientos de eficiencia estándar, por otros que fueran solo de 2% a 6% más eficientes.

En los países en vías de desarrollo, este tipo de políticas energéticas han demorado en establecerse y las cifras que se encuentran en cuanto al uso de motores más eficientes son notablemente inferiores a las de los países industrializados. Una de las razones es que en las prácticas tradicionales de compra no se evalúa el costo real de la energía, entre otras cosas, porque no se comprende la relación entre la eficiencia y los costos

totales durante la vida útil del equipo. Así, los compradores se concentran con frecuencia en el bajo costo inicial. No se comprende suficientemente que los motores y accionamientos con mayor eficiencia, aunque son más caros inicialmente, gracias a los costos de operación más bajos, compensan la diferencia en un plazo normalmente apropiado [3].

La eficiencia es la variable fundamental para la toma de decisiones sobre el mantenimiento o reemplazo de los motores eléctricos. Estando los motores eléctricos presentes en la mayoría de procesos, los pronósticos son más efectivos si se consiguen realizar mientras que el motor está en operación.

El mantenimiento de sistemas eléctricos y mecánicos en el área de los procesos industriales continúa siendo un reto de enormes proporciones. Como es poco factible la interrupción del proceso, los mantenimientos se suelen hacer en horarios programados donde previamente se puede cortar la alimentación eléctrica del sistema. Los métodos de monitoreo continuo no intrusivos en campo están surgiendo como los más ideales para maximizar la rentabilidad y el tiempo de funcionamiento, ya que pueden ser realizados durante las horas de mantenimiento, ocasionando un impacto mínimo en el proceso de operación de la planta.

La reducción de los costos operacionales depende de la eficiencia de operación de los motores eléctricos. En consecuencia, hay una necesidad por contar con herramientas para la estimación de la eficiencia que puedan ser usadas de manera sencilla y que ofrezcan un nivel razonable de confianza, para que luego los motores puedan ser evaluados para ser reemplazados por motores de mejor eficiencia usando un análisis de costo-beneficio [4].

El propósito básico de este trabajo, es la presentación didáctica de información actualizada sobre un par de métodos para la determinación en campo de la eficiencia en motores eléctricos de inducción de jaula de ardilla, así como la explicación de todos los aspectos importantes relacionados con la mejora de eficiencia en dichos motores.

Se espera demostrar que se cuenta con herramientas de fácil acceso para la determinación de las eficiencias de los motores eléctricos en campo, y que éstas son de gran utilidad para la toma de decisiones en un estudio energético bajo la lógica de costo-beneficio.

El presente documento es el resultado de un proceso de recopilación y contraste de información de libros, normas, catálogos y, en mayor parte, de fuentes confiables de internet.

Se ha seguido un método de investigación científica, basado en la búsqueda de una solución a un problema.

El Capítulo I se refiere a los conceptos básicos de investigación y nomenclatura que se han seguido para la elaboración de esta tesis, según las exigencias que ésta amerita.

En el Capítulo II se dan datos generales sobre los conceptos básicos de los circuitos magnéticos que rigen el funcionamiento de todos los motores eléctricos. Para su mejor comprensión se hace una comparación con los conceptos de circuitos eléctricos.

El Capítulo III está dedicado a la descripción de cada uno de los elementos principales de los motores eléctricos, en especial de los de inducción de jaula de ardilla. Y se presta especial atención a todos aquellos aspectos constructivos que puedan ayudar a mejorar la eficiencia del funcionamiento en base a la reducción de pérdidas de potencia.

El Capítulo IV contiene el tema principal de este documento: los métodos para la determinación de la eficiencia en campo. Se empieza dando conceptos básicos generales que se utilizarán a lo largo del texto, así como carga, torque y potencia. Luego se hace una mención breve de aquellos métodos normados como la IEEE 112 y la IEC 60034-2-1, ya que son los que siempre serán usados como referentes. Finalmente se hace una mención y breve descripción de casi todos los métodos de estimación de la eficiencia en campo que existen, escogiendo dos de ellos por su balance entre precisión, intrusión y facilidad de aplicación: el Método del Deslizamiento, y el Método de las Eficiencias Ajustadas.

En el Capítulo V se brinda la información complementaria que todo estudio energético debe tener: el análisis económico. Y se dan recomendaciones sobre cuándo se debe considerar el reemplazo del motor en operación por uno nuevo de mejor eficiencia.

El Capítulo VI explica de manera muy detallada la lógica de programación que se ha tenido en cada paso de las aplicaciones computacionales que acompañan a este documento, como una herramienta práctica para agilizar los cálculos hechos en campo. Una aplicación computacional para el Método del Deslizamiento, y una aplicación computacional para el Método de las Eficiencias Ajustadas.

El Capítulo VII es una demostración de la funcionalidad de las aplicaciones computacionales presentadas en el Capítulo VI. Se hacen presentaciones comparativas para poder ver de mejor manera sus beneficios y se hace también contraste entre uno y otro para comparar las precisiones en los resultados.

El Capítulo VIII es una propuesta de experiencia de laboratorio, para que los alumnos puedan experimentar y utilizar todas las herramientas presentadas en este estudio de manera casi igual a como se presentan las condiciones en campo.

El Capítulo IX es un resumen final de todo lo que significó la realización de este documento, mencionando los aportes, las limitaciones y las maneras de cómo este estudio puede ser mejorado en un futuro.

CAPITULO I

PERFIL DE LA TESIS

1.1 Introducción

En este primer capítulo se explican todas aquellas consideraciones importantes, que se han tenido en cuenta en la redacción de esta tesis, como los objetivos, el respaldo normativo, la metodología de investigación y el sistema de redacción.

Aspectos como la metodología de investigación y el correcto uso de la nomenclatura internacional, tanto para las unidades de medición como para la redacción de un párrafo explicativo, son conceptos de mucha importancia a tener en cuenta cuando se elabora un texto didáctico.

También se hace la presentación formal del problema a tratar, y al cual esta tesis busca encontrarle una solución correcta y aplicativa. Al final del capítulo se dan breves alcances de lo que significó el proceso de investigación, como la dificultad para la obtención de cierta información, y lo que esta tesis ofrece en base a lo conseguido.

1.2 Problema

¿Qué método de fácil aplicación permite determinar la eficiencia energética de motores eléctricos con mayor precisión sin sacarlos de operación?

1.3 Antecedentes

Con respecto a los métodos de estimación de la eficiencia de motores eléctricos in-situ, a nivel mundial hay varios desarrollados por distintas entidades y profesionales especializados en el tema. Para este estudio se han seleccionado dos métodos en especial por ofrecer un balance adecuado entre intrusión, precisión, y fácil aplicación; y también por ser de bastante aceptación entre los especialistas: El Método de Deslizamiento, y el Método de las Eficiencias Ajustadas.

Con respecto al Método de Deslizamiento, es un método muy conocido a nivel mundial, y del cual hay mucha información. Lo que se ha conseguido en este documento, es la explicación detallada y didáctica de cada paso del cálculo de este método, mencionando también las modificaciones que ha sufrido, con la intención de mejorar su precisión.

Con respecto al Método de las Eficiencias Ajustadas, es un método que cada vez tiene más aceptación, pero del cual no fue sencillo obtener información.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Principal

Investigar sobre métodos de cálculo que permitan la determinación más precisa de la eficiencia de motores eléctricos sin sacarlos de operación. Esto se logrará analizando los métodos previamente explicados, haciendo uso de sus mejores características y mejorando la precisión en sus cálculos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Buscar y compilar información que se resuma en métodos de cálculo matemático rápidos para la obtención más precisa de la eficiencia de un motor eléctrico en operación, sin moverlo de su lugar de trabajo.
- Elaboración de software en base a un lenguaje de programación, para conseguir mayor rapidez en la obtención del resultado de la eficiencia, según los conceptos matemáticos involucrados en el método a proponer.
- Redactar una propuesta de experiencia de laboratorio para ser incluida en el curso de máquinas eléctricas, donde se indique el procedimiento, los instrumentos y conocimientos a utilizar para la obtención de la medida de la eficiencia de un motor en funcionamiento sin sacarlo de campo.

1.5 Respaldo Normativo y Legal

Este documento ha tenido como referente a las normas nacionales e internacionales relacionadas a la eficiencia de motores eléctricos: Normas como la **IEEE 112** y la **IEC 34-2-1**, entre otras a nivel internacional, y normas como la **NTP 399.450-2008** a nivel nacional.

El espíritu de este documento se respalda en la **Ley de la Promoción del Uso Eficiente de la Energía** y en su respectivo **Reglamento de Ley de la Eficiencia Energética**, así como la **Ley de Concesiones Eléctricas**, todos ellos actualmente rigiendo en todo el territorio nacional. También se han consultado documentos relacionados de alcance nacional como el **Código Nacional de Electricidad**.

1.6 Sistema Internacional de Unidades

En este documento se hace uso de varias unidades de medición, principalmente de carácter eléctrico y magnético. Para lograr una mejor comprensión se ha hecho uso de la nomenclatura establecida en el **Sistema Internacional de Unidades (SI)**. Se ha hecho especial énfasis en el correcto uso de los símbolos de las unidades, y con respecto al nombre de la magnitud física, éstas se presentan como tal cuando son mencionadas por primera vez, y en caso sea necesario, inmediatamente se explicará la abreviación que se utilizará a lo largo del documento para reducir el número de palabras, sin que pierda sentido la idea principal.

Hay casos donde se hace mención de ciertas magnitudes en unidades del sistema inglés, principalmente, ya que mucha de la información procede de Estados Unidos o países que no hacen uso del SI, pero se hará la aclaración debida y sólo sucederá cuando el contexto no permita la conversión a las unidades del SI.

1.7 Metodología de Investigación

Es importante hacer la anotación de que el sistema de investigación para el desarrollo de un tema científico es distinto al sistema de investigación que se utiliza para un tema social. Es algo que muchos no tienen claro y que se suele confundir. Eso quiere decir que una tesis de ingeniería no se debe enfocar de igual manera como se enfoca una tesis del área social.

Desde el inicio del desarrollo de esta tesis se tuvo en cuenta un sistema de investigación enfocado en “el diseño y la acción”, también conocido como “ciencia del diseño”. Los principales requerimientos en la ciencia del diseño son la rigurosidad y la relevancia. El proceso en si se esfuerza porque se cumplan dichos requerimientos.

La lógica de este método de investigación se puede explicar de manera fácil como la búsqueda de la elaboración de una herramienta que ayude a encontrar una solución a un problema planteado. El proceso de investigación se puede dividir en tres etapas principales: “identificación del problema”, “diseño de la solución” y “evaluación”, las cuales pueden interactuar una con otra a lo largo del proceso. Cada una de estas etapas tienen procedimientos internos, como se muestra en la figura 1.1.

1.8 Alcances del estudio

En base a la información recopilada, se hace una explicación completa del proceso de cálculo que aplican tanto el Método del Deslizamiento como el Método de las Eficiencias Ajustadas, para la determinación de las eficiencias de motores en operación.

Como la mayoría de métodos afines, estos dos elegidos hacen uso de algunas aproximaciones, que cumplen sólo para ciertas circunstancias, es por ello que sus resultados finales son considerados estimaciones. Algunas de las fórmulas usadas cumplen sólo para cierto rango de funcionamiento del motor, el rango más común, por eso dichas asunciones se consideran valederas.

Aparte de presentar la metodología de cálculo, se complementa con el desarrollo de una aplicación computacional para agilizar la realización de los cálculos, de acuerdo a las exigencias y tendencias modernas.

También, se incluye una propuesta de guía de laboratorio para que a través de experiencias orientadas, los estudiantes puedan comprender mejor la información explicada en este documento.

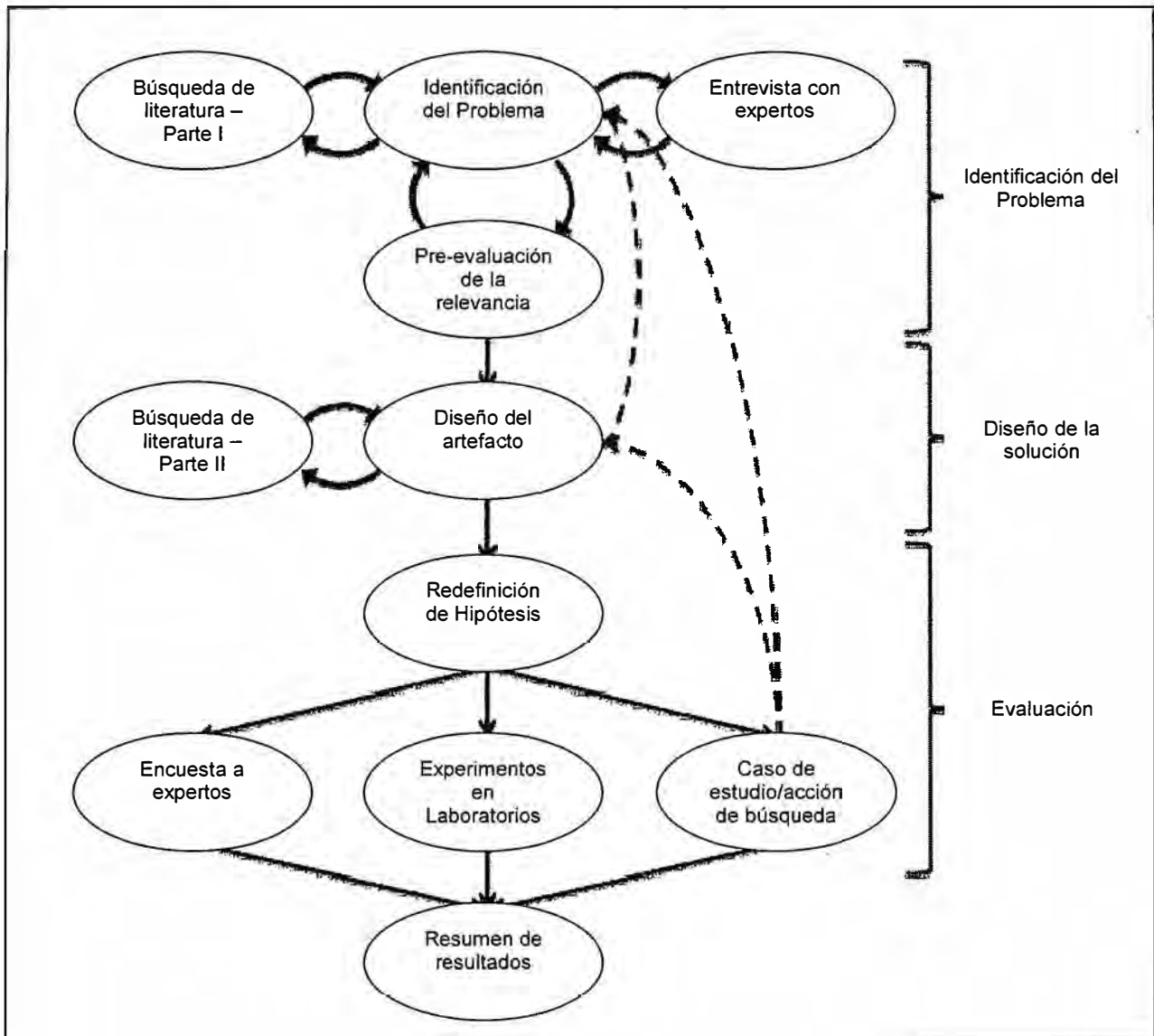


Fig. 1.1 Diagrama del Método de Investigación Utilizado [5].

Es importante mencionar que este estudio no busca comprobar el nivel de precisión de los métodos elegidos, por lo que se confía en la precisión que otros han comprobado en estudios comparativos con procedimientos de laboratorio, y también por los buenos resultados que han ofrecido en los tantos proyectos en los que han sido usados.

Ambos métodos fueron probados con datos de campo verdaderos, como parte de un estudio energético más amplio. Esto se muestra en el Capítulo VII.

CAPITULO II

CIRCUITOS MAGNÉTICOS

2.1 Introducción

El estudio de las máquinas eléctricas, electroimanes y otros dispositivos electromagnéticos se facilita al saber que su funcionamiento tiene mucho parecido al de un circuito eléctrico común. Por lo tanto es muy importante la comprensión de las propiedades de Kirchoff, estudiadas para circuitos eléctricos, pero aplicadas a los circuitos magnéticos.

Mientras que en los circuitos eléctricos se conduce corriente eléctrica de un elemento pasivo a otro a través de un conductor continuo, en las máquinas eléctricas se busca la canalización y concentración de altas densidades de flujo magnético a través de materiales ferromagnéticos. El material conductor en el caso de los circuitos magnéticos no es completamente continuo, en especial en el caso de las máquinas rotativas, al tener la necesidad de incluir una separación de aire conocida como entrehierro, insertando la primera diferencia a considerar con respecto a los circuitos eléctricos.

Antes de profundizar en el desarrollo de las fórmulas para los circuitos magnéticos, se explicará con detalle el significado de términos como material ferromagnético, flujo magnético y entrehierro, haciendo una comparación con sus similares usados en los circuitos eléctricos, en caso existan.

Un circuito magnético está formado generalmente por una estructura de hierro, sobre la que se arrollan una o más bobinas por las que circulan corrientes, que dan lugar a los flujos que aparecen en el sistema [6].

El carácter senoidal de los flujos que circulan tanto en los circuitos magnéticos (inducción magnética) como en los circuitos eléctricos (densidad de corriente), junto a la similitud de sus materiales conductores para facilitar el paso de estos flujos (permeancia en circuitos magnéticos, y conductividad en circuitos eléctricos), son pruebas suficientes para reforzar la idea de que pueden aplicarse a los circuitos magnéticos todos los teoremas de redes analizados en un curso de teoría de circuitos eléctricos. Teniendo siempre en consideración la característica no lineal de los materiales ferromagnéticos.

En este capítulo se explicarán las partes principales que componen un motor eléctrico. Se hará especial énfasis en el diseño y el material usado para aquellas partes

donde se producen las mayores pérdidas internas y se mencionarán maneras para disminuirlas. Se explicará el funcionamiento básico de toda máquina eléctrica rotativa, para incluir términos importantes que serán de mucho uso a lo largo de este estudio.

2.2 Circuitos eléctricos y magnéticos

Para todo aquel que se va a relacionar con los circuitos magnéticos por primera vez le es complicada la comprensión de todos los nuevos términos que involucran este campo de estudio. Por fortuna, existe un gran parecido con los circuitos eléctricos, cuya comprensión se espera haya sido clara en un curso previo de circuitos eléctricos básicos.

En este apartado se hará una explicación y comparación de aquellos términos propios de los circuitos magnéticos que tienen su similitud en el estudio de los circuitos eléctricos. La comprensión correcta de todos estos términos será de mucha ayuda para poder tener una rápida asimilación del funcionamiento de las máquinas eléctricas.

2.2.1 Parámetros equivalentes entre los circuitos eléctricos y magnéticos

a) Fuerza Magnetomotriz

El funcionamiento de las máquinas eléctricas tiene su base en la capacidad para aprovechar el campo magnético que se genera alrededor de un conductor con corriente eléctrica. Para el caso de los motores eléctricos, se tienen devanados arrollados estratégicamente alrededor de un núcleo ferromagnético.

Dependiendo del número de vueltas que tenga el devanado, la intensidad del campo magnético generado será mayor o menor. Por lo que estos devanados pueden ser comparados con las fuentes de energía conocidos en los circuitos eléctricos, sólo que estos devanados generarán un flujo magnético.

La **Fuerza Magnetomotriz F (f.m.m.)**, que se mide en Amperivoltas (A.v), es la causa de que se establezca un campo magnético en un circuito magnético, de un modo análogo al que la fuerza electromotriz (f.e.m.) es la causa de que se establezca una corriente eléctrica en un circuito eléctrico [6].

$$F = NI \quad (2.1)$$

Como se puede apreciar en la fórmula (2.1), el valor de la f.m.m. depende del número de vueltas N que tenga el devanado y de la corriente eléctrica I que por éste circule. Ésta vendría a ser la representación más clara sobre la conversión de energía eléctrica a magnética, al vincular en una fórmula parámetros de ambos tipos de circuitos.

b) Inducción Magnética

La **Inducción Magnética B**, que se mide en Teslas [T], es análoga a la densidad de corriente J en los circuitos eléctricos. Por lo que la Inducción Magnética tiene mucha

relación con el área transversal del canal magnético que atraviesa, como también con la reluctancia magnética R del material, que tiene su análogo en la resistencia eléctrica R de un circuito eléctrico.

También se puede comprender como su denominación literal lo describe, ya que es un campo producido por la inducción magnética que ocasiona una corriente eléctrica alrededor de un conductor eléctrico al pasar por éste.

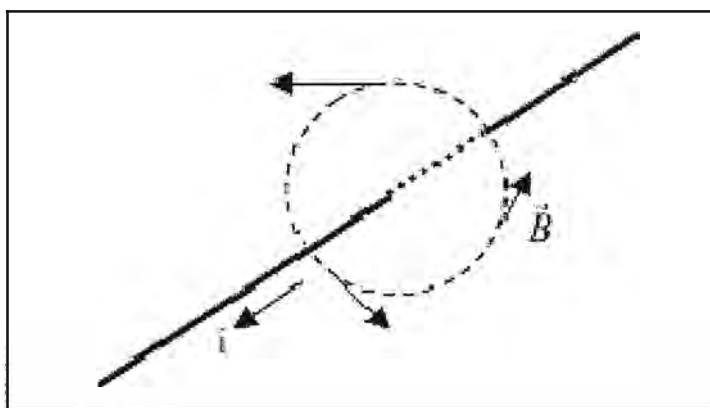


Fig. 2.1 Inducción Magnética [7].

c) Campo Magnético

El **Campo Magnético H** , que se mide en Amperivuelta/metro [A.v/m], tiene su análogo eléctrico en el Campo Eléctrico E [V/m]. Si el material a lo largo del trayecto elegido por el Campo Magnético es homogéneo e isótropo, se puede asegurar que la magnitud de H es la misma en todo ese recorrido.

Así como la Densidad de Corriente Eléctrica se relaciona con el Campo Eléctrico a través de la conductividad σ del conductor, el Campo Magnético se relaciona con la Inducción Magnética a través de la permeabilidad μ del material magnético.

$$B = \mu H \quad (2.2)$$

Ya que el Campo Magnético H se encuentra presente en todo el trayecto del circuito magnético, se le puede comparar con la caída de tensión que sucede en cada punto de un circuito eléctrico. De esa manera, el producto del Campo Magnético H con la distancia del trayecto del circuito magnético equivale a la fuente de generación magnética, o Fuerza Magnetomotriz. Donde L es la distancia del recorrido del circuito magnético.

$$HL = F = NI \quad (2.3)$$

d) Potencial Magnético

El **Potencial Magnético U** [A.v] es análogo al potencial escalar eléctrico V . Por lo tanto es distinto en cada punto del circuito magnético, y tiene su relación con el Campo Magnético H de la siguiente manera:

$$U_{12} = U_1 - U_2 = \int_1^2 H \cdot dl \quad (2.4)$$

e) Flujo Magnético

El **Flujo Magnético** ϕ , que se mide en Webers [Wb], es el parámetro más sencillo de comprender porque su similitud eléctrica es la Intensidad de corriente eléctrica I , cuya unidad son los Amperios [A].

Es un parámetro que depende de la Inducción Magnética B y del área transversal del circuito magnético que recorre, así como la Intensidad de corriente eléctrica I es el resultado del producto de la Densidad de Corriente Eléctrica con el área del conductor por el cual circula.

$$\phi = \int_S B \cdot dS \quad (2.5)$$

Donde S representa al vector del área transversal del circuito magnético. En la práctica, la Inducción Magnética B es prácticamente constante en la sección transversal de los núcleos ferromagnéticos y además tiene la misma dirección que la superficie, por lo que para facilitar los cálculos la fórmula (2.5) se representa de la siguiente manera:

$$\phi = BS \text{ [Wb]} \quad (2.6)$$

f) Resumen de parámetros equivalentes

Para asegurar la concepción de las analogías anteriormente descritas, se facilitan esquemas de un circuito eléctrico y de un circuito magnético, donde se incluyen cada uno de los parámetros mencionados.

En la Tabla N° 2.1 se han ordenado los parámetros magnéticos junto a sus análogos eléctricos, con la intención que sea una herramienta de fácil uso y recurrencia.

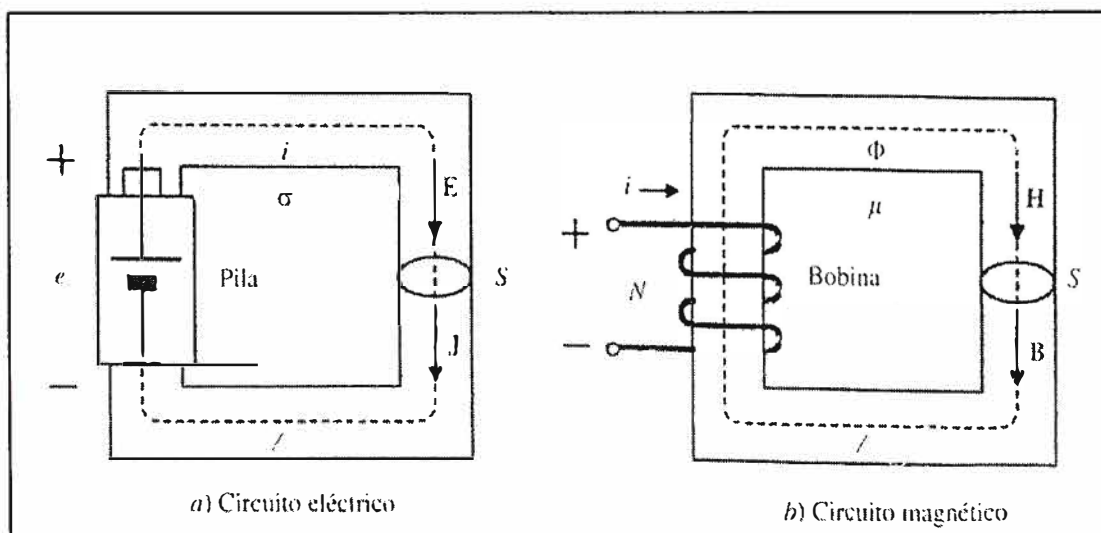


Fig. 2.2 Analogía circuito eléctrico-circuito magnético [6].

Tabla N° 2.1 Parámetros equivalentes entre los circuitos eléctricos y magnéticos [6].

Circuito eléctrico	Circuito magnético
e: f.e.m. [V]	F: f.m.m. [A.v]
J: Densidad de Corriente [A/m]	B: Inducción [T]
σ : Conductividad [S/m]	μ : Permeabilidad [H/m]
E: Campo Eléctrico [V/m]	H: Campo Magnético [A.v/m]
I: Corriente Eléctrica [A]	\emptyset : Flujo Magnético [Wb]
V: Potencial Eléctrico [V]	U: Potencial Magnético [A.v]

CAPITULO III

MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

3.1 Introducción

La información que se detalló en el Capítulo II es básica para la comprensión de los siguientes capítulos. Los circuitos magnéticos, y todas sus características mencionadas, son propias de todas las máquinas eléctricas.

Al existir varios tipos de máquinas eléctricas, éstas se pueden clasificar en tres tipos fundamentales:

- Transformadores
- Generadores
- Motores

Para el caso de este estudio, nos enfocaremos únicamente en el grupo de los Motores Eléctricos, y de manera específica en los Motores de Inducción de Jaula de Ardilla, pertenecientes al grupo de los Motores Asíncronos

Este capítulo empieza con la explicación del principio de funcionamiento de toda máquina eléctrica rotativa, mencionando aquellos parámetros magnéticos que se explicaron en el Capítulo II y también mencionando los elementos principales que conforman un motor eléctrico.

Seguidamente se explica, de manera detallada, los elementos básicos de todo motor eléctrico, haciendo descripción de los materiales usados para su construcción, y haciendo especial énfasis en la pérdida de energía que puede ocurrir en cada uno de estos elementos y mencionando maneras para que dichas pérdidas de energía disminuyan.

Finalmente se hace una explicación fácil de varios parámetros relacionados especialmente a las máquinas eléctricas asíncronas. Dichos parámetros son muy importantes ya que se mencionarán a lo largo de todo el estudio. Son parámetros con un nivel de medición no muy complejo, y entre los cuales se encuentra el objetivo principal de este estudio: la eficiencia.

3.2 Principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas rotativas

Las máquinas eléctricas rotativas son, por excelencia, las mejores máquinas para realizar la conversión de energía eléctrica a mecánica o viceversa. Esto quiere decir que este tipo de máquinas también cumplen con el principio de reciprocidad electromagnética,

cuando reciben energía mecánica y entregan energía eléctrica se llaman **generadores**, y cuando reciben energía eléctrica y entregan mecánica se les conoce como **motores**.

Como se mencionó anteriormente, este estudio y todas sus conclusiones han sido hechos sobre los Motores de Inducción de Jaula de Ardilla. El motivo de esta decisión es debido a la gran presencia de este tipo de motores en el mercado nacional e internacional. Gracias a su robustez y mayor eficiencia este tipo de motores se emplea en casi todo tipo de aplicaciones (a veces con la ayuda de dispositivos electrónicos), por lo que se les considera grandes consumidores de energía eléctrica. Basta con ver las estadísticas de los últimos años que indican que en el Perú, casi el 60% de la energía producida es consumida por el sector industrial, quienes disponen del 70 % de su energía para el funcionamiento de motores eléctricos [2]. Así, cuando se mencione sencillamente motor eléctrico, deberá entenderse como motor eléctrico de inducción de jaula de ardilla.

El sistema de funcionamiento de todo motor eléctrico tiene dos partes importantes claramente diferenciadas: el **estator** y el **rotor**. Estos dos elementos tienen forma cilíndrica y están separados por un espacio de aire conocido como **entrehierro**. El entrehierro es fundamental en toda máquina rotativa, para justamente permitir el libre giro de una de sus partes.

Como sus nombres lo indican, el estator es el elemento que se mantiene estable, y el rotor es el elemento que rota y permite la entrega del movimiento mecánico. Ambos elementos se encuentran envueltos por sistemas conductores independientes, por donde circulará corriente eléctrica. Dichos sistemas conductores se conocen como **devanados** o arrollamientos. El estator y el rotor se conocen en conjunto como el **núcleo**, que viene a ser la parte magnética, y los devanados vienen a ser la parte eléctrica del motor.

La energía eléctrica ingresa al motor por unos conductores que luego se arrollan al estator, esta configuración permite que al circular corriente eléctrica se genere una fuerza magnetomotriz. Dicha f.m.m. dará lugar a la aparición de un campo magnético, según la Ley de Biot y Savarat que dice que alrededor de todo segmento conductor por el que circula corriente eléctrica se crea un campo de inducción. Dicho campo provocará la circulación de un flujo magnético que, canalizado por el material magnético, irá desde el estator hasta el rotor atravesando el entrehierro. Al arrollamiento del estator que permite la inducción de este flujo se le conoce como **devanado inductor**.

El flujo que ahora circula, al llegar al rotor interactúa con el sistema eléctrico distribuido en su superficie exterior. Este arrollamiento recibirá el nombre de **devanado inducido**, ya que según el teorema de Faraday, el flujo proveniente del estator permitirá la aparición de una Fuerza Electromotriz inducida, y al ser estos circuitos cerrados, habrá una corriente inducida circulando por estos arrollamientos.

$$e(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (3.1)$$

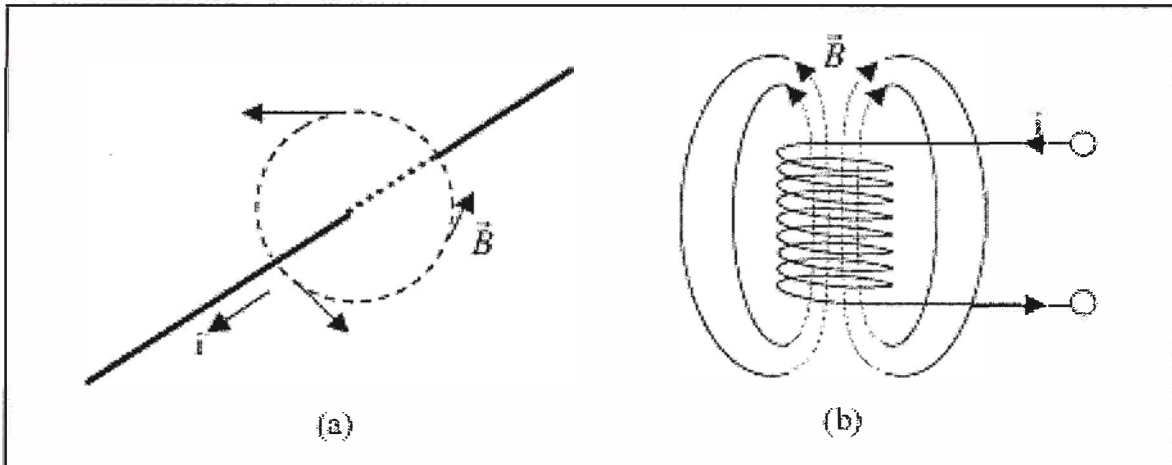


Fig. 3.1 Campos magnéticos creados por corriente eléctrica [7].

La fórmula (3.1) explica el Teorema de Faraday, donde e es la fuerza electromotriz inducida, ϕ es el flujo proveniente del estator, y que en el Capítulo II se explicó que dependía del campo de inducción y del área que atravesaba. En la figura 3.2 se puede apreciar el efecto del Teorema de Faraday para el caso de un rotor, donde ya se sabe que el campo es de carácter senoidal variable en el tiempo, y donde el área que atraviesa (que es cada una formada por las espiras del devanado del rotor) también varía en el tiempo debido al movimiento giratorio que posee.

El movimiento giratorio del rotor se produce según la Ley de Laplace, ya que al haber una corriente eléctrica circulando en un conductor que se encuentra dentro de un campo magnético, aparecerá sobre éste una fuerza que provocará el giro del rotor siguiendo el sentido del campo giratorio del estator.

$$F = i(L \times B) \quad (3.2)$$

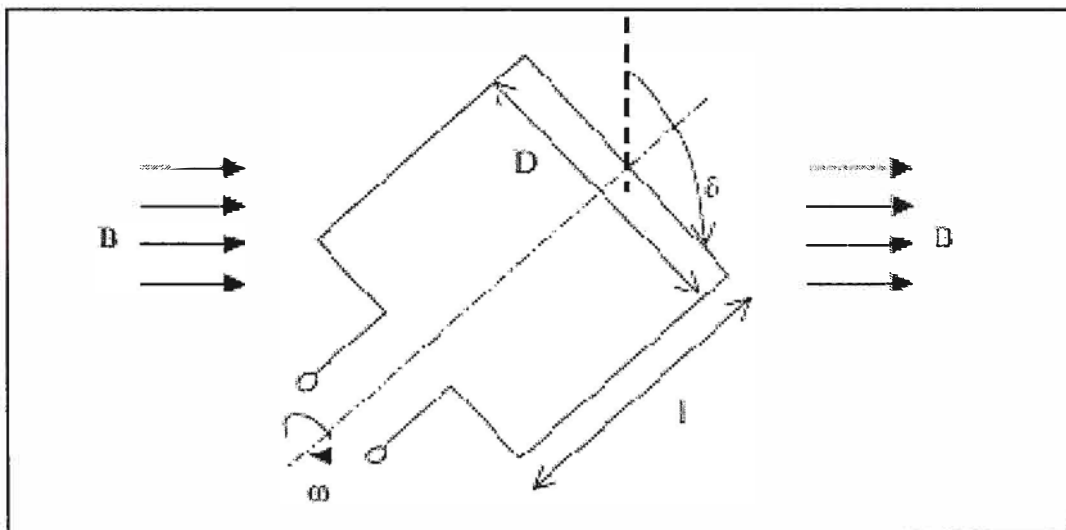


Fig. 3.2 F.e.m. inducida en una espira [7].

La corriente eléctrica en el devanado inductor tiene una frecuencia específica que determina la velocidad del campo giratorio conocida como **velocidad de sincronismo**. La velocidad con la que gira el rotor siempre será menor a la velocidad de sincronismo, esta es otra característica principal de los motores asíncronos. La velocidad es un parámetro de singular importancia para el desarrollo de métodos para la determinación de la eficiencia de motores eléctricos en operación.

3.3 Elementos básicos de las máquinas eléctricas rotativas

Los motores eléctricos están compuestos por elementos claramente diferenciados. En este apartado se hace una descripción independiente de cada uno de los elementos principales que componen un motor eléctrico. Se presta especial atención a los materiales y la forma en la que están contruidos para resaltar el hecho que tomando especial cuidado en estos aspectos también se puede conseguir disminución en las pérdidas y mejora en la eficiencia de los motores eléctricos.

Como elementos principales tenemos al núcleo, a los devanados, a la carcasa, los colectores y los rodamientos. Cada uno de estos elementos posee características distintas y especiales para que cumplan con su trabajo con la más alta eficiencia posible.

3.3.1 Núcleo

El **núcleo** es el componente magnético de toda máquina eléctrica. En los motores eléctricos, el núcleo está dividido en dos partes conocidas como el estator y el rotor, yendo el segundo dentro del primero con una separación de aire conocido como entrehierro. La función principal del núcleo es la de canalizar las grandes concentraciones de flujo que se generan en los devanados, ya que el único acoplamiento entre el estator y el rotor es de índole magnético. Por ello, hoy en día los núcleos se diseñan y construyen de placas de material ferromagnético, debido a sus mayores beneficios magnéticos en comparación con los otros materiales magnéticos conocidos.

De los materiales con mayor reconocimiento industrial para este tipo de usos, las **chapas magnéticas** de acero al silicio son las que tienen mayor aceptación por encima del hierro fundido o el acero fundido. Está demostrado que las chapas magnéticas permiten inducciones más elevadas ante un mismo valor de excitación magnética H .

El uso de chapas magnéticas, sobre todo en motores de gran potencia, se impone al uso de bloques compactos, ya que con las chapas magnéticas se reducen las pérdidas por Foucault, proceso que se explicará en secciones más adelante.

Para la colocación de los conductores de los devanados, en el caso casi exclusivo de los motores de inducción de jaula de ardilla, hay unas ranuras en la superficie interior del estator y en la superficie exterior del rotor, que son cerradas. Existen ranuras de tipo abierto o semi-cerradas que se usan para otros tipos de motores eléctricos.

Para el caso de los motores asíncronos, el diseño del estator y del rotor es liso, eso quiere decir que no existe ningún polo saliente en ninguno de los dos elementos. Para una mejor comprensión sobre el rol de los polos salientes, refiérase a cualquier texto especializado en el diseño de máquinas eléctricas.

El rotor lleva acoplado a su centro el eje externo del motor, a través del cual se soporta sobre unos rodamientos para mantener la distancia de diseño del entrehierro. A pesar de poseer características magnéticas distintas por tratarse de un espacio de aire, el entrehierro también se puede incluir dentro del estudio del núcleo.

a) Materiales Magnéticos

Los materiales magnéticos se diferencian por el valor de la **susceptibilidad magnética** que posean, y dependiendo de este valor tendrán comportamientos distintos ante la presencia de campos magnéticos externos.

La **susceptibilidad magnética** x_m , es un coeficiente adimensional que expresa la proporcionalidad entre la magnetización o imanación M y la intensidad del campo magnético H . Tiene relación directa con la **permeabilidad relativa** μ_r , que finalmente es la que ayuda a definir los distintos tipos de materiales magnéticos.

La relación entre la M , H y x_m se expresa con la siguiente fórmula:

$$M = x_m H \text{ [A/m]} \quad (3.3)$$

Sabiendo que la inducción magnética B tiene relación con los campos M y H , y que se representa a través de la siguiente fórmula:

$$B = \mu_0(H + M) \text{ [T]} \quad (3.4)$$

Luego, insertando la fórmula (3.3) en la fórmula (3.4), se obtiene:

$$B = \mu_0(H + x_m H) = \mu_0(1 + x_m)H \quad (3.5)$$

Siendo μ_0 la permeabilidad del vacío cuyo valor en unidades SI es $4\pi 10^{-7}$ H/m, y definiendo la permeabilidad relativa como $\mu_r = 1 + x_m$, la fórmula (3.5) se expresaría así:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (3.6)$$

Donde μ representa la **permeabilidad magnética del medio** ($\mu = \mu_0 \mu_r$). Entonces las clases de materiales magnéticos se determinan tomando como referencia el valor de su permeabilidad relativa μ_r :

- Diamagnéticos: si $\mu_r \approx 1$ (x_m es del orden de $- 10^{-5}$)
- Paramagnéticos: si $\mu_r \approx 1$ (x_m es del orden de $+ 10^{-3}$)
- Ferromagnéticos: si $\mu_r \gg 1$ (x_m tiene un valor elevado) [6].

Cada material tiene un comportamiento distinto ante la presencia de un campo magnético externo. Como se puede observar de las ecuaciones anteriores, el valor de su susceptibilidad magnética x_m indica la capacidad de imanación del material. Al interactuar con un Campo Externo de Inducción B , aparecerá una fuerza sobre los electrones orbitales, que cambiará el momento magnético total del átomo dependiendo de la intensidad de la fuerza y de su capacidad de imanación.

Según la fórmula de Lorentz, la fuerza F_m provocada por un Campo Exterior de Inducción B sobre un electrón de carga q será:

$$F_m = q(v \times B) \quad (3.7)$$

Donde v es la velocidad del electrón que variará de alguna manera debido a la fuerza aplicada sobre ellos. Dicha fuerza consigue variar la velocidad angular de los electrones, modificando también el valor de la corriente electrónica equivalente, y obteniendo finalmente un momento magnético neto.

Lo que se consigue es una imanación inducida, que de acuerdo con la Ley de Faraday-Lenz representa un momento magnético inducido que se opone al campo aplicado, reduciendo de este modo el valor de la inducción. El nivel de oposición de cada material será distinto, y dependerá sobre todo de su susceptibilidad magnética x_m .

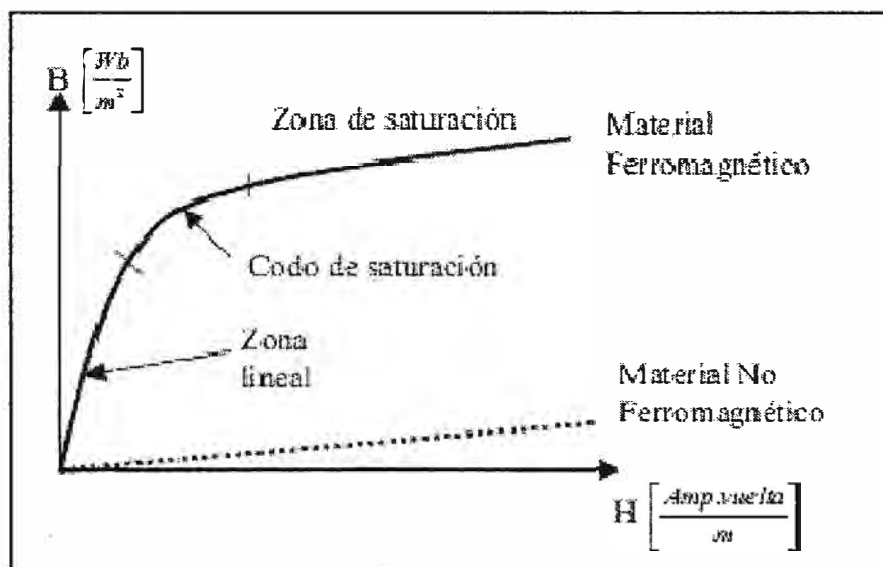


Fig. 3.3 Característica B-H [7].

- **Diamagnetismo**

En un material diamagnético, el momento magnético neto es cero en ausencia de campo magnético externo. La susceptibilidad magnética x_m de los materiales diamagnéticos es altamente negativa, del valor de -10^{-5} , lo que significa que se opone fuertemente a cualquier cambio que quiera provocar un campo magnético externo sobre

sus átomos. De manera macroscópica se puede entender como que los materiales diamagnéticos sufren de una imanación negativa.

Algunos materiales que tienen esta característica son el bismuto, el plomo, el cobre, la plata y el oro. Una característica más de los materiales diamagnéticos, es que el momento magnético que se generó ante la presencia de un campo magnético externo, desaparecerá una vez que se haya acabado la influencia de dicho campo. El material diamagnético volverá a su condición inicial, con momento magnético cero, lo que significa que no posee magnetismo remanente. También cabe aclarar que su valor de susceptibilidad magnética χ_m es independiente de la temperatura.

