



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN

**“EVALUACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS
PARA SUSTITUCIÓN DE MODELOS
ESTÁNDAR POR OTROS DE ALTA
EFICIENCIA”.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

PRESENTA

ING. JOSÉ DANIEL LLANILLO NAVALES

ASESOR:

DR. ROBERTO RAMÍREZ MESA



MINATITLÁN, VER.

AGOSTO 2008.

MÉXICO

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN
SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN



Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica
Dirección General de Educación Superior Tecnológica



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Minatitlán, Ver., 27 FEBRERO 2008
DIV. DE EST. DE POSGRADO E INVEST.
OFICIO No. DEPI-TIT-043-2008

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

**ING. JOSÉ DANIEL LLANILLO NAVALES
P R E S E N T E**

Después de haber satisfecho los requisitos establecidos en el procedimiento académico para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería en los Institutos Tecnológicos, y de conformidad con el H. Comité Revisor, es grato autorizarle la impresión de su Tesis:

"EVALUACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS PARA SUSTITUCIÓN DE MODELOS ESTÁNDAR POR OTROS DE ALTA EFICIENCIA."

ATENTAMENTE


M.C. MARCIA LOREN HERNANDEZ NIETO
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN



Boulevard Institutos Tecnológicos S/N, Col. Buena Vista Norte, C.P. 96848, Minatitlán, Veracruz
Teléfono (01 922) 22 243 45, 2 43 39, Fax 22 243 36, e-mail direccion@itmina.edu.mx
<http://www.itmina.edu.mx>



DEDICATORIA

A Claudia mi esposa por su paciencia y motivación a que lograra este objetivo así como su gran amor y comprensión cada día que me ha alentado a poder salir adelante cada día.

A mis hijas Estefanía y Jacqueline por ser lo más importante en mi vida y por su ejemplo que representa para ellas para ser mejor cada día y poder lograr los objetivos que se propongan.

A mis padres Daniel (qpd) y Guadalupe por sus palabras de aliento en cada momento que era necesario, así como, los valores que me fomentaron y me han ayudado a formarme y aplicarlos con mis hijas y mi esposa.

A mis suegros Felipe (qpd) y Natalia por impulsarme a lograr alcanzar esta meta con su alegría y entusiasmo.

A mis abuelas Josefina (qpd) y Eustolia (qpd) porque gracias a ellas he llegado hasta este momento con su cariño, mensajes de aliento y ejemplos de liderazgo y amor.

A mis amigos Manuel, Nemorio, José Luis, Armando y Alvaro por animarme a lograrlo y que no me desistiera en alcanzar este paso tan importante en mi vida profesional.

A dios por darme todo lo anterior, además de vida, paciencia, inteligencia y salud para disfrutar tanto a mis seres queridos como a mi desarrollo personal y profesional.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer esta tesis a todos mis maestros, primero al Dr. Roberto Ramírez Meza por motivarme en cumplir con mi objetivo de aprender y hacerlo bien así como por asesorarme en la elaboración de esta tesis, a todos mis compañeros de maestría por los conocimientos y experiencias sobre energía que compartieron conmigo, al Ing. Alejandro Vargas el cual es el Superintendente Eléctrico del Ingenio Cuatotolapán S.A. de C.V. por el apoyo con el personal directivo del mismo para poder realizar la tesis con un problema de la empresa, así como, recomendarme con el demás personal que me facilitó la información que utilicé en esta tesis, evaluar el modelo propuesto y proponer una mejora que sirve tanto al Ingenio como a mi desarrollo personal y profesional. Finalmente, quiero agradecer al jurado su crítica porque con ella podré desarrollarme mejor en mi trabajo.

Minatitlán, Ver., Agosto de 2008

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO	II
ÍNDICE	III
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ABSTRACT.....	XI
RESUMEN	XII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL INGENIO CUATOTOLAPAN Y DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL AZÚCAR	11
1.1 Situación geográfica del Ingenio Cuatotolapan.....	11
1.2 Organigrama del Ingenio Cuatotolapan.	12
1.2.1 La participación del Ingenio Cuatotolapan en producción del azúcar en el ámbito nacional.	12
1.3 Descripción del proceso de fabricación del azúcar.	13
1.4 Descripción del proceso de evaporación.	17
CAPÍTULO 2: MARCO HISTÓRICO DE REFERENCIA	22
2.1 Motivación. El Ahorro Energético en el Siglo XXI.....	22
2.1.1 La Energía, un Bien con Creciente Demanda.....	22
2.1.2 Un uso más eficiente de la energía	22
2.1.3 Energía para mejorar el medio ambiente.....	23
2.2 Evolución de la Eficiencia de Motores Trifásicos.....	24
2.3 Evolución de la Experiencia Internacional.....	25
2.4 Marco Legal Nacional	26
2.5 Análisis de Mercado de Motores Ineficientes en Operación	29

2.6	Importancia de los Motores de CA	29
2.7	Antecedentes históricos	33
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA		36
3.1	Elementos de los Motores Eléctricos	36
3.1.1	Piezas Componentes de los Motores	36
3.2	Rotor Jaula de Ardilla.....	37
3.2.1	Motores de jaula de ardilla.....	38
3.2.2	Clasificación de los motores de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con el enfriamiento y el ambiente de trabajo.	41
3.2.3	Selección de velocidades nominales demotores de induccion de jaula de ardilla o de rotor devanado.....	44
3.2.4	Efecto de la variación de voltaje sobre la velocidad de un motor de inducido de jaula de ardilla o de rotor devanado.....	44
3.2.5	Motor Síncrono de Inducción	46
3.2.6	Características de funcionamiento del motor de inducción.....	47
3.2.7	Características de funcionamiento normal del motor de inducción en marcha (<i>desde vacío hasta plena carga</i>).....	49
3.2.8	Arranque del motor de inducción.	51
3.3	Bobinados en las máquinas de corriente alterna	58
3.3.1	Bobinados concéntricos.....	58
3.3.2	Cálculo de bobinados concéntricos	59
3.3.3	Bobinados excéntricos.....	61
3.3.4	Bobinados imbricados enteros.....	61
3.4	Pérdidas en un Accionamiento Eléctrico	63
3.5	Pérdidas en un Motor de Inducción.....	64
3.5.1	Pérdidas en el Cobre de Estator	64

3.5.2	Pérdidas en el Cobre del Rotor.....	65
3.5.3	Pérdidas en el Hierro	65
3.5.4	Pérdidas Adicionales	66
3.5.5	Pérdidas Mecánicas.....	67
3.6	Pérdidas en el Convertidor de Potencia.....	68
3.6.1	Pérdidas en el Rectificador	68
3.6.2	Pérdidas en el Inversor	69
3.6.3	Pérdidas Adicionales	70
3.7	Modelos de Pérdidas del Motor de Inducción	72
3.8	Modelo de Pérdidas del Sistema Convertidor - Motor.....	73
3.8.1	Modelo de Pérdidas del Motor de Inducción.....	73
3.8.2	Efectos de la Temperatura.....	77
3.8.3	Efectos de la Saturación	78
3.8.4	Circuito armónico Equivalente por Fase	78
3.8.5	Circuito Equivalente en una Referencia Síncrona	80
3.8.6	MODELO DE PÉRDIDAS DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA	82
3.9	Control de Motores de Inducción	86
3.9.1	Antecedentes Históricos en el Control de Motores de Inducción	86
3.9.2	Métodos Escalares	89
3.9.3	Métodos Vectoriales	91
3.9.4	Control por Aceleración de Campo (FAM)	94
3.9.5	Control por Orientación de Campo Universal (UFO).....	95
3.9.6	Control Directo de Par (DTC).....	96
3.9.7	Nuevas Tencencias	97
CAPÍTULO 4: MARCO METODOLÓGICO.....		100
4.1	Evaluacion de los motores electricos	100
4.1.1	Objetivos.....	100
4.1.2	Metodologia de trabajo.	101

4.1.3	Informacion previa	101
4.1.4	Recopilacion y verificacion de la informacion.	102
4.1.5	Analisis de información previa.	103
4.1.6	Mediciones.....	104
4.1.7	Analisis de mediciones.	106
4.1.8	Evaluacion de las oportunidades de ahorro de energia.....	107
4.1.9	Oportunidades de Ahorro de Energía.	108
4.2	Recomendaciones generales para ahorrar energia	109
4.3	Procedimiento de Evaluación para la Sustitución de Motores Eléctricos de Eficiencia Estándar por Motores de Alta Eficienciat.....	115
4.3.1	Notación.....	115
4.3.2	Levantamiento de Datos	115
4.3.3	Potencia del Motor Estándar Demandada	116
4.3.4	Factor de Carga y Eficiencia del Motor Estándar.....	117
4.3.5	Ajustes de Eficiencia.....	117
4.3.6	Potencia de Freno del Motor Estándar	118
4.3.7	Potencia de Freno del Motor de Alta Eficiencia y Factor de Carga.....	118
4.3.8	Eficiencia del Nuevo Motor	118
4.3.9	Ajustes de la Eficiencia	119
4.3.10	Nueva Potencia Demandada	119
4.3.11	Ahorro Energético y Económico	119
4.3.12	Período de Amortización.....	120
4.4	Desarrollo del Software para la Sustitución de Motores.....	120
4.4.1	Levantamiento de Datos y Acometida de los Cálculos. Microsoft Excel.....	120
4.4.2	Obtención de Informes Personalizados para cada Motor de cada Planta. Microsoft Word.....	122