El diamagnetismo es un efecto que se encuentra presente en todos los materiales, pero en distintas intensidades, siendo débil en la mayoría de los casos, dando lugar a la denominación de los materiales **paramagnéticos** y **ferromagnéticos**, donde la oposición que ofrece el cambio del movimiento orbital de sus átomos se ve opacado por otros fenómenos más fuertes.

- **Paramagnetismo**

La primera característica de los materiales paramagnéticos es que en condiciones normales, sin presencia de un campo magnético, ya poseen un momento magnético neto, a diferencia de los materiales diamagnéticos cuyo momento magnético neto era cero en dichas condiciones.

Ante la presencia de un campo magnético externo, los materiales paramagnéticos se caracterizan también por tener un efecto diamagnético débil. El valor positivo de su susceptibilidad magnética χ_m , por el valor de 10^{-3} , permite que ocurra una imanación positiva, ya que el campo magnético externo consigue alinear a su favor los momentos moleculares del material, consiguiendo así un aumento de la inducción.

Algunos materiales paramagnéticos son el aluminio, magnesio, titanio y el wolframio. A diferencia de los materiales diamagnéticos, el efecto paramagnético si depende de la temperatura.

- **Ferromagnetismo**

En condiciones normales, sin presencia de ningún campo magnético externo, los materiales **ferromagnéticos** se encuentran en un estado magnéticamente nulo, o sea su momento magnético total es cero.

Los materiales ferromagnéticos presentan valores de susceptibilidad magnética χ_m elevados en comparación con las otras clases de materiales magnéticos descritos previamente, por lo que son los materiales magnéticos de preferencia para aplicaciones tecnológicas. Esa característica significa que aún ante campos magnéticos muy débiles se consigue una imanación positiva grande en el material.

Esta característica magnética favorable se debe sobre todo al ordenamiento que van sufriendo sus átomos conforme aumenta la intensidad del campo externo, tendiendo siempre y con facilidad a alinearse con este último.

Para la aplicación de las máquinas eléctricas, los núcleos (estator y rotor) se arman con estos materiales, y siempre se encuentran arrollados por algún material conductor eléctrico para poder hacer la conversión de la energía. Cuando ya los motores eléctricos se encuentran en funcionamiento, entre arranques y paradas ocurre también una presencia y ausencia de campo externo sobre el núcleo de material ferromagnético. Este constante cambio nos permite resaltar una característica más de este tipo de materiales magnéticos: la **magnetización remanente**.

La magnetización remanente se comprende mejor cuando después de haber estado expuesto ante un campo magnético externo, el material ferromagnético queda con un momento magnético neto. Esta característica se puede entender mejor analizando el desarrollo del **ciclo de histéresis** de un material ferromagnético.

Sólo tres elementos tienen las característica ferromagnéticas a temperatura ambiente y por encima de ella, y son el hierro, el cobalto y el níquel. Cabe mencionar que el ferromagnetismo es una propiedad que depende de la temperatura. Para cada material ferromagnético existe una temperatura máxima, sobre la cual el material pasa a condiciones paramagnéticas ya que el movimiento térmico se torna suficientemente grande y vence las fuerzas de alineación magnética.

3.3.2 Devanados

Los devanados son la parte eléctrica de todo motor eléctrico, y está compuesto por los conductores eléctricos que se arrollan tanto en el estator como en el rotor. El arrollamiento del estator recibe el nombre de **devanado inductor** porque es en éste donde, a partir de una corriente externa, se genera un flujo magnético. El arrollamiento del rotor recibe el nombre de **devanado inducido** porque es en éste en donde se induce una corriente eléctrica al entrar en contacto con el flujo proveniente del estator.

Es debido a la presencia de los devanados que se consigue el movimiento giratorio del rotor al aparecer una fuerza en éste debido a la interacción de la corriente inducida y del campo magnético (Ver apartado 2.2). En el caso de los motores asíncronos de inducción de jaula de ardilla, al ser de polos lisos, el devanado del estator se arrolla en toda la superficie interior de éste, mientras que el devanado del rotor se arrolla sobre la superficie exterior del mismo.

a) Materiales Conductores

El material por excelencia para ser usado en los devanados de los motores eléctricos es el cobre, ya que ofrece un conjunto de cualidades como su ductilidad, buena

conducción y fácil maniobrabilidad, que garantiza buenas condiciones eléctricas y mecánicas.

El aluminio es, por el momento, el material conductor que le sigue al cobre en la lista de cualidades. A pesar de tener una resistividad un poco mayor a la del cobre, ésta no es lo suficientemente alta como para afectar de manera notoria el paso de la corriente. Además, debido a su mayor resistividad, necesita ser de segmento mayor a lo que necesitaría el cobre para una corriente dada, consiguiendo así menores pérdidas por efecto corona, y sin siquiera llegar a pesar más de la mitad de lo que pesa el cobre. El aluminio se usa de manera exclusiva para la construcción de los devanados del rotor de los motores asíncronos de inducción de jaula de ardilla.

Tabla N° 3.1 Resistividad de Materiales más usados

Metal	Símbolo	Resistividad ($\times 10^{-8} \Omega \cdot m$)
Plata	Ag	1,629
Cobre	Cu	1,724
Oro	Au	2,440
Aluminio	Al	2,828

b) Configuraciones

En el estator, para el caso más común, realmente existen tres devanados, distribuidos con una separación de 120° eléctricos en el espacio, y que cada uno recibe corrientes con un desfasaje de 120° en el tiempo. De esa manera se logra cubrir la superficie interior del estator cilíndrico con arrollamientos que generarán un campo giratorio resultante constante y de forma senoidal. La distribución de este devanado define el número de polos del motor, y consecuentemente la velocidad del campo magnético y de giro del rotor.

Para información detallada sobre procesos de bobinado de motores, por favor referirse a un documento especializado. Más adelante, en este mismo texto, se explicará con más detalle la relación entre el número de polos y la velocidad del campo magnético giratorio, y su diferencia con la velocidad de giro del motor.

En el rotor, exclusivamente para el caso del motor de jaula de ardilla, el devanado inducido está compuesto por una serie de conductores de cobre o aluminio colocados a lo largo de su superficie cilíndrica, y dichos conductores están cortocircuitados en ambos extremos por unos anillos conductores. La forma geométrica que genera el devanado (sin el núcleo) se asemeja mucho al de una jaula de ardilla, de allí viene la denominación que recibe.

3.3.3 Elementos Mecánicos

Los motores eléctricos necesitan no sólo de sus sistemas eléctrico y magnético para funcionar adecuadamente. Necesitan de elementos que hagan las funciones netamente mecánicas, que son igual de importantes y necesarias. Entre los elementos mecánicos más importantes podemos mencionar a la carcasa, el eje y los rodamientos.

No es objetivo de este estudio profundizar en detalles funcionales ni constructivos de estos elementos, pero se mencionan aquellos que tienen injerencia en la transmisión de energía, al haber posibilidades de pérdidas en ellos también.

a) Carcasa

La carcasa es el elemento que protege a todos los demás elementos del motor eléctrico. Es la coraza que también impide a entes externos (seres humanos y animales) entrar en contacto con las partes de alto riesgo del motor eléctrico (sistema eléctrico y sistema rotatorio).

Existen distintos tipos de carcasas dependiendo de la función del motor y del ambiente en el que trabaja. Hay los que tienen ventilación natural o ventilación forzada, y dentro de los de ventilación natural hay variaciones del tamaño y forma de los espacio de ventilación dependiendo de los riesgos que presente el ambiente de trabajo, ya sea humedad, ya sean pequeños animales, ya sea mucha suciedad, etc. La forma de la carcasa también se diseña para poder disipar el calor y para permitir el paso de la ventilación.

La carcasa se ubica en la parte exterior del estator, teniendo una forma cilíndrica ovoide, conformado usualmente por partes, dependiendo de su facilidad de instalación. Es el elemento que contiene los soportes principales de todo el motor, ya sea que tenga una instalación horizontal o vertical.

b) Eje y rodamientos

El eje es aquel elemento que permite la entrega de la energía mecánica rotativa hacia la carga, ya que va acoplado directamente al rotor quien le transmite su movimiento de giro, es por ello que sobresale de la carcasa.

Los rodamientos funcionan como soporte del eje y a la vez para permitirle un giro casi libre. Su ubicación es al centro de las tapas laterales de la carcasa, ubicado de tal manera que el eje mantenga su linealidad.

3.4 Pérdidas de Energía en Motores Eléctricos

Los motores eléctricos no consiguen entregar como energía mecánica la misma cantidad de energía eléctrica que solicitan en sus terminales de ingreso. Hay parte de esa energía eléctrica que se pierde durante el proceso de transformación de energía en forma de calor y en los distintos elementos del motor.

3.4.1 Tipos de Pérdidas de Energía

Por su naturaleza, estas pérdidas se pueden clasificar de la siguiente manera: pérdidas en el hierro (histéresis), pérdidas por efecto Joule o en el cobre (en el estator y en el rotor), pérdidas mecánicas (fricción y ventilación) y las pérdidas por dispersión de carga.

La forma en que se distribuyen relativamente estas pérdidas depende del tipo y tamaño del motor. En la Tabla N° 3.2, se muestra como se distribuyen las pérdidas en motores de diseño NEMA B de distinta potencia nominal.

Tabla N° 3.2 Porcentaje según el tipo de pérdidas en motores de distintos tamaños [8].

Tipo de Pérdidas [%]	Potencia [HP]				
	5	25	50	100	200
En el cobre del estator	40	42	38	28	30
En el cobre del rotor	20	21	22	18	16
En el hierro	29	15	20	13	15
Mecánicas	4	7	8	14	10
Dispersión de carga	7	15	12	27	29

a) Pérdidas de energía en el hierro

El flujo magnético que circula entre el estator y el rotor, es un tipo de presentación de la energía, ya que al no haber conexión eléctrica entre estos dos elementos, se recurre a una conversión magnética para transmitir la energía entre ambos. Los materiales usados para la construcción del núcleo tienen características ideales para la conducción de dicho flujo permitiendo el paso de casi la totalidad del mismo, pero al no ser elementos conductores perfectos ocurren pérdidas de energía en forma de calor tanto en el estator como en el rotor. A continuación se detallan los dos tipos de pérdidas de energía que ocurren en el núcleo ferromagnético de un motor eléctrico.

- **Pérdidas por histéresis**

Se sabe que el flujo resultante del motor es variable en el tiempo, de forma ondulante, ya que proviene de un campo de inducción senoidal generado por la corriente alterna de ingreso al motor. O sea, así como el valor eficaz de la corriente aumenta y disminuye hasta sus límites cambiando de sentido alternamente, el campo de inducción realiza una función similar dentro del núcleo ferromagnético.

En otras palabras, es como si el núcleo fuese expuesto a un campo magnético creciente hasta cierto punto, y que luego vuelva a un valor cero, para luego ser expuesto a

un campo magnético creciente de manera negativa. En todo ese proceso hay variaciones constantes de las condiciones magnéticas del material, lo que significa que para un núcleo que nunca ha sido usado, después de su primera exposición ante un campo de inducción, sus condiciones magnéticas no serán las mismas a las originales, ya que presentará un **magnetismo remanente**, principal característica propia de los materiales ferromagnéticos.

El hecho que el material no vuelva a sus condiciones originales, y que exista un magnetismo remanente, significa que hay energía que está siendo consumida por el núcleo y que se disipa en forma de calor.

En la figura 3.4, se muestra el desarrollo de la curva de histéresis típica de todo material ferromagnético, siendo el área sombreada la energía que se pierde en cada medio ciclo eléctrico. Se aprecian los valores máximos y mínimos de la Inducción Magnética B , que tiene relación con los valores límites del Campo de Inducción H . Se aprecia como la curva no vuelve a pasar por el origen de las coordenadas, cruzando el eje del campo en $+B_r$ y $-B_r$, que representan los valores del magnetismo remanente en el núcleo.

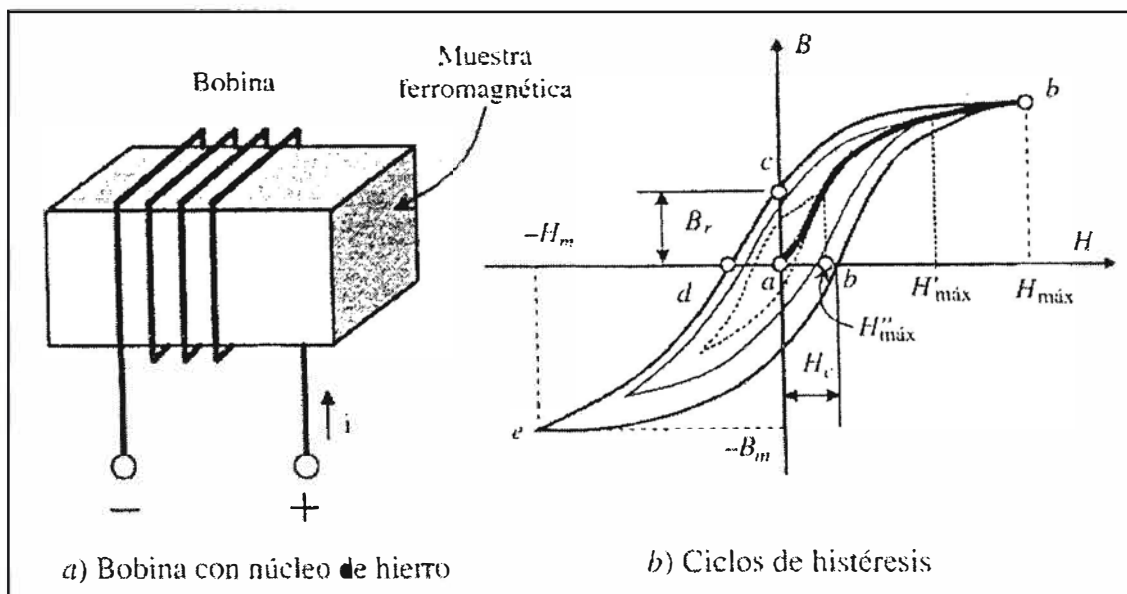


Fig. 3.4 Curva de Histéresis [6].

- **Pérdidas por corrientes de Foucault**

Ya se ha explicado varias veces cómo el proceso de inducción de campo y corriente, en ambos sentidos, es tan importante y se encuentra presente en todo el proceso de conversión de energía de un motor eléctrico. Una corriente eléctrica induce un campo, así como un campo induce una corriente en un conductor. Esto no sólo sucede en los devanados, también ocurre en el núcleo a escalas menores, pero que de todas maneras tienen un efecto considerable.

Los núcleos se hacen de material ferromagnético, que también permiten la conducción de electricidad, pero a menor escala que un conductor de cobre. Esa cualidad de conducción de corriente permite que al tener un flujo circulando a través de su longitud, se induzcan corrientes que circulan de manera perpendicular a éste, conocidas como **corrientes de Eddy**. En la figura 3.5 se aprecia el sentido y plano de circulación tanto del flujo como de la corriente que induce.

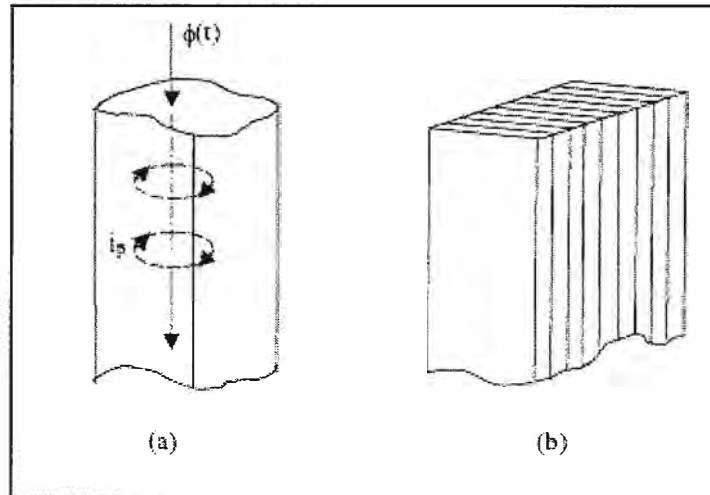


Fig. 3.5 a) Corrientes de Eddy, b) Chapas magnéticas del núcleo

La magnitud de la corriente eléctrica que se genera en el núcleo depende del valor del área transversal que atraviese el flujo. Por lo que de esa manera queda clara la intención de construir los núcleos en base de chapas magnéticas de pequeño espesor, con su plano en paralelo a la dirección del flujo, para de esa manera reducir el área de circulación de las corrientes parásitas inducidas.

b) Pérdidas de energía en el cobre

Estas son las pérdidas de mayor consideración en un motor eléctrico, ya que generalmente significan aproximadamente el 50% del total de pérdidas. A la vez son las más sencillas de comprender, ya que suceden por la característica propia resistiva de los conductores eléctricos. Estas pérdidas en el cobre se manifiestan como emisión de calor por ser producto del efecto Joule, que dice que las pérdidas de energía producidas en un conductor están en relación al cuadrado de la intensidad de corriente que por éste circula, según la fórmula (3.8):

$$P_{cu} = \sum R_j i_j^2 \quad (3.8)$$

Estas pérdidas suceden tanto en el devanado estático como en el rotórico, como se indica en la fórmula con el subíndice j , por lo que el valor de la resistencia R y de la corriente varía dependiendo del devanado que se esté analizando. Las pérdidas totales de este tipo resultan de la suma de las pérdidas ocurridas en el estator y en el rotor.

- **Pérdidas en los conductores del estator**

Están en función de la resistencia del devanado estático y del cuadrado de la intensidad de corriente I . Son mínimas en vacío e incrementan junto con la carga. La corriente de línea promedio I_{prom} se expresa en función del factor de potencia según la fórmula (3.9):

$$I_{prom} = \frac{P_T}{\sqrt{3} \cdot V_{prom} \cdot fdp} \quad (3.9)$$

Donde V_{prom} es la tensión promedio de entrada, P_T la Potencia eléctrica activa total de entrada y fdp el factor de potencia. Haciendo uso de conceptos que se explican más adelante, la intensidad de corriente de línea promedio también se puede expresar en función de la eficiencia (Ver apartado 4.1.4 para comprender la relación entre P_T , la Potencia útil P_U a la salida del eje del rotor expresado en kW, y la eficiencia η), según la fórmula (3.10):

$$I_{prom} = \frac{P_U}{\sqrt{3} \cdot V_{prom} \cdot fdp \cdot \eta_1} \quad (3.10)$$

Se puede concluir, al reemplazar la fórmula (3.10) en la fórmula (3.8) que las pérdidas en el devanado del estator serán inversamente proporcionales al cuadrado de la eficiencia y del factor de potencia fdp.

- **Pérdidas en los conductores del rotor.**

Están en función de la resistencia del devanado rotórico, del cuadrado de la corriente que circula por dicho devanado y depende del flujo magnético que atraviesa el entrehierro. Son prácticamente cero en vacío y se incrementan de acuerdo al cuadrado de su corriente y también de acuerdo su temperatura.

c) Pérdidas Mecánicas

Las pérdidas de energía en los elementos mecánicos de un motor eléctrico se pueden clasificar principalmente como pérdidas por fricción y por ventilación.

Las pérdidas por fricción son las que ocurren en los rodamientos así como entre las masas giratorias y el aire en todo momento que el rotor esté girando. Estas pérdidas son directamente proporcionales a la velocidad de giro del rotor, y también dependen del estado de mantenimiento que tengan los rodamientos.

Las pérdidas por ventilación tienen relación directa con el tipo de ventilación que tenga el motor, ya sea forzada o natural. En caso el sistema de ventilación no haya sido bien diseñado o esté fallando, estas pérdidas aumentarán. Estas pérdidas son proporcionales con la tercera potencia de la velocidad de giro del rotor.

$$P_m = An + Bn^3 \quad (3.11)$$

d) Pérdidas por dispersión de carga

Las pérdidas por dispersión de carga son el resultado de una fuga de flujos inducidos por corrientes de carga. Son pérdidas residuales difíciles de determinar por medio de mediciones directas o de cálculos. Están en función de muchos factores de diseño y de fabricación del motor, algunos como el diseño del devanado, la inducción en el entrehierro, el tipo de contacto superficial entre las barras, las laminaciones del rotor, etc.

3.4.2 Técnicas para la reducción de pérdidas

La función de un motor es la de convertir energía eléctrica en energía mecánica para realizar un trabajo útil, acción en la cual se pierde energía en forma de calor. La manera más evidente para mejorar la eficiencia de un motor es reduciendo sus pérdidas. Una mejora de la eficiencia igual a 2 puntos porcentuales, de 92% a 94%, significa una reducción del 25% en pérdidas. Como las pérdidas en motores se manifiestan como calor expulsado al medio ambiente, la reducción de pérdidas puede reducir de manera significativa la potencia destinada a la ventilación en el sistema de aire acondicionado de una instalación industrial.

La mayoría de técnicas para la reducción de pérdidas son detalles constructivos, cuyas demostraciones matemáticas no se profundizan aquí, pero que al tener estrecha relación con el objetivo de este estudio, se mencionan para tener un mejor entendimiento de las conclusiones finales. El diseño final de un motor es un balance entre todos los tipos de pérdidas, con el objetivo de obtener una eficiencia elevada y aún poder satisfacer otros requerimientos operacionales.

Las pérdidas en motores podrían ser categorizadas como aquellas que son fijas, ocurriendo cada vez que el motor es energizado, y permaneciendo constantes para una tensión y velocidad dados; y aquellos que son variables y que se incrementan junto con la carga del motor. Estas pérdidas son descritas de la siguiente manera:

a) Cargas Fijas

- Las pérdidas en el núcleo representan aquella energía requerida para superar la oposición a los campos magnéticos cambiantes dentro del material del núcleo (histéresis) e incluye pérdidas debido a la creación de las corrientes de Eddy (Foucault) que fluyen en el núcleo.

Para reducir las pérdidas por histéresis se puede alargar el núcleo y de esa manera conseguir la reducción de las densidades de flujo magnético. También, como se explicó en el apartado 3.3.1a), se debe tomar en cuenta la correcta selección del material magnético usado para su construcción, alguno con permeabilidad electromagnética mejorada. Los estudios demuestran que la chapa magnética de acero con

concentraciones de silicio en la proporción de 3% a 3.5% aproximadamente, permite que la curva de histéresis del material sea más estrecha en el eje del campo magnético. Aparte ese porcentaje de concentración es ideal también para que la chapa magnética no pierda su consistencia, ya que el acero al ser mezclado con silicio pierde solidez y se vuelve débil y quebradizo en concentraciones mayores a las indicadas.

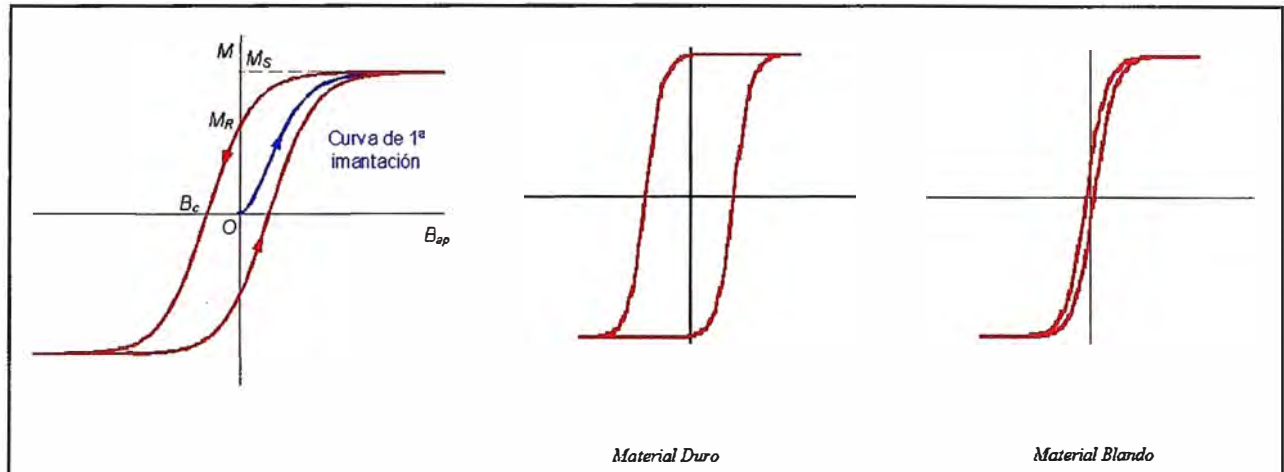


Fig. 3.6 Diferencia en el área de la Curva de Histéresis entre materiales [9].

El acero con las concentraciones de silicio anteriormente recomendadas, también ofrece mayor resistividad ante el paso de la corriente eléctrica, permitiendo la reducción de las pérdidas por Foucault. Dicha reducción se asegura más al usar chapas magnéticas, o sea láminas del material magnético en lugar de un bloque compacto. Como ya se indicó, al seccionar el núcleo en láminas (espesores comprendidos entre 0.3 y 0.5 mm), se angosta el área para la circulación de las corrientes parásitas generadas en el núcleo causada por el paso del flujo magnético. Además se debe asegurar un buen sistema de aislación interlaminar, por eso hoy en día las chapas magnéticas se fabrican con un recubrimiento aislante extremadamente delgado (0.001 mm) que se consigue con un tratamiento termoquímico especial, conocido comercialmente como **carlite**.

El entrehierro también sufre cambios de diseño y construcción cuando se busca la reducción de pérdidas de energía. La permeabilidad relativa del aire es hasta 1000 veces menor a la del hierro, lo que le otorga al entrehierro una reluctancia relativamente alta, lo que dificulta en cierto modo el paso del flujo, y eso conlleva a una necesidad de mayor inducción. Por ello se busca siempre reducir el tamaño del entrehierro, para reducir también la fuerza magnetomotriz de inducción.

Entrehierros grandes reducen los costos de fabricación. Entrehierros pequeños mejoran la eficiencia y el factor de potencia. Inclusive, entrehierros realmente pequeños puede seguir mejorando el factor de potencia, pero ya reducirían la eficiencia y presentaría riesgos de problemas de vibración.

- Para reducir las pérdidas por fricción y ventilación se deben seleccionar mejores rodamientos y precintos, se debe hacer fluir el aire requiriendo un diseño especial del ventilador en caso sea necesario. La minimización de estas pérdidas permiten un menor requerimiento de ventilación, lo que significa la necesidad de un ventilador más pequeño. Tanto las pérdidas en el núcleo como las pérdidas por fricción y ventilación son esencialmente independientes de la carga del motor.

b) Cargas Variables

- Las pérdidas en el cobre del devanado inductor se pueden reducir modificando el diseño de las ranuras del estator o reduciendo el grosor del aislamiento para incrementar el volumen de cobre en el estator.

Cómo se mostró en la fórmula (3.10), hay una interdependencia entre la corriente de entrada y el factor de potencia. A la hora de buscar mejoras en el motor, es importante tener muy presente dicha interdependencia. Para un mejor entendimiento de dicha interdependencia, en la fórmula (3.12) se ha despejado el factor de potencia en función de la corriente de entrada.

$$f dp = \frac{P_U}{\sqrt{3} \cdot V_{prom} \cdot I_{prom} \cdot \eta_1} \quad (3.12)$$

Se puede ver fácilmente que si se consigue un incremento de la eficiencia η_1 , se conseguiría una disminución del factor de potencia. Para que el factor de potencia se mantenga constante, la corriente de entrada tendría que disminuir en la proporción adecuada según el aumento de la eficiencia. Si lo que se busca es que tanto la eficiencia como el factor de potencia aumenten, tendría que haber una reducción mucho mayor de la corriente de entrada, lo cual es difícil de conseguir ya que se deben cumplir con otros requerimientos operacionales que exigen mayor corriente. Es por ello que finalmente todo debe ser un balance adecuado.

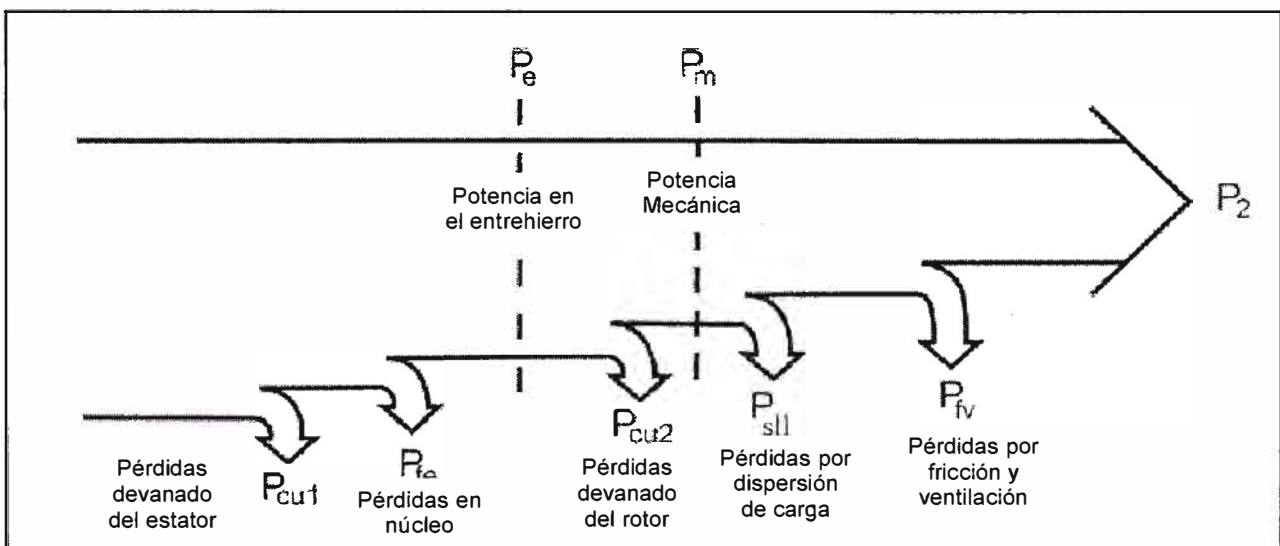


Fig. 3.7 Definición de las potencias y pérdidas en un motor de inducción [4].

Las pérdidas en el cobre del devanado inducido se pueden reducir incrementando el área de la sección transversal de las barras conductoras y de los anillos en los terminales para producir una menor resistencia.

- Las pérdidas por dispersión de carga, también conocidas como pérdidas adicionales, se pueden reducir con un diseño optimizado del motor, y con un procedimiento de ensamblaje muy cuidadoso. Estas pérdidas son las más difíciles de controlar, ya que son ocasionadas por un conjunto de variables distintas.

Tanto las pérdidas por dispersión de carga como las pérdidas en el cobre en el estator y el rotor varían con la carga.

CAPITULO IV

EFICIENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS EN OPERACIÓN

4.1 Magnitudes Características

Los resultados finales de este estudio implican una serie de mediciones, no sólo eléctricas, que se deben hacer para conseguir el resultado final: la determinación de la eficiencia de un motor eléctrico. Las magnitudes no siempre se obtendrán en base a mediciones del momento, sino también se utilizarán magnitudes de tablas, de catálogos o inscritas en la placa del motor que se vaya a analizar.

Esta sección servirá como un glosario básico previo, ya que los siguientes términos se usarán con mucha frecuencia, y es preferible que sus definiciones estén claras desde el inicio. La siguiente lista de magnitudes abarca solamente los términos más usados. Pueden haber términos cuya explicación no se brinde a continuación, pero que se pueda brindar al momento de su mención, como parte del contexto en el que se encuentra. Así como también puede encontrar términos que son considerados elementales, cuyo significado no se da de manera detallada, porque se sobreentiende su correcta comprensión, de algún curso previo de circuitos eléctricos básico.

4.1.1 Carga

Cada vez que en este texto se lea el término **Carga**, deberá entenderse como aquella máquina a mover y que se acopla al eje del motor. La mencionada máquina, según su diseño de fábrica, necesita de cierto torque motriz para poder funcionar en ciertas condiciones. El torque resistente de la carga se puede dar en Newton por metro [N.m]. Es según esta magnitud que se mide la resistencia al movimiento de la carga

a) Sobrecarga

Característica que se le asigna al motor eléctrico, cuando el torque resistente de la carga es mayor al torque nominal del motor, dando lugar a la circulación de una sobrecorriente en los devanados que provocaría un recalentamiento del motor, lo cual debe ser controlado adecuadamente

b) Baja carga

Característica que se le asigna al motor eléctrico, cuando el torque resistente de la carga es muy pequeño comparado con el torque nominal del motor, lo cual representa una sub-utilización del motor. En esas condiciones se ve afectado el factor de carga,

mostrando valores muy bajos, lo cual a gran escala es penalizado por la empresa distribuidora. La operación del motor en estas condiciones tampoco es favorable, ya que hay un desgaste acelerado de la lubricación en los rodamientos, por ejemplo.

4.1.2 Torque

Según conceptos básicos de física, el Torque es la representación angular de la acción de una Fuerza tangencial en un punto de una palanca a una distancia determinada de un centro de giro.

$$\tau = F \cdot d \text{ [N.m]} \quad (4.1)$$

Donde F es la fuerza tangencial y d es la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el centro de giro. Por ello que las unidades de medición del Torque son los Newton-metro.

En sistemas giratorios, como los motores de inducción, el Torque en la zona de operación se puede entender y expresar como una fuerza rotacional que depende directamente del **porcentaje de deslizamiento (z)**, parámetro que se explicará en el apartado 4.1.3d). La fórmula (4.2) es una representación generalizada del Torque en la zona de operación en motores de inducción siendo K una constante. (La demostración se puede encontrar en el Anexo A).

$$\tau = K \cdot z \text{ [N.m]} \quad (4.2)$$

El Torque desarrollado por un motor de inducción asíncrono varía con la velocidad de giro cuando el motor es acelerado desde cero hasta su velocidad máxima de operación.

a) Torque a plena carga

O **Torque nominal**, es el momento torsor necesario para mover una carga nominal a la potencia y velocidad indicadas en la placa del motor.

b) Torque a rotor bloqueado

Es el torque mínimo que debe desarrollar el motor al aplicarle tensión y frecuencia nominal, cuando se encuentra estático el rotor y en cualquier posición angular.

c) Torque mínimo de aceleración

Es el torque mínimo desarrollado por el motor durante el período de aceleración considerando desde el inicio del movimiento del rotor (el arranque) hasta la velocidad en la cual ocurre el torque de rompimiento.

d) Torque máximo de sincronismo

Es el torque máximo sostenido de un motor, que éste desarrolla a velocidad síncrona con tensión y frecuencia nominal con una excitación normal.

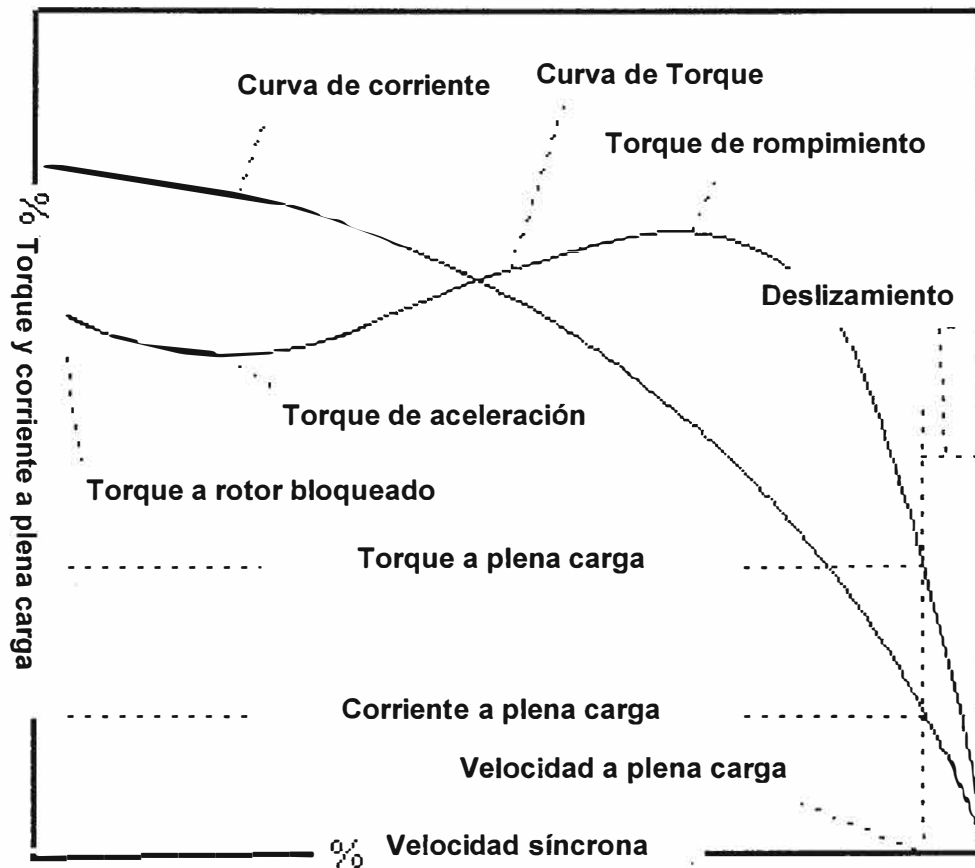


Fig. 4.1 Curvas Torque y Corriente nominal vs Velocidad síncrona [10].

e) Torque de aceleración

El torque máximo de aceleración de un motor síncrono es el máximo torque constante al cual el motor debe mover la inercia de la carga hasta la velocidad de sincronismo, aplicando la tensión y frecuencia nominal.

f) Torque de rompimiento

El torque de rompimiento de un motor es el máximo torque, el cual desarrolla sin una caída abrupta de la velocidad cuando se está aplicando una tensión y frecuencia nominal [11].

4.1.3 Velocidad

La magnitud velocidad, para el caso de un motor eléctrico, tendrá como unidades de medición las Revoluciones por Minutos [RPM], ya que todas las velocidades involucradas en un motor eléctrico son de carácter giratorio.

a) Velocidad Síncrona (n_{sin})

Es la velocidad del campo giratorio resultante que se origina dentro del motor eléctrico. Su magnitud se fija dependiendo de la frecuencia f de la corriente que reciba el motor y del número de polos p que posea. Para el caso del Perú, la frecuencia de la corriente es 60 Hz, por lo que se podría considerar como un valor fijo, siendo el número de polos la única variable para el establecimiento de la velocidad síncrona.

El número de polos usualmente viene estipulado por el fabricante, ya que se define con el tipo de bobinado que tenga el motor. La velocidad síncrona se define según la fórmula (4.3) y tiene valores comerciales fijos que se incluyen en la Tabla N° 4.1:

$$n_{sin} = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (4.3)$$

Tabla N° 4.1 Velocidad síncrona de acuerdo al número de polos

Número de polos (p)	Velocidad síncrona (n_{sin})
2	3000
4	1500
6	1000
8	750

Se puede ver claramente que a mayor número de polos, menor es la velocidad síncrona del motor. Existen métodos de regulación de velocidad que permiten el cambio del número de polos dentro de un motor, dependiendo de las necesidades de velocidad que se requiera para cierta función.

b) Velocidad Nominal (n_{nom})

O velocidad de placa, por ser un dato proveído por el fabricante, ya sea que aparezca en la placa misma del motor o que se haya conseguido en catálogos. Es la magnitud a la que debe girar el rotor en condiciones ideales de estar moviendo justamente la carga para el que fue diseñado, o como se suele decir, cuando se encuentra a **plena carga**. Teóricamente siempre debe ser menor que la velocidad síncrona.

c) Velocidad Real (n)

También llamada velocidad medida o velocidad de operación, ya que es una magnitud que varía con la carga. Es muy común que los motores eléctricos no se encuentren moviendo cargas para las que fueron diseñadas. Usualmente dichas cargas son menores, por lo que la **velocidad real** suele ser mayor a la velocidad nominal. Conforme la carga a mover va creciendo, la velocidad real va disminuyendo hasta alcanzar a la velocidad nominal. La velocidad real, teóricamente, siempre debe ser menor que la velocidad síncrona.

Para medir la magnitud de la velocidad de operación se utilizan tacómetros mecánicos o tacómetros estroboscópicos ópticos. Para efecto de este estudio, se adelanta que el instrumento de medición recomendado será el tacómetro óptico, por cuestiones de facilidad de uso en el área de trabajo.

d) Deslizamiento

Para facilitar los cálculos de este estudio, se define al **deslizamiento** como la diferencia entre la velocidad síncrona menos cualquiera de las otras dos velocidades mencionadas anteriormente.

Se denomina **deslizamiento nominal** a la diferencia entre la velocidad síncrona n_{sin} menos la velocidad nominal n_{nom} , según la fórmula (4.4):

$$s_{nom} = n_{sin} - n_{nom} \text{ [RPM]} \quad (4.4)$$

Cuyo **porcentaje de deslizamiento nominal** queda definido según la siguiente fórmula:

$$Z_{nom} = \frac{n_{sin} - n_{nom}}{n_{sin}} [\%] \quad (4.5)$$

Se denomina **deslizamiento real** a la diferencia entre la velocidad síncrona n_{sin} , menos la **velocidad real** n , según la fórmula (4.6):

$$s = n_{sin} - n \text{ [RPM]} \quad (4.6)$$

Cuyo **porcentaje de deslizamiento real** queda definido según la siguiente fórmula:

$$Z_{real} = \frac{n_{sin} - n}{n_{sin}} [\%] \quad (4.7)$$

4.1.4 Potencia

Cada vez que en este documento se cite el parámetro **potencia**, deberá entenderse a la característica propia del motor que describe su capacidad para realizar cierto trabajo. En el motor eléctrico, al ser una máquina de conversión de energía, están presentes en un mismo sistema dos tipos de potencias: la potencia eléctrica activa y la potencia mecánica.

La Potencia Eléctrica es la que se registra a la entrada del motor, en sus bornes, y se suele medir en kilowatt [kW].

Para los motores eléctricos, la Potencia mecánica se puede entender como la capacidad que tienen para aplicar a una carga el Torque producido en su eje a una determinada velocidad de giro. Es la que se registra a la salida mecánica del motor, y se puede expresar según la fórmula (4.8):

$$P = \tau \cdot n \cdot \frac{\pi}{30} \text{ [W]} \quad (4.8)$$

Siempre que la velocidad esté en RPM y el Torque en N.m.

La Potencia Mecánica a la salida del eje suele darse en Caballos de fuerza [H.P] (Horse Power), y para conseguir eso, la fórmula (4.8) debe multiplicarse por un factor igual a 0.746.

a) Potencia Nominal (P_{nom})

Es la potencia mecánica externa, asignada por el fabricante, que el motor debe entregar a la carga trabajando bajo condiciones de tensión y corriente nominales. Es una de las magnitudes que aparece necesariamente en la placa del motor usualmente expresado en HP, y permite saber el tamaño de la carga ideal que es capaz de mover.

b) Potencia Real (P_{eje})

Es una magnitud medida o determinada y que tiene relación directa con la carga real que el motor esté moviendo. Es la potencia mecánica real que entrega el eje del rotor, y por lo tanto se indica en caballos de fuerza [HP].

c) Potencia total de entrada (P_T)

Es la potencia eléctrica de entrada al motor y se mide en kilowatts [kW]. La magnitud de esta potencia varía dependiendo de lo que requiera el motor en base a la carga que esté moviendo. Existen instrumentos electrónicos que permiten la medición de ese valor junto con el de la tensión y la corriente de entrada conocidos como multímetros o analizadores de redes. A lo largo de este texto se recalca la importancia de usar equipos de alta precisión para que los cálculos y resultados sean de alta confiabilidad.

4.1.5 Eficiencia (η)

La eficiencia de un motor es la proporción entre la potencia mecánica de salida sobre la potencia eléctrica de entrada. Lo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (4.9)$$

No toda la potencia activa de entrada es convertida y entregada como potencia mecánica en el eje, ya que hay parte de esa energía que se consume y se pierde dentro del motor. En otras palabras, la Potencia a la salida del motor es igual a la Potencia eléctrica activa a la entrada menos la Potencia correspondiente a las pérdidas dentro del motor. De esta manera la eficiencia también se puede expresar de las formas siguientes:

$$\eta = \frac{P_{entrada} - P_{pérdidas}}{P_{entrada}} \quad (4.10)$$

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + P_{pérdidas}} \quad (4.11)$$

La eficiencia o rendimiento, es la medida de la habilidad y condición de un motor eléctrico para convertir la potencia eléctrica que toma del sistema en potencia mecánica útil. Es aquella magnitud que permite saber de manera más clara las condiciones de funcionamiento del motor. La eficiencia se puede ver afectada por factores como el desgaste o el acoplamiento de una carga incorrecta (condición de sobrecarga o carga reducida).

a) Tipos de eficiencias

Para evaluar motores según sus mejoras en eficiencia o sus ahorros en energía, es esencial que se utilice una sola definición de eficiencia. Es complicado comparar de manera apropiada las eficiencias que los fabricantes publican, difunden o consiguen de sus pruebas, ya que se usan muchos valores en catálogos y textos de venta. Las definiciones más comunes son:

- **Eficiencia nominal o promedio**

Debido a la variación inevitable que pueda existir en los materiales, en los procesos de ensamblaje, y en las pruebas realizadas, la eficiencia de un motor varía con respecto a la de otro del mismo diseño y de la misma línea de producción. Por eso, la eficiencia nominal es el promedio de la eficiencia a plena carga de un número grande de motores del mismo diseño. La NEMA recomienda que la eficiencia nominal se use para calcular el consumo de energía de un motor o de un grupo de motores.