4.4.3	Mantenimiento de la Base de Datos de Motores en Plaza. Microsoft Acces.....	124
CONCLUSIONES.....		127
BIBLIOGRAFÍA.....		135
Anexo I: Procedimiento de Mediciones en Motores Trifásicos		144
Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002		153
Anexo III: Guía de aplicaciones del Multímetro Fluke 43B Power Quality Analyzer		164

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura a:	Principales Destinos de la Energía Eléctrica por Sector y Tecnología.	3
Figura b:	Constitución de un motor trifásico de alta eficiencia.	4
Figura 1.1:	Localización geográfica del Ingenio	11
Figura 1.2:	Organigrama del Ingenio Cuatotolapan	12
Figura 1.3:	Proceso de evaporación instrumentado.....	18
Figura 2.1:	La eficiencia del motor trifásico en la última década.....	24
Figura 2.2:	Mejoramiento de las Eficiencias Según la Potencia Nominal del Motor.....	25
Figura 2.3:	Panel de Disertantes en “Foros de Consulta para la Integración del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012”	27
Figura 2.4:	Comparación del rendimiento de un motor de CC y un motor asíncrono trifásico en función de la velocidad a potencia nominal de 18 kW.....	32
Figura 3.1:	a) Arranque directo de motores trifásicos con rotor en cortocircuito. b) Circuitos de Comando	54
Figura 3.2:	Esquema de Bobinado Concéntrico.....	61
Figura 3.3:	Esquema de Bobinado Excéntrico	62
Figura 3.4:	Esquema general de un accionamiento eléctrico.....	63
Figura 3.5:	Circuito equivalente armónico por fase del motor de inducción: Circuito genérico para el armónico de orden n.....	79
Figura 3.6:	Circuito equivalente armónico por fase del motor de inducción: Forma equivalente serie del circuito.	80
Figura 3.7:	Circuito equivalente armónico por fase del motor de inducción: Circuito equivalente “shunt” del circuito.	80
Figura 3.8:	Circuitos equivalentes d-q de pérdidas en una referencia síncrona.	82
Figura 3.9:	Circuito equivalente de un rectificador de diodos.....	83

Figura 3.10:	Interruptor del inversor y circuito equivalente de pérdidas.	84
Figura 3.11:	Formas de onda de conmutación para un transistor.....	85
Figura 3.12:	Esquema de un control escalar tipo tensión-frecuencia (V/f).	89
Figura 3.13:	Esquema de un control de velocidad por deslizamiento controlado.	91
Figura 3.14:	Principio de la regulación del control vectorial.	92
Figura 3.15:	Esquema de un control por aceleración de campo.	94
Figura 3.16:	Esquema del Control Directo de Par (DTC).....	97
Figura 4.1:	Levantamiento de Datos de Motores en Planta.	121
Figura 4.2:	Vista parcial del Resumen del Informe.....	121
Figura 4.3:	Vista parcial de la tabla correspondiente a eficiencias y costos de motores de eficiencia estándar y motores de alta eficiencia.	122
Figura 4.4:	Vista parcial del Informe obtenido para un motor en particular.	123
Figura 4.5:	Administración de la base de Datos de Motores disponibles en plaza por medio de Microsoft Access.....	124
Figura 4.6:	Vista parcial del Informe obtenido para un motor en particular.	125
Figura 4.7:	Hoja de cálculo para Motor de Catálogo con los ahorros correspondientes a la selección efectuada.	126
Figura 4.8:	Hoja empleada como auxiliar para los cálculos de la eficiencia del motor existente.....	127
Figura 4.9:	Hoja empleada como auxiliar para los cálculos de la eficiencia y la selección del motor de reemplazo.	129
Figura 4.10:	Detalle parcial de los documentos emitidos en forma automática por medio del software desarrollado.....	130
Figura 4.11:	Detalle de la hoja de cálculo propuesta para la contrastación de la hipótesis.....	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Inversiones y Ahorros proyectados para el programa 2007- 2012 de Eficiencia Energética.....	28
Tabla 2.2: Distribución de la energía consumida por motores eléctricos en EE.UU. según el tipo de aplicación.	30
Tabla 3.1: Características de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación en letras NEMA	39
Tabla 3.2: Distribución de pérdidas en motores de inducción convencionales, según la publicación No. MG10-1983 de National Manufacture Association (NEMA), EE.UU.	67
Tabla 4.1: Notación de la sección.....	115

ABSTRACT

This paper provides an analysis of the requirements of the sugar industry on electric motors that used to replace those that are generic use engines, have a poor performance compared with high-performance engines.

In Chapter 1 deals with the description of the current state of industry in the region, in Chapter 2 defines the theoretical elements necessary to select high-efficiency electric motors; Chapter 3 covers the practical implementation of high-performance systems, while that in Chapter 4 is done economic analysis of the investment required.

The analysis is based on modeling and calculation of the efficiency of the engine.

Being the sugar mills industries that often operate with little profit margins, a national and international conjuncture that has made up the price of land as a result of crops for biofuel projects, the technical proposal will generate substantial savings in operating costs such devices that will likely to fall much better in the production schemes that still lie ahead for this new millennium.

RESUMEN

El presente trabajo constituye un análisis de los requerimientos de la industria azucarera en cuanto a los motores eléctricos que emplea con el fin de sustituir aquellos que, siendo motores de uso genérico, presentan un pobre desempeño comparado con motores de alto rendimiento.

En el capítulo 1 se aborda la descripción del estado actual de la industria en la región; en el capítulo 2 se definen los elementos teóricos necesarios para seleccionar motores eléctricos de alta eficiencia; el capítulo 3 abarca la implementación práctica de sistemas de alto rendimiento, mientras que en el capítulo 4 se realiza el análisis económico de la inversión requerida.

El análisis se basará en la modelización y cálculo de la eficiencia del motor.

Siendo los ingenios azucareros industrias que funcionan muchas veces con escasos márgenes de ganancias, una coyuntura nacional e internacional que ha hecho subir el precio de la tierra como consecuencia de proyectos de cultivos para biocombustibles, la tecnificación propuesta permitirá generar ahorros substanciales en el costo operativo de tales ingenios que los harán susceptibles de encuadrarse mucho mejor en los esquemas productivos que se avecinan para este aún nuevo milenio.

INTRODUCCIÓN

La investigación

“La investigación es un proceso sistemático de aproximación a una realidad concreta, con el propósito de generar información que permita posteriormente tomar decisiones para atender necesidades y/o resolver problemas de diversa índole”¹

Este trabajo se identifica con esta definición:

- Es sistemática: Pretende *sistematizar* el objeto de estudio (la sustitución de motores)
- Es de aproximación: Cada estadio del estudio se entiende como una *aproximación* de la realidad, que sin llegar a describirla completamente, represente una mejora del estadio anterior.
- Permite decidir: El trabajo elaborado brinda los factores principales para la toma de decisiones, entendidas éstas como la ponderación de diferentes variables.

Justificación

Social

Puede beneficiarse el colectivo de las plantas donde se introduzca una sustitución de motores al tener que actualizar los conocimientos. Muchas veces los motores de alta eficiencia vienen acompañados con criterios de mantenimiento más exigentes y métodos nuevos de trabajo. Así, a la larga, las empresas ven la posibilidad de mejorar la capacitación de su personal, con el consiguiente aumento del valor agregado de las labores de la nómina, y sus posteriores repercusiones en el nivel social y salarial.

¹ Autores Varios. “Material de Apoyo al Curso Investigación Educativa”, Instituto de Estudios Universitarios. Maestría en Ciencias a la Educación.

Teórica

Mucho ha sido el avance en el desarrollo de los estándares al uso para la sustitución de motores. Aquí se estudian los nuevos criterios empleados en el reemplazo, así como los elementos teóricos necesarios para obtener el desarrollo de los mismos.

Así tenemos que:

- Motor: Es una maquina rotatoria que convierte energía eléctrica en energía mecánica.
- Motor Estándar: Se define como un equipo con eficiencia menor a la establecida en la normatividad vigente (NOM-016-ENER-2002)
- Motor de Alta Eficiencia: Se define como un equipo con eficiencia igual o mayor a la establecida en la normatividad vigente (NOM-016-ENER-2002)

Se considera que los motores eléctricos son el elemento motriz de la industria, considerando que consumen alrededor del 60 al 70% del gasto de energía eléctrica de una planta industrial² a nivel mundial.

Para el caso de México, se tiene un consumo establecido en el entorno del 55%, de acuerdo a la siguiente distribución del consumo establecido por Organismos Nacionales, tal y como se indica en la Figura 0.1 (tomar en cuenta que consumo para generar el aire comprimido corresponde a motores eléctricos)

También se introduce el empleo de software más especializado, capaz de someter al análisis teórico un motor en particular, por medio de cálculo por elementos finitos y modelos matemáticos de las ecuaciones diferenciales que gobiernan al motor, que permita desarrollos subsecuentes de la metodología empleada en los cálculos del presente trabajo.

² Ing. Javier Ortega Solís, "Caso de Eficiencia de Motores", IV taller nacional "Promoviendo un sector público energéticamente eficiente: acciones locales que mueven al país", FIDE

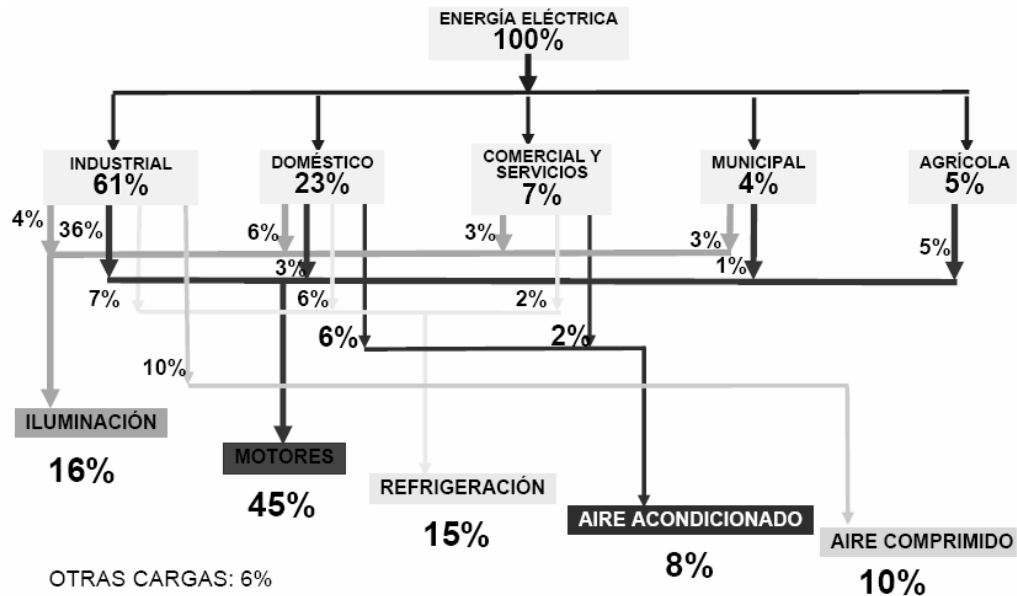


Figura a: Principales Destinos de la Energía Eléctrica por Sector y Tecnología³.

Metodológica

Se examinan los métodos de sustitución de motores de acuerdo a distintas normas y estándares norteamericanos y europeos, para luego introducir la norma oficial mexicana, elaborada por el FIDES, y requerida por las instituciones a la hora de otorgar financiamientos, subvenciones, y otro tipo de ventajas.

En el Anexo I se considera el Procedimiento de Mediciones en Motores Trifásicos al uso recomendado por el IEEE.

Institucional

El empleo de motores de alta eficiencia en la industria nacional puede aportar su granito de arena en la disminución de la brecha tecnológica de las empresas públicas y privadas de México respecto al estadio actual del desarrollo en los países centrales.

Es Política de Estado la sustitución de motores. En el IV Taller Nacional “Promoviendo un sector público energéticamente eficiente: acciones locales que mueven al país”, donde participaban CEMEX, Grupo CARSO, Villacero, Industrial

³ Ing. Javier Ortega Solís, Op. Cit.

Minera México, Grupo DESC entre varios importantes consumidores de energía eléctrica se constató que en un período de cinco años de implementado el plan de sustitución promovido localmente por CFE, FIDE y CONAE en el estado de Zacatecas, se logró casi un 100% de penetración en el mercado por parte de los motores de Alta Eficiencia. En tal sentido, la Figura 0.2 ilustra el rápido avance del plan.

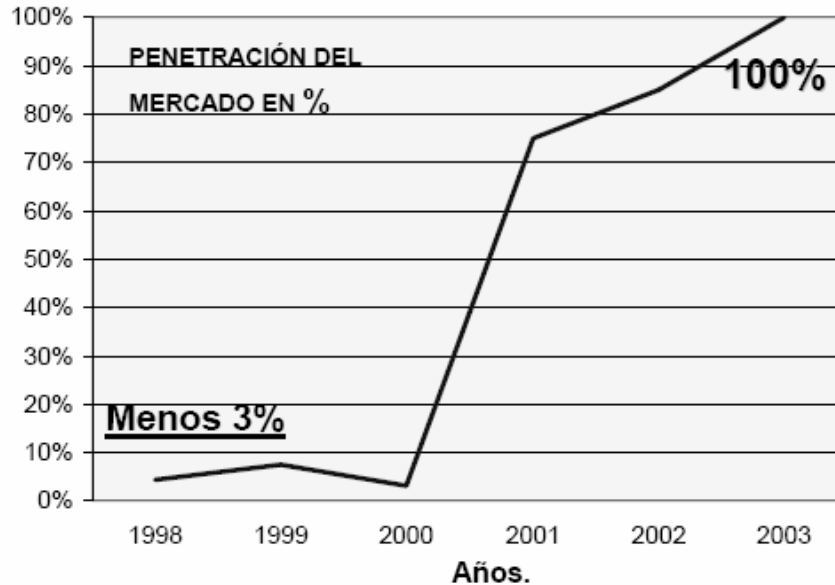


Figura b: Constitución de un motor trifásico de alta eficiencia.

El proyecto ha permitido superar ampliamente la meta planteada que consistía en pasar de menos de un 3% de penetración de motores eléctricos de alta eficiencia al inicio del proyecto, al 30% en un lapso de 5 años.

Entre los logros del plan se señalaron como puntos principales en dicho Congreso:

- Se evito quemar 3.7 millones de barriles de petróleo por año
- Se evito inversiones por 1,025 millones de pesos
- Se dejo de emitir 2.4 millones de toneladas de partículas contaminantes al año de CO₂, SO₂, NO_x
- Ahorros por 159.7 MW en demanda 2,135 GWh /año en consumo
- Comercialización de 211,246 motores de alta eficiencia

Personal

Es intención del autor legar un mundo mejor a sus hijas, ayudando en la medida de sus posibilidades a reducir las emisiones de CO₂, evitar el despilfarro energético y contribuir a luchar contra el calentamiento global.

Profesional

La sustitución de motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia pone al autor del presente trabajo en contacto permanente con profesionales, técnicos y personal subalterno de plantas de producción de muy variada índole.

Las situaciones particulares, los estados del mantenimiento, supervisión, orden y limpieza, políticas de seguimiento y demás que se emplean en cada planta en particular así como el “saber hacer” de cada uno de las personas involucradas en el mismo, brindan un acervo de incomparable riqueza a quien los sepa apreciar y asimilar.

Planteamiento del Problema

La industria nacional viene usando motores que por sus características generales son diseñados para actuar en muy variadas situaciones, y no siempre es la mejor opción disponible en el mercado para desempeñar las tareas que le han sido asignadas.

Por otra parte, se demostrará que en la mayoría de los casos, estos motores no son tan siquiera atractivos desde el punto de vista económico a la hora de decidirse ya sea a repararlos, substituirlos, o adquirir uno nuevo por ampliación o cambio del esquema productivo.

Se expondrá el notable peso que tienen los motores en el esquema general del consumo eléctrico, y como es Política de Estado el uso más eficiente y racional de la energía que se suministra a los motores, con los consiguientes beneficios en subsidios o financiamiento a bajo interés.

Posteriormente se abordará el estudio teórico de los distintos aspectos involucrados en el procedimiento, a fin de asegurar una cabal comprensión de todos los pasos y procesos necesarios, así como aquellos aspectos relevantes que hacen a la teoría y práctica del diseño y operación de motores eléctricos, para luego

establecer con claridad el procedimiento de cálculo necesario para acometer la sustitución de motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia.

Finalmente se pondrá a disposición de los niveles gerenciales de las empresas los elementos necesarios para tomar la decisión más adecuada para cada motor en particular desde el punto técnico-empresarial.

Objetivos de la Investigación

Objetivo General

Evaluar el ahorro obtenido al sustituir motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia, así como el beneficio de emplear motores de alta eficiencia en emprendimientos nuevos. Deberá por tanto considerarse asimismo las relaciones costo/beneficios que derivan de la reparación de motores, con el fin de compararlas respecto a la alternativa anterior.

Dada la gran cantidad de motores que deberá estudiarse, se propone una sistematización del mismo.

Para ello se han planteado distintas opciones de software capaz de realizar la tarea. Los criterios para la selección del mismo, han sido los siguientes:

- Portabilidad: El código desarrollado deberá poderse trasladar a otros ambientes de desarrollo.
- Flexibilidad: Deberá adaptarse a las variaciones que cada planta pretenda introducir, ya sea por su particular metodología de trabajo, por su nivel de compromiso con la hipótesis planteada, por cambios en detalles de la normativa vigente, variaciones estadales de los reglamentos que se aplican, y muchas otras circunstancias más similares a las anteriores.
- Disponibilidad: El ambiente de desarrollo empleado deberá poderse implementar en muy variados ambientes de hardware (el que pueda brindar la planta).
- Robustez: Deberá adecuarse al concepto de robustez en ingeniería de sistemas computacionales, dado por la capacidad del sistema de obtener resultados fiables al variar muchos parámetros simultáneamente.

Estos son los criterios con los que se analizarán posteriormente el software estudiado y los que guiarán en la decantación del que se considere más adecuado a cada paso del proceso.

Objetivos Particulares

Se plantean los siguientes objetivos particulares:

Analizar el peso relativo que tienen los motores eléctricos en el consumo energético nacional

Discutir el impacto ambiental que tiene la sustitución de motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia.

Exponer los conceptos teóricos necesarios para llevar a cabo el objetivo principal.

Sistematizar el abordaje de la cuestión, dada la gran cantidad de motores que es necesario analizar.

Hipótesis

Los motores de alta eficiencia redundan en un mejoramiento notable del desempeño de las empresas. Ahorran energía al país y disminuyen las emisiones de gases de invernadero. Promueven la calificación del personal y necesitan y vienen con procedimientos mejorados de operación y mantenimiento.

Este será el principal punto de estudio, y será contrastada para cada motor en particular. La respuesta afirmativa o negativa a esta hipótesis de trabajo en cada motor será de parte del maestrante hecha como una recomendación referente a sustituir o no un motor, quedando obviamente en manos de la gerencia de la planta seguirla o no.