- **Eficiencia mínima o garantizada**

La eficiencia mínima representa una combinación desfavorable en la materia prima y en las tolerancias de fabricación. Para cada valor de eficiencia nominal cualquier motor de ese diseño debe alcanzar o superar el valor de eficiencia mínima asociado, que se obtiene considerando un incremento del 20% de sus pérdidas a comparación de las pérdidas asociadas a la eficiencia nominal.

La eficiencia mínima es un estándar que debe ser alcanzado o excedido por los fabricantes, no es apropiado para el cálculo de consumo de energía probable. La eficiencia mínima definida por la NEMA usualmente aparece como dato de placa con el nombre de "Eficiencia Garantizada".

- **Eficiencia Aparente**

La eficiencia aparente es el producto del factor de potencia del motor y la mínima eficiencia. Con esta definición, el consumo de energía puede variar considerablemente ya que si el factor de potencia es alto la eficiencia es baja. Ninguna especificación debe hacerse en base a valores de eficiencia aparente.

- **Eficiencia Calculada**

Este término se refiere a un promedio de eficiencia esperada basado en una relación entre los parámetros de diseño y los resultados de pruebas. Ninguna especificación debe hacerse en base a valores de eficiencia calculada.

b) Niveles de Eficiencia

A nivel mundial existen distintas nomenclaturas para clasificar los niveles de eficiencia de los motores eléctricos. En el Anexo B se hace una explicación histórica del desarrollo de las eficiencias de los motores eléctricos y sus nomenclaturas a lo largo de

los años, también se menciona las expectativas de los especialistas para los próximos años y las intenciones de uniformizar estos conceptos a nivel mundial.

Para tener una mejor comprensión al leer los siguientes apartados y capítulos, o algún otro texto relacionado, es necesario hacer la comparación apropiada entre los niveles de eficiencia más usados en la actualidad y resaltar la ubicación del Perú en este contexto.

En Estados Unidos hay un consenso entre el **Instituto de los Ingenieros Eléctricos y Electrónicos** (IEEE, por sus siglas en inglés) y la **Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos** (NEMA, por sus siglas en inglés), plasmado también en el **Acta de Política Energética** (EPAAct, por sus siglas en inglés), con respecto a los valores de eficiencia y la nomenclatura a usar para los motores producidos dentro de su territorio. Los niveles, ordenados del más bajo al más alto en eficiencia son: Eficiencia Estándar, Eficiencia Energética, y Eficiencia Premium o Alta Eficiencia.

En Europa, la **Comisión Europea de Fabricantes de Máquinas Eléctricas y de Equipos y Sistemas de Electrónica de Potencia** (CEMEP, por sus siglas en Inglés), de manera independiente, publicó unos valores de eficiencia que los agrupaba en niveles según la siguiente nomenclatura, ordenados del más bajo al más alto en eficiencia: EFF3, EFF2, y EFF1.

Por otro lado, la **Comisión Electrotécnica Internacional** (IEC, por sus siglas en inglés), publicó otros valores de eficiencia para distintas potencias de motores, y los clasificó en niveles de la siguiente manera, ordenados del más bajo al más alto en eficiencia: IE-1, IE-2, e IE-3.

La Tabla N° 4.2 permite visualizar la comparación aproximada entre los niveles de eficiencia más usados a nivel mundial para motores eléctricos:

Tabla N° 4.2 Designación de niveles de eficiencia [12].

IEC 34-2	CEMEP	IEEE/CSA
IE-3 PREMIUM		NEMA Premium o Alta Eficiencia
IE-2 ALTA	EFF 1	EPAAct, Eficiencia Energética
IE-1 ESTÁNDAR	EFF 2	Estándar
MENOR A ESTÁNDAR	EFF 3	

En el Perú, la Norma Técnica Peruana NTP 399.450 toma como referencia la Norma Internacional IEC 60034-31 para definir los niveles de eficiencia de los motores eléctricos.

- **Motor de eficiencia estándar (IE1)**

Es el que tiene una eficiencia nominal igual o mayor que el indicado en la Tabla N° 4.3, de acuerdo al número de polos.

- **Motor de eficiencia alta (IE2)**

Es el que tiene una eficiencia nominal igual o mayor que la indicada en la Tabla N° 4.4, de acuerdo al número de polos

- **Motor de eficiencia muy alta/PREMIUM (IE3)**

Es el que tiene una eficiencia nominal igual o mayor que la indicada en la Tabla N° 4.5 , de acuerdo al número de polos [13].

Las curvas de Eficiencia vs. Potencia Nominal mostrados en la figura 4.2, permiten distinguir mejor los rangos de eficiencia explicados previamente.

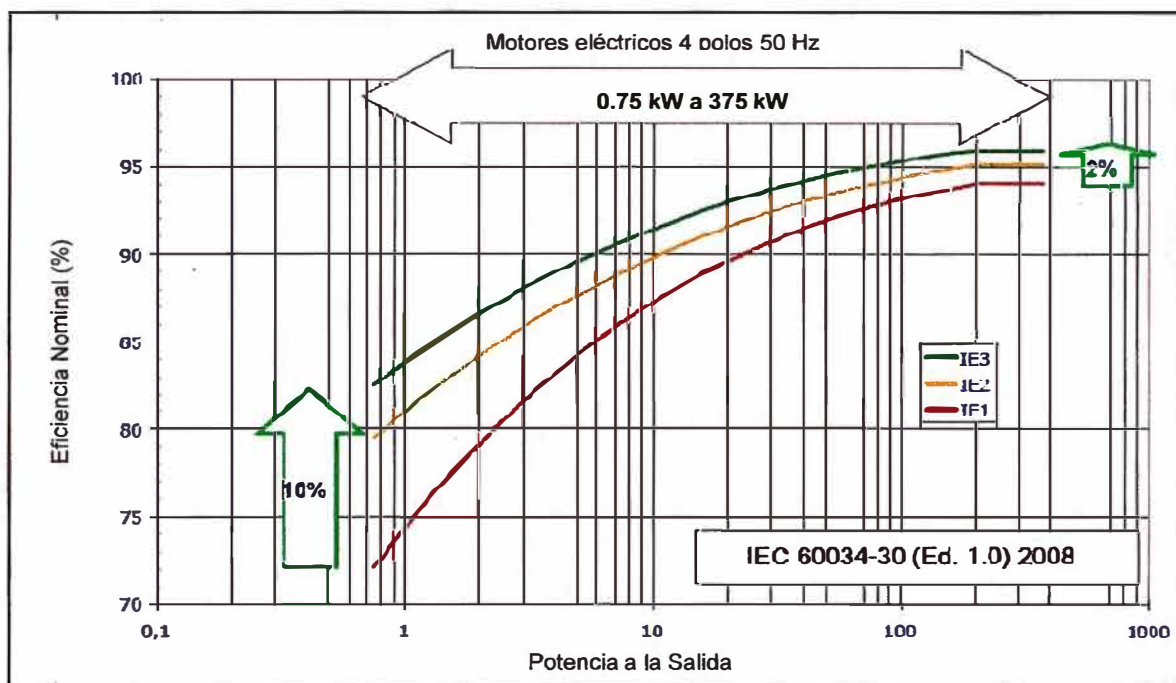


Fig. 4.2 Niveles de eficiencia energética según la IEC [14]

En la Tabla N° 4.3 , Tabla N° 4.4 , y Tabla N° 4.5 , se muestran los valores mínimos de eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados para los niveles de eficiencia IE1, IE2 e IE3, respectivamente.

c) Beneficios de los motores de eficiencia alta

Los motores de eficiencia alta son más largos que los motores de eficiencia estándar, ya que los núcleos del rotor y el estator se alargan para reducir las pérdidas asociadas a la densidad de flujo magnético, sin embargo, se instalan en la misma carcasa. Cumplen de manera total con los estándares NEMA para la corriente de sobrecarga, de arranque, y el torque de rompimiento. También se pueden aplicar controles y protecciones convencionales NEMA.

Varios fabricantes se jactan de que sus motores de eficiencia alta trabajan a menores temperaturas que los motores de eficiencia estándar, lo que se traduce como un tiempo de vida mayor del motor, de su aislamiento y de sus rodamientos. El resultado se manifiesta teniendo menores problemas en los devanados, periodos más prolongados para la programación de acciones de mantenimiento, y menores cortes forzados del servicio eléctrico.

Los motores de eficiencia alta tienen una expectativa de vida mayor a los de eficiencia estándar, ya que tienen una mejor capacidad para resistir mayor número de paradas y sobrecargas. Además, los motores de eficiencia alta operan con menores pérdidas no relacionadas a la carga.

Algunos beneficios adicionales al usar motores de eficiencia alta son:

- Una garantía extendida.
- Ciclos de lubricación prolongados, debido a una operación a menor temperatura.
- Mayor tolerancia ante los impactos térmicos, provocados por paradas y arranques frecuentes.
- Una mayor capacidad para tolerar condiciones de sobrecarga, debido a una operación a menor temperatura y a un factor de servicio de 1.15.
- Menores fallas, usualmente provocadas por una ventilación inadecuada o dañada.
- Mayor resistencia ante condiciones de operación anormales, como sobretensión, tensión reducida o desfasaje.
- Hay un pequeño incremento en el factor de potencia de los motores menores a 100 HP, lo que reduce las pérdidas en el sistema de distribución y los cargos por penalidades por factor de potencia por parte del distribuidor.

Sin embargo, todos estos beneficios dependen de varios factores. Los motores de eficiencia alta pueden tener factores de potencia mayores o menores que los motores de eficiencia estándar, dependiendo de las prácticas de diseño del fabricante. En condiciones de desbalance de tensión, tanto los motores de eficiencia alta como los de eficiencia estándar deberán sufrir un desgaste y una reducción de su rendimiento similar, ya que se usan los mismos métodos y herramientas de fabricación.

Para el diseño y construcción de los motores de eficiencia alta y PREMIUM, en general, se tienen en cuenta todos los puntos mencionados en el apartado 3.4.2. La figura 4.3, grafica de manera clara las características constructivas de dichos motores.

4.1.6 Factor de carga (*fdc*)

Es la relación entre la Potencia en el eje, aquella registrada a la salida funcionando en condiciones reales, sobre la Potencia nominal, la que se supone debería entregar a su salida si funcionase en condiciones nominales.

Tabla N° 4.3 Valores mínimos de eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados de eficiencia estándar IE1 [%]

Potencia nominal kW/HP	2 Polos	4 Polos	6 Polos
0.75/1.0	77.0	78.0	73.0
1.1/1.5	78.5	79.0	75.0
1.5/2.0	81.0	81.5	77.0
2.2/3.0	81.5	83.0	78.5
3.0/4.0	83.4	84.2	81.6
3.7/5.0	84.5	85.0	83.5
4.5/6.0	85.0	85.8	84.0
5.5/7.5	86.0	87.0	85.0
7.5/10.0	87.5	87.5	86.0
9.2/12.5	87.4	88.4	87.4
11.0/15.0	87.5	88.5	89.0
15.0/20.0	88.5	89.5	89.5
18.5/25.0	89.5	90.5	90.2
22.0/30.0	89.5	91.0	91.0
30.0/40.0	90.2	91.7	91.7
37.0/50.0	91.5	92.4	91.7
45.0/60.0	91.7	93.0	91.7
55.0/75.0	92.4	93.0	92.1
75.0/100.0	93.0	93.2	93.0
90.0/125.0	93.0	93.2	93.0
110.0/150.0	93.0	93.5	94.1
132.0/175.0	93.6	94.1	93.8
150.0/200.0	94.1	94.5	94.1

Tabla N° 4.4 Valores mínimos de eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados de eficiencia alta IE2 [%]

Potencia nominal kW/HP	2 Polos	4 Polos	6 Polos
0.75/1.0	75.5	82.5	80.0
1.1/1.5	82.5	84.0	85.5
1.5/2.0	84.0	84.0	86.5
2.2/3.0	85.5	87.5	87.5
3.0/4.0	86.6	87.3	87.6
3.7/5.0	87.5	87.5	87.5
4.5/6.0	87.8	88.5	88.8
5.5/7.5	88.5	89.5	89.5
7.5/10.0	89.5	89.5	89.5
9.2/12.5	89.6	90.4	90.5
11.0/15.0	90.2	91.0	90.2
15.0/20.0	90.2	91.0	90.2
18.5/25.0	91.0	92.4	91.7
22.0/30.0	91.0	92.4	91.7
30.0/40.0	91.7	93.0	93.0
37.0/50.0	92.4	93.0	93.0
45.0/60.0	93.0	93.6	93.6
55.0/75.0	93.0	94.1	93.6
75.0/100.0	93.6	94.5	94.1
90.0/125.0	94.5	94.5	94.1
110.0/150.0	94.5	95.0	95.0
132.0/175.0	94.7	95.0	94.6
150.0/200.0	95.0	95.0	95.0

Tabla N° 4.5 Valores mínimos de eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados de eficiencia Premium IE3 [%]

Potencia nominal kW/HP	2 Polos	4 Polos	6 Polos
0.75/1.0	77.0	85.5	82.5
1.1/1.5	84.0	86.5	87.5
1.5/2.0	85.5	86.5	88.5
2.2/3.0	86.5	89.5	89.5
3.0/4.0	87.6	89.5	89.5
3.7/5.0	88.5	89.5	89.5
4.5/6.0	88.8	90.5	90.5
5.5/7.5	89.5	91.7	91.0
7.5/10.0	90.2	91.7	91.0
9.2/12.5	90.4	92.2	92.0
11.0/15.0	91.0	92.4	91.7
15.0/20.0	91.0	93.0	91.7
18.5/25.0	91.7	93.6	93.0
22.0/30.0	91.7	93.6	93.0
30.0/40.0	92.4	94.1	94.1
37.0/50.0	93.0	94.5	94.1
45.0/60.0	93.6	95.0	94.5
55.0/75.0	93.6	95.4	94.5
75.0/100.0	94.1	95.4	95.0
90.0/125.0	95.0	95.4	95.0
110.0/150.0	95.0	95.8	95.8
132.0/175.0	95.2	95.9	95.5
150.0/200.0	95.4	96.2	95.8

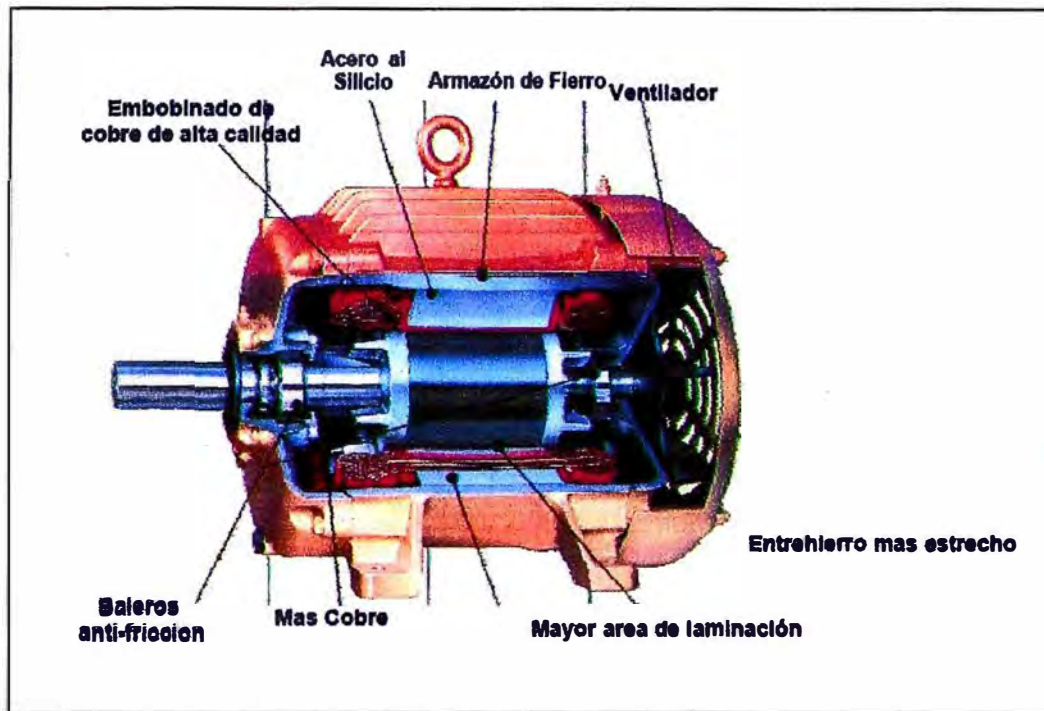


Fig. 4.3 Constitución de un motor trifásico de eficiencia alta [15]

4.2 Métodos para la determinación de la eficiencia de motores eléctricos

Todos los conceptos previamente explicados van a ayudarnos a comprender de manera más fácil los métodos que existen para la determinación de la eficiencia de los motores eléctricos y la importancia que este parámetro tiene en los estudios energéticos y el ahorro de energía.

En este apartado se van a presentar aquellos métodos que están estipulados en las normas internacionales y aquellos que no pero que por su practicidad tienen el reconocimiento mundial de los especialistas para ser utilizados de manera suplementaria.

La IEEE y la IEC son dos de las instituciones internacionales que más influencia tienen a nivel mundial a la hora de especificar métodos de cálculos y valores de referencia, tanto en la eficiencia de motores como en muchas otras áreas de la ingeniería eléctrica y afines. Como representante de Estados Unidos la IEEE publicó su norma IEEE 112, y por el lado de Europa la IEC publicó su norma IEC 34-2-1, ambas especifican métodos varios para la determinación de la eficiencia. A estos métodos vamos a denominarlos **métodos normados**, y para cuestiones de comparación, se resalta el hecho que deben ser realizados en laboratorios especializados.

Profesionales y empresas especializadas en el campo, en base a una amplia experiencia, han desarrollado y publicado métodos para poder determinar la eficiencia de los motores eléctricos en el campo de trabajo. A estos métodos vamos a denominarlos **métodos de campo**, y para cuestiones de comparación, se resalta que obviamente no existe la necesidad de que sean llevados a cabo en un laboratorio.

4.2.1 Métodos Normados

Es de carácter crítico que las comparaciones de eficiencia entre motores se hagan usando una metodología uniforme para la determinación de dicha eficiencia. Dicha metodología varía a nivel mundial, y no es recomendable la aplicación sin criterio de alguna de ellas sobre cualquier motor ya que eso conllevaría a la obtención de valores muy distintos de poca confianza. Aquellos países que no tienen una industria de fabricación de motores de gran tamaño importan motores de distintos países y determinan las eficiencias usando metodologías distintas y variadas.

A pesar de algunos esfuerzos, hasta el momento no se ha podido conseguir la prevalencia y aceptación de un único método a nivel mundial, y es por eso que cada país especifica en sus normas metodologías distintas para la determinación de la eficiencia de los motores. Los estándares más comunes son los siguientes:

- IEEE 112-2004 (Estados Unidos)
- IEC 60034-2 (Comisión Electrotécnica Internacional)
- JEC-37 (Comité Electrotécnico Japonés)
- BS-269 (Británico)
- C-390-93 (Asociación de Estándares Canadiense)
- ANSI C50.20 similar al IEEE 112 (Estados Unidos)

El objetivo de este estudio no está enfocado en los métodos normados, sino más bien en los métodos de campo, es por ello que no se profundiza mucho en los mencionados primeramente, y la información que se brinda es básica y general.

Los valores de eficiencia que se muestran en la mayoría de las placas de los motores o las que los fabricantes facilitan, se calculan de acuerdo a alguno de los dos métodos que más aceptación han conseguido: el de la norma IEEE 112-B y el de la norma IEC 60034-2 (método indirecto). En este apartado se hace una comparación entre ambos métodos [16].

El estándar o norma IEEE 112 es quizá el más aceptado en la industria. A pesar de haber sido implementado inicialmente en los Estados Unidos, hoy en día algunos otros países lo han tomado como referencia, tal es el caso de Canadá en su norma C390-33. En Europa, la norma IEC 60034-2 estuvo en uso hasta hace poco. Era una norma relativamente fácil de aplicar en la práctica y requería poca información para calcular la temperatura de los devanados y las pérdidas por dispersión de carga. Ese detalle provocaba que su método sufriera de muchas mediciones imprecisas y por muchos años se ganó muchas críticas. La nueva norma IEC 60034-2-1, que fue publicada en Noviembre del 2007, tiene como base a su versión anterior, presentando cambios y ajustes habiendo tomado como evidente referencia a la norma IEEE 112 [17].

a) La Norma IEEE 112 y la Norma IEC 60034-2-1

La norma IEEE 112 ha sido mayoritariamente reconocida como referente principal entre las normas para la determinación de la eficiencia de motores de inducción, y también se ha comprobado su fiabilidad y coherencia, mientras que la norma IEC 60034-2-1, recién publicada, aun no es validada por los textos especializados.

Para poder dar una explicación general de estos dos métodos, se va a hacer una comparación entre ambos analizando aquellos factores que conforman las fuentes de error más considerable: factor instrumental, factor metodológico, y factor humano.

- **Precisión de los equipos**

Sin duda alguna, la precisión de los equipos juega un rol importante en las mediciones experimentales. En la Tabla N° 4.6 se muestran las precisiones instrumentales especificadas en cada una de las normas analizadas. Se puede apreciar que la nueva norma IEC especifica casi las mismas precisiones instrumentales que la norma IEEE, lo que por lo tanto, deja ver algunas de las mejoras que han sido hechas con respecto a su versión anterior.

Sin embargo, el uso de instrumentos que tengan precisiones similares no necesariamente garantiza resultados similares. Las diferencias también provienen de las distintas metodologías y procedimientos de pruebas especificados en las normas, así como por las distintas técnicas que poseen los operarios involucrados.

Tabla N° 4.6 Precisión de los instrumentos y estimación de la eficiencia [%]

Variable	IEEE 112	IEC 34-2-1
Instrumento transformador	0.5	0.3
Tensión	0.2	0.2
Corriente	0.2	0.2
Potencia	0.2	0.2
Torque	0.2	0.2
Velocidad	1 rpm	1 rpm
Frecuencia	0.1	0.1
Resistencia	0.2	0.2
Temperatura	1 °C	1°C
Eficiencia según WCE*	0.31	0.33
Eficiencia según RPBE**	0.17	0.18

*Estimación en la peor de las situaciones (WCE, según sus siglas en inglés)

** Estimación realista basada en la perturbación (RPBE, según sus siglas en inglés). [17]

- **Metodología**

Ambas normas definen varios métodos para determinar las pérdidas y la eficiencia. Para esta comparación, sólo se considerarán aquellos métodos que involucren las variables de entrada y salida, así como las pérdidas segregadas, por ser los métodos más comunes y utilizados en la industria.

En principio, para determinar las pérdidas en el devanado del estator, se necesita conocer su resistencia o su temperatura para cualquier condición de prueba.

Según la norma IEEE 112, se debe medir la resistencia del devanado del estator cuando el motor se encuentra aún frío, antes de la realización de cualquier prueba que signifique el funcionamiento del motor. Este dato sirve como una resistencia de referencia ya que luego se usará para calcular la resistencia del devanado para todas las condiciones de carga, usando la temperatura medida correspondiente de los devanados. Obviamente, para que los sensores obtengan la temperatura de los devanados, se incurre en procedimientos de mucha intrusión sobre el motor en funcionamiento.

Por el contrario, la norma IEC 60034-2-1 indica que la resistencia del devanado debe ser medida de manera directa desde sus terminales, apagando el motor, justo antes de llegar a su nivel de carga máxima y también antes de llegar a su punto de mínima carga. No se requiere la medición de la temperatura durante su funcionamiento.

Este método permite la obtención de dos lecturas distintas de la resistencia del devanado, correspondientes al nivel de carga nominal y al nivel de carga más bajo. Para casos de sobrecarga, con niveles mayores al 100% de carga nominal, la resistencia del devanado a considerar tendrá el mismo valor medido en su nivel de carga máxima. Para cargas menores a la nominal se asume que el valor de la resistencia del devanado es el resultado de una interpolación directa entre los dos valores previamente medidos.

El prescindir de la temperatura del devanado, le da una ventaja obvia a este método, ya que se evita el uso interno de sensores, y también permite que el método pueda ser aplicado a un conjunto amplio de motores de inducción sin tener que separarlos a un lado.

Con respecto al tratamiento para el cálculo de las pérdidas en el núcleo, ambas normas definen pruebas en vacío similares para separar las pérdidas por fricción y ventilación de las pérdidas en el hierro. Según la norma IEEE 112, las pérdidas en el núcleo serán las mismas en todos los niveles de carga; pero para la norma IEC, las pérdidas en el núcleo varían con respecto a la carga, dependiendo de la caída de tensión resistiva en el devanado del estator, según la fórmula (4.12):

$$V_r = \sqrt{\left(V - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \cos\theta\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \sin\theta\right)^2} \quad (4.12)$$

Donde V es la tensión entre fases, I es la corriente de línea, R su respectiva resistencia, y θ el ángulo del factor de potencia. Por esta razón, se hace obvio que en este cálculo específico, el método de la norma IEC es más preciso que el de la IEEE, ya que la tensión de magnetización (y por ende, las pérdidas en el núcleo) se determinan restando la caída de tensión en el devanado del estator menos la tensión al ingreso.

Para la determinación de las pérdidas por dispersión de carga, ambas normas usan técnicas similares. Primero se obtienen las pérdidas residuales, restandole a las pérdidas totales aquellas pérdidas tradicionales que pueden ser determinadas, y luego se ajusta la curva para encontrar las pérdidas por dispersión de carga usando un análisis de regresión lineal. El coeficiente de correlación en el ajuste de la curva de las pérdidas por dispersión de carga, es el que ocasiona que para este cálculo específico ambos métodos sean similares mas no iguales, ya que la norma IEEE 112 especifica un valor mínimo de 0.9 y la norma IEC un valor de 0.95.

En el caso que no sea posible una determinación directa de las pérdidas por dispersión de carga, éstas pueden ser estimadas usando ciertas tolerancias que están en función de la potencia de entrada (IEC 60034-2-1) o de la potencia de salida (IEEE 112). En la figura 4.4 se grafican de manera separada, para poder comparar, ambas consideraciones. A pesar que estas tolerancias tienen implicaciones estadísticas en las pérdidas por dispersión de carga y, como se indica en la norma IEC 34-2, son mejores que cualquier tolerancia fija, éstas no reflejan el diseño y la construcción de un único motor. Por su naturaleza, las pérdidas por dispersión de carga son distintas para cada motor y no es justificable la asignación de valores arbitrarios para estas pérdidas cuando existe la posibilidad de ser medidos.

Con respecto a las pérdidas en los devanados del rotor, y las pérdidas por fricción y ventilación, ambas normas comparten técnicas de cálculo iguales y no hay una diferencia importante entre las dos.

- **Procedimientos de prueba y factores humanos**

Entre ambas normas hay algunas diferencias para la realización de las pruebas en vacío y con carga.

El Método B de la norma IEEE 112 especifica las siguientes condiciones:

- Cuando la potencia de entrada varía en un 3% de su valor medido en dos intervalos sucesivos de 30 minutos con ninguna carga aplicada, se debe asumir que hay un equilibrio térmico. Las pruebas en vacío se llevan a cabo tomando desde el 125% de la tensión nominal bajándolo hasta aquel punto en que la reducción de la tensión pueda ocasionar un incremento considerable de la corriente, no existiendo un número específico para la toma de datos.

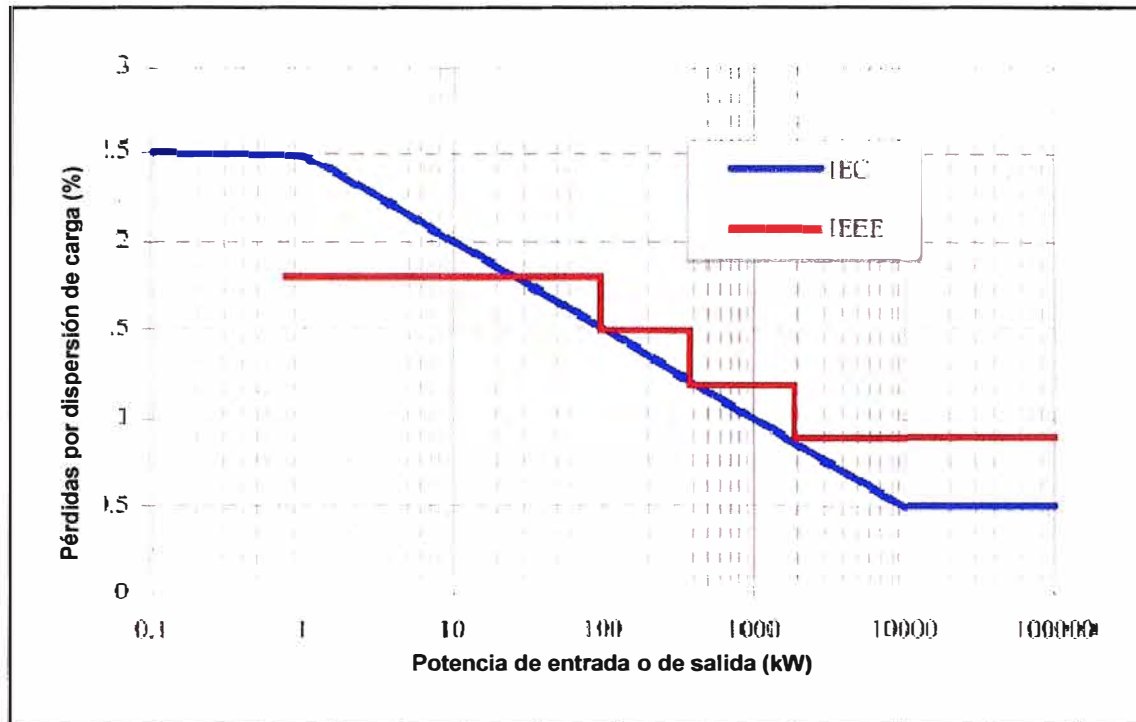


Fig. 4.4 Curvas para la estimación de las Pérdidas por dispersión de carga según la norma referente [17].

- Cuando la temperatura medida de la máquina varía alrededor de 1°C en un intervalo de 30 minutos moviendo una carga nominal, significa que se ha conseguido un equilibrio térmico. Tanto las pruebas con carga como las pruebas en vacío se realizan a seis niveles decrecientes del torque, que van desde el 150% hasta el 25% del torque a carga nominal.
- Es recomendable tomar varias medidas en cada nivel de tensión y carga en periodos cortos de tiempo, y luego promediar los resultados para tener un valor más preciso.
- La resistencia del devanado del estator se deriva de la resistencia de referencia y del incremento de la temperatura en condiciones de vacío y con carga. Los sensores de temperatura pueden ser montados sobre los conectores de dos terminales de los devanados, en el espacio correspondiente al estator, o sino también pueden ir incrustados entre las láminas del núcleo, aunque es preferible que sean instalados en la parte más caliente de la máquina.

La norma IEC 60034-2-1 especifica las siguientes condiciones:

- Cuando se asume un equilibrio térmico, las pruebas en vacío se deben realizar a cuatro niveles de tensión igualmente distanciados entre el 60% y el 125% de la tensión nominal (incluido el 100%), y por lo menos a tres niveles de tensión igualmente distanciados entre el 20% y el 50% de la tensión nominal.

- Cuando la temperatura medida de la máquina varíe alrededor de 2°C/h con carga nominal, significa que se ha conseguido un equilibrio térmico. Los datos se toman en cuatro niveles de tensión igualmente distanciados entre el 25% y el 100% de tensión nominal (incluyendo este último) y en dos niveles de tensión igualmente distanciados por encima del 100% sin pasar el 150% de tensión nominal. Las pruebas a plena carga y a carga parcial se realizan empezando por la mayor carga hasta la menor carga, en ese orden descendiente. Estas pruebas deben realizarse lo más rápido posible para minimizar los cambios de temperatura del motor.
- De manera preferente, la temperatura del devanado se debe determinar por medición directa evitando la realización de la prueba a plena carga, intentando hacerlo en el menor tiempo posible a través del procedimiento de extrapolación. Se debe hacer una medición extra de la temperatura del devanado, después de haber hecho el procesamiento respectivo al nivel de carga más bajo. Las dos lecturas se usan para la obtención de los valores de la resistencia del devanado en todos los otros niveles de carga. De manera alternativa, se puede medir la temperatura del devanado con sensores de temperatura, de manera similar a lo que estipulan los procedimientos de la IEEE.

Sin embargo, no hay definición alguna que especifique donde deben ir instalados los sensores para obtener una temperatura del devanado promedio.

Los errores de los operarios crecen debido a la malinterpretación de las normas y de los procedimientos de las pruebas, también debido a la mala aplicación de los equipos de medición, y al incorrecto procesamiento de los resultados de las pruebas. Por ejemplo, los errores de medición que se obtienen cuando el instrumento no es correctamente usado se consideran como errores humanos. De ser así, sería relativamente sencillo definir una norma de medición si es que todos los que usasen exactamente el mismo equipo de medición tuvieran la misma plataforma de prueba y la misma capacidad de suministro, con relación a la prueba de motores. Desafortunadamente, ese no es el caso en el mundo real y se hace imposible definir de manera completa y detallada un procedimiento de prueba para una norma a pesar que, como es lógico, las definiciones del procedimiento se hacen lo más estrictas posibles.

Hay varios tópicos del procedimiento de ambas normas, que vale la pena resaltar.

Primero, para la mayoría de motores de inducción con potencias menores a 150 kW, las pérdidas de Joule en el estator son usualmente el único gran componente de las pérdidas totales. De manera propia se hace evidente cuán importante es la determinación de la resistencia del devanado del estator con una buena precisión bajo cualquier condición. No obstante, la manera como la norma IEC calcula la resistencia del devanado del estator permite la interferencia de las personas en el proceso de prueba.

Por un lado, tomar mediciones de manera acelerada entre cada cambio de carga parcial, ocasionaría la aparición de errores si es que el transitorio no tiene el tiempo suficiente para estabilizarse. Por el otro lado, tomar mediciones de manera muy tranquila en cada nivel de carga parcial alteraría la condición de operación, que ya está previamente programada para una carga nominal. Respecto a esto, la IEEE 112 provee un método relativamente preciso para la determinación de la resistencia del devanado del estator usando sensores para obtener las temperaturas locales del devanado.

Segundo, la ubicación de los sensores insertados en la máquina da lugar a desviaciones, particularmente cuando la máquina está experimentando un gran cambio de temperatura. En general, la diferencia de temperatura entre los terminales de los conductores de los devanados, las ranuras del estator, y las laminaciones del núcleo puede fácilmente exceder los 5°C.

En efecto, la norma IEEE 112 sigue siendo mejor que la norma IEC, ya que la primera por lo menos sugiere la obtención de la máxima temperatura del devanado del estator, mientras que no hay ningún dato al respecto en la segunda norma. Sin embargo, el método de la norma IEEE solamente pueda dar una buena aproximación de la resistencia del devanado pero no logra otorgar un valor de resistencia preciso.

En resumen, la dinámica térmica de una máquina es tan compleja que la velocidad del cambio de la temperatura es significativamente distinta en diferentes puntos de la máquina que tengan relación con el recorrido del aire.

Tabla N° 4.7 Tabla de características de la norma IEEE 112 y la IEC 60034-2-1 [17]

Características	IEEE 112-B	IEC 34-2-1
Segregación de pérdidas	SI	SI
Ubicación de sensores de temperatura	SI	NO
Temperatura referencial del ambiente	25°C	25°C
Corrección de la resistencia del devanado del estator	SI	SI
Pérdidas en el núcleo con compensación de la caída de tensión	SI	SI
Análisis por regresión lineal de las pérdidas por dispersión de carga	NO	SI
Coefficiente de correlación en las pérdidas por dispersión de carga	SI	SI
Torquímetro corregido	0.9	0.95
Dinamómetro corregido	SI	NO
Potencia de salida corregido	NO	SI

Se podría conseguir mayor precisión si se instalasen varios sensores en distintas partes del devanado del estator para obtener un valor promedio, o si no como último recurso, se utilizaría un sistema para la medición directa de la resistencia durante la operación.

Tercero, el número de niveles de tensión y carga a realizar durante la prueba según la norma IEEE también está abierto a la interpretación de cada uno. A pesar que la norma IEC especifica seis niveles espaciados aproximadamente de manera igual entre el 20% y el 150% de la tensión nominal, los resultados de la prueba se grafican con respecto al cuadrado del torque para calcular las pérdidas por dispersión de carga.

Es obvio que los niveles de carga más altos tendrán una mayor influencia que los niveles más bajos de carga a la hora de la extrapolación lineal con respecto al torque inicial, esto debido al efecto magnificador de la función cuadrada. Algo similar ocurre en las pruebas en vacío a la hora de determinar los niveles de tensión a ser realizadas para la determinación de las pérdidas por fricción y ventilación usando la técnica de regresión.

En la Tabla N° 4.7 se resumen más diferencias entre ambos métodos. [17]

b) Beneficios y Complicaciones

La aplicación de alguno de los métodos normados garantiza un resultado altamente preciso y da mayor confianza para tomar decisiones correctas con respecto al reemplazo de un motor por otro de mayor eficiencia. Siempre que las pruebas se realicen en laboratorios certificados, con operarios experimentados y equipos probados, se puede tener plena confianza en los resultados obtenidos, ya que estos métodos sobretodo llevan el respaldo de instituciones internacionales de mucho prestigio.

Desde el punto de vista ingenieril se obtienen los beneficios anteriormente mencionados, pero visto desde el punto de vista económico, la realización de las pruebas según los métodos normados implican muchos gastos y pérdidas que toda industria desea evitar en un proceso de evaluación.

El traslado del motor desde la planta industrial hasta el laboratorio se puede convertir en un gasto grande. Para el caso del Perú, la mayoría de las grandes plantas industriales se ubican en las afueras de las ciudades, y los laboratorios dentro de éstas últimas. La situación se complica más aún al notar que no todas las ciudades del país cuentan con algún laboratorio que esté certificado para hacer este tipo de pruebas. Por la geografía propia de nuestro país, tan accidentada, a veces puede ser muy complicado el traslado por tierra de grandes motores, y así el costo de traslado podría ser muy elevado.

Junto con el elevado costo y las largas distancias que implica el traslado, el tiempo que el motor o los motores están fuera de servicio, el mismo tiempo que algunas áreas o procesos se detienen, se interpreta como ganancias económicas que la industria deja de

percibir, y que no equivalen al gasto que se realiza sólo para la determinación de la eficiencia de un motor que venía realizando sus funciones aparentemente bien. Esa es una explicación aproximada de cómo los administradores económicos de las industrias interpretan el costo – beneficio de un estudio energético usando los métodos normados.

Siendo la motivación actual global, y en especial la de este estudio, lograr la difusión y concientización de la necesidad de ahorro de energía en base a estudios y aplicaciones energéticas, es que también se han estudiado y desarrollado métodos que permiten la determinación de la eficiencia solamente con mediciones que se pueden realizar en campo. De esa manera se descartarían o minimizarían muchas de las complicaciones que trae la aplicación de los métodos normados.

4.2.2 Métodos de Campo

En vista de las grandes implicancias económicas que trae consigo la aplicación de los métodos normados para la determinación de la eficiencia de un motor eléctrico, muchos profesionales y empresas comprometidas con los estudios energéticos, en base a su experiencia acumulada y a estudios comparativos, han desarrollado métodos prácticos que no exigen el retiro de los motores de su lugar de trabajo, e inclusive hay algunos que no exigen siquiera el desacoplamiento de la máquina.

Como los motores eléctricos son piezas fundamentales en la mayoría de los procesos industriales, se considera más efectivo si el análisis de eficiencia se logra hacer mientras que los motores se encuentren en operación. Pocas son las ocasiones en las que se puede conseguir la interrupción de los procesos, y antes de cualquier intervención en los motores el sistema debe ser eléctricamente desconectado. Cumpliendo esa exigencia es que los métodos de campo no intrusivos están consiguiendo cada vez más aceptación, ya que sus pruebas se pueden realizar durante los periodos de mantenimiento que son regularmente programados con anticipación, consiguiendo de esa manera una reducción en los costos por el tiempo fuera de servicio.

Como se puede entender, existe una cantidad interesante de métodos propuestos a nivel mundial. Cada uno de ellos con requerimientos de mediciones distintas, con procedimientos de cálculos distintos, con niveles de intrusión y precisión distintos.

En este apartado, primero se van a mencionar algunas inspecciones previas que se deben realizar en el sistema eléctrico donde se encuentran los motores a analizar, para minimizar los errores en los resultados. Luego se hará una presentación en resumen de aproximadamente 30 métodos de campo conocidos a nivel mundial, haciéndose una breve explicación de los más utilizados, para finalmente explicar de manera detallada dos de esos métodos, escogidos por su fácil aplicación, mínima intrusión y gran utilidad demostrada a lo largo de los años [4].

a) Evaluación del Sistema Eléctrico

Antes de la toma confiable de mediciones en campo, se debe examinar minuciosamente el sistema de distribución eléctrica de la planta. La tensión del sistema y el balance de la tensión entre fases deben encontrarse dentro de los límites permitidos para poder conseguir mediciones confiables y útiles sobre el funcionamiento del motor.

Para el caso del Perú, los sistemas de corriente alterna deberán tener una frecuencia nominal de 60 Hz, y se podrán utilizar los siguientes niveles en Baja Tensión: 380/220V y 440/220V. “Las tolerancias admitidas sobre las tensiones nominales de los puntos de entrega de energía, en todas las etapas y en todos los niveles de tensión, es de hasta el $\pm 5,0\%$ de las tensiones nominales de tales puntos. Tratándose de redes secundarias en servicios calificados como Urbano-Rurales y/o Rurales, dichas tolerancias son de hasta el $\pm 7,5\%$. Asimismo, la tolerancia admitida para media tensión de acuerdo a la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Rurales, es de 6.0% ” [18].

Siendo el caso de estudio aquellos motores trifásicos de baja tensión, y haciendo cumplir lo que dice el CNE de igual manera para el sistema de eléctrico interno de una planta industrial, la tolerancia de tensiones en los puntos de entrega debe ser como se indica en la Tabla N° 4.8:

Tabla N° 4.8 Tolerancias de caída de tensión en los puntos de entrega, para distintas tensiones nominales [18]

Tensión Nominal [V]		220	380	440
Máxima Caída de Tensión [V]	Zona Urbana	11	19	22
	Zona Rural	16.5	28.5	33

Como las variaciones diarias o semanales de la tensión pueden exceder los rangos permitidos, las medidas tomadas en un momento pueden inducir al error. Cuando el promedio en el tiempo de la tensión trifásica excede los rangos de valores de la Tabla N° 4.8, el sistema se considera disconforme. Antes de realizar las pruebas en campo a los motores, se deben tomar acciones para corregir la sobretensión y sub tensión del sistema. Dichas acciones de corrección deben empezar contactando a la empresa suministradora del servicio eléctrico.

El desbalance de tensión se identifica cuando existen tensiones desiguales en los terminales eléctricos del motor. El desbalance de tensión se define como 100 veces la máxima desviación entre la tensión de línea y la tensión promedio, dividido sobre la tensión promedio (Ver Anexo C). La NEMA especifica como valor máximo para la realización de las pruebas en campo que el desbalance de tensión no sea mayor al 1%,

mientras que la IEEE es un poco más exigente y especifica como requerimiento que las pruebas se realicen siempre y cuando el desbalance de tensión no exceda de 0.5%. Con un buen diseño del sistema de distribución eléctrico de la planta, el valor del desbalance de tensión a la altura del suministro debe ser el mismo que en el punto de alimentación del motor. La diferencia en el balance de las tensiones se ocasiona por caídas de diferencia de tensión entre el suministro y los centros de carga, por la presencia de cargas monofásicas mal ubicadas entre las fases, y por la presencia de transformadores en delta abierto o estrella abierta.

b) Métodos de campo existentes

Es necesario recopilar información que permita identificar aquellos motores con eficiencia baja para que se puedan llevar a cabo las acciones apropiadas con el objetivo de reemplazar dichos motores, para mejorar la eficiencia de todo el sistema, para ajustar la calibración de los controles de los motores, para seleccionar apropiadamente la potencia de los motores, etc.