El uso de variadores de velocidad introduce tecnologías para los cuales aún no está preparada la red de suministro nacional – por la introducción de armónicos de orden superior en la red, para los cuales no se haya debidamente protegida en nuestro país –, ni las instalaciones de las plantas industriales, ni, en general, el personal que las opera; todo lo cual los descarta en principio como soluciones.

Los motores de eficiencia estándar generan pérdidas muchas veces millonarias a las plantas industriales. Son de lento reemplazo sus partes en caso de desperfectos, lo cual origina muchas veces reparaciones rápidas pero muy poco

exitosas desde el punto de vista del ahorro energético, lo cual engrosa el monto general de las pérdidas económicas al disminuir notablemente su eficiencia.

Una discusión pormenorizada de estos puntos evade los alcances del presente trabajo, por lo cual sólo serán analizados en forma genérica.

Conclusiones particulares

Hemos expuesto en líneas generales los lineamientos generales bajo los cuales será sometido el escrutinio y seguimiento del presente trabajo, siendo los que serán aplicados en el desarrollo del mismo. Como primera aplicación tenemos que en la presente tesis se tendrá los siguientes elementos para su posterior desarrollo.

Variables

Las principales variables del presente trabajo serán el voltaje (V) y la corriente (I) medidos por el autor directamente de los bornes de los motores en estudio.

El instrumento sensor para tal motivo se describe en el Anexo III: Guía de aplicaciones del Multímetro Fluke 43B Power Quality Analyzer.

En el Anexo I se considera el Procedimiento de Mediciones en Motores Trifásicos al uso recomendado por el IEEE, al cual el maestraste se apegó para realizar las mediciones de campo.

Marco Metodológico

Tipo de Investigación

Se trata de una investigación no experimental, puesto que nuestras variables independientes principales de estudio evaden nuestra manipulación, al descartar en principio el empleo de variadores de velocidad, y los sistemas de protección y regulación de voltaje asociados a ellos.

Alcance

El alcance del presente trabajo es:

- Exploratorio
- Descriptiva
- Evaluativa
- Explicativa

Por ello el maestrante se fija como meta brindar los elementos necesarios para la toma de decisión, elaborando material que pueda ser presentado posteriormente

Método

Se aplicará un método deductivo, partiendo de lo general para llegar a lo particular, teniendo en todo momento el cuidado necesario para atenernos al texto y espíritu de las normas regulatorias vigentes. De este modo los informes obtenidos pueden ser presentados ante los organismos competentes por parte de las empresas propietarias de los motores a la hora de solicitar beneficios crediticios o subvencionales disponibles por las Políticas de Estado diseñadas para el ahorro energético nacional.

Técnicas e instrumentos

Tendremos como técnica la observación directa del objeto de estudio, instrumental de medidas eléctricas y como procedimiento de aplicación del mismo describiremos las normas internacionales aplicadas para la obtención de datos eléctricos aplicadas.

Unidades de Análisis

El universo de estudio del presente trabajo lo constituyen los motores eléctricos habilitados en distintas plantas del territorio nacional.

Dado que cada motor comporta sus particularidades evade el alcance de esta tesis el realizar análisis estadístico alguno de esta población de estudio.

Por otro lado, lo que sí se emplea, son los resultados de las estadísticas a motores hechas por NEMA sobre eficiencias de motores instalados en EE.UU., y en sus resultados basaremos nuestros cálculos.

Conclusiones generales

Los aspectos a evaluar en el motor y su sistema asociado serán entre otras cosas:

- Evaluación de la Resistencia del Bobinado (conforme con NEMA MG-1):
- Evaluación del Aislamiento a Tierra, Megueo (conforme con IEEE 95 y IEEE 43)

- Evaluación de la Absorción Dieléctrica del aislamiento (conforme con IEEE 43):
- Evaluación del Índice de Polarización del aislamiento (conforme con IEEE 43):
- Evaluación del Perfil de Polarización del aislamiento (conforme con IEEE 43):
- Aplicación de Hi-Pot (conforme con IEEE 95 y IEEE 43):
- Aplicación de la Surge Testing (conforme con IEEE 522):
- Evaluación de Condición de Potencia de Alimentación
- Evaluación del Rendimiento del Motor
- Evaluación de la condición del motor
- Evaluación de la energía de alimentación
- Evaluación de la carga del motor
- Evaluación del nivel de vibración
- Evaluación del régimen de operación

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL INGENIO CUATOTOLAPAN Y DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL AZÚCAR

1.1 Situación geográfica del Ingenio Cuatotolapan.

El ingenio se localiza en el municipio de Hueyapan de Ocampo y en la población Juan Díaz Covarruvias al sur de Veracruz en un valle de aproximadamente 52 hectáreas, que se inicia en la región de los Tuxtla y termina en el cauce del río San Juan como se muestra en la Figura 0.1

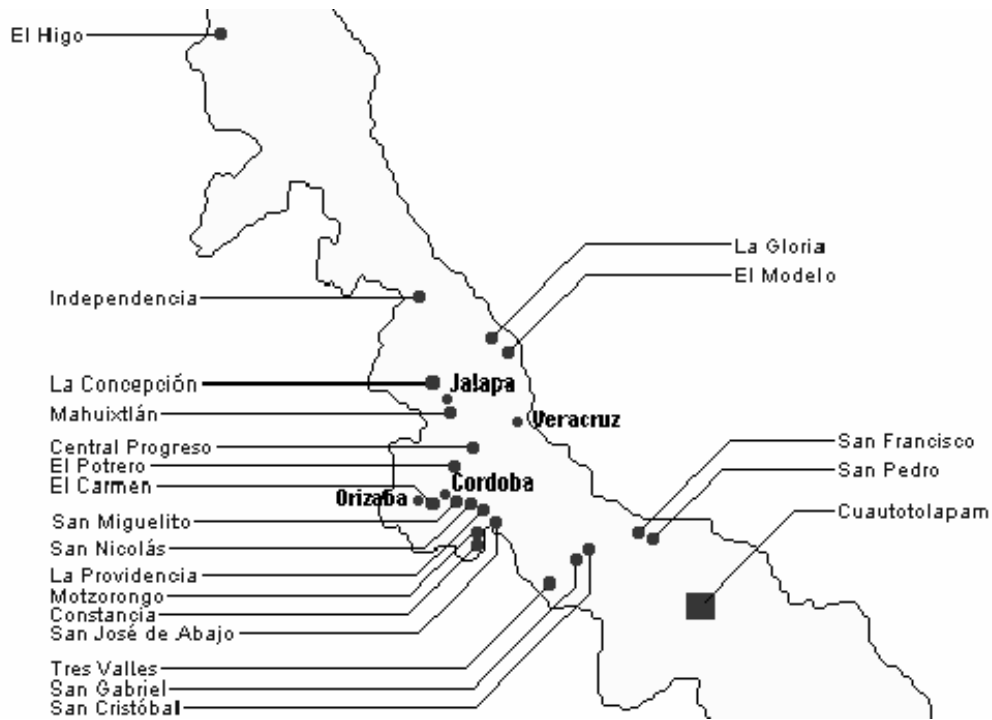


Figura 1.1: Localización geográfica del Ingenio

La hidrología en la zona de abastecimiento del ingenio de acuerdo a la división hidrológica del país, se ubica en las regiones 28 y 29, denominadas Papaloapan y Coatzacoalcos, respectivamente. Esta constituida por ríos y arroyos perennes que llevan grandes volúmenes de agua, esta condición constituye una potencialidad significativa para su aprovechamiento de riego de auxilio de 4,000 hectáreas; utilizando las corrientes de los ríos: San Juan Evangelista, Grande, Tepango y Hueyapan.

Como se observa en la Figura 1.1, la ubicación geográfica del ingenio tiene gran relevancia en el sector productivo de la región debido a que es la principal fuente de ingreso de las poblaciones mencionadas

1.2 Organigrama del Ingenio Cuatotolapan.

A continuación se presenta el organigrama del Ingenio Cuatotolapan.

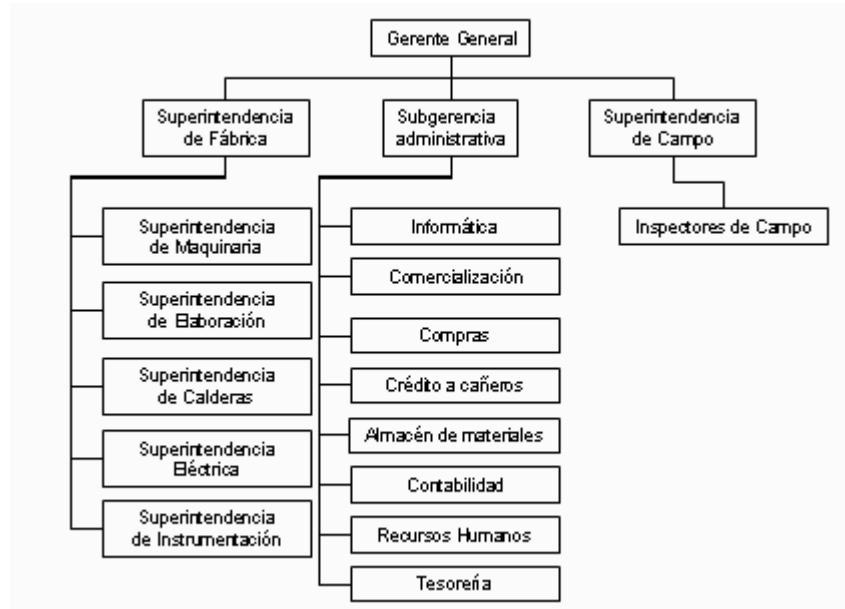


Figura 1.2: Organigrama del Ingenio Cuatotolapan

1.2.1 La participación del Ingenio Cuatotolapan en producción del azúcar en el ámbito nacional.

De acuerdo a información publicada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en la Zafra 2001/2002, la producción nacional total de azúcar fue de 4,865,358 toneladas, para lo cual, solo el estado de Veracruz participó con la producción de 1,888,999 toneladas, que representa el 38.83% de la producción nacional, siendo el estado más importante en este rubro; el Ingenio Cuatotolapan produjo 63,880 toneladas, teniendo una participación del 3.38% de la producción estatal y el 1.31% de la nacional.

Un punto muy importante a considerar que el 70% de su producción es para exportación y el 30% para consumo interno.

1.3 Descripción del proceso de fabricación del azúcar.

A continuación se hará la descripción de todo el proceso por orden que inicia como sigue:

ABASTECIMIENTO DE CAÑA.- La zona de abastecimiento está formada por cuatro divisiones: Acayucan, Catemaco, Hueyapan de Ocampo y San Andrés Tuxtla

EQUIPO DE TRANSPORTE.- El 100 % de la materia Prima es transportada por camiones, torton y trailer con capacidades de carga de 10, 20 y 30 respectivamente.

MANEJO DE CAÑA.- Se maneja en tercios de 3,500 a 6,000 Kg. atados con cadenas cañeras. Los camiones son pesados en 2 Basculas de plataforma con control digital de 50 toneladas y, con una plataforma de 20 toneladas. La recepción en el batey se hace mediante 3 Grúas radiales, todas con una capacidad de 6 ton, elevación 11 m, las tres acondicionadas con balancín de descarga y araña cañera para la alimentación a las mesas. La alimentación de caña se hace mediante 2 Mesas alimentadoras estructurales, movidas por motores eléctricos. La caña es conducida a molinos mediante 4 Conductores tipo tablillas. La preparación de la caña se logra con 2 juegos de cuchillas picadoras de fabricación local. Desfibradora modificada para 54 martillos, con pastilla de triten accionada por turbina de vapor acoplada a un reductor de velocidad.

EQUIPO DE MOLIENDA.- De fabricación local compuesto por 6 molinos de 32" x 48" con rayado circular de 1 ½" x 35° en las mazas cañeras y con 1 ½" x 45° en las mazas superiores y bagacera. Cada molino tiene acondicionado un rodillo de alimentación forzada, 4ª maza de 27" x 48" y rayado de 1 ½" x 45°. Las dimensiones de los muñones de las mazas es de 13 1/4 diámetros x 15" longitud y el diámetro del pistón hidráulico de 10". Molinos 1 y 2: movidos por turbina de vapor, 2 etapas, con potencia de 750 H.P. a 3,600 r.p.m. presión de vapor de admisión 10.55 kg/cm, presión de escape 1.055 kg/cm, reductor de alta velocidad y potencia de 750 H.P. La reducción de baja velocidad es por medio de una transmisión abierta doble con una relación de velocidad de 4.44:1 de 750 H.P. Molino 3: movido por turbina de vapor, 2 etapas, con potencia nominal de 500 H.P. a 3,500 r.p.m. acoplada a reductor de alta velocidad con potencia de 500 H.P; la reducción de baja velocidad es una

transmisión de engranes abierta y una potencia nominal de 500 H.P. Molino 4 y 5: movidos por turbinas, de una etapa, 750 H.P. nominal, esta acoplada a un reductor de alta velocidad, la transmisión de baja velocidad es de engranes abierta con un primer paso de flecha y piñón helicoidal y un segundo paso de piñón corona doble y una potencia nominal de 750 H.P. Molino 6: movido por turbina 3600 r.p.m acoplada a un reductor de alta velocidad y una potencia nominal de 500 H.P., el tren de baja velocidad es de engranes rectos abiertos y una potencia nominal de 500 H.P.. Se cuenta con dos sistemas de lubricación para molinos. Un sistema de presión hidráulico y 12 acumuladores hidráulicos. La separación del pachaquil es mediante un transportador colador, provisto de 9 telas barrenadas de acero inoxidable, cadena de arrastre y 38 rastras de madera accionado por un moto reductor. El jugo mezclado es enviado a un segundo colador. Un sistema de maceración compuesto simple con 4 bombas inatascables. El agua de inibición se aplica por medio de 2 bombas centrífugas bipartidas accionadas con motores eléctricos. El jugo colado es enviado a las básculas de jugo por medio de 2 motobombas centrífugas.

PLANTA DE VAPOR.- Consta de 5 calderas. tipo paquete, presión de vapor 15 Kgs/cm² capacidad de generación 37.5 Kg/s totalmente automática, el combustible es bagazo/combustoleo, con ventiladores de tiro forzado movidos por turbinas de vapor. Precalentador de aire tubular de 3 pasos a contracorriente. 3 Bombas para el manejo de condensados al tanque elevado deareador.. 2 Turbo bombas para alimentación de agua a calderas, con una presión de bombeo de 240 lb/pulg². (17 kg/cm² aproximadamente). 2 bombas auxiliares para alimentación de agua movidas por motores eléctricos. Para el bombeo de petróleo a quemadores se cuenta con 3 bombas. Los conductores de bagazo cuentan con un sistema de supervisión en tiempo real de instrumentación, con transmisores, controladores e indicadores electrónicos e inteligentes.

PLANTA ELECTRICA.- 3 Turbogeneradores de 1,200 kw y corriente alterna 460 volts trifásicos 60 hz. Una subestación auxiliar, conectada a C.F.E., de 500 k.v.a. acometida de CFE de 13.2 kv/460 volts., con sensores de velocidad, temperatura vibración y desplazamiento axial.

CLARIFICACION.- Cuenta con bascula automática digital Toledo, con celdas de carga capacidad nominal 10 ton. Tanques para pesar el jugo, cuenta con contador mecánico para las tancadas descargadas. Tanque colchón para recibir el jugo pesado, Torre de sulfatación Atlas de acero inoxidable con horno de charolas. Bombas para manejo de sulfitado para alcalización de jugo hay un control automático de pH, Tanques para preparar la lechada, para el manejo de lechada de cal. Bomba acoplada a motor eléctrico. Bomba acoplada a motor. Bombas para manejar el jugo alcalizado. El calentamiento del jugo alcalizado se efectúa en 2 etapas.

EVAPORACION.- Un doble efecto que consta de dos preevaporadores con extracción de vapor al 2o cuerpo y a calentadores secundarios. Segundo efecto con extracción para calentadores primarios, para transferencia de jugo se cuenta con 2 Bombas centrifugas, para manejo de meladura. Un Cuádruple efecto que consta de tres cuerpos de 5,131 ft² de superficie calorífica cada uno y el 4o. cuerpo de 2 cuerpos de 2,746 ft² de superficie calorífica cada uno. Cuádruple efecto de 18,000 ft² que consta de 4 efectos de 4,500 ft² de superficie calórica cada uno, 2 Bombas para manejo de meladura.

TACHOS.- 4 Tachos para masas de "A" de fabricación nacional, 2 tachos de calandria, agitador mecánico, con motor eléctrico y Reductor. Tacho de calandria tipo Honolulu para masas de "B" o "C". Calandria para Templas de refinado, cada uno cuenta con un Agitador mecánico con motor reductor.

EQUIPO DE CONDENSACION Y VACIO.- Bomba de VACIO para los tachos de crudo y para el filtro de cachaza. 12 Condensadores tipo contracorriente para los tachos, los evaporadores y el filtro de cachaza.

CRISTALIZADORES.- 5 Cristalizadores en forma "U" con aspas de agitación y movimiento accionado con motor .Los cristalizadores 1 y 2: comunicados, se usan como mezcladores para las templan de "B". Cristalizadores 3, 4 y 5: comunicados, se usan como portatemplan para masas de "C". Cristalizador tipo Werskpoor, continuo con 26 discos para enfriamiento y 8 discos para calentamiento y tiempo de retención 6 hrs. Cristalizador continuo vertical, equipado con serpentines de enfriamiento que trabajan en circuito cerrado, con bomba de agua, distribuidor de masa con motor 2

Bombas, 2 Intercambiadores de placas, uno para enfriamiento de agua y otro para calentamiento de miel final. Todo el sistema opera en forma automática.

CENTRIFUGAS.- Para templas de A: 5 Centrifugas, con mandos electrónicos capacidad de carga 450 kg./ciclo. Con motores eléctricos. Para templas de "B" Centrifuga, capacidad de carga 9 tons/hr. Centrifuga continua, capacidad 11 tons/hr. Para templas de C: Centrifuga continua, capacidad 13 tons/hr. Centrifuga continua. Para templas de refino: 4 Centrifugas. Para purgar templas de refinado se cuenta con 4 centrifugas.

SECADO Y ENVASE.- Secador de azúcar con temperatura de secado 110-115 °C". Una bascula electrónica para 120 sacos/hr. tipo automática. Envasadora de azúcar de 2 kg. y enfardadora de 20 kg. Con capacidad máxima de 90 ton/día.

ALMACENAMIENTO DE AZUCAR.- Dos bodegas de 30 x 30 x 7.5 mts área 900 m². Capacidad 90,000 sacos de 50 kg. c/u. Una bodega de 30 x 60 x 7.5 mts; área 1,800 m², capacidad 220,000 sacos de 50 kg. Una bodega de 30 x 40 x 7.5 mts; área. 1,200 m² con capacidad de 12,500 fardos de 20 kg. , Para el manejo de azúcar en bodega, se cuenta con 15 transportadores de banda y 3 remontadores de banda de 7 mts. una bascula Toledo de 100 kg. Para repesar los sacos. Una bascula Continental de 100 ton. Para pesar los furgones cargados con azúcar. Aunque fueran de uso.