En la Tabla N° 4.9, se muestra una compilación de casi 30 métodos que han sido desarrollados para la determinación de la eficiencia en campo. En las columnas se indica cuales son aquellas mediciones y pruebas que cada uno de estos métodos necesitan, y al extremo derecho de la tabla, se muestra información aproximada sobre sus niveles de precisión, nivel de intrusión y posible costo de implementación.

De los datos de la tabla se puede observar que 24 de los métodos listados requieren información de placa para sus procedimientos de cálculo, lo que sugiere un acuerdo en el criterio internacional para delimitar las tolerancias del deslizamiento y de la eficiencia. Así también, para las mediciones de la potencia de ingreso, la tensión, la corriente y la velocidad, que son mediciones recurrentes en los diferentes métodos, es necesario establecer exigencias con respecto a la precisión y exactitud de los equipos. Es importante mencionar que los analizadores de potencia de redes son una opción importante a la hora de seleccionar un método de medición, ya que en general, ofrecen una buena precisión, lo que aumenta la exactitud y reduce el porcentaje de error a la hora de evaluar la eficiencia de los motores.

Con respecto a los niveles de intrusión, en la tabla se puede observar que mientras más intrusivo sea el método, la estimación de la eficiencia será más precisa, y su implementación será más costosa, por lo que tendrá un menor uso en la industria. Los esfuerzos por reducir los niveles de intrusión afectan la precisión de los métodos.

En consecuencia, los especialistas en el tema necesitan conocer el procedimiento de varios métodos, ya que no siempre podrán contar con todas las variables para poder usar un determinado método, pero sí para utilizar otro. De esa manera, elegirán aquel

método que puedan desarrollar y que le permita la obtención de datos con la precisión adecuada para que los resultados finales sean lo suficientemente confiables.

Tabla N° 4.9 Métodos existentes para la determinación de la eficiencia en campo [4].

Variables Métodos	Información de Placa	Corriente de Ingreso	Velocidad (RPM)	Corriente nominal	Tensión en los terminales	Potencia de Ingreso	Factor de Potencia nominal	Prueba en vacío	Factor de potencia en vacío	Corriente en vacío	Prueba con carga	Resistencia del Estator caliente	Resistencia del estator frío	Medida del torque en el eje	Nivel de Intrusión	Precisión	Economía
Datos de placa	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NI	B	B
Deslizamiento Estandar	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	PNI	B	A
Ontario Hydro con deslizamiento compens	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	PNI	B	A
Deslizamiento Límite Superior	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NI	B	A
Motor Master+Deslizamiento	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NI	MB	B
Motor Master +Corriente	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NI	MB	B
Motor Master+Potencia de ingreso	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	PNI	MB	M
IEEE 112, Método F1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	I	MA	A
Ontario Hydros método F1 simplificado	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	PI	MA	M
ORMEL 96	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	I	MB	M
Rockwell Efficiency Wizard	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	PI	A	M
Rotor Bloqueado	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	PI	A	M
Standstill Fred.Reps.	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	I	A	A
IEEE 112, Método E1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	I	A	B
Hirzel modificado Método E1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	PI	MA	M
Ontario Hydro (OHME)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	NI	MA	M
Nielsen E1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NI	A	M
Becnel, Kigore & Merrill	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	I	A	M
Volsegang & Benning opción 1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	PI	MA	M
Volsegang & Benning opción 2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI	NO	PNI	A	M	
Vectron ECNZ	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI	NO	PI	A	M	
Estonerline ANGUS	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	SI	NO	PI	MA	B
Corriente	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	PI	MB	B
Torque entrehierro	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	PI	MB	M
Torque del eje	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI	I	A	M
Sillex	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	PNI	MA	M
Sentech	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	I	A	M
Hon y Chen	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	PI	MB	M
Conexión Delta-Estrella	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	PI	MB	M

* Donde NI=No Intrusivo, PNI=Parcialmente No Intrusivo, PI=Parcialmente Intrusivo, I=Intrusivo, B= Bajo, MB= Medio Bajo, M= Medio, MA= Medio Alto, y A= Alto.

• Método del Deslizamiento

Basado en la peculiaridad de la curva Carga vs Deslizamiento de los motores (casi lineal desde el 10% hasta el 110% de su carga nominal), se asume que hay una relación directa entre el deslizamiento con carga y la potencia de salida.

De esa manera se puede saber a qué porcentaje de su potencia nominal se encuentra trabajando el motor y consecuentemente saber su eficiencia.

También se necesitan los datos nominales de placa y datos eléctricos de entrada, que se pueden conseguir con equipos de medición tradicionales.

Para la determinación del deslizamiento se necesita la medición de la velocidad de trabajo, que para evitar un margen de error muy amplio, se recomienda su obtención a través de un estroboscopio digital.

Hay que tener presente el margen de error de medición que se puede filtrar por las variaciones de tensión, habiendo maneras de reducirlo teniendo consideraciones especiales a la hora del cálculo de la eficiencia.

Este método va a dar como resultado una eficiencia subestimada, pero que siempre estará dentro del 20% de margen de tolerancia para el deslizamiento según normas como NEMA MG1 y IEC 60034-1, lo cual permite que sea un método apropiado para un cálculo aproximado inicial de la eficiencia. Más adelante se hará una explicación más detallada del procedimiento de este método.

- **Método de las Eficiencias Ajustadas**

Este método también es poco intrusivo y de fácil aplicación, por lo que ha conseguido gran aceptación entre los especialistas dedicados al tema. Se toma como valor inicial y referencial la eficiencia nominal. En caso dicho parámetro no se pueda leer de entre los datos de placa del motor, en base a la potencia nominal, tensión nominal y velocidad nominal, por catálogos se escoge la eficiencia al 100% del modelo correspondiente.

Con los datos medidos, potencia eléctrica de entrada y tensión promedio, junto con la eficiencia nominal, se calcula el factor de carga referencial. De esa manera se tienen los datos suficientes para determinar la eficiencia de funcionamiento. Usando tablas de eficiencias para distintos factores de carga, se identifican los valores de eficiencia para los factores de carga superior e inferior al ya calculado, y con esos valores de eficiencia, en base a una fórmula de iteración, se determina una primera eficiencia de operación del motor.

Este método se caracteriza principalmente por tomar en cuenta casi todos los factores externos que afectan la eficiencia, y que muchos otros métodos no consideran. Factores como el desbalance de tensión, la diferencia de tensión entre fases, el número de rebobinados del motor, etc. Para la determinación de cada uno de estos factores, se han desarrollado fórmulas que describen curvas de tendencia, que se han elaborado en base a la experiencia de años.

Este método es presentado por el organismo denominado "Fideicomiso para el Ahorro de Energía de México". Más adelante se hará una explicación más detallada del procedimiento de este método.

- **Método usando Datos de Placa**

Es el método menos intrusivo de todos, ya que la información con la que se trabaja es la misma que aparece en la placa del motor. En este método se asume que la eficiencia del motor es constante e igual a la indicada en la placa. Esta asunción tiene mayor funcionalidad cuando la curva eficiencia vs carga es más plana, de manera que se puede considerar la eficiencia nominal igual en cualquier condición de carga.

La mayoría de los motores industriales funcionan con un factor de carga igual a 75%. Se puede evaluar la precisión de este método comparando distintas curvas de eficiencia vs carga de motores con distintos polos y potencias. En la figura 4.5 se puede apreciar que para un motor de 1 HP y 2 polos con factores de carga entre 50% y 100%, la eficiencia varía mucho con la carga. Sin embargo, para un motor de 8 polos, se puede ver que su eficiencia se reduce notoriamente con factores de carga reducidos. Por ese motivo, el Método usando los Datos de Placa puede ser funcional para algunos motores, pero para otros puede otorgar muchas imprecisiones.

Las condiciones de campo menos ideales para aplicar este método es cuando se tiene un motor menor a 10 HP y que ha sido rebobinado sin cumplir los estándares de la Asociación de Servicio de Aparatos Eléctricos (EASA, por sus siglas en inglés). O cuando la información que viene en la placa no está de acuerdo a algunas de las normas internacionales previamente mencionadas, y peor si es que el ambiente de trabajo tiene mucha suciedad. En esos casos la eficiencia real puede estar más del 10% por debajo de la eficiencia nominal de placa. Sin embargo, se debe tener presente que como último recurso, la aplicación de este método es mejor que la omisión total de una evaluación en campo.

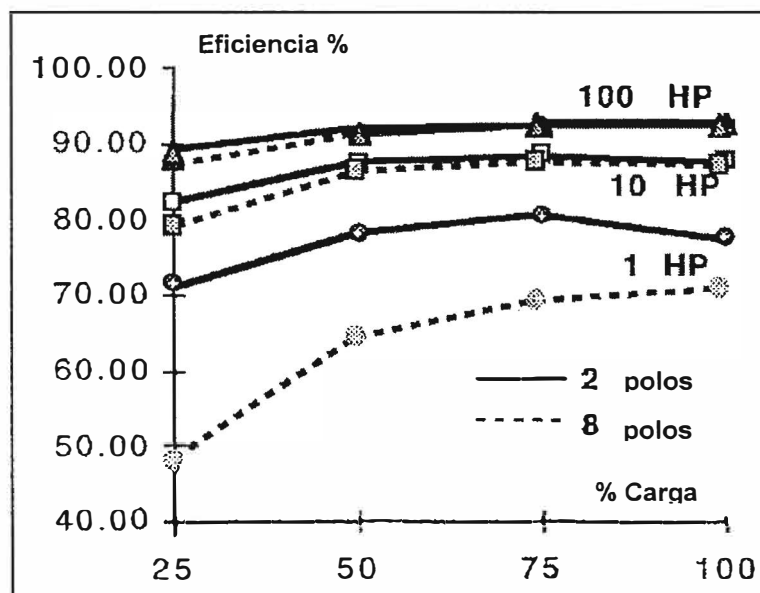


Fig. 4.5 Curvas típicas de eficiencia vs carga [19]

- **Método de la Corriente Eléctrica (con compensación de corriente reactiva)**

Este otro método también necesita de los datos de placa y de pocos datos medidos en campo. Este método se caracteriza por su facilidad de aplicación, ya que sólo es necesario medir la potencia de entrada y la corriente de operación del motor. Se basa en la premisa de que la proporción entre la potencia en el eje y la potencia nominal va en relación a la proporción entre la corriente promedio y la corriente nominal, según la fórmula (4.13):

$$P_{eje} = \left(\frac{I_{prom}}{I_{nom}} \right) \times P_{nom} \quad (4.13)$$

Como consecuencia de su simplicidad, carece de una gran precisión en comparación a los datos obtenidos en laboratorio. Para reducir los márgenes de error, a la hora del cálculo de la eficiencia se agrega un factor relacionado con la corriente de compensación reactiva [4].

$$\eta = \left(\frac{2 \times I_{prom} - I_{vacío}}{2 \times I_{nom} - I_{vacío}} \right) \times \left(\frac{P_U}{P_T} \right) \quad (4.14)$$

- **Método de las Pérdidas segregadas**

Este método estima las magnitudes de cada uno de los cinco tipos de pérdidas que se pueden identificar en un motor eléctrico.

- Pérdida en la resistencia del estator. Se calcula por fórmula fija.
- Pérdidas en la resistencia del rotor. Se calcula por fórmula fija.
- Pérdidas en el Núcleo Magnético. Se calcula según el Método IEEE112-E, modificado por el Ontario Hydro (Método OHME).
- Pérdidas por Fricción y ventilación. Se calcula según el Método IEEE112-E, modificado por el Ontario Hydro (Método OHME).
- Pérdidas por Dispersión de Carga. El cálculo de estas pérdidas es una de las dificultades de este método por ser donde más imprecisiones se generan.

Este método usa las aproximaciones del Método OHME el cual aplica los valores asumidos según IEEE 112-E1 para las pérdidas por dispersión de carga.

La implementación de este método es relativamente fácil, aunque tiene algunos errores de origen metodológico a la hora de la estimación de las pérdidas. A pesar de eso, su aplicación es muy útil para el cálculo de la eficiencia ya que su error absoluto está en el orden del 3% [4].

- **Método del torque en entrehierro**

Este método utiliza el producto del Torque en el entrehierro por la Velocidad de giro del rotor como la Potencia Mecánica en el entrehierro para realizar el cálculo de la eficiencia del motor.

Una versión más sofisticada de este mismo método, desarrollada por el Laboratorio Nacional Oak Ridge (ORNL, según sus siglas en inglés) de Tennessee - EEUU, utiliza las formas de onda de la tensión y corriente como información inicial. Esta información puede ser usada para detectar defectos como rajaduras en las barras del rotor, cortocircuitos entre espiras del estator, y para la evaluación de la presencia de armónicos.

Las fórmulas principales de este método son las siguientes:

$$P_T = \frac{\int_0^T (V_A I_A + V_B I_B + V_C I_C) \cdot dt}{T} \quad (4.15)$$

La ecuación del torque en el entrehierro es:

$$\tau [N \cdot m] = \frac{p \cdot \{(I_A - I_B) \cdot \int [V_{CA} - R(I_C - I_A)] - (I_C - I_A) \cdot \int [V_{AB} - R(I_A - I_B)]\}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (4.16)$$

Por lo que la eficiencia se calcula en base a la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{[(\tau) \cdot (2\pi) \cdot \left(\frac{n_{sin}}{60}\right) - (P_m) - (P_{SLL})]}{P_T} \quad (4.17)$$

Donde:

V_A, V_B, V_C son las tensiones de fase de entrada.

I_A, I_B, I_C son las corrientes de línea de entrada.

T , es el período.

p , es el número de polos.

V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} son las tensiones de línea de entrada.

R , es la mitad de la resistencia entre líneas.

n_{sin} , es la velocidad síncrona.

P_m son las Pérdidas mecánicas (ventilación y fricción).

P_{SLL} son las Pérdidas por dispersión de carga.

Para el cálculo de las pérdidas se usan los siguientes métodos:

- Las pérdidas en los devanados, por fricción y ventilación, se estiman usando la aproximación recomendada por la norma IEEE 112-E, modificado por el Ontario Hydro (Método OHME).
- Para la estimación de las pérdidas por dispersión de carga se usa el método de cálculo propuesto en la norma IEC 60034-2-1, que ofrece una mayor precisión que la aproximación recomendada por la IEEE 112-1 y la del IEC 60034-2.
- La resistencia puede ser calculada usando un factor de corrección de temperatura según la norma IEC-60034-30.
- A la hora de hacer la medición de la velocidad, lo más recomendable es hacerlo con un estroboscopio digital.

Varios resultados experimentales demuestran que éste es un método muy preciso y poco invasivo, y el valor obtenido de la eficiencia es ideal para la toma de decisiones sobre el motor en estudio [19].

- **Método de Rockwell Motor-Efficiency Wizard (RMEW)**

Primero se des-energiza el motor, se mide la resistencia de línea a línea a la entrada. Se mide la temperatura del motor y del cable con un sistema infrarrojo, y se registra la distancia del cable de entrada.

Se conecta un monitor de potencia y uno de frecuencia a la caja de arranque del motor y se comienza el envío de datos a un ordenador portátil (que cuenta con un software propietario).

Se registran los datos de placa y el diámetro del ventilador.

Se enciende el motor y se lleva al nivel de carga normal. Se toman medidas de la temperatura y de la velocidad con carga nominal y con carga ligera.

Los datos obtenidos en los dos puntos de carga se usan para calcular los parámetros del circuito equivalente monofásico del motor en estado permanente. Así se consiguen las pérdidas en los devanados del estator y del rotor.

Las pérdidas por dispersión de carga se estiman según las fórmulas de la norma IEEE 112-1.

Las Pérdidas por fricción y ventilación se determinan a través de datos del motor teniendo como variables al diámetro del ventilador y la velocidad de giro.

Habiendo armado el circuito equivalente se logran elaborar todas las curvas necesarias (eficiencia, torque, potencia, factor de potencia y corriente vs velocidad o carga).

Resultados experimentales comparativos garantizan una alta precisión en sus mediciones y resultados [20].

4.3 Método del Deslizamiento

El Método del deslizamiento tiene su base en el uso de los valores de la velocidad nominal, velocidad síncrona y velocidad real, parámetros que se explicaron en el apartado 4.1.3. Es por ello que este método sólo es aplicable cuando es posible la medición de la velocidad real en el campo. En el apartado 4.1.3a) se dan valores de la velocidad síncrona para 50Hz y 60Hz.

4.3.1 Datos de placa

Este método también hace uso de los datos de placa, es por ello que unos de los primeros parámetros con los que se debe contar con seguridad son la Potencia Nominal [HP], la Tensión Nominal [V] y la velocidad nominal [RPM]. En condiciones reales los datos de placa son muy ilegibles o la placa en sí ya no se encuentra en su posición

original. De encontrarse en una situación similar, en toda industria con seguridad llevan un registro de la Potencia Nominal de cada motor, la Tensión Nominal se puede concluir de la tensión del sistema a la que el motor pertenece, y con la suficiente experiencia se puede reconocer rápidamente la velocidad síncrona con sólo observar al motor en funcionamiento. Luego, con la información de la Potencia Nominal, Tensión Nominal y Velocidad Síncrona, se puede conseguir la velocidad nominal recurriendo a catálogos de motores de la misma marca.

El primer cálculo que se puede realizar en base a la información acumulada hasta este punto es el deslizamiento nominal. Este parámetro se explicó en el apartado 4.1.3d), y se definió según la fórmula (4.4) de la siguiente manera: $s_{nom} = n_{sin} - n_{nom}$ [RPM].

4.3.2 Datos Medibles

Seguidamente se debe proceder a la obtención de parámetros medibles. Tratando siempre de contar con un equipo analizador de redes, éste podrá registrar las tensiones entre líneas, las corrientes y factores de potencia de cada fase. Estos equipos se pueden programar para que de manera automática en su reporte muestren la tensión y corriente promedio, y también la potencia activa promedio. Pero en caso sólo se cuente con las tensiones entre líneas, las corrientes de fases y los factores de potencia de fase, se puede calcular la Potencia Activa (Potencia Total de Entrada) de la siguiente manera:

Siendo V_{rs}, V_{st}, V_{tr} las tensiones entre líneas, la tensión promedio será:

$$V_{prom} = \frac{V_{rs} + V_{st} + V_{tr}}{3} \text{ [V]} \quad (4.18)$$

Siendo I_r, I_s, I_t las corrientes de fases, la corriente promedio será:

$$I_{prom} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3} \text{ [A]} \quad (4.19)$$

Siendo fdp_r, fdp_s, fdp_t los factores de potencia de fases, el factor de potencia promedio será:

$$fdp = \frac{fdp_r + fdp_s + fdp_t}{3} \quad (4.20)$$

Y la Potencia Activa se calcularía según la fórmula (4.21):

$$P_T = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{prom} \cdot I_{prom} \cdot fdp}{1000} \text{ [kW]} \quad (4.21)$$

El último parámetro que faltaría medir, es la velocidad real, para lo cual se recomienda usar un tacómetro óptico de alta precisión con pantalla digital de hasta tres decimales. Con este valor, se procede a calcular el deslizamiento real, que como se explicó en el apartado 4.1.3d), se realiza según la fórmula $s = n_{sin} - n$ (4.6):

4.3.3 Factor de carga básico

El punto clave y la característica principal del Método del Deslizamiento, está en su manera de calcular el factor de carga y por ende su potencia en el eje, que no se puede medir directamente. Este método se basa en la generalización gráfica de que el deslizamiento real está en proporción directa con la carga en el eje. Eso quiere decir que si el deslizamiento real equivale al 50% del deslizamiento nominal, la Potencia Útil en el eje será aproximadamente el 50% de la Potencia Activa registrada al ingreso del motor, tal y como se puede apreciar en la figura 4.6.

$$\left(\frac{s}{s_{nom}}\right) \cdot 100 = \left(\frac{P_{eje}}{P_{nom}}\right) \cdot 100 = fdc \quad (4.22)$$

De esa manera, el factor de carga (fdc), explicado en el apartado 4.1.6 se determina según la fórmula (4.23):

$$fdc = \left(\frac{s}{s_{nom}}\right) \cdot 100 [\%] \quad (4.23)$$

Conociendo el factor de carga se puede calcular la **Potencia mecánica en el eje** (P_{eje}), en base a la Potencia Nominal, según la fórmula (4.24):

$$P_{eje} = \frac{(P_{nom}) \cdot (fdc)}{(100)} \quad [\text{HP}] \quad (4.24)$$

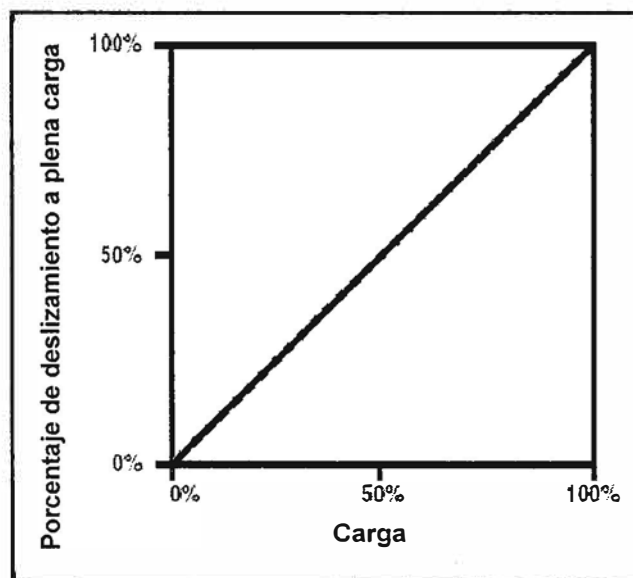


Fig. 4.6 Porcentaje de deslizamiento del motor en función de la carga [21].

4.3.4 Determinación de la eficiencia

Para calcular la eficiencia, se necesita tener la Potencia a la salida y la Potencia al ingreso en las mismas unidades. Para la Potencia al ingreso se considera la Potencia Activa, que se calculó al inicio y se encuentra en kW. Para la Potencia de salida se cuenta con la Potencia mecánica en el eje, recientemente calculada, pero que se encuentra en

HP, por lo que se tiene que representar en kW también, haciendo la operación respectiva y obteniendo la **Potencia Útil (P_U)**, según la fórmula (4.25):

$$P_U = (P_{eje}) \cdot (0.746) \text{ [kW]} \quad (4.25)$$

Con los datos obtenidos hasta este punto ya se puede proceder a la determinación de la eficiencia del motor. Recordando que la eficiencia es la relación de la Potencia a la salida del motor sobre la Potencia al ingreso del mismo, se puede expresar según la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.26)$$

Este método ha sido favorecido debido a su simplicidad y sus ventajas en seguridad. Los dos parámetros de un motor que son más fáciles de medir son la temperatura y la velocidad. La mayoría de motores se construyen de manera que un tacómetro óptico o una luz estroboscópica tengan acceso al eje.

Sin embargo, la precisión del método del deslizamiento es limitado por múltiples factores. Primero, hay una amplia tolerancia con respecto al uso de la velocidad de placa a plena carga. Segundo, a cualquier nivel de carga, el deslizamiento varía de manera inversa ante el cuadrado de la tensión a la entrada del motor (Ver Anexo A). Tercero, el deslizamiento se ve afectado por la resistencia del rotor, lo que en consecuencia, lo vuelve dependiente de la temperatura de operación. El punto faltante recae en el error que provocan los operadores. Los tacómetros son instrumentos muy sensibles y el hecho de que las pruebas en un motor con carga constante se realicen por varios operadores, significa que las lecturas de la velocidad pueden variar en ± 2 RPM.

La mayor fuente de incertidumbre relacionada al uso del método del deslizamiento está en el uso de la velocidad nominal que los fabricantes imprimen en las placas. Para ese parámetro, la norma NEMA MG 1-12.46 establece una tolerancia de $\pm 20\%$ del deslizamiento nominal con respecto a una **velocidad ideal nominal** referencial, esta última obtenida para condiciones de tensión, frecuencia y potencia nominales, y para una temperatura ambiente de 25°C . Esto quiere decir, por ejemplo, que para un diseño de un motor de una potencia cualquiera, cuya velocidad síncrona sea 1800 RPM, idealmente debería tener una velocidad nominal de 1760 RPM, valor que se toma como referencia y que ofrece un deslizamiento nominal ideal igual a 40 RPM. El $\pm 20\%$ del deslizamiento nominal ideal sería igual a ± 8 RPM, siendo éste el valor que se le suma a 1760 RPM. De esa manera, varios fabricantes pueden especificar velocidades nominales distintas para un mismo diseño de motor con valores entre 1752 a 1768 RPM, y seguirían estando dentro de lo permitido por la norma. [8] [21]

La norma IEC 34-1 establece una tolerancia de $\pm 30\%$ del deslizamiento nominal para aquellos motores con potencia nominal menor a 1 kW, y de $\pm 20\%$ del deslizamiento nominal para motores de potencia nominal igual o mayor a 1 kW. [22]

Debido a esa amplia tolerancia, generalmente los fabricantes redondean los valores de la velocidad nominal a algún múltiplo de 5 RPM., valor equivalente a un pequeño porcentaje de la velocidad nominal y que podría considerarse como insignificante. Pero como el método del deslizamiento se basa en la diferencia entre la velocidad nominal y la síncrona, considerando como "ideal" un deslizamiento de 40 RPM, una diferencia de 5 RPM provocaría un cambio del 12% en la carga calculada.

4.3.5 Factor de carga corregido con respecto a la tensión

El deslizamiento también varía de manera inversa con el cuadrado de la tensión (Ver Anexo A). Eso quiere decir que cuando la tensión aumenta, el deslizamiento disminuye (la velocidad real aumenta). Una manera de corregir esta desviación, es multiplicando cada deslizamiento por el valor de su respectiva tensión al cuadrado, en la fórmula del factor de carga, tal como se muestra en la fórmula (4.27):

$$fdc = \left(\frac{s}{s_{nom}} \right) \cdot \left(\frac{V_{prom}}{V_{nom}} \right)^2 \cdot 100 \quad (4.27)$$

Pruebas y estudios de laboratorio han comprobado que usando el factor de carga que usa este método originalmente, expresado en la fórmula (4.23), se determina una carga menor a la que realmente mueve el motor, o sea se subestima la carga real, y esto debido a la asunción mostrada en la figura 4.6, ya que realmente esa "recta" tiene una ligera curvatura[4]. Con la inserción de un factor de corrección de la tensión, lo que se consigue es obtener un valor de carga mayor, o sea más aproximada a la realidad, y así disminuir las imprecisiones y los errores en los resultados. Pero es importante resaltar que esto sólo es de ayuda cuando la tensión promedio es mayor a la nominal, ya que en caso sea menor a la nominal, lo que se conseguiría sería reducir el valor del factor de carga, lo cual no es conveniente ya que de por sí el factor de carga está subestimado. Es necesario tener este punto muy en cuenta.

4.3.6 Factor de carga, propuesta alternativa

Con la intención de seguir mejorando la precisión de este método, se le pueden hacer ciertos cambios adicionales a la fórmula del factor de carga, sin tener que aumentar la complejidad del cálculo ni aumentar su nivel de intrusión.

Según la definición del factor de carga que se dio en el apartado 4.1.6, este parámetro se puede expresar según la fórmula (4.28):

$$fdc = \frac{P_{eje}}{P_{nom}} * 100 \quad [\%] \quad (4.28)$$

Dicha fórmula representa la proporción de la potencia real con respecto a la potencia nominal ambos a la salida del motor.

En el caso de un motor, que ofrece movimiento giratorio, toda potencia se puede expresar en función del Torque y de la velocidad con que gira su eje, como se explicó en el apartado 4.1.4. Siendo así, la Potencia Real (P_{eje}) depende directamente de la velocidad real y del Torque (τ) desarrollado a dicha velocidad. Y, de la misma manera, la Potencia nominal (P_{nom}) depende directamente de la velocidad nominal y del Torque a plena carga. (τ_{nom}). Entonces tendremos las siguientes fórmulas:

$$P_{eje} = n \cdot \tau \cdot \frac{\pi}{30} \quad (4.29)$$

$$P_{nom} = n_{nom} \cdot \tau_{nom} \cdot \frac{\pi}{30} \quad (4.30)$$

Según la representación generalizada y abreviada que se presentó en el apartado 4.1.2, el Torque se puede expresar en función de una constante K y el porcentaje de deslizamiento (z) (Ver Anexo A). Entonces, cada uno de los Torques con los que estamos trabajando, se pueden representar de la siguiente manera:

$$\tau = K \cdot z \quad (4.31)$$

$$\tau_{nom} = K \cdot z_{nom} \quad (4.32)$$

En el apartado 4.1.3d) se explicaron y representaron las fórmulas correspondientes a los porcentajes de deslizamiento. De las fórmulas (4. 5) y (4. 7) se pueden despejar la velocidad real y nominal y expresarlas en función del porcentaje de deslizamiento:

$$n = n_{sin} \cdot (1 - z) \quad (4.33)$$

$$n_{nom} = n_{sin} \cdot (1 - z_{nom}) \quad (4.34)$$

Reemplazando las cuatro últimas expresiones en las fórmulas (4.29) y (4.30), las potencias se pueden expresar de la siguiente manera.

$$P_{eje} = n_{sin} \cdot (1 - z) \cdot K \cdot z \cdot \frac{\pi}{30} \quad (4.35)$$

$$P_{nom} = n_{sin} \cdot (1 - z_{nom}) \cdot K \cdot z_{nom} \cdot \frac{\pi}{30} \quad (4.36)$$

Por lo tanto la fórmula (4.28) se podría representar de la siguiente manera.

$$fdc = \frac{n_{sin} \cdot (1 - z) \cdot K \cdot z \cdot \frac{\pi}{30}}{n_{sin} \cdot (1 - z_{nom}) \cdot K \cdot z_{nom} \cdot \frac{\pi}{30}} \cdot 100 [\%] \quad (4.37)$$

$$fdc = \frac{(z - z^2) \cdot 100}{(z_{nom} - z_{nom}^2)} [\%] \quad (4.38)$$

Para simplificarlo se puede representar de la siguiente manera, al reemplazar z y z_{nom} por el respectivo cociente entre su deslizamiento y la velocidad síncrona.

$$f_{dc} = \frac{(s \cdot n_{sin} - s^2) \cdot 100}{(s_{nom} \cdot n_{sin} - s_{nom}^2)} \quad [\%] \quad (4.39)$$

A la fórmula obtenida también se le puede agregar el factor de corrección por desbalance de tensión, tal y como se hizo en la fórmula (4.27), pero se vuelve a resaltar el hecho que sólo es útil cuando la tensión promedio es mayor a la tensión nominal. Para cuestiones de este estudio no se va a considerar dicho factor, para poder presentar un método que pueda usarse tanto en condiciones de sobretensión o sub tensión. Queda a decisión del lector agregarle o no dicho factor de corrección

Para el cálculo de la nueva eficiencia corregida o ajustada, se prosigue con los pasos ya conocidos según las fórmulas (4.24) a (4.26). [22]

La temperatura es otro factor que se debe tener en cuenta. Las pruebas con dinamómetros y en campo confirman que conforme la temperatura del motor aumenta, la velocidad a plena carga del motor disminuye. Es común encontrar una diferencia de 4 RPM entre la velocidad a plena carga de un motor frío (temperatura del ambiente) y la velocidad de un motor caliente.

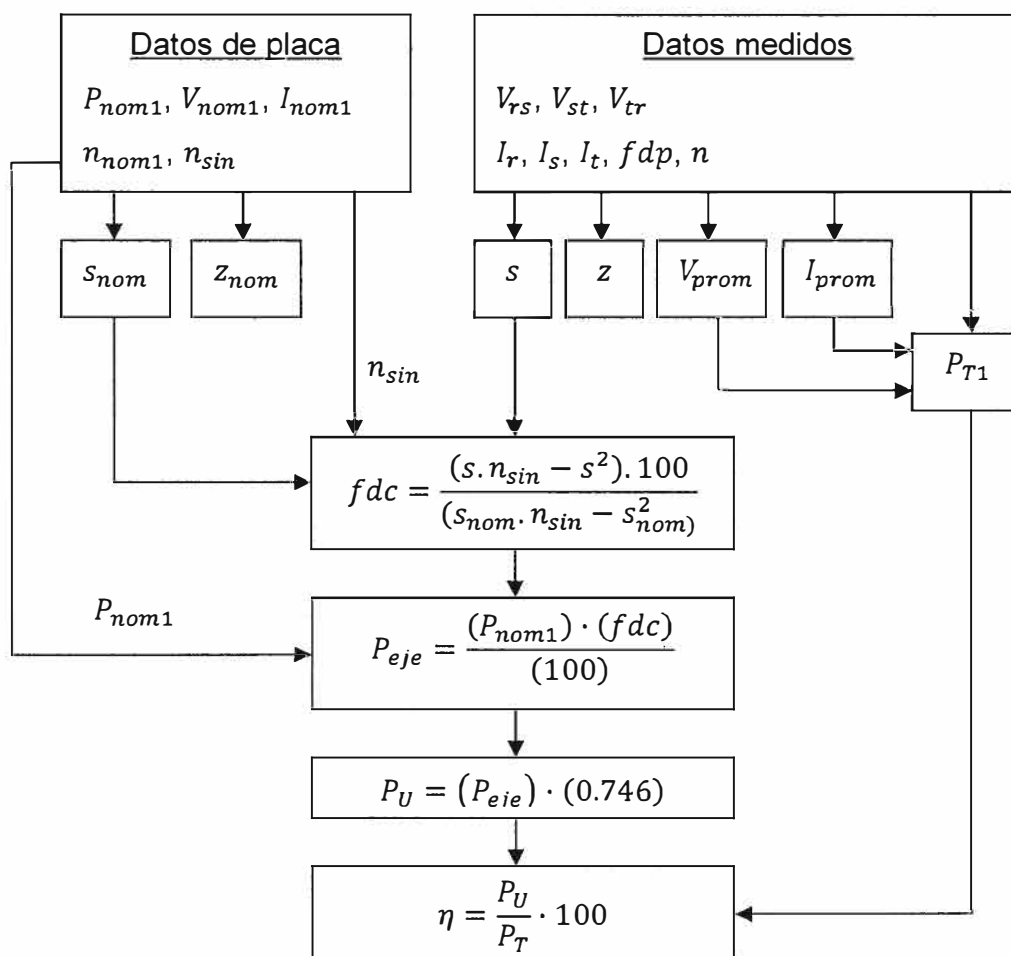


Fig. 4.7 Diagrama de bloques, proceso Método del Deslizamiento

Usando el sistema de secuencia de bloques, en la figura 4.7 se muestra un esquema que permite tener una idea clara y resumida sobre el procedimiento que utiliza el Método de Deslizamiento escogido para el cálculo de la eficiencia de un motor eléctrico.

4.4 Método de las Eficiencias Ajustadas

El Método de las Eficiencias Ajustadas es otro de los métodos de campo que ha conseguido gran aceptación entre los especialistas del tema. En su procedimiento de cálculo necesita de pocas variables medibles, ya que la gran mayoría de datos o se consiguen de catálogos o son de conocimiento del operador.

Lo más resaltante de este método desarrollado fundamentalmente por el FIDE de México, es la aplicación de factores que ayudan a corregir y mejorar la precisión de los resultados finales. Dichos factores corresponden a aquellas condiciones anormales del sistema en campo que siempre están presentes y que pocos métodos consideran, y son: la desviación y el desbalance de tensiones, y el número de rebobinados del motor.

Así como la gran mayoría de los métodos de campo, este método ha sido el producto de años de experiencia del FIDE, consiguiendo así un método que es confiable y que cumple con las tolerancias establecidas por las normas internacionales. Cabe resaltar que el FIDE toma como gran referente a la NEMA, por lo que los valores de eficiencia que ellos recomiendan son para motores NEMA.

Vale mencionar, que el procedimiento de cálculo de los métodos de campo es independiente del tipo de fabricación del motor, ya sea que haya sido construido según normas NEMA o IEC, por ejemplo. Pero en caso de usar valores de catálogos, tal y como lo hace este método de eficiencias ajustadas, sí es muy recomendable tener en cuenta el tipo de fabricación del motor, para que de esa manera el cálculo sea más preciso, y la conclusión final sea más acertada.

4.4.1 Datos de placa

Los datos de placa que se necesitan en un inicio son: la Potencia nominal [HP], la tensión nominal [V], la velocidad nominal o velocidad síncrona [RPM], y la eficiencia nominal [%]. Se trabajará con la velocidad síncrona, el cual será el inmediatamente superior a la velocidad nominal de entre los valores indicados en el apartado 4.1.3a), para su respectiva frecuencia de trabajo. A diferencia del método del deslizamiento, este método se puede aplicar cuando sea muy difícil la medición de la velocidad real.

Por simple inspección visual se puede identificar la clase de carcasa del motor: abierto o cerrado, característica que será importante para el procedimiento de cálculo. Al igual que es necesario conocer la eficiencia nominal del motor, que se puede conseguir de la placa, o sino de catálogos del fabricante, conociendo previamente los valores antes mencionados.

4.4.2 Datos medibles

Seguidamente se debe proceder a la obtención de los parámetros medibles. Tratando siempre de contar con un equipo analizador de redes, éste podrá registrar las tensiones entre líneas y las corrientes de cada fase, así como también los factores de potencia de fase. Estos equipos se pueden programar para que de manera automática en su reporte muestren la tensión y corriente promedio, y también la potencia activa promedio.

Pero en caso sólo se cuente con las tensiones entre líneas, las corrientes de fases y los factores de potencia de fase, se puede calcular la Potencia Activa (Potencia Total de Entrada) de la siguiente manera:

Siendo V_{rs}, V_{st}, V_{tr} las tensiones entre líneas, la tensión promedio será:

$$V_{prom} = \frac{V_{rs} + V_{st} + V_{tr}}{3} \text{ [V]} \quad (4.40)$$

Siendo I_r, I_s, I_t las corrientes de fases, la corriente promedio será:

$$I_{prom} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3} \text{ [A]} \quad (4.41)$$

Siendo fdp_r, fdp_s, fdp_t los factores de potencia de fases, el factor de potencia promedio será:

$$fdp = \frac{fdp_r + fdp_s + fdp_t}{3} \quad (4.42)$$

Y la Potencia Activa se calcularía según la fórmula (4.43):

$$P_T = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{prom} \cdot I_{prom} \cdot fdp}{1000} \text{ [kW]} \quad (4.43)$$

4.4.3 Factor de carga

Con los datos que se tiene ya se puede proceder a conocer el factor de carga al que está trabajando el motor en estudio. De acuerdo con el significado de factor de carga que se dio en el apartado 4.1.6, éste se calcula según la fórmula (4.44):

$$fdc = \frac{\eta_{nom} \cdot P_T}{0.746 \cdot P_{nom}} \text{ [%]} \quad (4.44)$$

Donde el producto $\eta_{nom1} \cdot P_T$, según la definición de eficiencia, es igual al equivalente eléctrico de la potencia desarrollada a la salida del motor, o Potencia útil [kW]. Y el producto $0.746 \cdot P_{nom1}$ es la conversión eléctrica de la Potencia mecánica nominal a la salida del motor, y también se expresa en [kW].

4.4.4 Eficiencia base

El valor base de la eficiencia para el motor en estudio, se obtiene luego de hacer una iteración con otros valores de eficiencia. Con los datos obtenidos hasta el momento:

diseño del motor (IEEE o IEC), clase del motor (abierto o cerrado), velocidad síncrona, y potencia nominal; en una tabla de eficiencias, se puede hacer un filtro hasta identificar la fila o columna que incluya los valores de eficiencia correspondientes a un motor con las características indicadas.

Para poder aplicar este método con mayor facilidad, se recomienda contar con tablas de eficiencia de motores para distintos valores de factores de carga (100%, 75%, y 50% de la carga nominal, por lo menos). De esa manera, teniendo el valor del factor de carga de operación del motor en estudio, se debe identificar el factor de carga inmediato superior (fdc_a) e inmediato inferior (fdc_b) de entre los valores que la tabla otorgue, ya que estos valores se utilizarán más adelante en el procedimiento de cálculo. Por ejemplo, si el factor de carga del motor resulta ser 83%, el fdc_a será 100%, y el fdc_b será 75%. Y en caso el factor de carga del motor sea 64%, el fdc_a será 75% y el fdc_b será 50%.

Una vez identificados el fdc_a y el fdc_b , se procede a ubicar los valores de eficiencia que se encuentra en su respectivas columnas (o filas, según sea la distribución de la tabla) y que coincidan con el tipo de motor previamente identificado, gracias a los parámetros iniciales, ya indicados.

A la eficiencia del motor, según el catálogo de referencia, para un factor de carga fdc_a se le denomina η_a , y a la eficiencia para un factor de carga fdc_b se le denomina η_b . La identificación de estos valores se puede realizar de manera manual o automatizada.

La eficiencia del motor en estudio se encuentra dentro un rango cuyo límite superior está definido por η_a y cuyo límite inferior está definido por η_b . Para el cálculo de nuestra eficiencia se recurre a una iteración matemática, representada en la fórmula (4.45):

$$\eta = \left(\frac{\eta_b - \eta_a}{fdc_b - fdc_a} \right) \cdot (fdc - fdc_a) + \eta_a \quad [\%] \quad (4.45)$$

El resultado de esta fórmula representa aquella eficiencia sin considerar irregularidades del sistema como desviación y/o desbalance de la tensión. Y es aquí donde el Método de las Eficiencias Ajustadas le hace honor a su nombre, ya que al valor de la eficiencia que hemos calculado se le van a aplicar ciertos factores de corrección para “ajustar” su valor y acercarlo más a las condiciones reales.

4.4.5 Factores de ajuste

Las condiciones del sistema eléctrico al que pertenece un motor en una planta industrial nunca son iguales a las nominales o ideales, o sea en casi la totalidad de los casos se tienen condiciones anormales de funcionamiento y eso se traduce en valores de la eficiencia más alejados de lo que en realidad son. En el Anexo C se hace una descripción más detallada de las condiciones anormales más comunes y de mayor influencia para el cálculo de la eficiencia en campo.

Para la formulación de un factor de ajuste de la variación de la tensión (fvv), se debe proceder de la siguiente manera. Primero se define una nueva variable llamada **variación de tensión** (vv), que se calcula según la fórmula (4.46):

$$vv = \left(\frac{V_{prom}}{V_{nom}} \right) - 1 \quad (4.46)$$

Luego, para determinar el valor del **factor de ajuste de la variación de la tensión** (fvv), de manera sencilla, se reemplaza el valor de vv en la fórmula (4.47), y se procede con el cálculo indicado:

$$fvv = (vv)[0.07 - 1.334 \cdot (vv)] - 0.009 \quad (4.47)$$

La formulación de un **factor de ajuste por diferencia de la tensión** (fdv) es igual de sencilla, sólo con algunas consideraciones extras. Primero se trabaja con las tensiones de fase que se obtuvieron con el analizador de redes y que fueron inicialmente analizadas para obtener la tensión promedio. Se debe identificar y seleccionar al valor mayor y menor de las tres tensiones de fase. Lo que matemáticamente se puede representar según las fórmulas (4.48) y (4.49) :

$$V_{fmax} = \text{Max}\{V_r, V_s, V_t\} \quad (4.48)$$

$$V_{fmin} = \text{Min}\{V_r, V_s, V_t\} \quad (4.49)$$

Donde V_{fmax} viene a ser el máximo valor entre las tensiones de fase y V_{fmin} viene a ser el mínimo valor entre las tensiones de fase. Estos valores se utilizan para hallar el valor de una nueva variable denominada **diferencia de tensión** (dv) según la fórmula (4.49)

$$dv = \frac{\text{Max}\{(V_{fmax} - V_{prom}), (V_{prom} - V_{fmin})\}}{V_{prom}} \quad (4.50)$$

El numerador vendría ser el máximo valor entre la diferencia de $V_{fmax} - V_{prom}$ o la diferencia de $V_{prom} - V_{fmin}$. Vale mencionar, para aclarar cualquier duda, que en cualquier situación V_{prom} se encontrará entre V_{fmax} y V_{fmin} .

Para hallar el valor del factor de diferencia de tensión (fdv), en la fórmula (4.51) se reemplaza dv por el valor numérico que se acaba de obtener.

$$fdv = 1 - dv[0.0113 + 0.0073 \cdot (dv)] \quad (4.51)$$

Otra de las condiciones anormales que este método considera que se debe ajustar, es el hecho que el motor haya sido rebobinado anteriormente. Varios estudios han demostrado que todo motor al ser sometido a un rebobinado inadecuado suele perder de 2% a 8% de su eficiencia [23] [24].

El **factor de ajuste por rebobinado (f_{re})**, según las experiencias y estudios que respaldan este método, puede tomar cuatro valores dependiendo de ciertas características con respecto al tipo de servicio de rebobinado al que haya sido sometido el motor. En caso el motor estudiado no haya sido rebobinado nunca, el f_{re} asume un valor igual a cero.

Dependiendo de la temperatura a la que haya sido rebobinado el motor, el f_{re} puede tomar uno de los siguientes valores:

Si la temperatura máxima fue 633°C, entonces $f_{re} = 0.0530$.

Si la temperatura máxima fue 683°C, entonces $f_{re} = 0.0117$.

Si la temperatura máxima fue 733°C (soplete), entonces $f_{re} = 0.0250$.

En caso el rebobinado se haya realizado a través de un procedimiento químico, entonces $f_{re} = 0.0040$.

Los factores de ajuste por diferencia de tensión, desbalance de tensión y rebobinado son aquellos que más van a influenciar para acercar el valor de la eficiencia hacia condiciones más reales.

4.4.6 Eficiencia Ajustada

Para determinar la **eficiencia ajustada (η_{aj})**, se procede según la fórmula:

$$\eta_{aj} = f_{dv} \cdot \left(\frac{\eta}{100} + f_{vv} - f_{re} \right) \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.52)$$

Este nuevo valor de la eficiencia nos permitirá saber de mejor manera la condición real del motor, y de esa manera las acciones que se vayan a tomar al respecto serán tomadas con mayor criterio y serán realmente las adecuadas.

De esa manera, teniendo el valor de la eficiencia ajustada se puede calcular el valor de la Potencia útil a la salida del motor.

$$P_U = \frac{\eta_{aj}}{100} \cdot P_T \text{ [kW]} \quad (4.53)$$

En el caso de que en un estudio energético se tome la decisión de reemplazar el motor existente, la Potencia útil será un valor referente para la selección del nuevo motor.

Usando un diagrama de bloques, en la figura 4.8 se muestra un esquema que permite tener una idea clara y resumida sobre el procedimiento que utiliza el Método de Eficiencias Ajustadas para el cálculo de la eficiencia de un motor eléctrico.

Aquellos bloques que han sido pintados de color gris, representan aquellas funciones que han sido programadas para que dichos valores se muestren de manera automática en función de ciertos datos necesarios previamente ingresados y que de alguna manera se han expresado en el diagrama.

Se debe comparar la figura 4.8 con la figura 4.7, para ver diferencias.

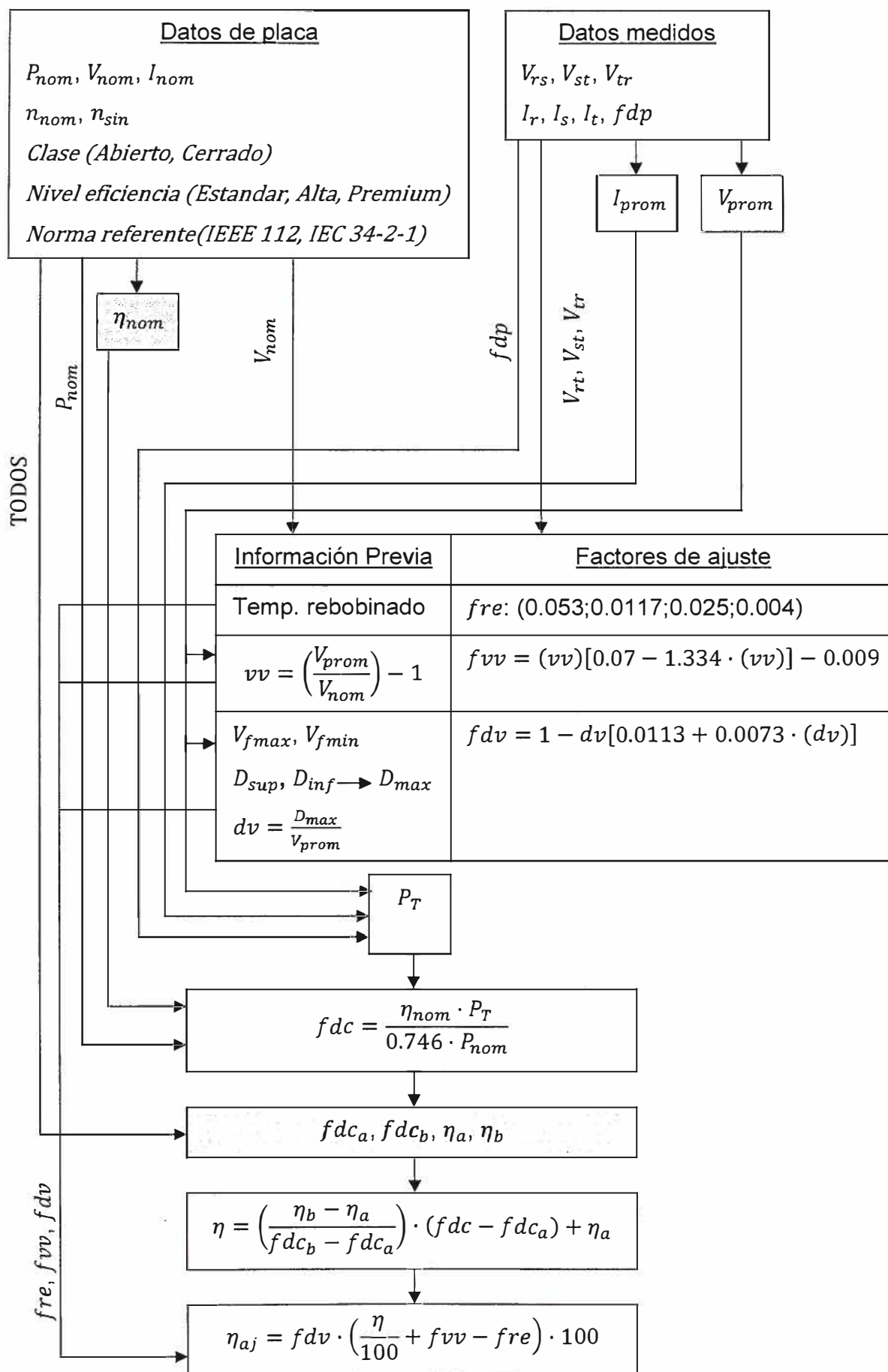


Fig. 4.8 Diagrama de bloques, proceso Método de Eficiencias Ajustadas

CAPITULO V

CONSIDERACIONES PARA EL REEMPLAZO DE UN MOTOR

5.1 Introducción

La determinación de la eficiencia de motores eléctricos no se suele hacer de manera aislada, sino más bien es la parte central de todo estudio de eficiencia energética para industrias con procesos que involucran el funcionamiento de muchos motores. El valor de la eficiencia que se haya determinado, cualquiera sea el método utilizado, servirá para comenzar a pensar en la necesidad de reemplazar el motor por uno nuevo.

Pero en realidad, esa decisión no se basa únicamente en el valor de la eficiencia, sino también entran a tallar los costos y tiempos. Es por ello que toda metodología para la determinación de la eficiencia en motores es complementada con un cálculo para conocer la rentabilidad económica al ser reemplazado por otro. No siempre el reemplazo por un motor de mayor eficiencia es la solución más rentable o adecuada. Más adelante se indicará en que situaciones es conveniente considerar un reemplazo de motor.

En una visión generalizada al sector industrial del Perú, se puede ver la importancia de mejorar la eficiencia de la gran mayoría de los motores que se encuentran en operación. En nuestro país casi el 60% de la energía eléctrica producida es consumida por el sector industrial.

En el sector industrial, los motores se usan para hacer funcionar bombas, ventiladores y compresores, así como para el traslado de materiales y el funcionamiento de los equipos de procesamiento de éstos. En el sector comercial se usan en aplicaciones como enfriamiento, calefacción y ventilación: unidades de refrigeración y circulación, y abastecimiento de agua. En las residencias los motores se usan para hacer funcionar los electrodomésticos, el aire acondicionado y ventiladores.

Aproximadamente el 70% de la energía eléctrica usada por la industria manufacturera se utiliza en el funcionamiento de sus motores. La industria química es la que tiene el procedimiento más largo manejado por motores eléctricos, estando la industria papelera en el segundo lugar. Las industrias del petróleo, de procesamiento de comida, de fabricación de metales y las industrias de plásticos y caucho también consumen grandes cantidades de energía eléctrica en sus procesos de producción manejados por motores eléctricos.

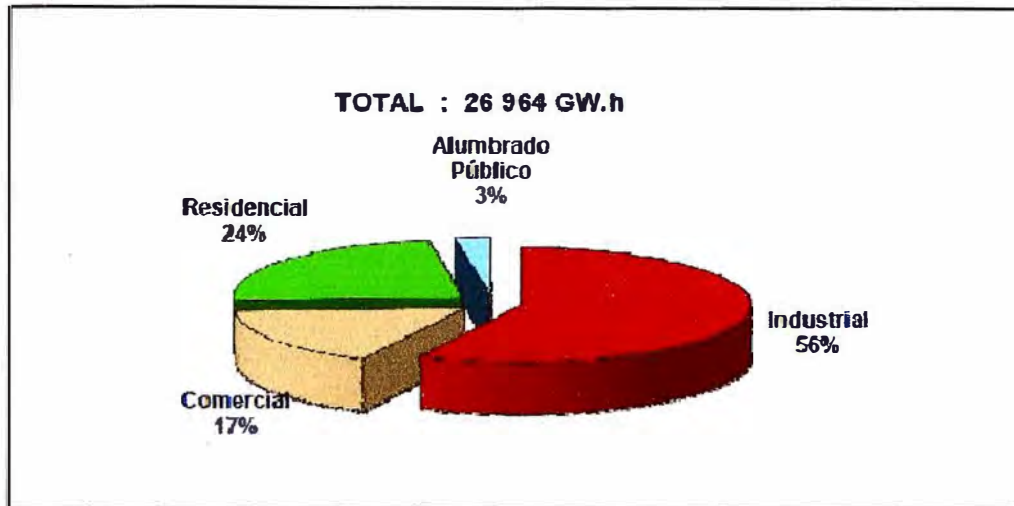


Fig. 5.1 Porcentaje de venta de Energía Eléctrica 2008 por sector económico [2]

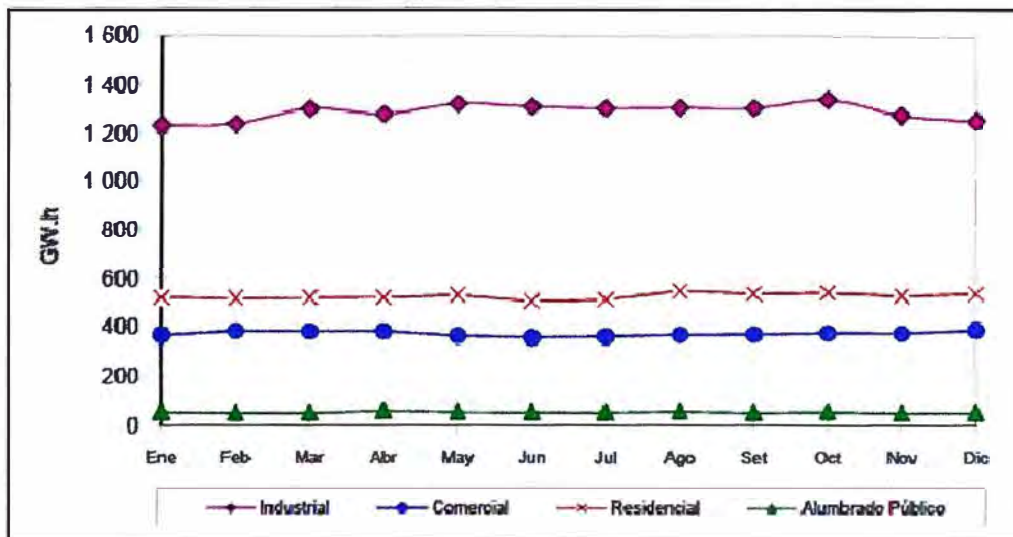


Fig. 5.2 Venta mensual de Energía Eléctrica 2008 por sector económico [2].

Es difícil saber el porcentaje de presencia de los motores de acuerdo a su potencia dentro del mercado peruano, ya que no se cuenta con algún estudio que brinde estadísticas precisas y detalladas de magnitud nacional. Pero se puede concluir, de la tendencia del número de industrias por tipo, y del número de motores que suelen haber en cada tipo de industria en otros países, que el porcentaje de motores menores a 10 HP es considerablemente mayor al porcentaje de motores de potencias mayores. A pesar que el porcentaje de presencia de los motores chicos es abrumadoramente mayor, los motores grandes consumen mucha más potencia en conjunto.

De aquí en adelante cuando se lea **motores de eficiencia energética** se deberá entender tanto los motores de eficiencia alta como los de eficiencia PREMIUM. Se hace esta agrupación para agilizar la lectura, ya que lo usual es reemplazar los motores de eficiencia estándar por motores con mejores eficiencia, ya sea de eficiencia alta o de eficiencia PREMIUM, según lo más conveniente.

5.2 Potencial de ahorro de energía

Años atrás, cuando el costo de la energía era más bajo, la tendencia de compra de motores para instalaciones nuevas o como reemplazo siempre estaba supeditado a las condiciones cíclicas de los negocios, así como a los incentivos económicos y de otro tipo que brindan ciertos programas para la promoción del ahorro de la energía, sobre todo en países de Europa.

A pesar que los motores de eficiencia PREMIUM existen en el mercado mundial ya hace más de 20 años, en el Perú aún no se consigue que su porcentaje de venta y uso alcance niveles de acuerdo a las exigencias energéticas y ambientales actuales, como ya sucede en varios países de Europa, por ejemplo. Esto se debe a que las prioridades de los compradores de motores siguen siendo la disponibilidad, la entrega rápida, la confiabilidad y el precio. Lentamente los compradores de motores están empezando a considerar la eficiencia entre los factores decisivos a la hora de adquirir motores eléctricos.

Lo que se debe hacer en el Perú, y que ha tenido éxito en otros países, es la elaboración y difusión de programas de concientización de ahorro energético y mejores ofertas en la venta de motores, ya que eso permitirá un cambio en las prioridades a la hora de comprar motores eléctricos, particularmente en los de gran potencia.

En general, los procesos industriales funcionan de manera muy similar en cualquier parte del mundo, sólo que a diferentes escalas. Es por ello que se puede tomar como referencia la experiencia y estudios que se hayan realizado en otros países, a falta de estudios detallados sobre esta área en el Perú.

De esa manera, estudios hechos en otros países, indican que se podría conseguir un mayor ahorro energético y económico si se reemplazaran la mayoría de motores menores a 5 HP funcionando en las industrias. A pesar que son los motores de mayor potencia los que más energía consumen en conjunto, es en los motores menores a 5 HP donde se han conseguido mejoras considerables de su eficiencia, además que la presencia de motores de eficiencia energética en estos rangos de potencia es mínima. Los motores de grandes potencias siempre han tenido una eficiencia relativamente alta, por eso mismo las ganancias energéticas que se obtendrían al reemplazar por otros de mejor eficiencia no serían muy notorias, y no sería económicamente rentable ya que su precio de venta es realmente alto. Los motores de grandes potencias se reemplazan sólo cuando ya han fallado de manera irremediable.

5.3 Cuando comprar motores de eficiencia energética

Los ahorros en energía obtenidos al reemplazar motores de eficiencia estándar por motores de eficiencia energética pueden ser considerables. Usando información de fácil

acceso como los datos de placa, horas de operación, y tarifa eléctrica, el lector podrá rápidamente determinar la tasa de retorno correspondiente a la selección y uso de un motor de eficiencia energética en específico.

Usar motores de eficiencia energética puede reducir los costos operativos de distintas maneras. El ahorrar energía no sólo reduce el monto del recibo mensual por consumo eléctrico, también puede prolongar o eliminar la necesidad de ampliar la capacidad del sistema eléctrico de suministro del predio. A una escala mayor, la instalación de aparatos ahorradores de energía le permite a los distribuidores de energía eléctrica prescindir por el momento de nuevas instalaciones de generación de energía, resultando en un menor costo final al consumidor.

El ahorro de dinero y de energía requiere de la apropiada selección y el uso de motores de eficiencia energética. Hay tres condiciones generales para escoger un motor de eficiencia energética: 1) cuando se quiere comprar un motor nuevo, 2) cuando se quiere reemplazar un motor que ha sido rebobinado, y 3) para reemplazar un motor operable pero de muy baja eficiencia. Los motores de eficiencia energética deben ser considerados en las siguientes circunstancias:

- En toda instalación nueva.
- Cuando se hagan modificaciones considerables a instalaciones o procesos de trabajo existentes.
- Para la adquisición de paquetes de equipos nuevos que incluyan motores eléctricos, como aire acondicionado, compresoras de aire, y sistemas de filtración.
- Al comprar motores de repuesto o reemplazar aquellos que ya están dañados.
- En lugar de rebobinar antiguos motores de eficiencia estándar
- Para reemplazar motores obviamente sobredimensionados o de baja carga
- Como parte de un programa de ahorro energético o de mantenimiento preventivo.
- Cuando las campañas de conservación, los reembolsos en compras, o los incentivos ofrecidos sean tales que hagan notar que el reemplazo por equipos de eficiencia energética es económicamente rentable.

5.4 Datos previos necesarios

La cantidad de dinero que se puede ahorrar comprando un motor de eficiencia energética en lugar de un motor estándar depende de varios factores como el tamaño del motor, el número de horas de uso al año, el factor de carga, la diferencia de eficiencias, y los cargos por potencia y energía consumida. Se requieren cuatro datos antes de hacer la evaluación del estudio económico para solicitar un motor de eficiencia energética en lugar de uno de eficiencia estándar. Primero, se debe conseguir y comprender el pliego tarifario al que pertenece la industria. Segundo, hay que determinar el factor de carga o el valor de

la potencia real de salida dividido sobre la potencia nominal, y así poder estimar su eficiencia. Tercero, hay que obtener el número de horas de operación del motor mientras está a plena carga. Cuarto, se debe realizar un cálculo de los ahorros energéticos anuales.

5.4.1 Facturación eléctrica

En el Perú, los usuarios que soliciten cargas por debajo de los 2500 kW son considerados como Clientes Regulados, los usuarios que soliciten cargas por encima de los 2500 kW entran al grupo de los Clientes Libres. Entre las empresas distribuidoras de energía y los Clientes Libres no hay estipulada de manera fija ninguna tarifa para la facturación eléctrica, ya que ambos finalmente llegan a un acuerdo con respecto a las tarifas.

En el caso de los Clientes Regulados, el Osinergmin tiene estipulado un pliego de tarifas eléctricas tanto para baja como media tensión, y que se eligen de acuerdo al tipo de consumo que el usuario realizará [25].

Las explicaciones y ejemplos de este estudio están focalizados para Clientes Libres de Media Tensión, ya que la mayoría de industrias en el Perú pertenecen a este grupo, teniendo tarifas mayores o iguales a la MT4. De esa forma, los cargos más comunes para ese tipo de tarifas son los siguientes:

- Cargo Fijo.
- Cargo por Energía Activa en Horas Punta.
- Cargo por Energía Activa Fuera de Punta. Cargo por Potencia Activa de Generación en Horas Punta.
- Cargo por Potencia Activa de Distribución en Horas Punta.
- Cargo por Energía Reactiva que exceda del 30% del total de la Energía Activa.

5.4.2 Factor de Carga

Antes de determinar los ahorros energéticos conseguidos por el reemplazo por un motor de eficiencia energética hay que saber el factor de carga o porcentaje promedio de la potencia de salida a plena carga.

Para calcular el factor de carga, se puede usar alguno de los métodos descritos en el Capítulo IV.

5.4.3 Horas Anuales de Operación

También se debe conocer el número de horas de operación del motor en su punto de carga ya que los ahorros de energía eléctrica son directamente proporcionales al número de horas de uso del motor. Lo que significa, que el uso de un motor de eficiencia energética que funciona 8,000 horas al año significará un ahorro cuatro veces mayor que el de un motor equivalente usado sólo 2000 horas al año.

Las estimaciones sobre los ahorros de energía conseguidos por el uso de motores de eficiencia energética se ven altamente influenciadas por las horas de operación ya que suelen ser supuestas. En condiciones ideales, se deben usar contadores de tiempo de funcionamiento para registrar el tiempo de prendido y apagado de un motor mientras éste se encuentre bajo estudio. Estos contadores hacen un censado del campo magnético generado cada vez que el motor está funcionando. Es muy útil contar con un historial detallado de operación para el cálculo del total de horas de operación al año así como para conocer los perfiles de operación según las horas, que es lo que afecta los cargos en las horas pico.

El número estimado de horas de operación generalmente se basa en información otorgada por los técnicos, ingenieros o gerentes de planta. Un estudio hecho por la empresa Portland General Electric muestra que en promedio, los motores realmente operan el 93% de las horas estimadas de operación reportadas en los informes. Existen errores grandes en las horas estimadas de operación otorgadas y medidas en campo por los encargados de planta, quienes pasan momentos difíciles tratando de calcular dichas horas. Hay varios casos en que el operador ha estimado 2,000 horas de operación, cuando en realidad superaba las 7,500 horas de uso anual. De manera inversa, hay casos de motores con 6,000 horas anuales de operación estimadas, cuando en realidad no pasaban de las 1,000 horas.

Una manera de reducir los errores causados por la estimación de horas de operación es elaborando un perfil de tiempo de operación. Dicho perfil, dado como ejemplo en la Tabla N° 5.1, requiere que el encargado de planta introduzca datos del uso del motor en sus diferentes turnos durante los días de trabajo, fines de semana y feriados.

Tabla N° 5.1 Perfil de tiempo de operación [8].

Perfil de Operación del Motor		
	Horario Normal	Horario Extra
1° Turno		
2° Turno		
3° Turno		
Periodo de Operación [Sem/Año]		

También es importante tener en cuenta la naturaleza de la carga a ser movida. Si el encargado de planta considera que el reemplazo de motores debe cumplir con la lógica de costo-beneficio, los motores con las siguientes características no deberían ser considerados para ser reemplazados: aquellos que están acoplados a cargas de

velocidad variables, aquellos que operan con factores de carga bajos, aquellos que mueven cargas intermitentes, cíclicas o de funcionamiento indefinido.

5.4.4 Cálculo de los Ahorros Energéticos Anuales

Antes de determinar los ahorros económicos anuales, se necesita estimar los ahorros energéticos anuales. Los motores de eficiencia energética necesitan de menos potencia eléctrica de entrada para brindar la misma potencia de salida que un motor de eficiencia estándar. El ahorro en kilowatts consumidos depende principalmente de la diferencia de eficiencias que haya entre un motor de eficiencia energética y uno de eficiencia estándar, teniendo el resto de parámetros de diseño similares.

De aquí en adelante, todos los parámetros que tenga en su nomenclatura el subíndice 1 se referirán al motor en operación, y los que tengan el subíndice 2 se referirán al motor nuevo de reemplazo.

La diferencia de potencia eléctrica utilizada entre dos motores que deben operar la misma carga, pero con eficiencias diferentes, denominado en este documento como **Ahorro de Potencia (A_P)** se expresa de la siguiente manera:

$$A_P = P_{T1} - P_{T2} \text{ [kW]} \quad (5.1)$$

Donde P_{T1} es la Potencia eléctrica total a la entrada del motor 1, y P_{T2} es la Potencia eléctrica total a la entrada del motor 2.

De la definición de eficiencia, se pueden expresar las potencias eléctricas totales de la siguiente manera:

$$P_{T1} = \frac{P_{nom1} \cdot 0.746 \cdot fdc_1 \cdot 100}{\eta_1} \text{ [kW]} \quad (5.2)$$

$$P_{T2} = \frac{P_{nom2} \cdot 0.746 \cdot fdc_2 \cdot 100}{\eta_2} \text{ [kW]} \quad (5.3)$$

Y al ser reemplazados en la fórmula (5.1), el Ahorro de Potencia se podría expresar de esta otra manera:

$$A_P = \frac{P_{nom1} \cdot 0.746 \cdot fdc_1 \cdot 100}{\eta_1} - \frac{P_{nom2} \cdot 0.746 \cdot fdc_2 \cdot 100}{\eta_2} \text{ [kW]} \quad (5.4)$$

$$A_P = \frac{P_{eje1} \cdot 0.746 \cdot 100}{\eta_1} - \frac{P_{eje2} \cdot 0.746 \cdot 100}{\eta_2} \text{ [kW]} \quad (5.5)$$

Si se considerase que el nuevo motor va a tener que mover la misma carga que el motor antiguo movía a la salida de su eje, se tendría una expresión reducida para el Ahorro de Potencia:

$$A_P = P_{eje1} \cdot 0.746 \cdot 100 \cdot \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right) \text{ [kW]} \quad (5.6)$$

De manera similar se deben calcular los ahorros conseguidos por concepto de energía, utilizando las horas anuales de operación (hr). El **Ahorro de Energía (A_E)**, depende directamente de A_P y su valor se consigue según la fórmula :

$$A_E = A_P \cdot hr \text{ [kWh]} \quad (5.7)$$

Se debe tener claro que el valor de A_E calculado si es representativo de un año, mientras que el valor de A_P es una característica puntual de potencia entre dos motores, parámetro que puede servir de referencia en análisis mensuales independientes.

5.5 Ahorros económicos anuales

Es fundamental haber comprendido bien el tipo de tarifaria eléctrica que tiene la industria, ya que así se verá que hay cargos por conceptos de potencia y otros por conceptos de energía. Para simplificar los cálculos, se considerará un cargo promedio representativo a todos los relacionados a Energía Activa y otro cargo promedio representativo a todos los relacionados a Potencia. Cuando se tenga la posibilidad de hacer un cálculo más minucioso se puede considerar de manera diferenciada todos los cargos pertenecientes a la tarifa eléctrica.

Los ahorros económicos anuales por concepto de energía se calculan multiplicando el Ahorro por Energía (A_E) por la **tarifa eléctrica de energía (t_E)** que se mide en [\$/kWh], mientras que los ahorros económicos anuales por concepto de potencia se calculan multiplicando el **Ahorro por Potencia (A_P)** por la **tarifa eléctrica de potencia (t_P)** que se mide en [\$/kW.mes] por el número de meses, 12. Finalmente, el **Ahorro Económico Anual (A_{EA})** se puede definir por la siguiente fórmula:

$$A_{EA} = 12 \cdot t_P \cdot A_P + t_E \cdot A_E \text{ [\$]} \quad (5.8)$$

Las fórmulas (5.1) a (5.8) son aplicables para aquellos motores con una carga constante específica. Para cargas variables, se pueden usar las ecuaciones de ahorro de energía para cada porción del ciclo donde la carga sea relativamente constante por un periodo considerable de tiempo. El ahorro energético total será la suma de todos los ahorros para cada periodo. Se determina el ahorro de la demanda en el punto más alto de carga. Las ecuaciones no son aplicables para motores operando con cargas pulsantes, o con cargas que varían rápidamente en intervalos cíclicos.

5.6 Evaluación de la viabilidad económica

Los motores de eficiencia energética cuestan 15% a 30% más que los motores de eficiencia estándar, ya que tienen un mejor diseño y están hechos de materiales de más alta calidad. Sin embargo, en muchos casos este precio adicional es rápidamente recuperado gracias a los ahorros en los costos de energía. Para determinar la viabilidad

económica de la instalación de un motor de eficiencia energética, hay que examinar los ahorros de energía totales en comparación con el precio especial.

La mayoría de gerentes de plantas industriales buscan que las inversiones se recuperen a través de ahorros en energía dentro de un periodo de uno a tres años basados en un análisis de retorno simple. El **Periodo simple de recuperación (PSR)** se define como el periodo de tiempo necesario para que los ahorros de una inversión igualen al costo inicial o incremental de dicha inversión.

Para la compra inicial de un motor o para el reemplazo de un motor quemado o que ya no se puede rebobinar, el *PSR* para la inversión extra asociada con la compra de un motor de eficiencia energética es la proporción entre el **Costo del motor nuevo (C_{MN})** mas el **Costo de envío (C_{en})** menos el descuento que pueda haber, sobre el valor del Ahorro económico anual (A_{EA}).

$$PSR = \frac{C_{MN} + C_{en} - \text{descuento}}{A_{EA}} \quad (5.9)$$

Para el reemplazo de motores operacionales, el *PSR* se calcula de manera similar a la situación anterior, pero se debe agregar que aquí se considera el **Costo de Instalación (C_{inst})** del motor nuevo de eficiencia energética:

$$PSR = \frac{C_{MN} + C_{en} + C_{inst} - \text{descuento}}{A_{EA}} \quad (5.10)$$

Todo comprador de motores debe estar familiarizado y usar de manera consistente una lista de nomenclaturas. También deben conocer de los estándares para los procedimientos de pruebas. Se debe tener siempre presente lo siguiente:

- Insistir que todos los puntos relacionados a la garantía deben ser hechos con respecto a la misma base. (por ejemplo la eficiencia mínima nominal o garantizada).
- Preparar especificaciones que identifiquen el estándar de prueba que será utilizado para determinar el rendimiento del motor.
- Reconocer la variación entre la precisión de fabricación y la de prueba y establecer un rango de tolerancia para un rendimiento aceptable.
- Hacer comparación entre tiendas. Se puede maximizar la eficiencia a través de una reducción en el Costo del motor nuevo.
- Obtener un motor con una eficiencia nominal que no pase del 1.5% al máximo valor disponible para la misma clase en tamaño, velocidad y carcasa.
- Para bombas y ventiladores, seleccionar un motor de eficiencia energética cuya velocidad a plena carga sea similar a la del motor de eficiencia estándar que está reemplazando.

CAPITULO VI

DESARROLLO DE SOFTWARE

6.1 Generalidades

Como se indicó en el Capítulo I, uno de los objetivos de este documento es la elaboración de un software para que la aplicación de los dos métodos explicados en el Capítulo IV sea más sencilla y ágil.

Por lo tanto, se presenta de manera separada un programa bajo el nombre de **Método de Deslizamiento**, y otro programa bajo el nombre de **Método de las Eficiencias Ajustadas**.

Ambos programas siguen fielmente el procedimiento de cálculo de la eficiencia indicado en sus respectivos apartados del Capítulo IV, y además se complementan con un cálculo del Periodo Simple de Retorno de la inversión, para cuando se considere la posibilidad del reemplazo por un motor de eficiencia energética.

Se escogió al programa Excel como plataforma de funcionamiento de estos programas, por los siguientes motivos:

- Excel es un programa que suele encontrarse instalado en todas las computadoras portátiles. No hay necesidad de instalar ningún programa adicional.
- Casi la totalidad de los profesionales relacionados al área saben manejar Excel, al menos de manera básica. Y estos programas se han hecho de manera que sólo basta con presionar un botón para que se realice el cálculo indicado.
- Excel permite mostrar y calcular una gran cantidad de unidades estudiadas al mismo tiempo. En la gran mayoría de estudios energéticos el número de motores estudiados suele ser grande, por lo que sería tedioso trabajar con un programa que hiciera todo ese cálculo uno por uno, algo que la distribución por filas, columnas y celdas del Excel ayudan a apreciar mejor.

Se hizo uso de programación complementaria en Visual Basic, para procedimientos complejos como la búsqueda de cierta información en alguna base de datos. También se hace entrega del código fuente de aquellos cálculos en donde se hace uso de Visual Basic.

En un CD adjunto, se hace entrega de los programas mencionados anteriormente, como aporte y para su utilización por quienes estén interesados en el tema.

6.2 Método del Deslizamiento

En el apartado 4.3 se mencionaron alternativas para la mejora de la precisión del Método del Deslizamiento, dejando claro que todas las mejoras eran realizadas sobre el factor de carga. Para el desarrollo de este programa se está considerando aquel que hemos denominado “factor de carga, propuesta alternativa” (Ver apartado 4.3.6). En el Capítulo VII se podrá ver una comparación entre los resultados obtenidos para cada variante del factor de carga, y se sustentará la decisión tomada en la elección de una de dichas variantes para el desarrollo de este programa.

La hoja de cálculo de Excel está dividido en dos grande secciones, fácilmente inidentificables por colores, en la primera fila:

- Motor en estudio, o Motor 1, ya que todos aquellos parámetros relacionados a este motor llevarán el subíndice 1.
- Motor de reemplazo, o Motor 2, ya que todos aquellos parámetros relacionados a este motor llevarán el subíndice 2.

Para aquellos cálculos que se resuelven sin necesidad de Visual Basic, o sea con la inclusión de fórmulas en celdas, en las líneas inmediatas se presentará el nombre de la columna e inmediatamente la fórmula que se relaciona. Se indicará en caso la columna sea para el ingreso manual de información o para la selección de opciones de alguna lista desplegable.

La información entre líneas diagonales es explicativa y no debe confundirse como parte del código de programación

6.2.2 Datos de Placa

//Ingreso manual de los datos de placa//

Potencia mecánica nominal [HP] ----- P_{nom1}

Tensión nominal [V] ----- V_{nom1}

Corriente nominal [A] ----- I_{nom1} //No es indispensable//

Velocidad nominal [RPM] ----- n_{nom1}

Velocidad síncrona [RPM] ----- n_{sin}

//Cálculos automáticos//

Deslizamiento nominal [RPM] ----- $s_{nom} = n_{sin} - n_{nom}$

Porcentaje deslizamiento nominal [%] -- $z_{nom} = \frac{n_{sin} - n_{nom}}{n_{sin}}$

6.2.3 Datos Medidos

//Ingreso manual de los datos medidos//

Tensión entre fases "rs" [V] ----- V_{rs}

Tensión entre fases "st" [V] ----- V_{st}

Tensión entre fases "tr" [V] ----- V_{tr}

//Cálculo automático //

Tensión promedio [V] ----- $V_{prom} = \frac{V_{rs} + V_{st} + V_{tr}}{3}$

//Ingreso manual de los datos medidos//

Corriente de fase "r" [A] ----- I_r

Corriente de fase "s" [A] ----- I_s

Corriente de fase "t" [A] ----- I_t

//Cálculo automático //

Corriente promedio [A] ----- $I_{prom} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3}$

//Ingreso manual de los datos medidos//

Factor de Potencia ----- fdp

//Cálculo automático //

Potencia activa total [kW] ----- $P_{T1} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{prom} \cdot I_{prom} \cdot fdp}{1000}$

//Ingreso manual de los datos medidos//

Velocidad real de operación [RPM] ----- n

//Cálculos automáticos //

Deslizamiento real [RPM] ----- $s = n_{sin} - n$

Porcentaje deslizamiento real [%] ----- $z = \frac{(n_{sin} - n)}{(n_{sin})} \cdot 100$

6.2.4 Datos Extras

//Ingreso manual de datos//

Horas de operación anual [hr] ----- hr

Tarifa eléctrica de potencia [\$/kW.mes] - t_P

Tarifa eléctrica de energía [\$/kWh] ----- t_E

6.2.5 Cálculo de la eficiencia del motor en estudio, Motor 1

//Calculo automático de variables//

Factor de carga [%] ----- $f_{dc} = \frac{(s \cdot n_{sin} - s^2) \cdot 100}{(s_{nom} \cdot n_{sin} - s_{nom}^2)}$

Potencia mecánica real [HP] ----- $P_{eje} = \frac{(P_{nom}) \cdot (f_{dc})}{(100)}$

Potencia mecánica útil [kW] ----- $P_{U1} = (P_{eje}) \cdot (0.746)$

Eficiencia 1 [%] ----- $\eta_1 = \frac{(P_{U1})}{(P_{T1})} \cdot 100$

Potencia activa perdida [kW] ----- $P_P = P_{T1} - P_{U1}$

Costos operativos anuales [\$] ----- $C_{op} = (P_{T1}) \cdot (hr) \cdot (t_E)$

Costos pérdidas anuales [\$] ----- $C_P = (P_P) \cdot (hr) \cdot (t_E)$

6.2.6 Datos del motor de reemplazo, Motor 2

En base a la potencia mecánica útil y a la eficiencia del motor, elija el motor de reemplazo e ingrese los siguientes datos.

//Ingreso manual de datos//

Eficiencia 2 [%] ----- η_2

Costo de compra motor nuevo [\$] ----- C_{MN}

Costo de envío motor nuevo [\$] ----- C_{en}

Costo de instalación motor nuevo [\$] ---- C_{inst}

Descuento [\$] ----- $desc$

6.2.7 Viabilidad económica

//Cálculo automático de variables//

Ahorro de Potencia [kW] ----- $A_P = (P_{U1}) \cdot \left(\frac{100}{\eta_1} - \frac{100}{\eta_2} \right)$

Ahorro de Energía [kWh] ----- $A_E = A_P \cdot hr$

$$\begin{aligned} \text{Ahorro económico anual [$/año]} & \text{-----} & A_{EA} &= 12 \cdot t_P \cdot A_P + t_E \cdot A_E \\ \text{Costo de reemplazo [\$]} & \text{-----} & C_{RM} &= C_{MN} + C_{en} + C_{inst} - desc \\ \text{Periodo simple de retorno [años]} & \text{-----} & PSR &= \frac{C_{RM}}{A_{EA}} \end{aligned}$$

6.3 Método de Eficiencias Ajustadas

En el apartado 4.4 se hizo una explicación completa de todos los cálculos implicados en este método, sobre todo de los factores de ajuste de la eficiencia.

Lo ideado para este estudio es que, para agilizar el uso de este método, el programa debe estar vinculado de manera computacional con una base de datos que contenga eficiencias para distintas condiciones. Dicha base de datos son tablas de eficiencias distribuidas según la norma referente (IEEE 112 o IEC 34-2-1), clase de la carcasa (abierto o cerrado), la velocidad síncrona, la potencia nominal, nivel de eficiencia y factor de carga.

El archivo Excel desarrollado y entregado junto con este documento, está diseñado de tal manera que sirva como plantilla de trabajo, ya que viene acompañado de un formato de tablas de eficiencias, distribuidas de tal manera que permite la ubicación rápida de información por parte del programa.

Se recurrió al uso de programación en Visual Basic para que el programa pueda referirse a la base de datos y a la vez pueda distinguir y discriminar según la información ingresada, y así poder ubicar y mostrar los valores de eficiencia necesarios según el tipo de motor en estudio. La aplicación de Visual Basic no recarga la vista del programa en ningún sentido. Se brinda también el código fuente de la programación en Visual Basic, para que el programa pueda ser analizado, revisado y utilizado por todos los interesados.

La hoja de cálculo de Excel está dividido en dos grande secciones:

- Motor en estudio, o Motor 1, ya que todos aquellos parámetros relacionados a este motor llevarán el subíndice 1.
- Motor de reemplazo, o Motor 2, ya que todos aquellos parámetros relacionados a este motor llevarán el subíndice 2.

Para aquellos cálculos que se resuelven sin necesidad de Visual Basic, o sea, con la inclusión de fórmulas en celdas, en las siguientes líneas se presentará el nombre de la columna e inmediatamente la fórmula que se relaciona. Se indicará en caso la columna sea para el ingreso manual de información o para la selección de opciones de alguna lista desplegable.

La información entre líneas diagonales es explicativa y no debe confundirse como parte del código de programación

6.3.2 Datos de Placa

//Ingreso manual de datos de placa//

Potencia mecánica nominal [HP] ----- P_{nom1}

//En la columna siguiente se debe escoger, de una lista desplegable, el tipo de unidades del valor ingresado para P_{nom1} (kW o HP), ya que existe la posibilidad de que el valor se encuentre en kilowatts, por ejemplo. La Potencia mecánica nominal debe estar en HP, por eso si es que de la lista desplegable el operario escoge la opción kW, el programa internamente lo convertirá a HP multiplicando su valor por 0.746.//

//Ingreso manual de los datos de placa//

Tensión nominal [V] ----- V_{nom1}

Corriente nominal [A] ----- I_{nom1} //No es indispensable//

Velocidad nominal [RPM] ----- n_{nom1}

//Seleccionar de lista desplegable//

Velocidad síncrona [RPM] ----- n_{sin}

//La velocidad síncrona sólo puede tomar cuatro valores para 60 Hz. Dichos valores se muestran en una lista desplegable que se mostrará en cada celda de dicha columna, cuyos valores son: 3600, 1800, 1200 y 900 RPM. El valor de la velocidad síncrona es el inmediato mayor al de la velocidad nominal que se tenga//

//Seleccionar de lista desplegable//

Clase de motor -----	•	Abierto
	•	Cerrado
Nivel de Eficiencia -----	•	Estándar
	•	Alta
	•	Premium
Norma Referente -----	•	IEEE 112
	•	IEC 34-2-1

//Selección automática de base de datos//

Eficiencia nominal [%] ----- η_{nom1}

//En base a la información ingresada sobre: Norma referente, Clase de motor, Velocidad Síncrona, Potencia Nominal y Nivel de Eficiencia, en ese orden, el programa

ubicará aquel valor de eficiencia que también corresponda al 100% de factor de carga, y lo mostrará en la columna correspondiente a la Eficiencia nominal del motor en estudio

El código fuente utilizado para esta acción en una sola celda es el siguiente://

Sub EficienciaNominalMotorEnUso(fila)

Set IEEE = Sheets("IEEE 112")

Set IEC = Sheets("IEC 34-2-1")

Set main = Sheets("Hoja1")

pnomCol = 4

nsinCol = 8

claseCol = 9

nivelCol = 10

normaCol = 11

enomCol = 12

pnomUsada = 13

aumento = 0

pnom = main.Cells(fila, pnomCol).Value

nsin = main.Cells(fila, nsinCol).Value

clase = main.Cells(fila, claseCol).Value

nivel = main.Cells(fila, nivelCol).Value

norma = main.Cells(fila, normaCol).Value

If nivel = "Alta" Then

 aumento = aumento + 4

End If

If nivel = "Premium" Then

 aumento = aumento + 8

End If

pnomReal = 0

pnomReal100 = 0

pnomDelta = 99999

```

If norma = "IEEE 112" Then
  IEEE.Select
  IEEE.Cells(7, 1).Select
  Do Until IsEmpty(ActiveCell)
    If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 1).Value = clase Then
      If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 2).Value = nsin Then
        If IsEmpty(IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3)) = False Then
          If Abs(pnom - IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value) < pnomDelta
Then
            pnomDelta = Abs(pnom - IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value)
            pnomReal = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value
            pnomReal100 = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
          End If
        End If
      End If
    End If
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
  Loop
Else
  IEC.Select
  IEC.Cells(7, 1).Select
  Do Until IsEmpty(ActiveCell)
    If IEC.Cells(ActiveCell.Row, 1).Value = clase Then
      If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 2).Value = nsin Then
        If IsEmpty(IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3)) = False Then
          If Abs(pnom - IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value) < pnomDelta Then
            pnomDelta = Abs(pnom - IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value)
            pnomReal = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value
            pnomReal100 = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
          End If
        End If
      End If
    End If
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
  Loop
End If

```

```

main.Select
main.Cells(fila, enomCol).Value = pnomReal100
main.Cells(fila, pnomUsada).Value = pnomReal
main.Cells(fila, enomCol).Select
End Sub

```

//Para que dicha función se aplique a lo largo de toda la columna hasta el final de la lista de valores ingresado, se requiere del siguiente comando://

```

Sub EficienciaNominalMotorEnUsoBarrido()

```

```

Set main = Sheets("Hoja1")
pnomCol = 4
nsinCol = 8
claseCol = 9
nivelCol = 10
normaCol = 11
fila = 7

main.Cells(fila, 4).Select

Do Until IsEmpty(main.Cells(fila, 4))
  If IsEmpty(main.Cells(fila, pnomCol)) = False Then
    If IsEmpty(main.Cells(fila, nsinCol)) = False Then
      If IsEmpty(main.Cells(fila, claseCol)) = False Then
        If IsEmpty(main.Cells(fila, nivelCol)) = False Then
          If IsEmpty(main.Cells(fila, normaCol)) = False Then
            Call EficienciaNominalMotorEnUso(fila)
          End If
        End If
      End If
    End If
  End If
  fila = fila + 1
main.Cells(fila, 4).Select

```

Loop

main.Cells(fila, 12).Select

End Sub

6.3.3 Datos Medibles

//Ingreso manual de los datos medidos//

Tensión entre fases "rs" [V] ----- V_{rs}

Tensión entre fases "st" [V] ----- V_{st}

Tensión entre fases "tr" [V] ----- V_{tr}

//Cálculo automático //

Tensión promedio [V] ----- $V_{prom} = \frac{V_{rs} + V_{st} + V_{tr}}{3}$

//Ingreso manual de los datos medidos//

Corriente de fase "r" [A] ----- I_r

Corriente de fase "s" [A] ----- I_s

Corriente de fase "t" [A] ----- I_t

//Cálculo automático //

Corriente promedio [A] ----- $I_{prom} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3}$

//Ingreso manual de los datos medidos//

Factor de Potencia ----- f_{dp}

6.3.4 Datos Extras

//Ingreso manual de datos//

Horas de operación anual [hr] ----- hr

Tarifa eléctrica de potencia [\$/kW.mes] - t_p

Tarifa eléctrica de energía [\$/kWh] ----- t_E

6.3.5 Factores de Ajuste

//Seleccionar de lista desplegable//

¿Ha sido rebobinado?-----

- SI
- NO

//Si la respuesta es SI. Seleccionar de lista desplegable//

Temperatura o Método usado [K]-----

- 633
- 683
- 733 (soplete)
- Método químico

//Selección automática de acuerdo a la información previa//

Factor de ajuste por rebobinado----- $f_{re} =$
 $SI(Z7="NO",0,SI(NO(ESBLANCO(AA7)),$
 $SI(AA7=633,0.053,SI(AA7=683,0.0117,$
 $SI(AA7=733,0.025,0.004))),,""))$

//La función para el cálculo de f_{re} realiza la asignación del valor según lo especificado en el apartado 4.4.5, con respecto a si el motor fue o no rebobinado antes de su análisis energético. "Z7" y "AA7" son las columnas de donde se solicita información necesaria para este cálculo.//

//Cálculo automático//

Variación de Tensión ----- $vv = \left(\frac{V_{prom}}{V_{nom1}} \right) - 1$

Factor de ajuste variación de tensión[%] $f_{vv} = (vv)[0.07 - 1.334 \cdot (vv)] - 0.009$

Máxima tensión de fase [V] ----- $V_{fmax} = Max(V_r, V_s, V_t)$

Mínima tensión de fase [V] ----- $V_{fmin} = Min(V_r, V_s, V_t)$

Diferencia límite superior [V] ----- $D_{sup} = V_{fmax} - V_{prom}$

Diferencia límite inferior [V] ----- $D_{inf} = V_{prom} - V_{fmin}$

Diferencia mayor [V] ----- $D_{max} = Max(D_{sup}, D_{inf})$

Diferencia de tensión ----- $dv = \frac{D_{max}}{V_{prom}}$

Factor ajuste Diferencia tensión ----- $f_{dv} = 1 - dv[0.0113 + 0.0073 \cdot (dv)]$

6.3.6 Cálculo de la eficiencia del motor en estudio, Motor 1

//Cálculo automático//

$$\text{Potencia activa [kW]} \text{ ----- } P_{T1} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{prom} \cdot I_{prom} \cdot fdp}{1000}$$

$$\text{Factor de carga [\%]} \text{ ----- } fdc_1 = \frac{\eta_{nom1} \cdot P_T}{0.746 \cdot P_{nom1}}$$

$$\begin{aligned} \text{Factor de carga inmediato inferior [\%]} \text{ -- } fdc_a = & \text{SI(NO(ESBLANCO(AM7)),} \\ & \text{SI(Y(AM7}>=0,AM7<25),0,} \\ & \text{SI(Y(AM7}>=25,AM7<50),25,} \\ & \text{SI(Y(AM7}>=50,AM7<75),50,} \\ & \text{SI(Y(AM7}>=75,AM7<=100),75,100))))) \end{aligned}$$

//La función para el cálculo de fdc_a realiza la asignación del valor según lo especificado en el apartado 4.4.4, con respecto al valor obtenido para fdc_1 , ubicado en la columna "AM7"//

//Cálculo automático//

$$\text{Factor de carga inmediato superior [\%]} \quad fdc_b = \text{SI(AN7<>"" ,SI(AN7<100,AN7+25, 100),"")}$$

//La función para el cálculo de fdc_b realiza la asignación del valor según lo especificado en el apartado 4.4.4. Para simplificar los cálculos se basa en el valor obtenido para fdc_a , ubicado en la columna "AN7", y busca su inmediato superior de los cuatro valores que puede coger, y que debe ser 25 unidades mayor//

//Cálculo automático//

$$\text{Eficiencia de } fdc_a \text{ [\%]} \text{ ----- } \eta_a$$

$$\text{Eficiencia de } fdc_b \text{ [\%]} \text{ ----- } \eta_b$$

//En base a la información obtenida sobre: Norma referente, Clase de motor, Velocidad Síncrona, Potencia Nominal, Nivel de Eficiencia y factores de carga inmediatos superior e inferior, en ese orden, el programa ubicará aquellos valores de eficiencia que cumplan con todas esas características, y los mostrará en la columnas respectivas de η_a y η_b .