TANQUES PARA PETROLEO.- 3 tanques cilíndricos verticales de lamina de hierro y una fosa de concreto, tanques de almacenamiento.

REFINERIA.- Tanque de 7,600 lt para disolver el azúcar a 38° Be de aquí pasa a un tanque de 3,962 lt y luego a un afinador de 3,396 lt donde se ajusta el fundido a 30° Be y una temperatura de 80°C por bombeo pasa al colador y de aquí al Tanque colchón de 22,400 lts. El fundido filtrado por bombeo pasa por un medidor masico al tanque de reacción, donde se adiciona ácido fosfórico, decolorante y lechada de cal en forma automática con un control de pH. El fundido tratado se bombea a 2 eductores cayendo a un tanque de 7,500 lts. Por bombeo el fundido aereado pasa por un juego de 3 calentadores primarios donde se eleva la temperatura a 90 °C y llega a un tanque de cabeza constante donde se dosifica el floculante; entrando por el fondo del clarificador Clarín de 13,900 lt donde por

flotación se eliminan las impurezas, (espumas) y se mandan a alcalización de crudo. A la salida del Clarificador se le dosifica soda ash cayendo a un tanque de 10,000 lts. Por bombeo el licor clarificado pasa a un juego de 2 calentadores secundarios, donde se eleva la temperatura a 90 °C pasando a las columnas percoladoras (10 en total), donde se elimina la mayor parte del color todavía presente depositándose en un tanque de 8,950 lts de donde se bombea y pasa a través de dos filtros trampa TEKLEEN de 3" de diámetro en acero inoxidable con malla de 100 mesh Modelo OBF3P - 250 g.p.m. con control electrónico automático, después al tanque receptor de tachos de 49,292. Los tachos de refinado descargan las templeas a un mezclador de 47,260 lt de donde se alimentan las centrifugas. El sirope se almacena en tanques alimentadores de tachos de refinado de 49,292 lts c/u y el sirope de 4a. (run off) se manda a los tachos de crudo. El azúcar húmeda se almacena en tres tolvas de 20,991 Kg c/u, para pasar a través del secador y ya el azúcar seca pasa a través de tres cribas vibratorias (swecos) de 60" de diámetro para la separación de granza grande, el azúcar seca cribada cae a un gusano, pasando por dos parrillas magnéticas y se deposita en dos tolvas de almacenamiento para su envasado. Las 5 tolvas en su interior son de acero inoxidable. 3 equipadas con vibradores magnéticos Mca. ERIEX, Mod. U-60.

SERVICIOS GENERALES.- Se cuenta con cuatro compresores y dos secadores de aire un tanque de almacenamiento de condensados puros y/o agua tratada con capacidad de 973,375 lts. Una bascula para pesar miel con celda de carga, una capacidad de 10 toneladas. Para pesadas de 2 ton; cada descarga integrada con programador de bacheo.

1.4 Descripción del proceso de evaporación.

Después de clarificación, inicia el proceso de evaporación donde su principal función es retirarle el agua al jugo de caña.

El jugo que entra al primer evaporador, se calienta por medio de vapor el cual se busca que entre en su punto de vapor saturado para que efectúe únicamente el cambio de estado y no sobrecaliente el jugo, debido a que esto incrementa el problema de ensuciamiento al sobrecalentar el jugo. Para lograr que el vapor entre

bajo estas condiciones se cuenta con una válvula atemperadora, para que en función a su presión se le controle la temperatura. Cabe mencionar que por la falta de instrumentación, actualmente no se logra al 100% este control, debido a que únicamente se cuenta con indicadores y la válvula atemperadora es manual.

El vapor del jugo que sale del primer vaso, entra al segundo para calentar el jugo que sale del primer vaso y entra al segundo vaso. Este paso se repite desde los preevaporadores hasta el penúltimo vaso, debido a que en el último vaso se introduce agua fría para crear vacío y ayudar a la cristalización.

La Figura 1.3 muestra un esquema del proceso de evaporación de un Ingenio Azucarero con toda la instrumentación necesaria para su buena operación.

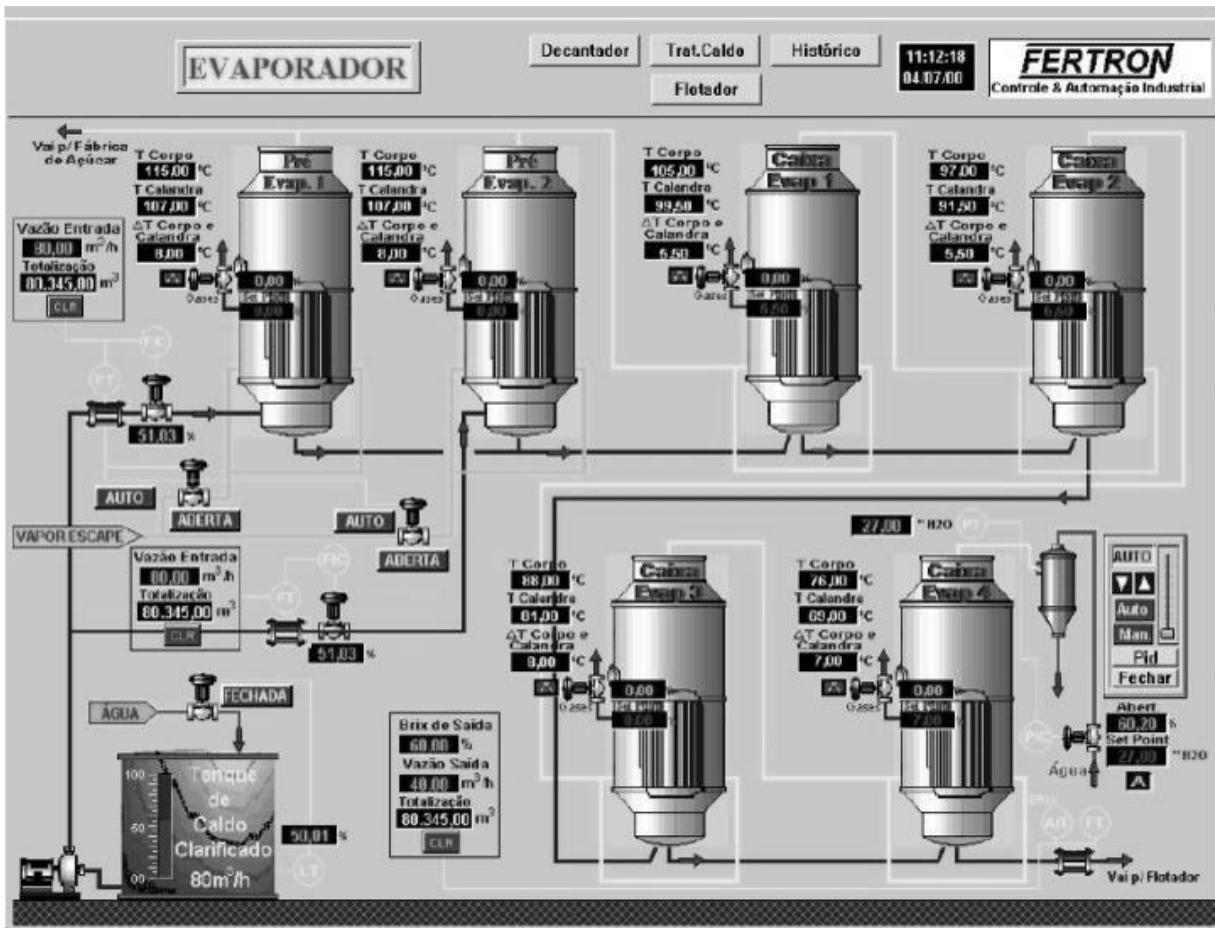


Figura 1.3: Proceso de evaporación instrumentado

La fabricación del azúcar involucra varios procesos desde que entra la caña de azúcar, se pica, se muele, el bagazo que sale en la molienda se emplea como

combustible en las calderas para producir vapor, que es empleado tanto para mover turbogeneradores; como molinos, picadoras de caña, desfibradoras, ventiladores de calderas y bombas de agua para las calderas; por otro lado, el vapor también se emplea para calentar el jugo de caña en los evaporadores, en los tachos para la cristalización del azúcar y en el desareador para tratar el agua que entra a calderas.

En este capítulo se analiza el proceso de evaporación, aquí se comienza a evaporar el agua del jugo. El jugo claro que posee casi la misma composición del jugo crudo extraído (con la excepción de las impurezas eliminadas en la cachaza) se recibe en los evaporadores con un porcentaje de sólidos solubles entre 10 y 12% y se obtiene una meladura o jarabe con una concentración aproximada de sólidos solubles del 55 al 60%.

Este proceso se da en los evaporadores de múltiples efectos al vacío, que consisten en una solución de celdas de ebullición dispuestas en serie. El jugo entra primero en el pre-evaporador y se calienta con vapor saturado hasta el punto de ebullición. Al comenzar a ebullición se generan vapores los cuales sirven para calentar el jugo en el siguiente efecto, logrando así un menor punto de ebullición en cada evaporador. En el proceso de evaporación se obtiene el jarabe o meladura. La meladura es purificada en un clarificador. La operación es similar a la anterior para clarificar el jugo filtrado.

Durante este proceso y por las características del fluido se tienen diversos problemas que son ocasionados durante la Zafra tales como la corrosión que daña tanto el espejo como los tubos y el ensuciamiento que ocasiona paros continuos al afectar el funcionamiento de los evaporadores y es necesario para limpiarlo, este último ocasiona que al cabo del tiempo se provoque la corrosión.

El proceso corrosivo natural del jugo de caña varía según las características del mismo. Un indicador común de corrosión es el nivel de pH. Entre más ácido el pH, es más corrosivo el fluido¹. Otros factores que pueden afectar la corrosión son la cantidad de minerales disueltos, gases, temperatura, y velocidad. Se pueden identificar los varios tipos de corrosión al examinar la superficie del metal tales como:

- Corrosión general: es un ataque uniforme de una superficie metálica

- Corrosión galvánica: ocurre cuando dos metales disímiles o aleaciones se conectan y se exponen a un ambiente corrosivo a través de un medio acuoso. Picadura por corrosión, o picadura de oxígeno, es una forma de ataque de metal que aparece esporádicamente, muy localizable y a menudo es más destructivo.
- Corrosión por erosión ocurre cuando los rangos de flujo son excesivos; la superficie metálica virtualmente se desgasta

La corrosión también puede ser el resultado de organismos microbiológicos tal como bacterias, hongos, y algas. El crecimiento de organismos microbiológicos en sistemas de enfriamiento industriales y comerciales también puede afectar a los intercambiadores de calor y causan problemas de olor.

Si el se agua deja sin tratar, se llega a un punto donde ya no puede mantener las impurezas en solución. Este punto se denomina nivel de saturación. El nivel de saturación depende de la temperatura, concentración, y nivel de pH.

Los depósitos de incrustación interfieren con los intercambiadores de calor y reducen su eficiencia por aislar las superficies de intercambio de calor. La forma más común de incrustación en sistemas del agua de enfriamiento es el carbonato de calcio (CaCO_3). En el agua, los iones del calcio se combinan con bicarbonato para formar bicarbonato del calcio: $(\text{Ca}^+) + (2\text{HCO}_3) \text{Ca} (\text{HCO}_3)_2$.

A medida que la temperatura del sistema aumenta, se convierte de bicarbonato de calcio a carbonato de calcio de la siguiente manera: $\text{Ca} (\text{HCO}_3)_2 + \text{calor} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$.

Si se dejan aumentar los depósitos de incrustación, se restringe el flujo del agua, de los conductos, y los tubos del intercambiador del calor se obstruyen. Finalmente, si no se presta la debida atención a los depósitos de incrustación puede llevar a la destrucción o posible falla en los de tubos del intercambiador del calor. Además puede generar pérdida de eficiencia y contaminación del proceso.

Los sistemas de enfriamiento se infectan continuamente con microorganismos. Si no se controlan, las poblaciones microbiológicas se multiplican rápidamente en el ambiente tibio del agua de enfriamiento. La acumulación de

crecimientos microbiológicos puede llevar a ensuciar los intercambiadores de calor, deteriorar el metal debido a la corrosión, además de obstruir filtros y pantallas.

El ensuciamiento es resultado de la acumulación física de sólidos suspendidos en la superficie del intercambiador de calor. Los sólidos suspendidos incluyen crecimientos microbiológicos o [subproductos], material orgánico, y materia inorgánica precipitada.

Si se desea que un sistema de agua de enfriamiento opere efectiva y eficazmente, se debe usar tratamiento orientado a los problemas de incrustación, corrosión, crecimiento microbiológico, y ensuciamiento. Se pueden solucionar estos problemas ya sea con tratamiento químico interno o con el uso de equipo de pre-tratamiento externo, tal como filtros de lechos profundos y separadores centrífugos, suavizadores, separadores ciclónicos, etc. El éxito de un programa de tratamiento del agua en torres de enfriamiento depende de la apropiada selección y aplicación de productos químicos y equipos, así como establecer correctamente los programas de purgado.

CAPÍTULO 2: MARCO HISTÓRICO DE REFERENCIA

2.1 Motivación. El Ahorro Energético en el Siglo XXI

2.1.1 La Energía, un Bien con Creciente Demanda

Hoy en día, en una sociedad industrializada, seríamos incapaces de imaginar un mundo sin energía, máquinas, ordenadores, ni telecomunicaciones. La crisis del 73 del siglo pasado, fue producto de la toma de conciencia a nivel mundial de que la energía es un bien escaso, que se debe conservar y utilizar adecuadamente. Los años 90, víctimas de las consecuencias de la mala utilización de la energía, como es el Efecto Invernadero entre otros, han sido testigos de la necesidad imperiosa de conservar la energía y preservar el medio ambiente.

Si bien son los países industrializados los consumidores masivos de energía, a corto plazo, los países en vías de desarrollo se convertirán en grandes consumidores de energía. Así lo refleja un informe de 1994 de la Administración de Información de Energía (“Energy Information Administration”) y del Sistema de Proyecciones de Energía Mundial (“World Energy Projections System”)⁴.

Se estima que para el año 2010⁵, los países miembros de la OCDE consumirán un 27% más de energía, los pertenecientes a Eurasia un 43% y los restantes países un 55%.

2.1.2 Un uso más eficiente de la energía

El 16 Congreso Mundial de Energía (“World Energy Congress”)⁶ se celebró en Tokio en octubre de 1995, con el slogan: “La Energía para Nuestro Mundo: ¿Que nos exige el futuro?”⁷.

⁴ Autores varios, “World Energy Consumption; Projections for the Year 2000 through 2010”, IEEE Power Engineering Review, vol. 15, no. 12, pág. 10, Diciembre 1995.

⁵ Estimación en base a datos de 1992.

Los principales temas tratados en este congreso fueron:

- La energía y el medio ambiente.
- Interrelación entre diferentes formas de energía.
- La energía y el mundo.
- Necesidades energéticas para los países en vías de desarrollo.
- Financiación e impacto económico de la energía.
- La energía y el consumidor.
- Conservación y uso eficiente de la energía.

Este congreso, junto con otros muchos en casi todas las regiones del mundo, nos dan idea de la toma de conciencia que la sociedad ha tomado en relación a la importancia de la necesidad de conservar y emplear la energía de forma más eficiente, más económica y menos agresiva para con el medio ambiente a la vez.

2.1.3 Energía para mejorar el medio ambiente

La comunidad mundial, con el tiempo, ha llegado a ser consciente de los principales cambios climáticos y del medio ambiente que afectan a la Biosfera de forma global, particularmente los originados por el bien conocido Efecto Invernadero. En Marzo de 1994 diversos planes de acción fueron establecidos por la Comisión sobre Cambios Climáticos de las Naciones Unidas.

El siglo XXI será testigo de una nueva forma de entender la energía, con dos objetivos básicos fundamentales:

- La necesidad de conservar la energía (conservación de reservas, adecuada utilización de la energía y obtención de nuevas formas de energía).

⁶ T.J. Hammons, C. Kim, J.S. Jennings, P. Fresco, S. Nasu, J. Baker, "World Energy Council 16th Congress Review", IEEE Power Engineering Review, vol. 16, no. 3, pp. 11-18, Marzo 1996.

⁷ Ésta es una traducción del slogan original: "Energy for Our Common World: What will the future ask for us?".

- La necesidad de preservar el medio ambiente (obteniendo ciclos cerrados de energía, reciclaje y disminuyendo las consecuencias del Efecto Invernadero).

2.2 Evolución de la Eficiencia de Motores Trifásicos

La eficiencia de los motores trifásicos ha experimentado un notable ascenso, como se puede apreciar en la Figura 2.1.

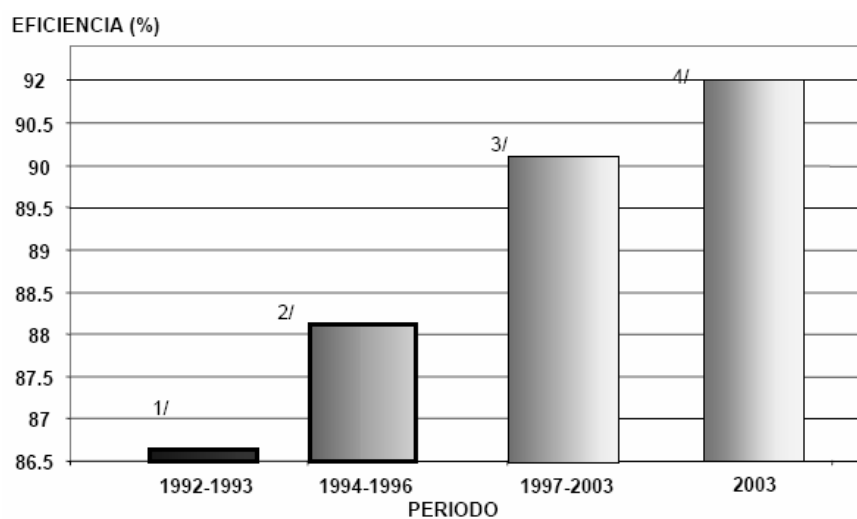


Figura 2.1: La eficiencia del motor trifásico en la última década⁸.

También se puede apreciar la calidad de los trabajos desarrollados al observar estos mismos datos desglosados según la potencia nominal de los motores, lo cual se ilustra en la figura Figura 2.2.