El código fuente utilizado para esta acción en una sola celda es el siguiente.//

Sub FactoresCargaLimiteMotorEnUso(fila)

Set IEEE = Sheets("IEEE 112")

Set IEC = Sheets("IEC 34-2-1")

```
Set main = Sheets("Hoja1")
```

```
nsinCol = 8
```

```
claseCol = 9
```

```
nivelCol = 10
```

```
normaCol = 11
```

```
pnomUsadaCol = 13
```

```
fdcaCol = 40
```

```
fdcbRow = 41
```

```
eaRow = 42
```

```
ebRow = 43
```

```
aumento = 0
```

```
nsin = main.Cells(fila, nsinCol).Value
```

```
clase = main.Cells(fila, claseCol).Value
```

```
norma = main.Cells(fila, normaCol).Value
```

```
pnomUsada = main.Cells(fila, pnomUsadaCol).Value
```

```
fdca = main.Cells(fila, fdcaCol).Value
```

```
fdcb = main.Cells(fila, fdcbRow).Value
```

```
nivel = main.Cells(fila, nivelCol).Value
```

```
If nivel = "Alta" Then
```

```
    aumento = aumento + 4
```

```
End If
```

```
If nivel = "Premium" Then
```

```
    aumento = aumento + 8
```

```
End If
```

```
ea = 0
```

```
eb = 0
```

```
If norma = "IEEE 112" Then
```

```
    IEEE.Select
```

```
    IEEE.Cells(7, 1).Select
```

```
    Do Until IsEmpty(ActiveCell)
```

```
        If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 1).Value = clase Then
```

```
            If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 2).Value = nsin Then
```

```
                If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value = pnomUsada Then
```

```

Select Case fdca
  Case 100
    ea = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
    eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
  Case 75
    ea = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 5 + aumento).Value
    eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
  Case 50
    ea = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 6 + aumento).Value
    eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 5 + aumento).Value
  Case 25
    ea = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 7 + aumento).Value
    eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 6 + aumento).Value
  Case 0
    ea = 0
    eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 7 + aumento).Value
End Select
End If
End If
End If
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
Else
  IEC.Select
  IEC.Cells(7, 1).Select
  Do Until IsEmpty(ActiveCell)
    If IEC.Cells(ActiveCell.Row, 1).Value = clase Then
      If IEC.Cells(ActiveCell.Row, 2).Value = nsin Then
        If IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value = pnomUsada Then
          Select Case fdca
            Case 100.
              ea = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
              eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
            Case 75
              ea = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 5 + aumento).Value
              eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value

```



```

        Case 50
            ea = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 6 + aumento).Value
            eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 5 + aumento).Value
        Case 25
            ea = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 7 + aumento).Value
            eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 6 + aumento).Value
        Case 0
            ea = 0
            eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 7 + aumento).Value
    End Select
End If
End If
End If
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
End If
main.Select
main.Cells(fila, eaRow).Value = ea
main.Cells(fila, ebRow).Value = eb
main.Cells(fila, eaRow).Select

End Sub

```

//Para que dicha función se aplique a lo largo de ambas columnas hasta el final de la lista de valores ingresados, se requiere del siguiente comando://

```
Sub FactoresCargaLimiteMotorEnUsoBarrido()
```

```

    Set main = Sheets("Hoja1")
    pnomCol = 4
    nsinCol = 8
    claseCol = 9
    nivelCol = 10
    normaCol = 11
    fila = 7

```

main.Cells(fila, 4).Select

Do Until IsEmpty(main.Cells(fila, 4))

If IsEmpty(main.Cells(fila, pnomCol)) = False Then

If IsEmpty(main.Cells(fila, nsinCol)) = False Then

If IsEmpty(main.Cells(fila, claseCol)) = False Then

If IsEmpty(main.Cells(fila, nivelCol)) = False Then

If IsEmpty(main.Cells(fila, normaCol)) = False Then

Call FactoresCargaLimiteMotorEnUso(fila)

End If

End If

End If

End If

End If

fila = fila + 1

main.Cells(fila, 4).Select

Loop

main.Cells(fila, 43).Select

End Sub

//Cálculo automático//

Eficiencia 1 [%] ----- $\eta_1 = \left(\frac{\eta_b - \eta_a}{f_{dc_b} - f_{dc_a}} \right) \cdot (f_{dc_1} - f_{dc_a}) + \eta_a$

Eficiencia ajustada 1 [%] ----- $\eta_{aj1} = f_{dv} \cdot \left(\frac{\eta_1}{100} + f_{vv} - fre \right) \cdot 100$

Potencia eléctrica útil [kW] ----- $P_{U1} = \frac{\eta_{aj1}}{100} \cdot P_{T1}$

6.3.7 Cálculo de la eficiencia del motor de reemplazo, Motor 2

//Selección de lista desplegable//

Nivel de Eficiencia -----

- Estándar
- Alta
- Premium

Norma Referente -----

- IEEE 112
- IEC 34-2-1

//Cálculo automático//

$$\text{Potencia eléctrica útil [kW]} \text{ ----- } P_{U2} = \frac{P_{U1}}{0.75}$$

$$\text{Potencia mecánica nominal [HP]} \text{ ----- } P_{eje2} = \frac{P_{U2}}{0.746} \approx P_{nom2}$$

//El valor obtenido para P_{eje2} debe ser redondeado y aproximado a alguno de los valores de potencia comerciales o que se tenga en la base de datos. Para conseguir esto en una sola celda, se utiliza el siguiente comando://

Sub PNominalMotorNuevo(fila)

Set IEEE = Sheets("IEEE 112")

Set IEC = Sheets("IEC 34-2-1")

Set main = Sheets("Hoja1")

pnomCol = 51

nsinCol = 8

claseCol = 9

nivelCol = 10

normaCol = 47

pnomUsada = 52

aumento = 0

pnom = main.Cells(fila, pnomCol).Value

nsin = main.Cells(fila, nsinCol).Value

clase = main.Cells(fila, claseCol).Value

nivel = main.Cells(fila, nivelCol).Value

norma = main.Cells(fila, normaCol).Value

If nivel = "Alta" Then

 aumento = aumento + 4

End If

If nivel = "Premium" Then

 aumento = aumento + 8

End If

pnomReal = 0

pnomReal100 = 0

pnomDelta = 99999

If norma = "IEEE 112" Then

IEEE.Select

IEEE.Cells(7, 1).Select

Do Until IsEmpty(ActiveCell)

If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 1).Value = clase Then

If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 2).Value = nsin Then

If IsEmpty(IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3)) = False Then

If Abs(pnom - IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value) < pnomDelta

Then

pnomDelta = Abs(pnom - IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value)

pnomReal = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value

pnomReal100 = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value

End If

End If

End If

End If

ActiveCell.Offset(1, 0).Select

Loop

Else

IEC.Select

IEC.Cells(7, 1).Select

Do Until IsEmpty(ActiveCell)

If IEC.Cells(ActiveCell.Row, 1).Value = clase Then

If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 2).Value = nsin Then

If IsEmpty(IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3)) = False Then

If Abs(pnom - IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value) < pnomDelta Then

pnomDelta = Abs(pnom - IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value)

pnomReal = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value

pnomReal100 = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value

End If

End If

End If

End If

ActiveCell.Offset(1, 0).Select

```

    Loop
End If

```

```

    main.Select
    main.Cells(fila, pnomUsada).Value = pnomReal
End Sub

```

// Para que dicha función se aplique a lo largo de la columna hasta el final de la lista de valores ingresados, se requiere del siguiente comando.//

```

Sub PNominalMotorNuevoBarrido()

```

```

    Set main = Sheets("Hoja1")
    pnomCol = 51
    nsinCol = 8
    claseCol = 9
    nivelCol = 48
    normaCol = 47
    fila = 7

```

```

    main.Cells(fila, 4).Select

```

```

Do Until IsEmpty(main.Cells(fila, 4))

```

```

    If IsEmpty(main.Cells(fila, pnomCol)) = False Then

```

```

        If IsEmpty(main.Cells(fila, nsinCol)) = False Then

```

```

            If IsEmpty(main.Cells(fila, claseCol)) = False Then

```

```

                If IsEmpty(main.Cells(fila, nivelCol)) = False Then

```

```

                    If IsEmpty(main.Cells(fila, normaCol)) = False Then

```

```

                        Call PNominalMotorNuevo(fila)

```

```

                    End If

```

```

                End If

```

```

            End If

```

```

        End If

```

```

    End If

```

```

    fila = fila + 1

```

```

    main.Cells(fila, 2).Select

```

Loop

main.Cells(fila, 52).Select

End Sub

//Cálculo automático//

Factor de carga del motor nuevo [%] ---- $fdc_2 = \frac{P_{U1} \cdot 100}{0.746 \cdot P_{nom2}}$

Factor de carga inmediato inferior [%] -- $fdc_c = \text{SI}(\text{NO}(\text{ESBLANCO}(\text{BA7})),$
 $\text{SI}(\text{Y}(\text{BA7} \geq 0, \text{BA7} < 25), 0,$
 $\text{SI}(\text{Y}(\text{BA7} \geq 25, \text{BA7} < 50), 25,$
 $\text{SI}(\text{Y}(\text{BA7} \geq 50, \text{BA7} < 75), 50,$
 $\text{SI}(\text{Y}(\text{BA7} \geq 75, \text{BA7} \leq 100), 75, 100))))), ""))$

//La función para el cálculo de fdc_c realiza la asignación del valor según lo especificado en el apartado 4.4.4, con respecto al valor obtenido para fdc_2 , ubicado en la columna "BA7"//

//Cálculo automático//

Factor de carga inmediato superior [%] $fdc_d = \text{SI}(\text{BB7} < > "", \text{SI}(\text{BB7} < 100,$
 $\text{BB7} + 25, 100), "")$

//La función para el cálculo de fdc_d realiza la asignación del valor según lo especificado en el apartado 4.4.4. Para simplificar los cálculos se basa en el valor obtenido para fdc_c , ubicado en la columna "BB7", y busca su inmediato superior de los cuatro valores que puede coger, y que debe ser 25 unidades mayor//

//Cálculo automático//

Eficiencia de fdc_a [%] ----- η_a

Eficiencia de fdc_b [%] ----- η_b

//En base a la información obtenida sobre la Clase de motor y Velocidad Síncrona del Motor 1, y en base a la Potencia Nominal, Norma referente, Nivel de Eficiencia y factores de carga inmediatos superior e inferior del Motor 2, el programa ubicará aquellos valores de eficiencia que cumplan con todas esas características, y los mostrará en la columnas respectivas de η_c y η_d .

El código fuente utilizado para esta acción en una sola celda es el siguiente://

Sub FactoresCargaLimiteMotorNuevo(fila)

Set IEEE = Sheets("IEEE 112")

Set IEC = Sheets("IEC 34-2-1")

Set main = Sheets("Hoja1")

nsinCol = 8

claseCol = 9

nivelCol = 48

normaCol = 47

pnomUsadaCol = 52

fdcaCol = 54

fdcbRow = 55

eaRow = 56

ebRow = 57

aumento = 0

nsin = main.Cells(fila, nsinCol).Value

clase = main.Cells(fila, claseCol).Value

norma = main.Cells(fila, normaCol).Value

pnomUsada = main.Cells(fila, pnomUsadaCol).Value

fdca = main.Cells(fila, fdcaCol).Value

fdcb = main.Cells(fila, fdcbRow).Value

nivel = main.Cells(fila, nivelCol).Value

If nivel = "Alta" Then

 aumento = aumento + 4

End If

If nivel = "Premium" Then

 aumento = aumento + 8

End If

ea = 0

eb = 0

If norma = "IEEE 112" Then

 IEEE.Select

 IEEE.Cells(7, 1).Select

 Do Until IsEmpty(ActiveCell)

```

If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 1).Value = clase Then
  If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 2).Value = nsin Then
    If IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value = pnomUsada Then
      Select Case fdca
        Case 100
          ea = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
          eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
        Case 75
          ea = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 5 + aumento).Value
          eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
        Case 50
          ea = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 6 + aumento).Value
          eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 5 + aumento).Value
        Case 25
          ea = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 7 + aumento).Value
          eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 6 + aumento).Value
        Case 0
          ea = 0
          eb = IEEE.Cells(ActiveCell.Row, 7 + aumento).Value
      End Select
    End If
  End If
End If
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
Else
  IEC.Select
  IEC.Cells(7, 1).Select
  Do Until IsEmpty(ActiveCell)
    If IEC.Cells(ActiveCell.Row, 1).Value = clase Then
      If IEC.Cells(ActiveCell.Row, 2).Value = nsin Then
        If IEC.Cells(ActiveCell.Row, 3).Value = pnomUsada Then
          Select Case fdca
            Case 100
              ea = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
              eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value

```



```

Case 75
    ea = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 5 + aumento).Value
    eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 4 + aumento).Value
Case 50
    ea = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 6 + aumento).Value
    eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 5 + aumento).Value
Case 25
    ea = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 7 + aumento).Value
    eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 6 + aumento).Value
Case 0
    ea = 0
    eb = IEC.Cells(ActiveCell.Row, 7 + aumento).Value
End Select
End If
End If
End If
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
End If
main.Select
main.Cells(fila, eaRow).Value = ea
main.Cells(fila, ebRow).Value = eb
main.Cells(fila, eaRow).Select

End Sub

//Para que dicha función se aplique a lo largo de ambas columnas hasta el final de la
lista de valores ingresados, se requiere del siguiente comando://

Sub FactoresCargaLimiteMotorNuevoBarrido()

Set main = Sheets("Hoja1")
pnomCol = 52
nsinCol = 8
claseCol = 9
nivelCol = 48

```

normaCol = 47

fila = 7

main.Cells(fila, 4).Select

Do Until IsEmpty(main.Cells(fila, 4))

 If IsEmpty(main.Cells(fila, pnomCol)) = False Then

 If IsEmpty(main.Cells(fila, nsinCol)) = False Then

 If IsEmpty(main.Cells(fila, claseCol)) = False Then

 If IsEmpty(main.Cells(fila, nivelCol)) = False Then

 If IsEmpty(main.Cells(fila, normaCol)) = False Then

 Call FactoresCargaLimiteMotorNuevo(fila)

 End If

 End If

 End If

 End If

 End If

 fila = fila + 1

 main.Cells(fila, 1).Select

Loop

 main.Cells(fila, 57).Select

End Sub

//Cálculo automático//

Eficiencia 2[%] ----- $\eta_2 = \left(\frac{\eta_d - \eta_c}{f d c_d - f d c_c} \right) \cdot (f d c_2 - f d c_c) + \eta_c$

Eficiencia ajustada 2 [%] ----- $\eta_{aj2} = f d v \cdot \left(\frac{\eta_2}{100} + f v v \right) \cdot 100$

Potencia activa 2 [kW] ----- $P_{T2} = \frac{P_{nom2} \cdot 0.746 \cdot f d c_2}{\eta_{aj2}}$

//Ingreso manual de datos//

Costo de compra del motor nuevo [\$] --- C_{MN}

Costo de envío de motor nuevo [\$] ----- C_{en}

Costo de instalación motor nuevo [\$] ---- C_{inst}

Descuento [\$] ----- $desc$

6.3.8 Viabilidad de inversión

//Cálculo automático//

Ahorro de Potencia [kW] ----- $A_P = P_{T1} - P_{T2}$

Ahorro de Energía [kWh] ----- $A_E = A_P \cdot hr$

Ahorro económico anual [\$/año] ----- $A_{EA} = 12 \cdot t_P \cdot A_P + t_E \cdot A_E$

Costo de reemplazo [\$] ----- $C_{RM} = C_{MN} + C_{en} + C_{inst} - desc$

Periodo simple de retorno [años] ----- $PSR = \frac{C_{RM}}{A_{EA}}$

CAPITULO VII

TRABAJO DE CAMPO

7.1 Generalidades

Los métodos para la determinación de la eficiencia presentados en el Capítulo IV, y las aplicaciones computacionales, correspondientes a cada uno de los métodos, presentadas en el Capítulo VI han sido elaborados para ser utilizados en el mismo lugar de operación de los motores a analizar. Se les denominó Método de Campo, y por lo tanto en este capítulo se presenta su funcionalidad usando datos recopilados en un estudio energético, del cual se participó por considerarlo parte principal complementaria de este estudio.

La muestra de 10 motores y sus respectivos datos mostrados, son parte de un estudio energético a la empresa de Cementos Yura realizado por la consultora CENYTEC S.A.C, teniendo el permiso necesario para su utilización en este estudio.

Las condiciones en campo han permitido tener consideraciones especiales a la hora de diseñar las aplicaciones computacionales, tratando de otorgar la mayor cantidad de opciones para que se puedan resolver todas las situaciones que se suelen presentar en campo. Mientras se vayan presentando los cuadros y gráficos comparativos se irán mencionando aquellas situaciones propias de campo, así como la solución que se les dio para tenerlas en consideración.

Primero se muestran los resultados obtenidos con el Método del Deslizamiento, usando la variante escogida en este estudio, aquella propuesta por Anibal Almeida y Fernando Ferreira. De manera conjunta se muestran los resultados obtenidos con las otras variantes de dicho método: la original y aplicando el factor de corrección de la tensión. De manera complementaria se muestran los resultados de la viabilidad económica al considerar el reemplazo de cada uno de los motores por otros de mejor eficiencia.

Segundo se muestran los resultados obtenidos con el Método de las Eficiencias Ajustadas, incluyendo la parte de la viabilidad económica ante la posibilidad de reemplazarlo por motores de mejor eficiencia y de la potencia adecuada.

Finalmente se hace una comparación entre los dos métodos propuestos, resaltando el porqué de sus resultados diferentes.

7.2 Aplicación del Método del Deslizamiento propuesto

Como se mencionó en el apartado 4.3.6, para la elaboración de la aplicación computacional en base al Método del Deslizamiento, se ha considerado el uso de una variante para el cálculo del factor de carga. Una variante que permite obtener valores de eficiencia no tan subestimados, o sea más cercanos a la realidad. En dicha variante el factor de carga se representa según la fórmula $fdc = \frac{(s.n_{sin} - s^2).100}{(s_{nom}.n_{sin} - s_{nom}^2)}$ [%] (4.39).

En la Tabla N° 7.1 se muestran los motores usados junto con sus características nominales:

Tabla N° 7.1 Datos de placa (nominales) necesarios para la aplicación del Método del Deslizamiento.

Código	DATOS DE PLACA							
	Potencia Mecánica Nominal		Tensión Nominal	Corriente Nominal	Velocidad nominal	Velocidad Síncrona	Deslizamiento nominal	Porcentaje de deslizamiento nominal
	P_{nom1}		V_{nom1}	I_{nom1}	n_{nom1}	n_{sin}	S_{nom}	Z_{nom}
	[HP] o [kW]		[Vt]	[A]	[RPM]	[RPM]	[RPM]	[%]
1001A	52,00 kW	69,71	440,00	86,00	1780	1800	20,00	1,11
518	132,00 kW	176,9	440,00	243,50	3575	3600	25,00	0,69
520	132,00 kW	176,9	440,00	206,00	3575	3600	25,00	0,69
610D	15,00 kW	20,11	440,00	30,00	1750	1800	50,00	2,78
C17	30,00 kW	40,21	440,00	55,00	1752	1800	48,00	2,67
G7	30,00 kW	40,21	440,00	55,00	1760	1800	40,00	2,22
L18	30,00 kW	40,21	440,00	53,00	1770	1800	30,00	1,67
L27	75,00 kW	100,5	440,00	140,00	1770	1800	30,00	1,67
N8	44,76 kW	60	440,00	73,00	3540	3600	60,00	1,67
N9	44,76 kW	60	440,00	73,00	3540	3600	60,00	1,67

La columna denominada “Código” se mantiene en todas las tablas siguientes, porque es una manera más fácil para identificar a los motores, y además por ser el código asignado dentro de la planta donde se hizo el estudio energético.

Como se puede ver hay una columna dedicada a la selección de las unidades de la Potencia Mecánica Nominal, esto debido a que no siempre se van a tener estos datos en una sola unidad, y este parámetro es de mayor utilidad cuando se tiene en HP, entonces, dependiendo de las unidades que se ingresen, en la cuarta columna se expresan todos los valores en HP.

En la hoja de cálculo, las columnas de color blanco serán aquellas donde el operador tendrá que ingresar los datos de manera manual, las columnas de algún color distinto, de preferencia, no se deben alterar ya que los resultados se mostrarán automáticamente de acuerdo a los valores ingresados previamente.

En la primera sección, tanto el deslizamiento como el porcentaje de deslizamiento son magnitudes que se calculan automáticamente teniendo los datos de placa.

En la Tabla N° 7.2 se muestra una primera parte de la sección correspondiente a los datos medidos. Se aprecia que para cada motor se deben tener los valores de cada una de las tensiones entre fases, el programa de manera automática calculará la Tensión Promedio.

Tabla N° 7.2 Datos medidos de las tensiones entre fases

Código	DATOS MEDIDOS			
	Tensión entre fases "rs"	Tensión entre fases "st"	Tensión entre fases "tr"	Tensión promedio
	V_{rs} [V]	V_{st} [V]	V_{tr} [V]	V_{prom} [V]
1001A	452,04	451,22	451,16	451,48
518	459,44	458,35	458,40	458,73
520	464,22	462,09	461,90	462,74
610D	455,90	457,99	455,80	456,56
C17	445,91	446,05	442,00	444,65
G7	449,25	448,01	444,32	447,19
L18	451,26	450,71	450,07	450,68
L27	450,65	448,42	451,71	450,26
N8	426,32	424,72	425,95	425,66
N9	426,32	424,72	425,95	425,66

En un estudio de campo se debe contar con un analizador de redes, el cual se deja conectado por un tiempo largo determinado, para que recopile datos tanto de la tensión, la corriente y el factor de carga, entre otros datos. De acuerdo al tiempo con el que se cuenta para hacer el estudio, los analizadores de redes se programan para tomar datos cada cierto tiempo. Puede ser cada 15 minutos, cada 10 minutos, cada 1 minuto, etc, eso queda a decisión del operario.

En las columnas de color blanco, lo que se ingresan son valores promedios, para cada una de las fases para cada motor, en base a la gran cantidad de datos que el analizador de redes haya registrado. El uso de un analizador de redes permite obtener datos mucho más reales.

En caso no se cuente con un analizador de redes, sino más bien con un multímetro y con pinzas amperimétricas, pues en ese caso se hace una sola toma de datos a cada fase y ese mismo valor es el que se ingresa a la hoja de cálculo.

En la Tabla N° 7.3 se muestran los valores de las corrientes para cada fase en las columnas en blanco, y en la de color verde se calcula la corriente promedio.

Tabla N° 7.3 Datos medidos de las corrientes en cada fase

Código	DATOS MEDIDOS			
	Corriente de fase "r"	Corriente de fase "s"	Corriente de fase "t"	Corriente promedio
	I_r [A]	I_s [A]	I_t [A]	I_{prom} [A]
1001A	52,99	52,76	50,58	52,11
518	65,56	69,16	67,52	67,41
520	73,41	72,58	69,69	71,89
610D	13,78	14,37	13,55	13,90
C17	18,63	20,13	18,79	19,18
G7	29,99	31,51	30,43	30,65
L18	36,77	40,54	37,07	38,13
L27	83,50	86,17	83,62	84,43
N8	58,95	60,12	62,06	60,38
N9	58,95	60,12	62,06	60,38

En la Tabla N° 7.4 se muestra la última parte correspondiente a la sección de datos medidos. Para el cálculo de los factores de potencia se puede proceder de dos maneras.

Se puede seguir el procedimiento que se usa para el cálculo de las tensiones y corrientes, programando el analizador de redes para que mida valores del factor de potencia de cada fase en cada intervalo del análisis. Luego, para cada fase, de todos los datos medidos en cada intervalo, se obtiene manualmente un promedio para cada fase, y finalmente se calcula un promedio de las tres fases, siendo este el valor que se colocaría en la columna indicada.

También se puede programar el analizador de redes para que en cada intervalo calcule los factores de potencia promedio entre las tres fases. Y luego, de entre todos los factores de potencias promedios de cada intervalo, se calcula un único valor promedio total, y es el que se ingresa en la columna indicada. Para el diseño del programa, se toma en cuenta la segunda consideración, con la intención de agilizar el cálculo y no cargar la presentación del programa,

La Potencia Activa de entrada se calcula de manera automática, y va acompañado de un subíndice 1 para indicar que es un valor correspondiente al Motor en Estudio.

La velocidad de operación se debe obtener usando un tacómetro óptico o estroboscópico. Con ese dato, el programa calcula de manera automática el deslizamiento real y su porcentaje de deslizamiento real.

En la Tabla N° 7.5 se han juntado las columnas correspondientes a todas las velocidades y sus respectivos deslizamientos para poder confirmar los valores medidos y calculados

Tabla N° 7.4 Datos medidos del factor de potencia, y parámetros calculados con los datos medidos

Código	DATOS MEDIDOS				
	Factor de potencia	Potencia Activa	Velocidad de operación	Deslizamiento Real	Porcentaje de deslizamiento real
	f_{dp1}	P_{T1} [kW]	n [RPM]	s [RPM]	Z [%]
1001A	0,72	29,14	1790	10	0,56
518	0,85	45,69	3593	7	0,19
520	0,85	49,21	3592	8	0,22
610D	0,59	6,49	1784	16	0,89
C17	0,60	8,89	1793	7	0,39
G7	0,84	20,03	1786	14	0,78
L18	0,67	19,97	1782	18	1,00
L27	0,76	50,13	1784	16	0,89
N8	0,93	41,57	3560	40	1,11
N9	0,93	41,57	3564	36	1,00

Tabla N° 7.5 Comparación entre velocidad nominal, síncrona y de operación y sus deslizamientos

Código	Velocidad Síncrona	Velocidad nominal	Deslizamiento nominal	Velocidad de operación	Deslizamiento Real
	n_{sin} [RPM]	n_{nom1} [RPM]	s_{nom} [RPM]	n [RPM]	s [RPM]
1001A	1800	1780	20	1790	10
518	3600	3575	25	3593	7
520	3600	3575	25	3592	8
610D	1800	1750	50	1784	16
C17	1800	1752	48	1793	7
G7	1800	1760	40	1786	14
L18	1800	1770	30	1782	18
L27	1800	1770	30	1784	16
N8	3600	3540	60	3560	40
N9	3600	3540	60	3564	36

De esa manera, se aprecia que la velocidad de operación (velocidad real) es mayor a la velocidad nominal y menor que la velocidad síncrona, lo cual cumple para un funcionamiento correcto del motor, sin tomar en cuenta su eficiencia aún.

Luego, en la Tabla N° 7.6 se muestra la sección correspondiente a los Datos Extras, ya que serán usados en la parte complementaria para conocer la viabilidad económica en el posible reemplazo de los motores por otros de mejor eficiencia.

Las horas de operación se deben estimar de acuerdo a lo mencionado en el apartado 5.4.3, para cuestiones de facilidad en el cálculo se ha considerado que todos los

motores analizados trabajan 8400 horas anuales, lo que equivale a operar en tres turnos seguidos durante casi todo el año.

Tabla N° 7.6 Datos Extras para Viabilidad Económica

Código	DATOS EXTRAS		
	Horas de operación anual	Tarifa Eléctrica de potencia	Tarifa Eléctrica de energía
	<i>hr</i> [hr]	<i>tP</i> [\$/kW.mes]	<i>tE</i> [\$/kWh]
1001A	8400	4,94	0,0426
518	8400	4,94	0,0426
520	8400	4,94	0,0426
610D	8400	4,94	0,0426
C17	8400	4,94	0,0426
G7	8400	4,94	0,0426
L18	8400	4,94	0,0426
L27	8400	4,94	0,0426
N8	8400	4,94	0,0426
N9	8400	4,94	0,0426

Para el cálculo de la Tarifa Eléctrica de Potencia, se recurrió a la información brindada por Osinergmin [25], para la zona de Arequipa, según la Tarifa MT3 del mes de Mayo del 2010.

El valor mostrado es un promedio de los valores correspondientes a los siguientes conceptos: Cargo por Potencia Activa de Generación en Punta y Fuera de Punta, y cargo por Potencia Activa de Distribución en Punta y Fuera de Punta. Eso se hace con el fin de reducir el número de parámetros a manejar y para agilizar el cálculo, teniendo siempre presente que lo que se va a conseguir con respecto a precios no será totalmente exacto sino más bien una estimación de mucha referencia.

Para el cálculo de la Tarifa Eléctrica de Energía, por los mismos motivos indicados en el párrafo anterior, se recurrió a la información de la misma tabla de tarifas, pero se promediaron los valores de los siguientes conceptos: Cargo por Energía Activa en Punta y cargo por Energía Activa Fuera de Punta.

Hay que tener muy en cuenta las unidades en que se consiguen los valores de los cargos de la tarifa, ya que al ingresarlos en la hoja de cálculo se debe hacer en dólares.

En la Tabla N° 7.7 se muestra la sección denominada Datos Calculados, ya que en dichas columnas los cálculos se hacen de manera automática usando toda la información ingresada anteriormente, y siguiendo el procedimiento indicado en el apartado 5.4.2. Por esa mismo razón dichas columnas se muestran de color verde, ya que no es necesario manipular la información mostrada en ellas.

Tabla N° 7.7 Cálculo de la eficiencia del Motor 1

Código	DATOS CALCULADOS						
	Factor de carga	Potencia mecánica real	Potencia eléctrica útil	Eficiencia	Potencia Activa perdida	Costos Operativos Anuales	Costo pérdidas anuales
	fdc_1 [%]	P_{eje1} [HP]	P_{U1} [kW]	η_1 [%]	P_p [kW]	C_{op} [\$]	C_p [\$]
1001A	50,28	35,05	26,15	89,71	3,00	10428,83	1072,72
518	28,14	49,79	37,15	81,29	8,55	16351,50	3059,14
520	32,15	56,89	42,44	86,25	6,77	17607,89	2420,85
610D	32,62	6,56	4,89	75,38	1,60	2322,79	571,79
C17	14,92	6,00	4,48	50,39	4,41	3179,70	1577,52
G7	35,52	14,28	10,66	53,20	9,37	7166,39	3353,56
L18	60,41	24,29	18,12	90,73	1,85	7147,27	662,48
L27	53,76	54,04	40,32	80,42	9,82	17940,26	3513,45
N8	67,04	40,23	30,01	72,18	11,56	14876,08	4137,81
N9	60,41	36,24	27,04	65,04	14,53	14876,08	5200,78

En la Tabla N° 7.8 se muestra la sección denominada Datos Básicos correspondientes a un motor de reemplazo (Motor 2). El procedimiento presentado tiene como base aquel propuesto por el Motor Challenge, un programa del Departamento de Energía de los Estados Unidos [21], donde ante la posibilidad de un reemplazo sólo toma en cuenta una mejora en la eficiencia, considerando la misma potencia mecánica nominal del Motor 1.

En base a esa información se ingresa en las columnas respectivas el costo de compra, de envío, de instalación y algún descuento, en caso se consiga.

Tabla N° 7.8 Datos Básicos del Motor de reemplazo (Motor 2)

Código	DATOS BÁSICOS				
	Eficiencia	Costo de compra	Costo de envío	Costo de instalación	Descuento
	η_2 [%]	C_{MN} [\$]	C_{en} [\$]	C_{inst} [\$]	$desc$ [\$]
1001A	94,1	5059	1011,80	758,85	354,13
518	95	12185	2437,00	1827,75	852,95
520	95	12185	2437,00	1827,75	852,95
610D	93	1424	284,80	213,60	99,68
C17	93,6	2840	568,00	426,00	198,80
G7	93,6	2840	568,00	426,00	198,80
L18	93,6	2840	568,00	426,00	198,80
L27	94,5	6101	1220,20	915,15	427,07
N8	93,6	3700	740,00	555,00	259,00
N9	93,6	3700	740,00	555,00	259,00

Tabla N° 7.9 Viabilidad de Inversión para la compra de un motor nuevo

Código	VIABILIDAD DE INVERSION				
	Ahorro de Potencia	Ahorro de Energía	Ahorro económico anual	Costo de reemplazo	Periodo simple de retorno
	<i>AP</i> [kW]	<i>AE</i> [kWh]	<i>AEA</i> [\$]	<i>CRM</i> [\$]	<i>PSR</i> [años]
1001A	1,36	11410,75	566,63	6475,52	11,43
518	6,59	55388,32	2750,43	15596,80	5,67
520	4,53	38064,25	1890,16	15596,80	8,25
610D	1,23	10328,38	512,88	1822,72	3,55
C17	4,10	34459,25	1711,15	3635,20	2,12
G7	8,64	72602,24	3605,22	3635,20	1,01
L18	0,61	5142,56	255,36	3635,20	14,24
L27	7,47	62765,11	3116,74	7809,28	2,51
N8	9,51	79895,92	3967,40	4736,00	1,19
N9	12,69	106554,37	5291,19	4736,00	0,90

El reemplazo de un motor operativo por uno de mayor eficiencia es conveniente cuando el Periodo Simple de Retorno de la inversión adicional es menor a los 3 años. Como se puede ver en la Tabla N° 7.9 hay casos donde el PSR es mayor al tiempo ideal de 3 años, y eso se debe a que según el método de análisis usado sólo se considera el reemplazo por un motor de mayor eficiencia mas no por uno con la potencia nominal indicada.

Aquellos motores que muestran un PSR muy elevado es porque muestran un Ahorro de Potencia muy reducido, lo cual obliga a pensar en un motor de reemplazo de mayor eficiencia al ya propuesto.

7.2.1 Comparación entre las variantes existentes

Como se indicó en el apartado 4.3, existen varias maneras para que la precisión de los resultados obtenidos con este método sea mejorada y más próxima a la realidad. Para lograr eso se tienen que aplicar distintas variantes a la fórmula del factor de carga.

A continuación se hará muestra de las eficiencias calculadas con cada uno de las variantes presentadas anteriormente, para demostrar que la escogida para la elaboración del software en este estudio es la que más precisión ofrece, basándonos en que de por sí, el Método de Deslizamiento original otorgaba datos de eficiencia subestimados.

El Método del Deslizamiento original calcula su factor de carga según la fórmula $f_{dc} = \left(\frac{s}{s_{nom}} \right) \cdot 100$ [%] (4.23), fórmula que se deduce de suponer una relación lineal entre el deslizamiento y la Potencia de salida. En la Tabla N° 7.10 se muestran los valores de eficiencia obtenidos al aplicar dicha fórmula.

Tabla N° 7.10 Uso del factor de carga original

Código	Factor de carga fdc [%]	Potencia mecánica real P_{eje1} [HP]	Potencia eléctrica útil P_{U1} [kW]	Eficiencia η_1 [%]
1001A	50,00	34,85	26,00	89,22
518	28,00	49,54	36,96	80,89
520	32,00	56,62	42,24	85,85
610D	32,00	6,43	4,80	73,95
C17	14,58	5,86	4,38	49,24
G7	35,00	14,08	10,50	52,43
L18	60,00	24,13	18,00	90,12
L27	53,33	53,62	40,00	79,79
N8	66,67	40,00	29,84	71,78
N9	60,00	36,00	26,86	64,60

En el apartado 4.3.5 se mencionó que existe una relación inversa entre el deslizamiento y el cuadrado de la tensión en los bornes del motor. De esa manera se aplicaba un factor de corrección de la tensión y el factor de carga quedaba expresado según la fórmula $fdc = \left(\frac{s}{s_{nom}}\right) \cdot \left(\frac{V_{prom}}{V_{nom}}\right)^2 \cdot 100$ [%] (4.27). En la Tabla N° 7.11 se muestran los valores de eficiencia obtenidos al aplicar dicha fórmula, diferenciándolos con el uso de un asterisco (*).

Tabla N° 7.11 Uso del factor de carga original con corrección de tensión

Código	Factor de carga * fdc^* [%]	Potencia mecánica real* P^*_{eje1} [HP]	Potencia eléctrica útil* P^*_{U1} [kW]	Eficiencia * η^*_1 [%]
1001A	52,64	36,69	27,37	93,93
518	30,43	53,85	40,17	87,92
520	35,39	62,62	46,72	94,95
610D	34,45	6,93	5,17	79,62
C17	14,89	5,99	4,47	50,28
G7	36,15	14,54	10,85	54,16
L18	62,95	25,31	18,88	94,55
L27	55,85	56,15	41,89	83,55
N8	62,39	37,44	27,93	67,18
N9	56,15	33,69	25,13	60,46

Se puede ver que en casi todos los motores, salvo en los dos últimos con código N8 y N9, la eficiencia mejoró en aproximadamente 5 puntos porcentuales al haber hecho uso del factor de corrección de tensión. En los motores con códigos N8 y N9 sucedió el efecto contrario, la eficiencia sufrió una disminución, ocasionando un alejamiento aún peor sobre

lo que debe ser la eficiencia en la realidad. Eso es debido a que para esos dos casos su Tensión Promedio es menor a la Tensión Nominal.

En general las condiciones que se presentan en campo, en un 80% de los casos, son similares a la que se aprecian en los motores N8 y N9, o sea sufren de sub tensión. Los datos de la Tabla N° 7.10 y Tabla N° 7.11 dejan ver que la aplicación del factor de corrección no es algo que se pueda usar de manera general en todos los casos.

En la Tabla N° 7.12 se vuelve a presentar los datos obtenidos con la variante utilizada en este estudio para la programación de la hoja de cálculo denominada como Método de Deslizamiento, usando la fórmula $fdc = \frac{(s \cdot n_{sin} - s^2) \cdot 100}{(s_{nom} \cdot n_{sin} - s_{nom}^2)}$ [%] (4.39), para la obtención del valor del factor de carga. A cada uno de los parámetros de esta tabla se les ha asignado dos asteriscos (**) para diferenciarlos de las variantes antes mencionadas.

Tabla N° 7.12 Uso del factor de potencia propuesto por este documento

Código	Factor de Carga ** fdc^{**} [%]	Potencia mecánica real** P^{**}_{eje1} [HP]	Potencia eléctrica útil** $P^{**}U1$ [kW]	Eficiencia ** $\eta^{**}1$ [%]
1001A	50,28	35,05	26,15	89,72
518	28,14	49,79	37,15	81,29
520	32,15	56,89	42,44	86,25
610D	32,62	6,56	4,89	75,39
C17	14,92	6,00	4,48	50,39
G7	35,52	14,28	10,66	53,21
L18	60,41	24,29	18,12	90,73
L27	53,76	54,04	40,32	80,42
N8	67,04	40,23	30,01	72,19
N9	60,41	36,24	27,04	65,04

La comparación apropiada se debe hacer con los valores mostrados en la Tabla N° 7.10, ya que en dichos valores tampoco se ha aplicado ningún factor de corrección relacionado a la tensión en los bornes del motor. Se puede ver que los valores de la Tabla N° 7.12, debido al uso de una fórmula distinta para el cálculo del factor de carga, son ligeramente mayores que los mostrados en la Tabla N° 7.10. La mejora final de la eficiencia es de aproximadamente 0.5 puntos porcentuales, que aunque aparentemente no sea mucho, ya es un logro al haber conseguido valores más cercanos a la realidad, y el haber reducido la subestimación originalmente obtenida.

A la última fórmula mencionada para el cálculo del factor de carga también se le puede aplicar un factor de corrección de tensión, bajo los mismos criterios explicados anteriormente en base a su relación inversa con el deslizamiento.

En la Tabla N° 7.13 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la fórmula (7.1) para el factor de carga. A cada uno de los parámetros de esta tabla se les ha asignado tres asteriscos (***) para diferenciarlos de las variantes antes mencionadas.

$$f_{dc} = \frac{(s \cdot n_{sin} - s^2) \cdot 100}{(s_{nom} \cdot n_{sin} - s_{nom}^2)} \cdot \left(\frac{V_{prom}}{V_{nom}} \right)^2 \quad (7.1)$$

Tabla N° 7.13 Uso del factor de potencia propuesto en este documento con corrección de tensión

Código	Factor de Carga *** f_{dc}^{***} [%]	Potencia mecánica real*** P^{***}_{eje1} [HP]	Potencia eléctrica útil*** P^{***}_{U1} [kW]	Eficiencia*** η^{***}_1 [%]
1001A	52,94	36,90	27,53	94,46
518	30,59	54,12	40,38	88,36
520	35,56	62,92	46,94	95,40
610D	35,12	7,06	5,27	81,17
C17	15,24	6,13	4,57	51,46
G7	36,69	14,75	11,01	54,96
L18	63,37	25,49	19,01	95,19
L27	56,29	56,59	42,22	84,21
N8	62,75	37,65	28,08	67,56
N9	56,53	33,92	25,30	60,87

En la Tabla N° 7.14 se hace una comparación directa de los valores de eficiencia obtenidos con a cada una de las variantes presentadas. Se observa que, en aquellos motores con sobretensión, la eficiencia obtenida al usar el factor de corrección de tensión es considerablemente mayor a sus correspondientes variantes que no usan dicho factor.

Tabla N° 7.14 Comparación de eficiencias usando las variantes para el Método del Deslizamiento

Código	Eficiencia η_1 [%]	Eficiencia * η^*_1 [%]	Eficiencia ** η^{**}_1 [%]	Eficiencia*** η^{***}_1 [%]
1001A	89,22	93,93	89,72	94,46
518	80,89	87,92	81,29	88,36
520	85,85	94,95	86,25	95,40
610D	73,95	79,62	75,39	81,17
C17	49,24	50,28	50,39	51,46
G7	52,43	54,16	53,21	54,96
L18	90,12	94,55	90,73	95,19
L27	79,79	83,55	80,42	84,21
N8	71,78	67,18	72,19	67,56
N9	64,60	60,46	65,04	60,87

El factor agregado es beneficioso sólo para aquellos motores cuya Tensión Promedio es mayor a la Tensión Nominal, y no para los que tengan condiciones inversas, como es el caso de los motores con código N8 y N9.

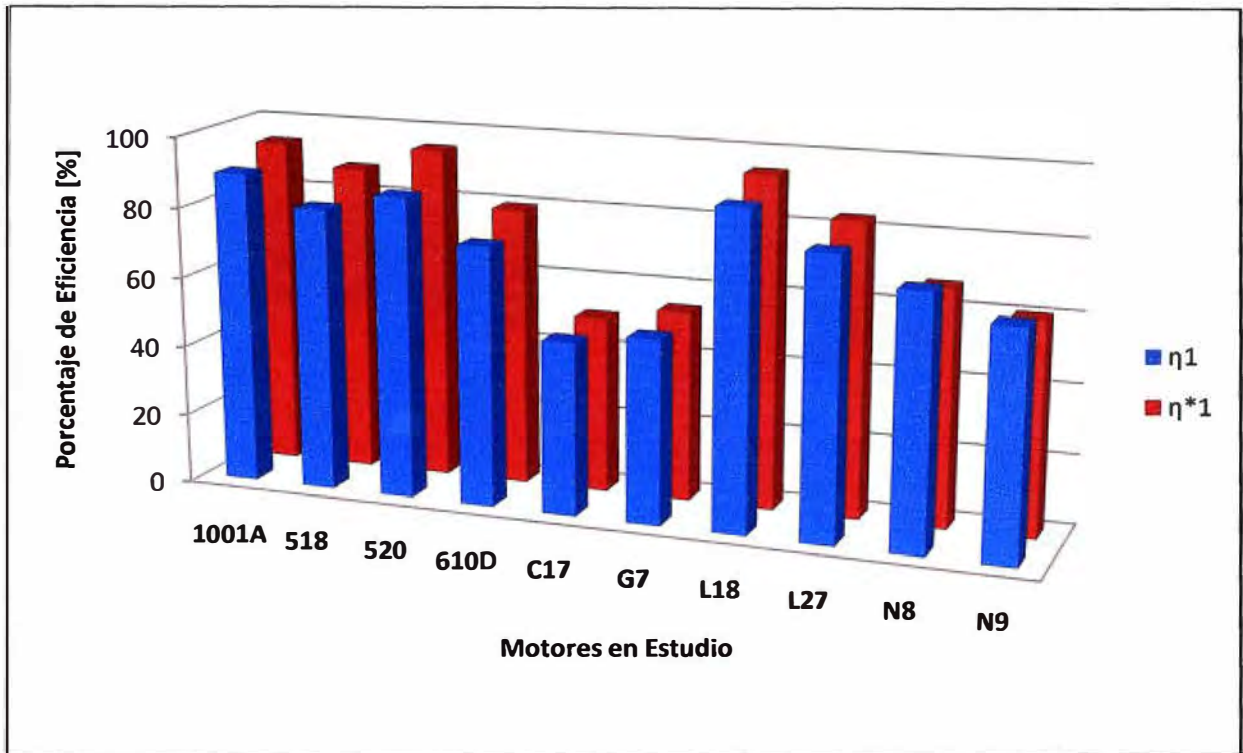


Fig. 7.1 Comparación de eficiencias obtenidas con el factor de carga original y agregándole el factor de corrección de tensión

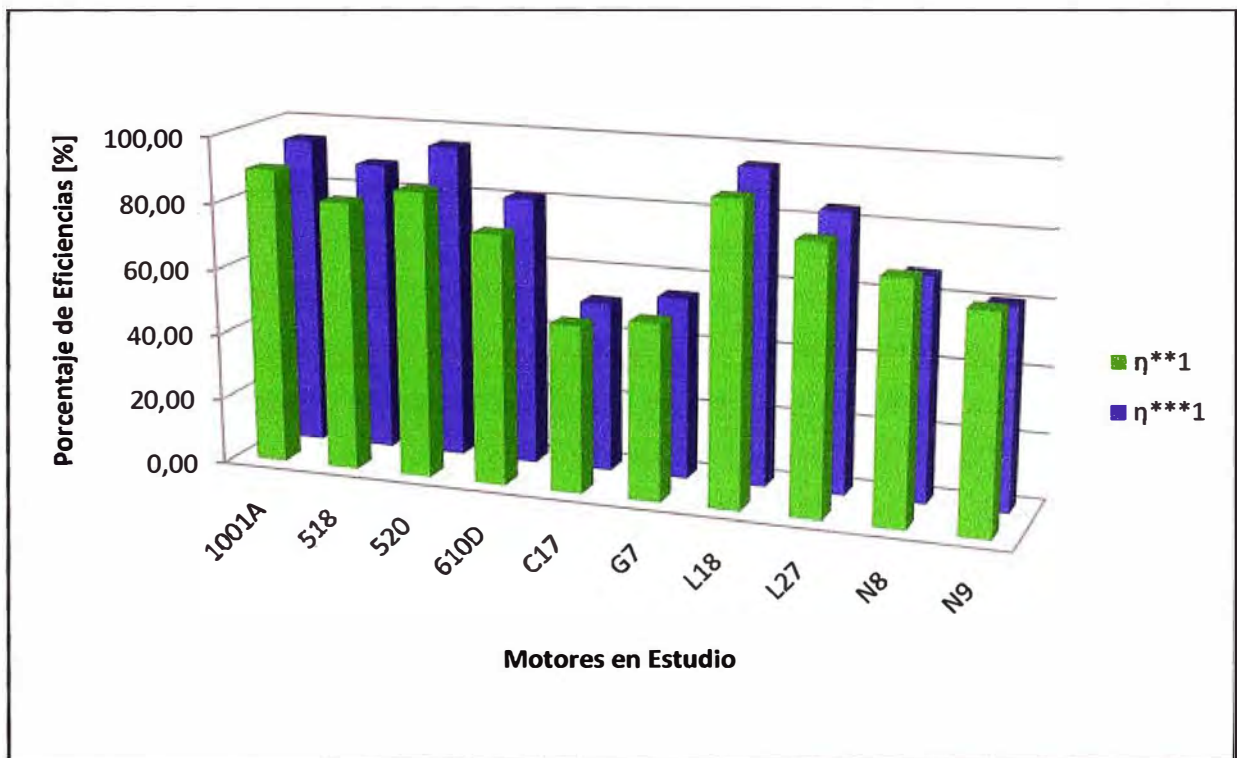


Fig. 7.2 Comparación de eficiencias obtenidas el factor de carga presentado en este estudio y agregándole el factor de corrección de tensión

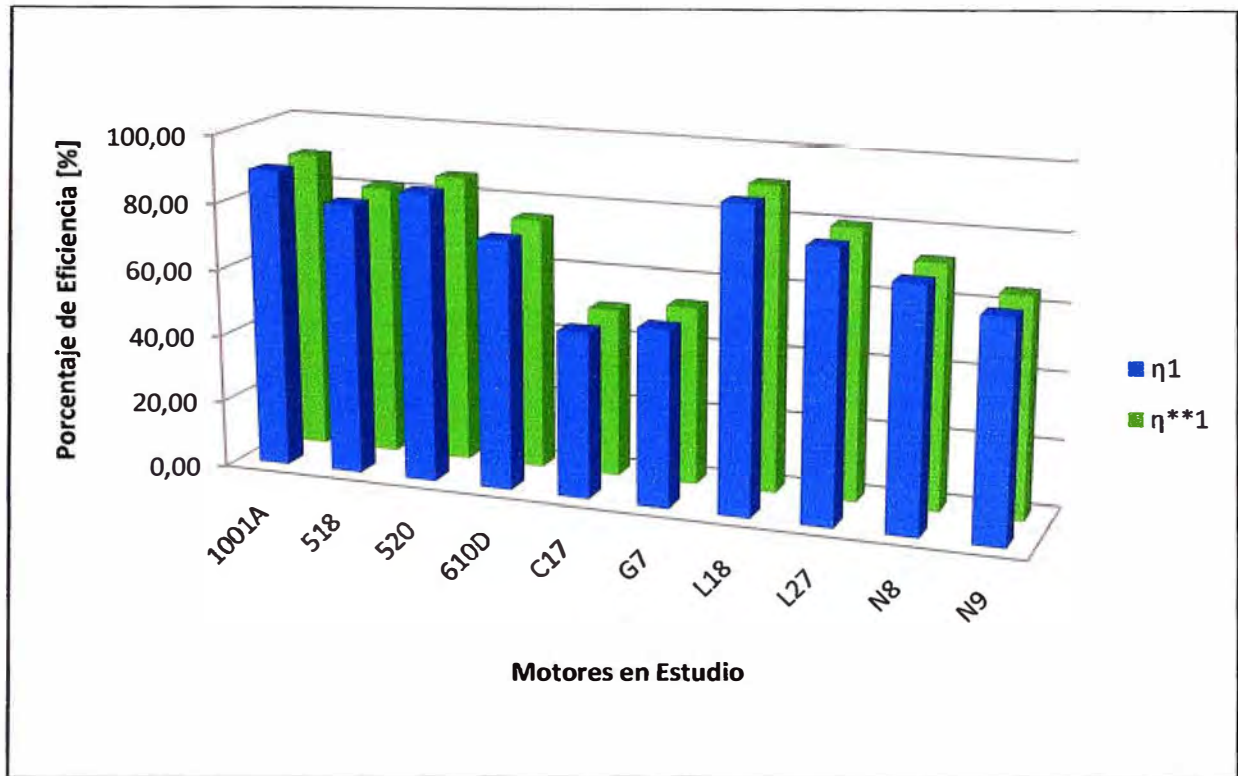


Fig. 7.3 Comparación de eficiencias entre las obtenidas con el factor de carga original y con la variante presentada en este estudio, sin ningún factor de corrección de tensión.

Para que a la hora de hacer un estudio energético, no se tenga que diferenciar entre aquellos motores con sobretensión o sub tensión, y aplicar un mismo criterio, en este estudio se omite la aplicación de este factor de corrección de tensión.

7.3 Aplicación del Método de las Eficiencias Ajustadas

El Método de las Eficiencias Ajustadas presentado también ha sido dividido en secciones para el ingreso de datos y publicación de resultados. Aquellas columnas que aparecen en color blanco son donde el operario tiene que ingresar la información solicitada. Aquellas columnas de color no deberían de tocarse, pues los resultados deben mostrarse automáticamente en base a la información ingresada manualmente.

La primera sección se denomina Datos de Placa, y se refiere a las características nominales del Motor en Estudio (Motor 1). En la Tabla N° 7.15 y Tabla N° 7.16 se muestran dichos valores nominales acompañados con el subíndice 1. Los datos de placa se han separado en dos tablas para apreciarlos de mejor manera.

En la Tabla N° 7.15 se ingresan la potencia mecánica, tensión, corriente y velocidad nominal. Dentro de la columna de la Potencia Mecánica Nominal se puede notar una separación para las unidades, y es que no siempre ese dato se va a encontrar en HP, lo cuál sería ideal, ya que en el resto del cálculo se necesita este valor en dichas unidades. Hay una columna contigua que no tiene ningún nombre, esa columna se usa para calcular

de manera interna el valor de la Potencia Mecánica Nominal en HP, dicha columna está oculta, para evitar confusiones y para no cargar la presentación del programa.

Tabla N° 7.15 Datos de Placa del Motor 1

Código	DATOS DE PLACA						
	Potencia Mecánica Nominal 1		Tensión Nominal	Corriente Nominal	Velocidad nominal	Velocidad Síncrona	
	P_{nom1} [HP] o [kW]		V_{nom1} [V]	I_{nom1} [A]	n_{nom1} [RPM]	n_{sin} [RPM]	
1001A	52,00	kW	69,71	440	86	1780	1800
518	132,00	kW	176,9	440	243.5	3575	3600
520	132,00	kW	176,9	440	206	3575	3600
610D	15,00	kW	20,11	440	30	1750	1800
C17	30,00	kW	40,21	440	55	1752	1800
G7	30,00	kW	40,21	440	55	1760	1800
L18	30,00	kW	40,21	440	53	1770	1800
L27	75,00	kW	100,5	440	140	1770	1800
N8	44,76	kW	60	440	73	3540	3600
N9	44,76	kW	60	440	73	3540	3600

La velocidad síncrona se puede elegir de una lista desplegable donde sólo se muestran los cuatro únicos valores de velocidad síncrona para 60 Hz: 900, 1200, 1800, y 3600 RPM. La selección deberá ser hecha por el operador de acuerdo al valor de velocidad nominal ingresado en la columna anterior.

En la Tabla N° 7.16 se muestran más datos nominales que deben ser ingresados al iniciar el estudio. Para la columna con el nombre "Clase", se despliega una lista con las opciones: Abierto y Cerrado, de acuerdo a la carcasa que tenga el Motor 1. Últimamente se usa en mayor porcentaje los de clase Cerrado. El nivel de eficiencia y la norma referente también se eligen de pequeñas listas desplegables como se indicó en el apartado 4.4.1.

La eficiencia nominal se mostrará automáticamente de acuerdo a lo indicado en el apartado 6.3.2, y por ello es una columna de color verde, ya que el operario sólo tendrá que presionar el botón **Calcular** para que el programa busque y muestre los valores correspondientes para cada motor. La columna denominada Potencia Nominal 1 Usada, es una columna para cálculo interno, donde se redondea el valor de la Potencia Nominal a usar para la búsqueda del valor de la Eficiencia Nominal 1, en la base de datos. Es una

columna que se puede esconder para no cargar la vista del programa, pero que es necesaria para cálculos futuros.

Tabla N° 7.16 Datos de placa y cálculo de la eficiencia nominal del Motor 1

Código	DATOS DE PLACA				
	Clase	Nivel de Eficiencia	Norma referente	Eficiencia nominal 1	Potencia Nominal 1 Usada
				Calcular	
				[%]	[HP]
1001A	Cerrado	Estándar	IEEE 112	92,2	75
518	Cerrado	Estándar	IEEE 112	92,8	200
520	Cerrado	Estándar	IEEE 112	92,8	200
610D	Cerrado	Estándar	IEEE 112	89,6	20
C17	Cerrado	Estándar	IEEE 112	90,7	40
G7	Cerrado	Estándar	IEEE 112	90,7	40
L18	Cerrado	Estándar	IEEE 112	90,7	40
L27	Cerrado	Estándar	IEEE 112	92,3	100
N8	Cerrado	Estándar	IEEE 112	92	60
N9	Cerrado	Estándar	IEEE 112	92	60

De la misma manera como para el Método del Deslizamiento, para la sección de los Datos Medibles se sigue el mismo criterio, tanto para los datos de tensión y corriente, que se muestran en la Tabla N° 7.17 y Tabla N° 7.18. Donde los datos de las columnas en blanco para cada motor, son preferentemente los valores promedios de cada fase, en base a un gran número de mediciones que se hizo previamente, en caso se haya contado con un analizador de redes. También podrían ser mediciones únicas hechas con un multímetro, pero se recomienda el uso del analizador de redes para obtener datos más confiables y que representen de mejor manera la situación real del sistema donde opera el motor.

La Tensión Promedio y la Corriente Promedio se calculan y muestran automáticamente de acuerdo a la información ingresada en las columnas anteriores. El factor de potencia que se muestra es el promedio de las tres fases, que se puede obtener directamente del analizador de redes al programarlo correctamente. Si no, se puede trabajar con los datos de cada una de las fases, también obtenidos con el analizador de redes, y luego se saca un promedio, el cual se ingresaría en la columna correspondiente de la Tabla N° 7.18.

Tabla N° 7.17 Datos medidos de las tensiones entre fases

Código	DATOS MEDIDOS			
	Tensión entre fases "rs"	Tensión entre fases "st"	Tensión entre fases "tr"	Tensión promedio
	V_{rs} [V]	V_{st} [V]	V_{tr} [V]	V_{prom} [V]
1001A	452,04	451,22	451,16	451,48
518	459,44	458,35	458,40	458,73
520	464,22	462,09	461,90	462,74
610D	455,90	457,99	455,80	456,56
C17	445,91	446,05	442,00	444,65
G7	449,25	448,01	444,32	447,19
L18	451,26	450,71	450,07	450,68
L27	450,65	448,42	451,71	450,26
N8	426,32	424,72	425,95	425,66
N9	426,32	424,72	425,95	425,66

Tabla N° 7.18 Datos medidos de las corrientes en fases

Código	DATOS MEDIDOS				
	Corriente de fase r	Corriente de fase s	Corriente de fase t	Corriente promedio	Factor de potencia promedio
	I_r [A]	I_s [A]	I_t [A]	I_{prom} [A]	f_{dp}
1001A	52,99	52,76	50,58	52,11	0,72
518	65,56	69,16	67,52	67,41	0,85
520	73,41	72,58	69,69	71,89	0,85
610D	13,78	14,37	13,55	13,90	0,59
C17	18,63	20,13	18,79	19,18	0,60
G7	29,99	31,51	30,43	30,65	0,84
L18	36,77	40,54	37,07	38,13	0,67
L27	83,50	86,17	83,62	84,43	0,76
N8	58,95	60,12	62,06	60,38	0,93
N9	58,95	60,12	62,06	60,38	0,93

En la Tabla N° 7.19 se ingresan los datos extras necesarios a la hora del cálculo de la viabilidad económica ante la posibilidad de reemplazar el motor por otro de características más adecuadas. Las horas de operación se deben estimar de acuerdo a lo mencionado en el apartado 5.4.3, para cuestiones de facilidad en el cálculo se ha

considerado que todos los motores analizados trabajan 8400 horas anuales, lo que equivale a operar en tres turnos seguidos durante casi todo el año.

Para el cálculo de la Tarifa Eléctrica de Potencia, se recurrió a la información brindada por Osinergmin [25], para la zona de Arequipa, según la Tarifa MT3 del mes de Mayo del 2010. El valor mostrado es un promedio de los valores correspondientes a los siguientes conceptos: Cargo por Potencia Activa de Generación en Punta y Fuera de Punta, y cargo por Potencia Activa de Distribución en Punta y Fuera de Punta. Eso se hace con el fin de reducir el número de parámetros a manejar y para agilizar el cálculo, teniendo siempre presente que lo que se va a conseguir con respecto a precios no será totalmente exacto sino más bien una estimación de mucha referencia.

Para el cálculo de la Tarifa Eléctrica de Energía, por los mismos motivos indicados en el párrafo anterior, se recurrió a la información de la misma tabla de tarifas, pero se promediaron los valores de los siguientes conceptos: Cargo por Energía Activa en Punta y cargo por Energía Activa Fuera de Punta.

Hay que tener muy en cuenta las unidades en que se consiguen los valores de los cargos de la tarifa, ya que al ingresarlos en la hoja de cálculo se debe hacer en dólares.

Tabla N° 7.19 Datos extras para Viabilidad Económica.

Código	DATOS EXTRAS		
	Horas de operación anual	Tarifa Eléctrica de energía	Tarifa Eléctrica de potencia
	<i>hr</i> [hr]	<i>tE</i> [\$/kWh]	<i>tP</i> [\$/kW.mes]
1001A	8400	4,94	0,0426
518	8400	4,94	0,0426
520	8400	4,94	0,0426
610D	8400	4,94	0,0426
C17	8400	4,94	0,0426
G7	8400	4,94	0,0426
L18	8400	4,94	0,0426
L27	8400	4,94	0,0426
N8	8400	4,94	0,0426
N9	8400	4,94	0,0426

En la Tabla N° 7.20 se muestran las columnas respectivas para el cálculo del factor de ajuste por rebobinado. Para el caso del ejemplo, ninguno de los motores había sido rebobinado antes del estudio energético, por eso el programa muestra que el valor a usar

para este factor será igual a cero. En caso el motor si haya sido rebobinado, se elegirá la opción SI de una lista desplegable que saldrá en cada celda de dicha columna. E inmediatamente, en la columna siguiente, se escogerá de otra lista desplegable la temperatura usada para el último rebobinado que tuvo el motor, según se indica en el apartado 4.4.5.

Tabla N° 7.20 Factor de ajuste por rebobinado

	FACTORES DE AJUSTE		
Código	Factor de ajuste por rebobinado		
	¿ Ha sido rebobinado ?	Temperatura o método utilizado <i>fre</i>	Valor a utilizar
1001A	NO		0
518	NO		0
520	NO		0
610D	NO		0
C17	NO		0
G7	NO		0
L18	NO		0
L27	NO		0
N8	NO		0
N9	NO		0

Los valores de la Tabla N° 7.21 se calculan de manera automática en base a la información de tensión ingresada en las secciones de datos de placa y datos medidos. Se muestran todos los pasos necesarios para hallar los factores de ajuste por variación de tensión y luego por diferencia de tensión, explicados en el apartado 4.4.5. Para no cargar mucho la presentación del programa, se pueden ocultar todas las columnas a excepción de las que se indican como el cálculo final de los factores antes mencionados, que son la segunda y última columnas mostradas.

La Tabla N° 7.22 muestra todos los cálculos necesarios para determinar la eficiencia del Motor 1. La Potencia Activa y el Factor de Carga 1 se calculan según lo indicado en el apartado 6.3.6. El factor de carga superior e inferior los busca el programa según la información previamente ingresada y calculada, como se indicó en el apartado 4.4.4. Luego hay que presionar el botón **Calcular** para que el programa busque en la base de datos de eficiencias, adjunta al programa, los valores de eficiencias correspondientes a los factores de carga inferior y superior.

Tabla N° 7.21 Factores de ajuste por variación y diferencia de tensión.

FACTORES DE AJUSTE									
Código	Variación de tensión	Factor de ajuste por variación de tensión	Tensión de fase máximo	Tensión de fase mínimo	Diferencia límite superior	Diferencia límite inferior	Diferencia Mayor	Diferencia de tensión	Factor de ajuste por diferencia de tensión
	vv	fvv	Vf_{max}	Vf_{min}	D_{sup}	D_{inf}	D_{max}	dv	fdv
1001A	0,026	-0,008	452,04	451,16	0,56	0,31	0,56	0,0012	0,99999
518	0,043	-0,008	459,44	458,35	0,71	0,38	0,71	0,0015	0,99998
520	0,052	-0,009	464,22	461,90	1,48	0,84	1,48	0,0032	0,99996
610D	0,038	-0,008	457,99	455,80	1,43	0,76	1,43	0,0031	0,99996
C17	0,011	-0,008	446,05	442,00	1,40	2,65	2,65	0,0060	0,99993
G7	0,016	-0,008	449,25	444,32	2,06	2,87	2,87	0,0064	0,99993
L18	0,024	-0,008	451,26	450,07	0,58	0,61	0,61	0,0014	0,99998
L27	0,023	-0,008	451,71	448,42	1,45	1,84	1,84	0,0041	0,99995
N8	-0,033	-0,013	426,32	424,72	0,66	0,94	0,94	0,0022	0,99997
N9	-0,033	-0,013	426,32	424,72	0,66	0,94	0,94	0,0022	0,99997

Tabla N° 7.22 Cálculo de la Eficiencia y la Eficiencia Ajustada del Motor 1

DATOS CALCULADOS									
Código	Potencia Activa 1	Factor de carga 1	Factor de carga inmediato inferior	Factor de carga inmediato superior	Eficiencia de $fdca$	Eficiencia de $fdcb$	Eficiencia 1	Eficiencia Ajustada 1	Potencia Eléctrica Útil 1
					Calcular				
	P_{T1}	$fdc1$	$fdca$	$fdcb$	η_a	η_b	η_1	η_{aj1}	P_{U1}
	[kW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kW]
1001A	29,14	69,27	50	75	91,3	92,5	92,22	91,42	26,64
518	45,69	43,06	25	50	84,9	90,5	88,95	88,10	40,26
520	49,20	46,37	25	50	84,9	90,5	89,69	88,79	43,69
610D	6,48	51,92	50	75	90	90,8	90,06	89,23	5,79
C17	8,89	36,01	25	50	84,2	89,2	86,40	85,56	7,60
G7	20,03	81,16	75	100	90,5	90,7	90,55	89,72	17,97
L18	19,94	80,81	75	100	90,5	90,7	90,55	89,74	17,89
L27	50,13	82,70	75	100	92,1	92,3	92,16	91,35	45,80
N8	41,57	114,54	50	75	86,8	88,4	90,93	89,66	37,27
N9	41,57	114,54	50	75	86,8	88,4	90,93	89,66	37,27

Con todos esos valores, el programa automáticamente calcular la eficiencia y la eficiencia ajustada. En este método es importante el cálculo de la verdadera Potencia Útil [kW] del Motor en Estudio según la eficiencia calculada, para que sirva de referencia en el supuesto caso de búsqueda de un motor de reemplazo.

En el caso se considere la posibilidad de buscarle un reemplazo al motor en estudio, sólo bastará con ingresar de manera manual la Norma Referente y el Nivel de Eficiencia del Motor de Reemplazo escogido, en las columnas indicadas según la Tabla N° 7.23.

La potencia del motor de reemplazo o Motor 2 debe ser según lo indicado en la columna denominada Potencia Nominal 2 Usada. Los valores de dicha columna son redondeos según los valores de mercado en HP de la Potencia Mecánica Nominal P_{nom2} calculada automáticamente por el programa. Para el cálculo de la Potencia Nominal 2 Usada se debe presionar el botón **Calcular** que mostrará los valores de redondeo, según los valores relacionados que encuentre en la base de datos que maneja. Todos los valores de esta sección, relacionados al Motor de Reemplazo, llevan el subíndice 2.

Tabla N° 7.23 Datos de placa del motor de reemplazo (Motor 2)

Código	DATOS DE PLACA				
	Norma referente	Nivel de Eficiencia 2	Potencia Eléctrica Útil 2 P_{U2}	Potencia Mecánica Nominal 2 P_{nom2}	Potencia Nominal 2 Usada Calcular
1001A	IEEE 112	Alta	35,52	47,62	50
518	IEEE 112	Alta	53,68	71,95	75
520	IEEE 112	Alta	58,25	78,08	75
610D	IEEE 112	Alta	7,71	10,34	15
C17	IEEE 112	Alta	10,14	13,59	15
G7	IEEE 112	Alta	23,96	32,11	30
L18	IEEE 112	Alta	23,86	31,98	30
L27	IEEE 112	Alta	61,06	81,85	75
N8	IEEE 112	Alta	49,70	66,62	60
N9	IEEE 112	Alta	49,70	66,62	60

La Tabla N° 7.24 muestra la sección denominada Datos Calculados donde se calcula la eficiencia básica y la eficiencia ajustada para la selección del Motor de Reemplazo.

Todos los cálculos de esta sección se realizan de manera automática, sólo hay la necesidad de presionar el botón **Calcular** para que el programa busque y muestre los valores de las eficiencias correspondientes al factor de carga inferior y superior, para luego hacer la iteración necesaria para el cálculo de la eficiencia básica. El procedimiento para el cálculo de los valores de cada columna se indica en el apartado 6.3.7 de manera detallada.

Tabla N° 7.24 Cálculo de la eficiencia y la eficiencia ajustada del Motor 2

Código	DATOS CALCULADOS							
	Factor de carga 2	Factor de carga inmediato inferior	Factor de carga inmediato superior	Eficiencia de $fdcc$	Eficiencia de $fdcd$	Eficiencia 2	Eficiencia Ajustada 2	Potencia Activa 2
	$fdc2$ [%]	$fdcc$ [%]	$fdcd$ [%]	Calcular η_c [%]	η_d [%]	η_2 [%]	η_{aj2} [%]	PT_2 [kW]
1001A	71,42	50	75	94,1	94,20	94,19	93,38	28,53
518	71,95	50	75	94,3	94,50	94,48	93,63	43,00
520	78,08	75	100	94,5	94,10	94,45	93,55	46,70
610D	51,71	50	75	91,7	92,10	91,73	90,90	6,37
C17	67,94	50	75	91,7	92,10	91,99	91,14	8,34
G7	80,29	75	100	93,6	93,00	93,47	92,65	19,39
L18	79,95	75	100	93,6	93,00	93,48	92,67	19,31
L27	81,85	75	100	94,6	94,10	94,46	93,65	48,90
N8	83,27	75	100	94,1	93,60	93,93	92,66	40,22
N9	83,27	75	100	94,1	93,60	93,93	92,66	40,22

Una vez seleccionado el Motor de Reemplazo, Motor 2, se buscan sus costos de compra, costos de envío, costos de instalación y en caso se consiga, algún descuento, y todos esos datos se ingresan en las columnas respectivas según lo mostrado en la Tabla N° 7.25.

Tabla N° 7.25 Costos del Motor de Reemplazo (Motor 2)

Código	DATOS BÁSICOS			
	Costo de compra	Costo de envío	Costo de instalación	Descuento
	CMN [\$]	Cen [\$]	$Cinst$ [\$]	$desc$ [\$]
1001A	5059	1011,80	758,85	354,13
518	12185	2437,00	1827,75	852,95
520	12185	2437,00	1827,75	852,95
610D	1424	284,80	213,60	99,68
C17	2840	568,00	426,00	198,80
G7	2840	568,00	426,00	198,80
L18	2840	568,00	426,00	198,80
L27	6101	1220,20	915,15	427,07
N8	3700	740,00	555,00	259,00
N9	3700	740,00	555,00	259,00

Finalmente, en la Tabla N° 7.26 se muestran los valores obtenidos para el cálculo de la viabilidad económica ante el reemplazo de un motor por otro de las características antes mostradas para cada motor en estudio. En dichas columnas los cálculos son automáticos por eso llevan un color distinto al blanco para no tener que hacer ningún cambio allí.

Tabla N° 7.26 Viabilidad de Inversión

Código	VIABILIDAD DE INVERSIÓN				
	Ahorro de Potencia	Ahorro de Energía	Ahorro económico anual	Costo de reemplazo	Período simple de retorno
	<i>AP</i> [kW]	<i>AE</i> [kWh]	<i>AEA</i> [\$]	<i>CRM</i> [\$]	<i>PSR</i> [años]
1001A	0,61	5140,77	25395,72	6475,52	0,25
518	2,70	22668,34	111983,00	15596,80	0,14
520	2,51	21045,27	103964,91	15596,80	0,15
610D	0,12	998,17	4931,04	1822,72	0,37
C17	0,54	4573,37	22592,73	3635,20	0,16
G7	0,63	5308,62	26224,91	3635,20	0,14
L18	0,63	5304,06	26202,36	3635,20	0,14
L27	1,23	10348,12	51120,35	7809,28	0,15
N8	1,35	11321,00	55926,43	4736,00	0,08
N9	1,35	11321,00	55926,43	4736,00	0,08

7.4 Comparación entre los dos métodos propuestos

Los métodos propuestos en este documento para la determinación de la eficiencia de motores asíncronos en campo son: Método del Deslizamiento, y Método de las Eficiencias Ajustadas. Se ha dejado claro que ambos métodos tienen procedimientos de cálculo distintos por ello los resultados son distintos y con precisiones diferentes.

En sí, el Método del Deslizamiento, ofrece resultados que son considerados subestimados con respecto a lo que se puede obtener en pruebas de laboratorio. Mientras que en el Método de las Eficiencias Ajustadas, justamente la aplicación de los factores de ajuste es para reducir la sobrestimación que se obtiene con su manera peculiar de obtener el factor de carga.

La primera diferencia que vale la pena resaltar es en el valor del factor de carga que se consigue con cada uno de los métodos. En la Tabla N° 7.27 se muestran los valores obtenidos con la variante del factor de carga utilizado para el desarrollo de la hoja de cálculo para el Método del Deslizamiento (con el subíndice MD), y el factor de carga obtenido con el Método de las Eficiencias Ajustadas (con el subíndice MEA).

Tabla Nº 7.27 Diferencia de los valores del factor de carga de cada método estudiado

Código	DATOS CALCULADOS	
	Factor de carga	
	<i>fdCMD1</i> [%]	<i>fdCMEA1</i> [%]
1001A	50,28	69,27
518	28,14	43,06
520	32,15	46,37
610D	32,62	51,92
C17	14,92	36,01
G7	35,52	81,16
L18	60,41	80,81
L27	53,76	82,70
N8	67,04	114,54
N9	60,41	114,54

Se puede ver que los valores de la columna correspondiente a *fdCMEA1* (factor de carga según el Método de las Eficiencias Ajustadas para el Motor 1), son mayores que los de la columna correspondiente a *fdCMD1* (factor de carga según el Método del Deslizamiento). Esa diferencia de valores ayuda a corroborar la idea de que el Método del Deslizamiento tiende a subestimar sus resultados, y que el Método de las Eficiencias Ajustadas tiene a sobrestimarlos. Se puede apreciar que los valores de factor de carga para los motores N8 y N9 según el Método de las Eficiencias Ajustadas es mayor al 100%, lo cual no es del todo lógico al fijarse que la corriente promedio no es mayor que su corriente nominal. Pero esa sobrestimación se verá corregida luego cuando a la eficiencia se le aplique todos los factores de ajuste propios de dicho método.

En la Tabla Nº 7.28 se han acomodado las eficiencias finales obtenidas según el Método del Deslizamiento y el Método de las Eficiencias Ajustadas propuestos.

Se puede observar que de manera general los valores de eficiencia obtenidos por el Método de las Eficiencias Ajustadas son mayores que los obtenidos por el Método del Deslizamiento, sin haber una proporción aritmética que cumpla para todos los motores. Hay motores, como el 1001A, cuya diferencia de eficiencia entre uno y otro método varía en no más de 1 punto porcentual. Mientras que en el motor G7, varía por más de 20 puntos porcentuales. Se debe tener en cuenta que esas diferencias grandes se pueden ocasionar ya que el Método del Deslizamiento considera en su cálculo la velocidad de operación, y existe la posibilidad de que en ciertos motores se hayan hecho sus pruebas estando en vacío, alterando en cierta forma los valores finales obtenidos.

Tabla N° 7.28 Diferencia de los valores de eficiencia de cada método estudiado

Código	DATOS CALCULADOS	
	Eficiencia	
	η_{MD1} [%]	η_{MEA1} [%]
1001A	89,71	91,42
518	81,29	88,10
520	86,25	88,79
610D	75,38	89,23
C17	50,39	85,56
G7	53,20	89,72
L18	90,73	89,74
L27	80,42	91,35
N8	72,18	89,66
N9	65,04	89,66

CAPITULO VIII

PROPUESTA DE LABORATORIO

8.1 Objetivo

Determinación de la eficiencia de un motor asíncrono de inducción de jaula de ardilla sin desacoplarlo de su carga, aplicando el Método del deslizamiento y el Método de Eficiencias Ajustadas. Analizar la conveniencia de su reemplazo por otro motor de mayor eficiencia, desde un punto de vista económico, en base al Periodo Simple de Retorno, para distintas situaciones variando: las horas de operación, el nivel de eficiencia, etc.

8.2 Principios Generales

Es muy importante tener la seguridad que los motores eléctricos de todo proceso industrial estén operando de manera eficiente. Para ello se realizan estudios energéticos con cierta frecuencia, y con el fin de reducir los costos del estudio y agilizar la obtención de sus resultados, la determinación de la eficiencia se puede hacer en el lugar del trabajo, sin desacoplar el motor de su carga.

La realización de esta experiencia de laboratorio viene acompañada de herramientas computacionales, que le ayudarán en la obtención de los valores requeridos: un programa para el Método del Deslizamiento, y un programa para el Método de las Eficiencias Ajustadas.

8.3 Equipos e Instrumentos a utilizar

- 1 Computadora portátil con los programas requeridos (Excel) y las hojas de cálculo preparadas para cada uno de los métodos.
- 1 Analizador de Redes o 1 multímetro digital Fluke con transductores de corriente para 1000 A y 3000 A, kit de toma de tensión.
- 1 Motor asíncrono de jaula de ardilla.
- 1 Carga rotativa regulable acoplable al motor.
- 1 Tacómetro óptico digital de alta precisión.
- 1 Pinza amperimétrica para medir tensiones y corrientes armónicas.
- 1 Pirómetro de infrarrojos.
- Equipo de protección personal (EPP) casco , guantes aislantes, anteojos antifaz zapatos para electricistas, ropa antífama.
- 1 Kit multímetro industrial

- 1 Megómetro
- 1 Higrómetro, para la medición de la humedad relativa y temperatura ambiente)

8.4 Procedimiento

Acoplar de manera correcta la carga regulable a la máquina motriz. Realizar las conexiones debidas para la alimentación eléctrica del motor.

Usar el pirómetro y el higrómetro para saber las condiciones del ambiente antes de encender el motor. Referirse a la norma usada para el método, para conocer las exigencias al respecto de la temperatura y humedad del ambiente del motor en estudio.

8.4.1 Método del Deslizamiento.

- Abrir la hoja de cálculo en Excel con el nombre **Método de Deslizamiento**.
- Obtener los datos nominales del motor en estudio, ya sea que se puedan leer de la placa, o que se puedan concluir del sistema, o que se consigan de catálogos. Los parámetros necesarios son: Potencia mecánica nominal, Tensión nominal, Corriente nominal, Velocidad nominal y Velocidad síncrona. Ingresas dichos datos en las columnas respectivas de la hoja de cálculo.
- Con el analizador de redes o con el multímetro Fluke, obtener los valores de las tensiones entre fases, de las corrientes de fase y del factor de potencia promedio en los terminales del motor e insertar dichos valores a las columnas respectivas.
- Con el tacómetro óptico medir la velocidad de operación del motor e ingresar dicho valor en la columna respectiva.
- El cálculo del factor de carga en el programa se realiza según la fórmula siguiente:

$$f d c = \frac{(z - z^2) \cdot 100}{(z_{nom} - z_{nom}^2)} [\%]$$

- Para la asignación del número de horas de trabajo, considerar que el motor trabaja dos turnos diarios (16 horas/día), cinco días a la semana, lo que da un aproximado de 3840 horas de operación anuales.
- Averiguar la tarifa actualizada por concepto de potencia y la tarifa actualizada por concepto de energía, de alguna de las empresas distribuidoras de energía locales.
- Ante la posibilidad de un reemplazo por otro motor de la misma potencia, por catálogos escoja uno de mejor eficiencia e ingrese todos los costos relacionados al mismo, en dólares.

8.4.2 Método de las Eficiencias Ajustadas

- Abrir la hoja de cálculo en Excel con el nombre **Método de Eficiencias Ajustadas**.
- Obtener los datos nominales del motor en estudio, ya sea que se puedan leer de la placa, o que se puedan concluir del sistema, o que se consigan de catálogos. Los parámetros necesarios son: Potencia mecánica nominal, Tensión nominal, Corriente

nominal, Velocidad nominal o Velocidad síncrona, Clase (tipo de carcasa), Nivel de eficiencia y Norma referente del motor en estudio. Ingresas dichos datos en las columnas respectivas de la hoja de cálculo.

- Con el analizador de redes o con el multímetro Fluke, obtener los valores de las tensiones entre fases, de las corrientes de fase y del factor de potencia promedio en los terminales del motor e insertar dichos valores a las columnas respectivas.
- El cálculo del factor de carga en el programa se realiza según la fórmula siguiente:

$$fdc = \frac{\eta_{nom} \cdot P_T}{0.746 \cdot P_{nom}} [\%]$$

- Para la asignación del número de horas de trabajo, considerar que el motor trabaja dos turnos diarios (16 horas/día), cinco días a la semana, lo que da un aproximado de 3840 horas de operación anuales.
- Averiguar la tarifa eléctrica actualizada por concepto de potencia y la tarifa eléctrica actualizada por concepto de energía, de alguna de las empresas distribuidoras de energía locales.
- Para un análisis inicial considerar que el motor en estudio no ha sido rebobinado. Luego hacer todo el procedimiento considerando cada uno de los tipos de rebobinado propuestos.
- Ante la posibilidad de un reemplazo por otro motor de la misma potencia, por catálogos escoja uno de mejor eficiencia y que cumpla con la Potencia Mecánica Nominal 2 calculada por el programa.

8.5 Preguntas

- Para el Método del Deslizamiento realice la determinación de la eficiencia considerando primero el cálculo del factor de carga según su forma básica, según la fórmula:

$$fdc = \left(\frac{s}{s_{nom}} \right) \cdot 100 [\%]$$

Luego determine nuevamente la eficiencia considerando el cálculo del factor de carga según la siguiente fórmula, donde se le agrega un factor de corrección por diferencia de tensión:

$$fdc = \left(\frac{s}{s_{nom}} \right) \cdot \left(\frac{V_{prom}}{V_{nom}} \right)^2 \cdot 100 [\%]$$

Además, haga el cálculo del factor de carga agregándole el factor de corrección a la fórmula de la variante usada para la elaboración del programa presentado. Dicha fórmula es la siguiente

$$fdc = \frac{(z - z^2) \cdot 100}{(z_{nom} - z_{nom}^2)} \cdot \left(\frac{V_{prom}}{V_{nom}} \right)^2 [\%]$$

Finalmente, haga una comparación entre los cuatro valores obtenidos y comente al respecto.

- Para el Método de las Eficiencias Ajustadas, ¿En cuánto varía la eficiencia del motor en estudio, en caso se considere que ha sido rebobinado? (Hacer la comparación considerando los cuatro casos propuestos para temperatura de rebobinado).
- Regule la carga para dos valores distintos y vuelva a realizar las mediciones indicadas para cada método. Indique para qué carga es que se obtiene mayor eficiencia del motor, y haga una comparación de los valores obtenidos por cada método.
- Para ambos métodos, considerar la posibilidad de reemplazo del motor por uno de misma potencia pero de mayor eficiencia, y analizar la influencia en el Periodo simple de retorno al cambiar las horas de operación anual para al menos tres situaciones distintas.

CAPITULO IX

APORTES DEL ESTUDIO

9.1 Aporte personal

Este documento ha sido redactado de manera que sea de fácil comprensión, haciendo las comparaciones pertinentes, resolviendo las fórmulas o haciendo las referencias adecuadas para que no hayan dudas al respecto.

La intención desde un inicio era enfocar todo hacia el tema de la eficiencia en motores, es por eso que el capítulo II y III, se resaltaron todos aquellos aspectos constructivos o de diseño que ayudasen a la reducción de pérdidas y por ende, a la mejoría de la eficiencia.

La aplicación del método de investigación presentado en el apartado 1.7, es el ideal a seguir para un estudio de este tipo dentro del campo de la ingeniería, pero que pocos conocen al respecto. Es por ello que la bibliografía brindada al respecto ayudará a que los futuros tesisistas sepan de este método y averigüen más al respecto antes de empezar su investigación.

9.2 Contribución del estudio

- Este documento ofrece una descripción detallada sobre el procedimiento de cada uno de los métodos escogidos, y fueron probados con datos reales de campo.
- El mayor aporte de este estudio es la herramienta informática para que la aplicación de ambos métodos sea más rápida y sencilla. Sobre todo en el Método de las Eficiencias Ajustadas, se entrega una aplicación que realiza de forma satisfactoria la búsqueda de valores dentro de una base de datos adjunta, agilizando dicho proceso que manualmente es muy tedioso.
- La experiencia de laboratorio propuesta se vuelve práctica al tener la aplicación informática a la mano, y permite a los alumnos darse cuenta de lo sencillo que es la estimación de la eficiencia de motores asíncronos en campo.

9.3 Limitaciones del estudio

A pesar de la exhaustiva investigación que se hizo por varios meses, no se pudieron conseguir todos los valores de eficiencia deseados para completar las tablas de la base de datos usadas para el Método de las Eficiencias Ajustadas. Por el momento, cuando en el programa se quiera escoger como norma referente la IEC 34-2-1, no encontrará valor

alguno para mostrar, así como tampoco para el nivel de eficiencia Premium de la norma IEEE 112 para factores distintos al 100%, a pesar que el programa está configurado para tomar dichos valores cuando sean agregados correctamente a la base de datos.

9.4 Futura investigación

- Se propone seguir con la búsqueda de valores de eficiencia para varios factores de carga (100%, 75%, 50%, 25%), para todas las potencias propuestas en las tablas de la base de datos. Durante todo el desarrollo de este estudio se buscó información al respecto, y lastimosamente no se consiguió completar las tablas. Dichas tablas están configuradas de tal manera que sólo se debe ingresar la información faltante.

Los valores que se consigan deben ser de fuentes confiables (empresas de prestigio) que aseguren hayan seguido los procedimientos de pruebas estipulados por algunas de las normas principales: IEEE 112 e IEC 34-2-1.

- De igual manera, se propone la adición de una base de datos que incluya los precios de los motores de acuerdo a su clase, velocidad y potencia. Para luego completar ambos programas, y sean capaces de mostrar dicho precio referencial en las casillas correspondientes de manera automática.
- Con intención de seguir mejorando la precisión del Método de las Eficiencias Ajustadas, sería ideal poder encontrar otra manera para el cálculo del factor de carga, ya que el uso de la eficiencia nominal en su fórmula es sencillamente un artificio o recurrencia, que no es teóricamente correcto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. No siempre se suele encontrar la placa incrustada al motor, en su lugar original. La mayoría de industrias del medio nacional, mantienen sus ambientes de trabajo en condiciones de descuido, y muchos motores ya han perdido sus placas, lo que complica la obtención de los valores nominales.
2. Cuando no se tienen los datos de placa, hay que tener presente que la Tensión Nominal se puede concluir de la tensión medida del sistema de distribución en el que se encuentra el motor, y la velocidad nominal se puede identificar con inspección visual teniendo la experiencia debida. Usualmente los encargados del mantenimiento de las plantas guardan un registro de la Potencia nominal. Teniendo todos esos datos, se puede recurrir a catálogos para obtener el resto de valores como la corriente y la velocidad nominal.
3. Para la obtención de valores confiables, es muy importante contar con equipos de alta precisión y de operarios que tengan conocimiento del correcto manejo de éstos. Una instalación incorrecta de los equipos se verá reflejado en resultados equivocados.
4. Tanto el Método del Deslizamiento como el Método de las Eficiencias Ajustadas son suplementarios, ya que no siempre es factible la medición de la velocidad de operación, lo cual haría imposible la aplicación del Método del Deslizamiento. La ubicación inaccesible o el exceso de suciedad dificultan la medición de la velocidad de operación usando tacómetros ópticos.
5. Se han presentado dos variantes para el Método del Deslizamiento que permiten la obtención de valores de eficiencia más precisos. Sabiendo, según estudios, que el Método del Deslizamiento original daba valores subestimados de eficiencia, en comparación con ensayos en laboratorio, la obtención de factores de carga mínimamente mayores significa un aumento en la precisión de la determinación de la eficiencia. Eso es lo que se ha conseguido al presentar la variante propuesta por Anibal de Almeida y Fernando Ferreira, quienes para el cálculo del factor de carga se basan en la igualdad de la Potencia al producto de la velocidad por el torque. (Ver fórmulas (4.28) a (4.39)). De esa manera se mejora en parte la subestimación de carga que se obtenía al aplicar la fórmula del factor de carga en el método original (Ver fórmula (4.23)).

6. En el Método del Deslizamiento el factor $\left(\frac{V_{prom}}{V_{nom}}\right)^2$ (Ver fórmula (4.27)) brinda un valor mayor a 1 cuando V_{prom} es mayor a V_{nom} (sobretensión), que al estar elevado a una potencia cuadrada ayuda aún más al aumento del factor de carga obtenido, tal como se puede ver en la fórmula $f_{dc} = \left(\frac{s}{s_{nom}}\right) \cdot \left(\frac{V_{prom}}{V_{nom}}\right)^2 \cdot 100$.

En esos casos es beneficioso, ya que el factor de carga en su forma original (sin el factor de corrección) brinda un valor de carga subestimado. Cuando V_{prom} es menor a V_{nom} (sub tensión), el valor de dicho factor de corrección es menor a 1, lo que conlleva a una disminución en el valor obtenido para el factor de carga, lo que no es conveniente.

Lo más usual es que la Tensión Promedio del sistema sea menor a la Tensión Nominal, y al ser así, al aplicar dicho factor de corrección de la tensión, el factor de carga y la eficiencia se verían disminuidos, restándole confiabilidad y precisión a los resultados finales.

De todo esto se concluye que el factor de corrección de tensión no es aplicable para todos los casos. Es por eso que, con la intención de desarrollar un procedimiento que se pueda aplicar en todos los casos, se hizo omisión de dicho factor de corrección a la hora de elaborar la metodología determinada y la usada para el desarrollo de la hoja de cálculo.

7. El Método del Deslizamiento, en su sección de cálculo de viabilidad económica, así como se presenta, ante la necesidad de reemplazo del motor, sólo considera la mejora de la eficiencia, más no un replanteo en la Potencia Nominal del nuevo motor. Sería interesante modificar dicha parte del cálculo, ya que hay veces en que los motores están muy sobredimensionados. De esa manera se lograría obtener Periodos Simples de Retorno más cortos y más atractivos económicamente.

8. El Método de las Eficiencias Ajustadas hace uso de un artificio que puede considerarse una fuente de imprecisión. Esto sucede al intentar calcular su factor de carga, ya que lo calcula según la fórmula $f_{dc} = \frac{\eta_{nom} \cdot P_T}{0.746 \cdot P_{nom}}$ (4.44). Donde se supone que el numerador $\eta_{nom} \cdot P_T$ representa la Potencia a la salida del eje en operación. Dicha potencia, expresada en función de la eficiencia debería representarse de la siguiente manera: $P_{eje} = \eta \cdot P_T$, donde P_T es la Potencia Activa medida en los bornes del motor en operación, y η sería su eficiencia en operación. En la fórmula (4.44) al usar η_{nom} no se está usando un valor indicado o que corresponda a la Potencia a la salida del eje en operación. Al usar la eficiencia nominal, se obtendrá un factor de carga mayor al real, y así una eficiencia de operación mayor a la real. Esta sobrestimación se corrige en parte al aplicarle los distintos factores de ajuste.

9. Al usar el Método de las Eficiencias Ajustadas, es importante tener siempre presente que las tablas de valores de eficiencias a usar tienen que ser de acuerdo a la procedencia o Norma en base a la cual fue diseñado el motor, para reducir imprecisiones.
10. En un inicio se tenía pensado juntar ambos métodos estudiados, de manera que para la determinación de la eficiencia inicial se utilizase el Método del Deslizamiento, y luego se usasen los factores de ajuste del Método de las Eficiencias Ajustadas. Pero así como se presentan ambos métodos no conviene juntarlos, ya que en sí el Método del Deslizamiento ofrece un valor de eficiencia subestimado, y lo que hacen los factores de ajuste es reducir ese valor, lo que terminaría otorgando valores de eficiencia más alejados aún de la realidad. Los factores de ajuste hacen bien su función sobre aquel valor de eficiencia calculado de las iteraciones como el Método de las Eficiencias Ajustadas específica, ya que en ese caso dicho valor está sobreestimado.

ANEXOS

ANEXO A

RELACIÓN ENTRE EL TORQUE, EL DESLIZAMIENTO Y LA TENSIÓN

En la presentación de una forma alternativa para aumentar la precisión del factor de carga en el Método del Deslizamiento en el apartado 4.3.6, hace uso de una relación entre el Torque y el deslizamiento. Debido a su importancia, por ser la base de ese nuevo método de cálculo, se considera importante dedicarle especial atención a la explicación del origen de la fórmula $\tau = K.z$ (4.31), donde se ve claramente una relación lineal y constante entre el Torque y el porcentaje de deslizamiento,

Es importante resaltar que dicha relación es posible dentro de la zona de trabajo de los motores según su diseño. Para la explicación detallada se recurrirá al circuito equivalente aproximado corregido de las máquinas asíncronas y a las curvas torque vs deslizamiento.

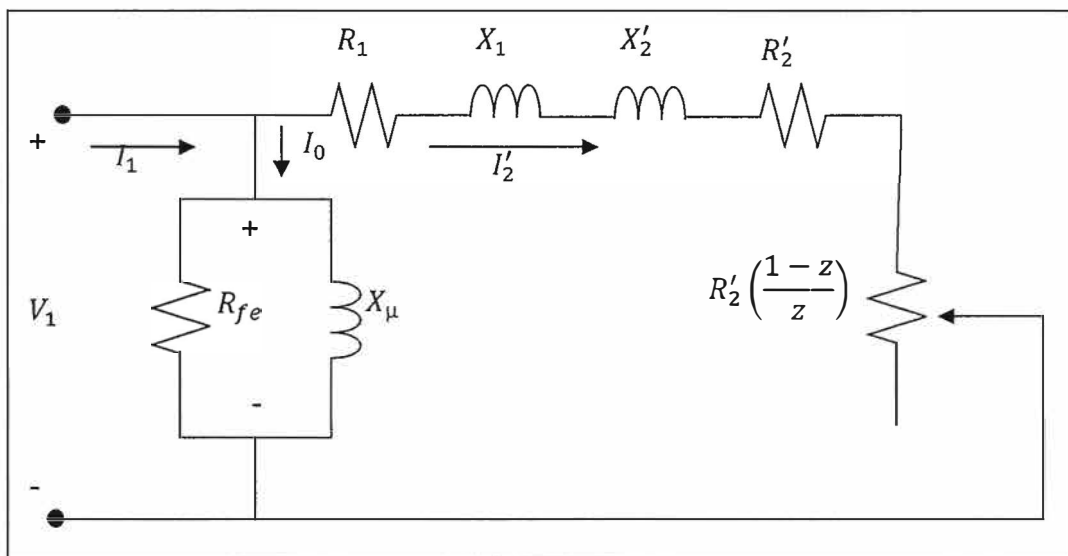


Fig A1 Circuito equivalente aproximado corregido por fase de una máquina asíncrona [7]

Todos los parámetros correspondientes al lado del rotor llevan un superíndice o comilla superior, lo que indica que ya han sido referidos con respecto al estator, de manera que ambos lados tienen el mismo número de fases, el mismo número de bobinas y el mismo factor de devanado. Habiendo hecho uso de un artificio matemático para que la representación de un circuito equivalente de ese tipo sea posible y fácil de comprender y utilizar.

El elemento mostrado en el extremo derecho, representado por $R'_2 \left(\frac{1-z}{z}\right)$ recibe el nombre de **resistencia de carga** y también se representará por la variable: R_C . Como se aprecia, dicho elemento depende del porcentaje del deslizamiento, lo que significa que depende del movimiento, o sea que representa el efecto equivalente a la carga mecánica que lleve el motor. La potencia disipada en este elemento será la misma potencia desarrollada por el motor en su movimiento de rotación, es decir, la potencia mecánica en el eje [6]. Dicha potencia se puede representar según la siguiente fórmula:

$$P_U = m_1 \cdot R_C \cdot I_2'^2$$

Donde P_U , como se mencionó en el apartado 4.3.4, es la potencia mecánica útil a la salida del eje del motor representada en Watts, el cual, para un sistema trifásico, cuando $m_1 = 3$, y reemplazando $R_C = R'_2 \left(\frac{1-z}{z}\right)$, se representa también de la siguiente manera:

$$P_U = 3 \cdot R'_2 \cdot \left(\frac{1}{z} - 1\right) \cdot I_2'^2$$

De la definición de la potencia en Watts, en función del torque rotativo:

$$P[W] = \tau[N \cdot m] \cdot \omega \left[\frac{rad}{seg} \right]$$

Donde ω representa la velocidad angular de giro en radianes por segundo, y τ representa el torque en Newtons-metro. Despejando el torque en función de la potencia y de la velocidad angular se obtiene la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{P}{\omega} = \frac{3 \cdot R'_2 \cdot \left(\frac{1}{z} - 1\right) \cdot I_2'^2}{\omega}$$

Siendo ω la velocidad angular de operación, se puede expresar también en función del porcentaje del deslizamiento y la velocidad angular síncrona, partiendo de la definición del porcentaje de deslizamiento, según la siguiente fórmula:

$$z = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad \rightarrow \quad \omega = \omega_s \cdot (1 - z)$$

Reemplazándolo en la expresión del torque, se obtiene:

$$\tau = \frac{3 \cdot R'_2 \cdot \left(\frac{1-z}{z}\right) \cdot I_2'^2}{\omega_s \cdot (1-z)}$$

Simplificando $(1-z)$ en el numerador y en el denominador, el torque mecánico interno se puede expresar de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{3 \cdot R'_2 \cdot I_2'^2}{\omega_s \cdot z}$$

Del circuito equivalente aproximado, se puede definir la corriente del secundario de la siguiente manera:

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_c)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

Reemplazando R'_c por $R'_2 \cdot \left(\frac{1}{z} - 1\right)$, operando, y reemplazando en la expresión del torque se obtiene:

$$\tau = \frac{3 \cdot R'_2}{\omega_s \cdot z} \cdot \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{z}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}$$

Para facilidad de cálculo se puede despreciar el valor de las reactancias, al ser considerablemente menores al de las resistencias, y la expresión del torque sería:

$$\tau = \frac{3 \cdot R'_2}{\omega_s \cdot z} \cdot \frac{V_1^2 \cdot z^2}{(R_1 \cdot z + R'_2)^2}$$

Otro parámetro que se puede despreciar es $R_1 \cdot z$, siendo el porcentaje de deslizamiento menor a 1, hacer que el valor de R_1 se reduzca, y de esa manera la expresión del torque quedaría de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{3 \cdot R'_2}{\omega_s} \cdot \frac{V_1^2 \cdot z}{R_2'^2}$$

Simplificando R'_2 , y agrupando los parámetros fijos, la expresión final sería:

$$\tau = \left[\frac{3 \cdot V_1^2}{\omega_s \cdot R_2'} \right] \cdot z$$

Considerando como constantes los valores de la tensión, la velocidad angular síncrona y de la resistencia en el secundario, se puede reducir la expresión, y se conseguiría demostrar lo usado en la fórmula (4.31), donde el torque está en función directa con el porcentaje de deslizamiento, donde K una constante [27]:

$$\tau = K \cdot z$$

Esta aproximación se puede ver gráficamente también, ya que en la zona de trabajo (alrededor de la velocidad síncrona) se ve que el gráfico tiende a ser prácticamente una pendiente lineal, o sea que el torque varía de manera casi directa con la velocidad.

En el Método del Deslizamiento también se inserta un factor de corrección debido a la desviación de la tensión, considerando que el porcentaje de deslizamiento varía con respecto al cuadrado de la tensión. Esa relación se puede demostrar tomando como base la ecuación obtenida para el torque y despejando z :

$$z = \frac{\tau \cdot \omega_s \cdot R'_2}{3 \cdot V_1^2}$$

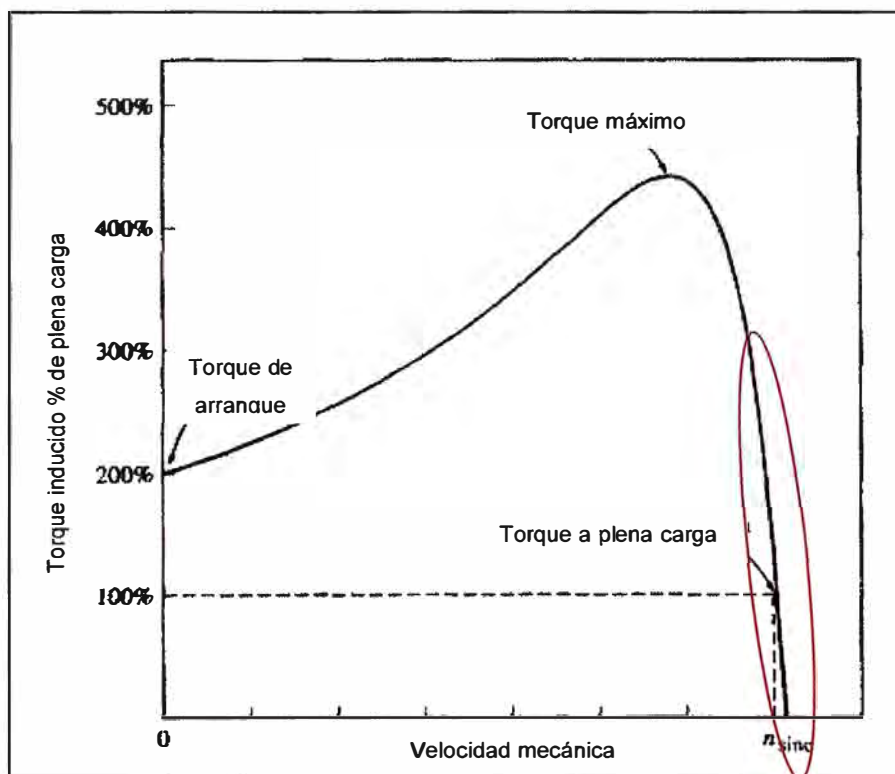


Fig. A2 Curva característica típica de un motor de inducción [7].

Se ve que z es inversamente proporcional al cuadrado de la tensión aplicada V_1 en el circuito monofásico equivalente simplificado. Es eso quiere decir que cuando la tensión aplicada crece el deslizamiento disminuye, y también de manera inversa. Es por eso que la aplicación del factor de corrección de tensión como se muestra en la fórmula (4.27) y (4.39) es correcta.

ANEXO B

EVOLUCIÓN DE LA EFICIENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS A LO LARGO DE LOS AÑOS

Desde el inicio del uso de los motores eléctricos, los fabricantes han tenido que ir mejorando la eficiencia de éstos según la exigencia de los usuarios, la aparición de nuevas aplicaciones, y sobre todo según la situación económica mundial y local, principalmente de los países industrializados que son los que siempre han requerido en mayor número de estas máquinas y los que rigen el avance de casi todo tipo de tecnología.

La condición de la economía local y mundial siempre está vinculada directamente con los combustibles o el precio de la energía. Y a lo largo de la historia, ha sido en momentos de crisis energética en donde se consiguieron mejoras notorias en la fabricación de motores eléctricos, buscando disminuir sus costos operacionales. Hoy en día a la motivación económica se le une la concientización ecológica.

El desarrollo de la eficiencia en motores eléctricos, así como su normatividad no ha tenido el mismo desarrollo en todo el mundo, quizá debido a que no todos vivieron las mismas situaciones económicas al mismo tiempo, lo que no ha permitido tener una definición única a nivel mundial sobre lo que es un **motor de eficiencia alta**.

En los Estados Unidos, en 1989 la **Asociación Nacional de Manufacturas Eléctricas** (NEMA por sus siglas en inglés), compiló en su norma MG-1 una serie de valores de eficiencias y funcionamiento de acuerdo a los motores que se fabricaban y predominaban en esa época.

Tres años después, el Congreso de los Estados Unidos, toma como referencia base dichos valores, para seleccionar los niveles mínimos de eficiencia para el **Acta de Política Energética** de 1992 (**EPAct**, por sus siglas en inglés), estableciendo así un primer rango de eficiencias que debían cumplir los motores, a los cuales hoy en día conocemos como **motores de eficiencia estándar**:

En 1997, la EPAct aumenta el nivel de exigencia con respecto a los valores de eficiencia mínima exigidos para los motores eléctricos dentro de Estados Unidos, denominando a los motores que cumplan con dichos valores como **motores de eficiencia energética**. Dichos valores fueron aceptados también por la NEMA y por toda la industria norteamericana en general.

De manera simultánea, el **Consortio para la Eficiencia Energética** (CEE por sus siglas en inglés), alianza conformada por grupos públicos y privados junto con el gobierno de los Estados Unidos, desarrolló un rango de valores de eficiencias superiores a los anteriores estipulados por la EPAAct. A los motores que cumplan con esos valores de eficiencia entran dentro del grupo de los **motores de eficiencia alta** [28].

En el año 2001, la NEMA lanzó el programa Motores Eléctricos de Eficiencia PREMIUM, que abarcaba muchos más tipos y tamaños de motores, elevando la exigencia en sus eficiencias.

Es así como surgen los tres niveles de eficiencias de motores eléctricos en Estados Unidos: Eficiencia Estándar, Eficiencia Energética o Alta, y Eficiencia PREMIUM. Actualmente en Estados Unidos ya no se fabrican más motores de eficiencia estándar, como acción para promover la compra y uso de motores de mejor eficiencia.

En Europa, en 1994, el Instituto Alemán del Cobre (DKI, por sus siglas en inglés) decidió involucrarse de manera más activa con los mercados del sector eléctrico y para ello, contrató los servicios de un especialista. Este especialista, al hacer su investigación sobre eficiencia de motores eléctricos, se dio con la sorpresa de que los fabricantes ya tenían entre sus productos motores de mayor eficiencia desde hacía 10 años atrás, pero que nadie los solicitaba. Y no era de extrañarse, ya que alrededor del 80% de todos los motores eléctricos de eficiencia estándar son vendidos originalmente a los grandes fabricantes de equipos o maquinarias, quienes no tienen motivación de comprar motores de eficiencia alta ya que ellos no van a ser los usuarios finales de los equipos que fabrican.

En el Reino Unido, la Asociación para el Desarrollo del Cobre (CDA UK, por sus siglas en inglés) era una de las pocas instituciones que venían destinando esfuerzos y especialistas para comprometerse más con el desarrollo en el uso eficiente de la energía. Fue con ellos con quien el especialista de la DKI tomó contacto como parte de su investigación, ya que ellos venían estudiando el tema con mayor anterioridad.

Casi a la par, en los Estados Unidos se venían estipulando los niveles mínimos de eficiencia para distintos tipos de motores (EPAAct 1992). Debido al fuerte activismo por parte de los representantes de CDA en Estados Unidos (CDA USA, por sus siglas en inglés), quienes venían realizando estudios sobre el tema, concluyendo que al final de su vida útil un motor eléctrico de bajo costo termina siendo más caro que uno de alta eficiencia, y en su afán por hacer público este concepto, ellos contribuyen en gran parte a la inserción de regulaciones sobre eficiencia en los Estados Unidos.

En 1997 empezó un gran debate sobre si en Europa se debía insertar regulaciones del tipo que se estaban insertando en Estados Unidos, debate donde tanto la CEMEP y la

Asociación Alemana de Fabricantes Eléctricos y Electrónicos (ZVEI, por sus siglas en alemán) estaban muy involucradas.

De repente, en los medios y los documentos científicos, se estaba hablando sobre los potenciales de ahorro de energía que ofrecían los motores eléctricos. Luego, una conferencia de prensa organizada por la DKI en Enero de 1999, fue de gran ayuda para que se haga de gran conocimiento la existencia de los motores de eficiencia energética y su capacidad de ahorro, tanto así que las empresas comenzaron a solicitar a los fabricantes este tipo de motores para hacer cambios totales en sus procesos.

Aún así, en ese momento, la Unión Europea decidió en contra de la estipulación de niveles mínimos de eficiencia. Ante eso, por su lado, las 31 compañías miembros de la CEMEP firmaron un acuerdo entre ellos para reducir en un 50% los niveles de producción de motores estándares de 2 y 4 polos que no ofrezcan pérdidas bajas para potencias entre 1 kW a 1000 kW para el 2003. Pero esto implicaba tener una definición precisa de lo que eran los motores de eficiencia alta y de eficiencia estándar.

Es así cómo se elaboran tres niveles de categorización de eficiencia dependiendo del tipo del motor, el número de polos, y sobre todo de su tamaño. De acuerdo con la figura B1, los motores que se encontrasen por encima de la línea verde serían considerados dentro de la clase EFF1, que anteriormente se consideraba como motores de eficiencia alta. Aquellos motores que se encontrasen entre la línea verde y la roja eran aquellos anteriormente conocidos como motores estándares, y que ahora eran clasificados como motores EFF2. Mientras que aquellos motores que se encontrasen por debajo de la línea roja eran clasificados como EFF3, y estaban por debajo de todo nivel de eficiencia, y tendían a desaparecer.

Luego, en el 2007, la IEC emite su norma 60034-3, donde presenta y especifica sus nuevos niveles normalizados para el etiquetado de motores según su nivel de eficiencia. El primer nivel IE1 abarca a los motores de eficiencia estándar. Siguiendo la numeración ascendente, el nivel IE2 abarca a los motores de eficiencia alta, y así los del nivel IE3 son los de eficiencia PREMIUM. Las curvas de la figura B2 muestran de manera clara la diferencia de eficiencia entre los niveles estipulados por la IEC.

El Perú ha adoptado el mismo sistema de etiquetado de eficiencia de motores estipulado por la IEC, al igual que muchos otros países. Actualmente, una gran cantidad de países tienen como mayor exigencia el uso de motores de eficiencia IE2, siendo los Estados Unidos los que elevarían dicha exigencia hasta el nivel IE3 en el año 2011 [30].

En la misma norma IEC 60034-3 se hace mención sobre un futuro nivel superior denominado IE4, que aún no son comercializados, y se espera tengan 15% menos pérdidas a comparación de los motores del nivel IE3.

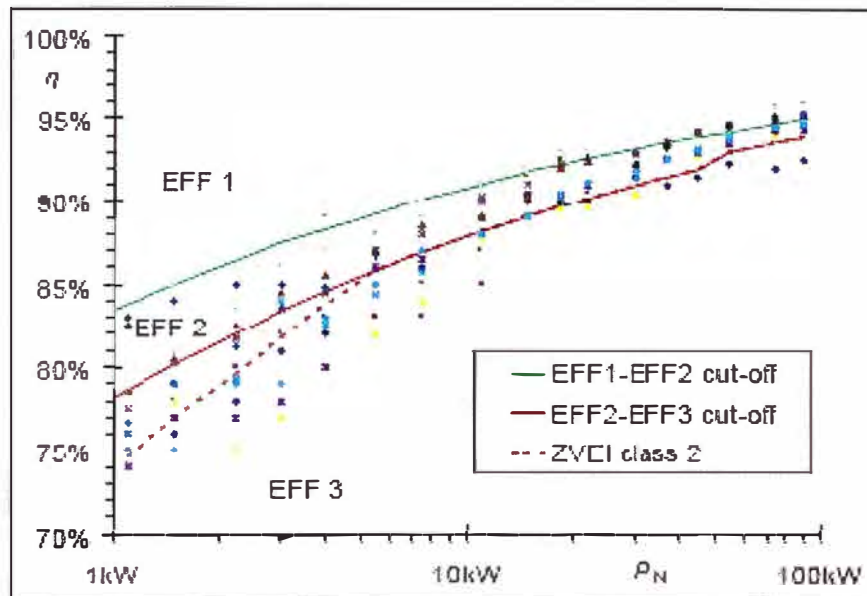


Fig. B1 Esquema de clasificación de eficiencia energética para motores de 2 polos de distintos fabricantes [29].

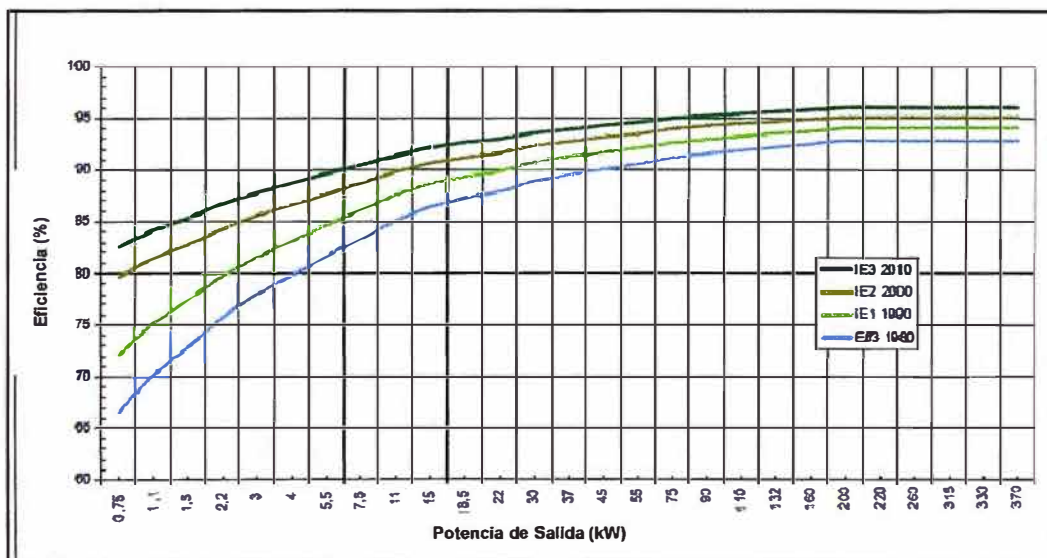


Fig. B2 Eficiencia de Motores de 4 polos según los años (%) [14].

ANEXO C

CONDICIONES ANORMALES DE SUMINISTRO

Efectos de la tensión de operación en el rendimiento del motor

Generalmente, los motores de alta tensión tienen un rango de eficiencia menor a sus equivalentes de media tensión, debido al incremento de aislamiento en los devanados que se requiere en las máquinas de alta tensión. Este aumento en el aislamiento provoca una reducción proporcional de espacio disponible para cobre en las ranuras del motor. De manera consecuente, aumentan las pérdidas por efecto Joule.

También se incurre en pérdidas cuando un motor diseñado para operar a una tensión de 230 V lo hace a 208 V o con una tensión de alimentación reducida cualquiera. En estas condiciones, el motor mostrará una eficiencia a plena carga menor, generará más calor, un mayor deslizamiento, producirá menor torque, y tendrá un menor tiempo de vida. La eficiencia se puede mejorar al mover el tap del transformador de tensión a un nivel superior.

Operación de motores bajo condiciones anormales

Se debe hacer una apropiada selección de los motores teniendo en cuenta las condiciones del servicio. Las condiciones usuales de servicio, según la norma NEMA MG 1-1993, Rev. 1, Motores y Generadores, son:

1. Temperatura de ambiente entre 0°C y 40°C.
2. Instalación en áreas o recintos que no interfieran con la ventilación de la máquina.
3. Operación con una tolerancia de tensión de $\pm 10\%$.
4. Altura no mayor a los 3,300 pies.
5. Operación dentro de una tolerancia de $\pm 5\%$ de la frecuencia de diseño.
6. Operación con un balance de tensión del 1% o menor.

La operación bajo condiciones de servicio inusuales puede conllevar a la pérdida de eficiencia y al consumo de energía adicional. Tanto los motores de eficiencia estándar como los de eficiencia energética pueden sufrir una reducción en su tiempo de vida y en su eficiencia debido a un sistema eléctrico con poco mantenimiento. El monitoreo de la tensión es importante para mantener una operación de alta eficiencia y para corregir potenciales problemas antes de que ocurran las fallas. El personal de mantenimiento preventivo debe medir periódicamente y registrar la tensión en los terminales del motor mientras que la máquina se encuentra a plena carga.

Sobretensión

Conforme la tensión se eleva, la corriente magnetizante también crece en una función exponencial. En algún punto, dependiendo del diseño del motor, la saturación en el núcleo crecerá y habrá sobrecalentamiento.

Cerca del 10% al 15% de sobretensión tanto la eficiencia como el factor de potencia decrecen de manera significativa para motores de eficiencia estándar mientras que el deslizamiento a plena carga disminuye. La corriente de arranque, el torque de arranque, y el torque de rompimiento aumentan de manera significativa en condiciones de sobretensión.

Una tensión que se encuentra en su máximo punto de su límite de tolerancia frecuentemente indica que el tap del transformador ha sido movido en la dirección incorrecta. Un relay sobrecargado no reconocerá esta situación de sobretensión y, si la tensión es mayor al 10%, el motor se puede recalentar. Una operación en sobretensión con corrientes aparentes (VAR) por encima de los límites aceptables por periodos de tiempo prolongados puede acelerar la deterioración del aislamiento del motor.

Sub tensión

Si un motor opera con una tensión reducida, inclusive dentro del 10% permitido, el motor requerirá de mayor corriente para poder producir el torque requerido impuesto por la carga. Esto provoca un incremento en las pérdidas por efecto Joule en el estator como en el rotor. Una tensión baja también impedirá al motor desarrollar un torque de arranque adecuado.

En la figura C1 se muestran los efectos que suceden en la eficiencia, el factor de potencia, la corriente y la velocidad de un motor, al operar con tensiones que no son las de diseño.

Las caídas de tensión excesivas en el sistema de suministro provocan una eficiencia de operación reducida a causa de tensiones bajas en los terminales del motor. Si el motor se encuentra al final de un alimentador largo, será necesario hacer una reconfiguración. La tensión del sistema también puede ser modificada siguiendo las siguientes acciones:

- Ajustando la posición de los taps del transformador.
- Instalando equipos para el cambio automático de los taps en caso las cargas del sistema varíen considerablemente a lo largo del día.
- Instalando capacitores para la corrección del factor de potencia que elevan la tensión del sistema a la vez que corrigen el factor de potencia.

Debido a que la eficiencia y el tiempo de vida de un motor se degradan con las variaciones de tensión, para un sistema se debe especificar únicamente motores que tengan tensiones nominales compatibles.

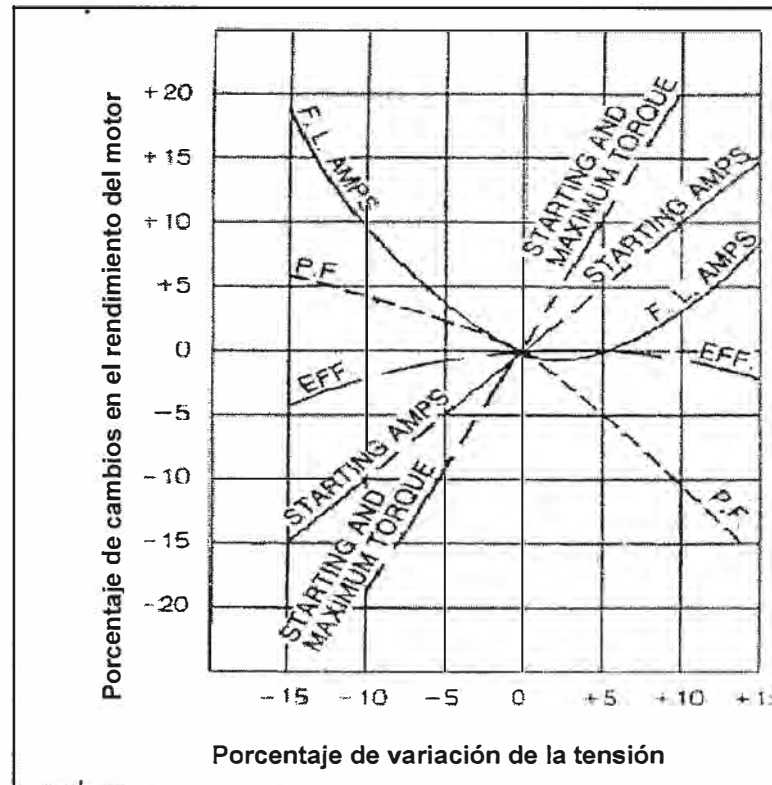


Fig. C1 Efectos en el funcionamiento del motor debido a la variación de tensión [8]

Desbalance de tensión entre fases

Un desbalance de tensión ocurre cuando hay tensiones distintas entre líneas de un motor de inducción polifásico. Este desbalance de tensiones entre fases también provoca que las corrientes de línea se encuentren en desbalance. Las corrientes de línea desbalanceadas ocasionan esfuerzos en el motor, vibraciones, incremento de estrés mecánico, y sobrecalentamiento de una o posiblemente dos de las fases del devanado. Esto resulta en un incremento dramático en las pérdidas del motor y en la generación de calor, lo que disminuye la eficiencia del motor como también acorta su vida.

La NEMA define el desbalance de tensión como 100 veces la desviación máxima de la tensión de línea con respecto a la tensión promedio de un sistema trifásico, dividido por la tensión promedio. Por ejemplo, si las tensiones de línea medidas son 462, 463, y 455 V, la tensión promedio es 460 V. El desbalance de tensión sería:

$$\left(\frac{460 - 455}{460} \right) \times 100\% = 1.1\%$$

Un desbalance de tensión de sólo 3.5% puede incrementar las pérdidas del motor en aproximadamente un 20%. Desbalances por encima del 5% indican problemas serios. Desbalances por encima del 1% conllevan a un desgaste del motor, y haría nula toda garantía del fabricante.

Según la norma NEMA MF 1-14.35, a un desbalance de tensión de 2.5% se le deberá aplicar un factor de desgaste igual a 0.925 a la hora de calcular el rendimiento de un motor. En la figura C2 se muestran los factores de desgaste debido a desbalances de tensión para motores de ciertas potencias. No hay distinción entre motores de eficiencia estándar o alta a la hora de seleccionar un factor de desgaste por desbalance de tensión.

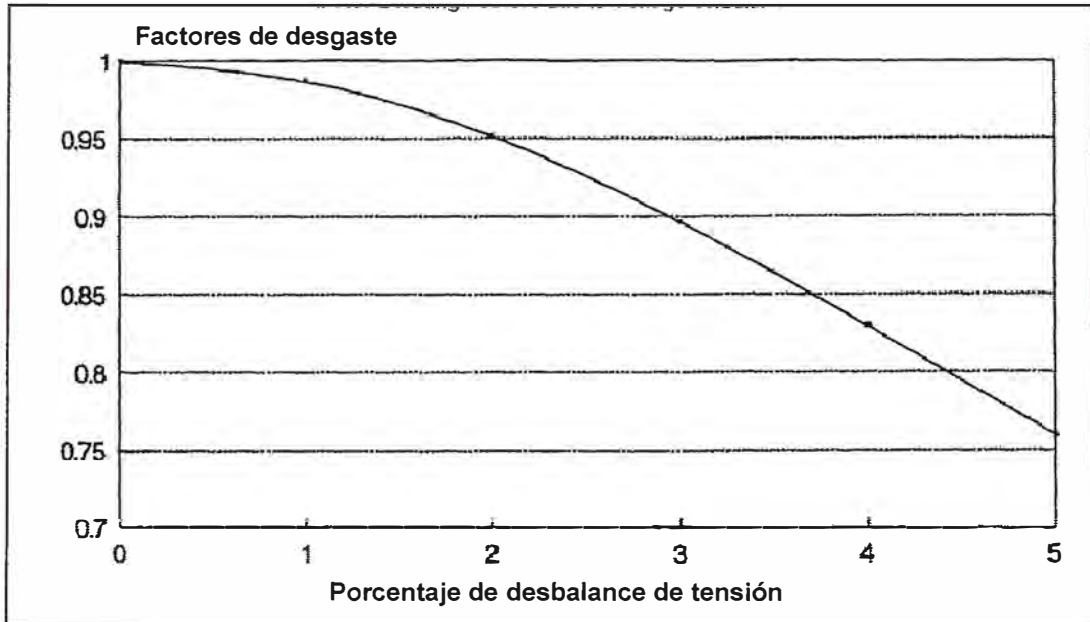


Fig. C2 Factores de desgaste en motores debido al desbalance de tensión

Algunos causales comunes para el desbalance de tensión son:

- Operación fallida de equipos de conexión automática para la corrección del factor de potencia.
- Suministro desbalanceado o inestable.
- Banco de transformadores desbalanceado alimentando una carga trifásica demasiado grande para el banco.
- Distribución desnivelada de cargas monofásicas en el sistema eléctrico.
- Fallas a tierra monofásicas sin identificar.
- Un circuito abierto en el sistema de distribución primario.

Para asegurar un balance apropiado del sistema, se deben seguir los siguientes pasos:

- Revisar los esquemas eléctricos unifilares para verificar que las cargas monofásicas estén uniformemente distribuidas.
- Revisar regularmente las tensiones en todas las fases para verificar que existe una variación mínima.
- Instalar detectores de falla a tierra.
- Realizar inspecciones termográficas anualmente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Ministerio de Energías y Minas, "Perú Sector Eléctrico 2009", Lima-Perú, 2009.
- [2]. Ministerio de Energías y Minas, "Anuario Estadístico de Electricidad 2008", Lima-Perú, 2009.
- [3]. Enrique Quispe, "Motores Eléctricos de alta eficiencia", Cali-Colombia, 2000.
- [4]. Rosaura Castrillón, José Luis Oslinger, Jairo Avesio Palacios, "In-Field Induction Motor Efficiency Determination Methods in the Scope of Efficiency-Based Maintenance", Cali-Colombia, 2009.
- [5]. Phillipp Offerman, Olga Levina, Marten Schönherr, Udo Bub, "Outline of a Design Science Research Process", Berlin-Alemania, 2009.
- [6]. Jesús Fraile Mora, "Máquinas Eléctricas", Madrid-España, 2003.
- [7]. Luis Vargas, "Conversión Electromagnética de la Energía", Santiago-Chile, 2003.
- [8]. Gilbert McCoy, John G. Douglas, "Energy Efficient Electric Motor Selection Handbook", Washington-EEUU, 1996.
- [9]. Proyectos Electromagnetismo, "Electromagnetic-Fields", <http://electromagnetic-fields.wikispaces.com/PROYECTOS+ELECTROMAGNETISMO>, Consultado Junio 2010.
- [10]. The Engineering ToolBox, "The Engineering ToolBox", http://www.engineeringtoolbox.com/electrical-motors-torques-d_651.html, Consultado Mayo 2010.
- [11]. Petróleos Mexicanos-PEMEX, "Motores Eléctricos hasta 200 HP", México DF-México, 2000.
- [12]. Standars for Energy Efficiency of Electric Motores Systems-SEEEM, "International Harmonization Inciative", Zurich-Suiza, 2006.
- [13]. Comité Técnico de Normalización de Uso Racional de la Energía y Eficiencia Energética, Subcomité de Motores Eléctricos, "Eficiencia Energética de Motores de Propósito General, Potencia Nominal de 0.746 kW a 149.2 kW. Límites y etiquetado", Lima-Perú, 2006.
- [14]. Conrad Brunner, "Efficiency Classes", Sidney-Australia, 2009.
- [15]. Javier Ortega Solis, "Motores", IV Taller Nacional "Promoviendo un sector público energéticamente eficiencia: Acciones locales que mueven al país", Zacatecas-México, 2006.

- [16]. Anibal T. de Almeida, Fernando Ferreira, John Busch, Pierre Angers, "Comparative Analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency standards using stray load losses in low-voltage, three phase, cage induction motors", Coimbra-Portugal, 2002.
- [17]. Wenpig Cao, "Confesion of IEEE 112 and new IEC standard 60034-2-1", Nottingham-UK, 2009.
- [18]. Ministerio de Energía y Minas, "Código Nacional de Electricidad Suministro", Lima-Perú, 2009.
- [19]. John Hsu, John Kueck, Mitchel Olszewski, Don Casada, Pedro Otaduy, Leon Tolbert, "Comparison of Induction motor field Efficiency Evaluation Methods", Oak Ridge, Tenesse-EEUU, 1998.
- [20]. Rich Schiferl, "An Accurate Method to Determine Electric Motor Efficiency while the motor is in operation", Milkwakee, Wisconsin-EEUU, 2003.
- [21]. Motor Challenge, "Determining Electro Motor Load and Efficiency", EEUU, 1997.
- [22]. Fernando Ferreira, Anibal Almeida, "Overview and Novel Proposals on In-Field Load Estimation Methods for three-phase Squirrel-Cage Induction Motors", Coimbra-Portugal, 2009.
- [23]. Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica-FIDE, "Ventajas y recomendaciones en el uso de motores eléctricos con sello FIDE", México, 2007.
- [24]. Programa de Investigación en Energía-Procobre, "Uso eficiente de la energía eléctrica", Santiago-Chile, 1998.
- [25]. Organismo Supervisor de la Inversión de Energía y Minería-OSINERGMIN, "Pliegos Tarifarios Aplicables a Usuarios Finales de Electricidad", <http://www2.osinerg.gob.pe/Tarifas/Electricidad>, Consultado 4 de Mayo del 2010.
- [26]. Marco Salvatori Artezán, "Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación voltaje/frecuencia", Puebla-México, 2003.
- [27]. Federico Vargas-Machuca Saldarriaga, "Máquinas Eléctricas Rotativas", Lima-Perú, 1990.
- [28]. Higinio Acoltzi, "Revisión de la normatividad en la aplicación de motores de inducción de alta eficiencia", Boletín IIE, 2001.
- [29]. Stefan Fassbinder, "Saving energy with high-efficiency motors", European Copper Institute-Alemania, 2007.
- [30]. Sara Hatch, Melanie Salde, "Testing Centres: task of the IEA 4E EMSA Project", Australia, 2009.