⁸ Fuentes:

- Estudio del Instituto de Investigaciones Eléctricas para establecer el Sello FIDE en motores, con información proporcionada por CANAME
- NOM-074-SCFI-1994 Motores estándar
- NOM-016-ENER-2002 Motores de Alta Eficiencia.
- NEMA PREMIUM

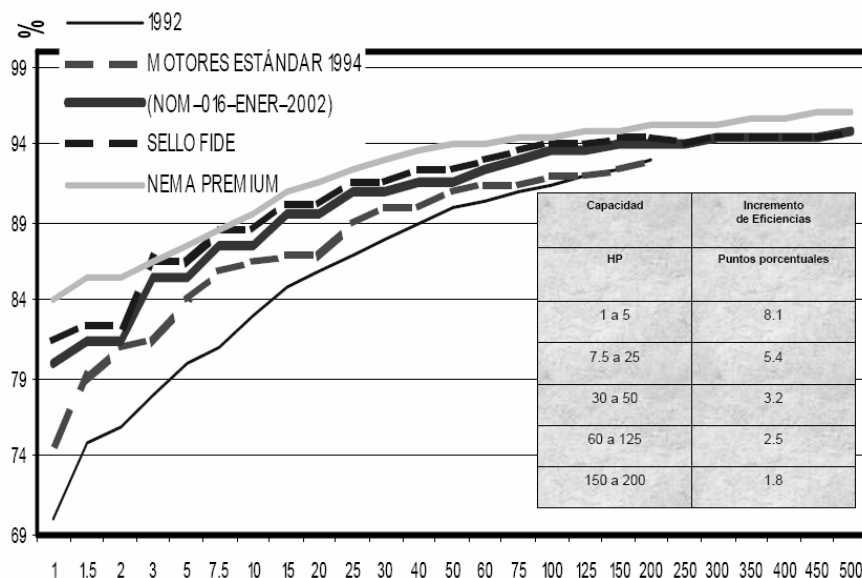


Figura 2.2: Mejoramiento de las Eficiencias Según la Potencia Nominal del Motor⁹.

2.3 Evolución de la Experiencia Internacional

Dada su influencia regional, se analiza la situación y evolución de la sustitución de motores en EE.UU. y Canadá.

En el vecino del norte, se constata que el proceso presenta las siguientes características:

- Incremento en la penetración del mercado de motores de alta eficiencia, del 2 al 20%.
- Falta de coordinación en los programas desarrollados por las compañías generadoras.
- Bajo impacto en la sustitución de equipos viejos.
- Desarrollo del Programa Motor Challenge.
- Entrada en vigor de la norma NEMA de Alta Eficiencia en noviembre de 1997.

⁹ Op. Cit

Es así que distintos actores públicos y privados reconvienen en desarrollar nuevos proyectos, principalmente dos:

Desarrollo de programas de incentivos en el 2002 por algunas compañías generadoras

En el 2003 se emitieron nuevas eficiencias para motores eléctricos, la NEMA Premium, la cual será la meta de diseño para todos los fabricantes de motores en América del Norte en los próximos años.

Por otra parte el caso canadiense puede ser resumido en los siguientes puntos:

- Incremento en la penetración del mercado de motores de alta eficiencia, del 5 al 65%.
- Programas similares de ahorro de energía entre las diferentes compañías generadoras.
- Solo una compañía generadora continuó otorgando incentivos económicos.
- Entrada en vigor en 1995 de normas de eficiencia.

2.4 Marco Legal Nacional

Con motivo del desarrollo del proyecto de incentivos en forma conjunta con la CONAE, se promovió la actualización de la NOM-016-ENER-02, autorizándose la NOM en el 2002 y se publicó en el Diario Oficial de la Federación el 13 de enero del 2003, entrando en vigor el 13 de marzo del 2003.

Esta norma contempló lo siguiente:

- Eliminación de las eficiencias especificadas para motores de eficiencia estándar
- Se Incluyo a los motores verticales
- Se Amplió el alcance de la Norma para cubrir hasta 500 HP

La misma consolida la permanencia de los equipos eficientes en el mercado Mexicano comercializándose solo Motores Eléctricos trifásicos de Inducción tipo jaula

de ardilla en los rangos de 1 a 500 HP, igualando los niveles de eficiencia establecidos en NEMA MG-1 1993 de Estados Unidos.

Ante la imperiosa necesidad de revertir el daño ecológico por la emisión de gases de efecto invernadero que afectan la atmósfera y propician el calentamiento global, produciendo graves daños a nivel mundial y nacional, es necesario tomar medidas que contribuyan a la adaptación y mitigación de este fenómeno. Una de las maneras efectivas para lograr resultados de trascendencia es la aplicación de medidas de ahorro y uso eficiente de energía eléctrica.

A nivel mundial del total de gases emitidos producto de una combustión, el principal de ellos es el Bióxido de Carbono (CO₂), en donde el 21% corresponde a la generación eléctrica.



Figura 2.3: Panel de Disertantes en “Foros de Consulta para la Integración del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012”.

En nuestro país, el 80% de la generación eléctrica nacional procede de centrales que queman combustibles fósiles, por lo que nuestra contribución a estas emisiones es importante. De hecho la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) señala que nos corresponde el primer lugar en la región por este concepto con 114 millones de toneladas de CO₂. De cada barril de petróleo, ni los usuarios

aprovechan a cabalidad el total de la electricidad generada. Resulta que, en promedio, si la tecnología con que se utiliza el fluido eléctrico es adecuada, se convierte en trabajo útil el 26.15% de la energía que tenía el combustible al salir del pozo de producción, mientras que, si se trata de procesos obsoletos o de equipos anticuados o en mal estado, el porcentaje de utilización baja al 4.13%¹⁰.

El FIDE es una institución privada, sin fines de lucro, fundada en 1990, a iniciativa de la CEE, cuya misión es propiciar el ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica, para contribuir al desarrollo económico, social y a la preservación del medio ambiente. Los resultados acumulados al 31 de marzo de 2007, con el trabajo armonizado con el Sector Energía y Cámaras Industriales, incluye la realización de 23,473 diagnósticos energéticos y el financiamiento de 3,815 proyectos de ahorro de energía eléctrica, la promoción del Programa de Financiamiento Doméstico (PVAEE), en donde se han otorgado 778,550 créditos por \$4,950 millones de pesos, y la sustitución de 26.3 millones de lámparas ahorradoras proyectos que han generado ahorros directos por 11,375 GWh en consumo de energía y 2,506 MW en potencia.

Esa propuesta de aumento de dimensión ofrece los siguientes beneficios adicionales a la sociedad:

- Diferir inversiones en infraestructura eléctrica
- Disminuir el costo de la factura eléctrica a los usuarios
- Incrementar la competitividad

Tabla 2.1: Inversiones y Ahorros proyectados para el programa 2007- 2012 de Eficiencia Energética.

Inversión Anual (MDP)	Ahorro Anual (GWh)	Ahorro Periodo (GWh)	Ahorro Acumulado (GWh)
\$ 5,200	5,383	32,389	44,184

¹⁰ Reseña de la Ponencia de Georgina Kessel ante el presidente de la República Dr. Felipe Calderón en ocasión del “Foros de Consulta para la Integración del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012”, sitio web del FIDE.

Para el cumplimiento de este programa 2007-2012 se requiere un financiamiento anual promedio de \$ 5,200 millones de pesos, para incrementar los programas a la industria ya los consumidores domésticos.

2.5 Análisis de Mercado de Motores Ineficientes en Operación

De acuerdo a las encuestas realizadas por PA Consulting¹¹, se determinó que el Programa de Incentivos a Motores estimuló el 32% del total de los motores para equipos de reemplazo.

También se constató una alta población de motores de eficiencias muy bajas y con más de 15 años de operación.

Calculamos que hay aproximadamente 1.5 millones de motores 3φ de inducción factibles de ser sustituidos.

2.6 Importancia de los Motores de CA

Se calcula que aproximadamente dos tercios de la potencia alterna mundial generada es utilizada para accionar motores eléctricos. La Tabla 2.2 muestra la distribución en EE.UU. de la energía generada en función del tipo de aplicación específica¹².

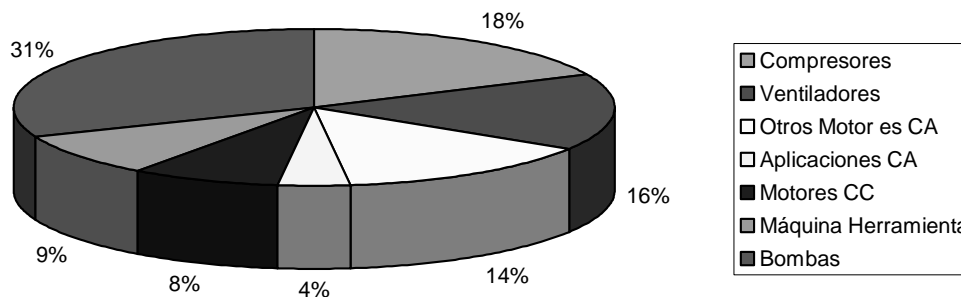
La necesidad de conservación de la energía está acelerando la forma de incrementar los niveles de rendimiento de los motores eléctricos. Existen diversas posibilidades para mejorar el rendimiento de los motores, muchas veces influenciadas por las regulaciones gubernamentales, así como también por los programas de financiación de la energía, los estándares de la industria y el coste de la energía¹³.

¹¹ Autores Varios, "Evaluación del Progreso del Programa de Incentivos a Motores", sitio web del FIDE.

¹² A.H. Bonnet, "An Update on AC Induction Motor Efficiency", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 5, pp. 1362-1372, Septiembre/Octubre 1994.

¹³ A.H. Bonnett, "Regulatory Impact on the Application of AC Induction Motors", IEEE Industry Applications Magazine, vol. 2, no. 2, pp. 4-15, Marzo/Abril 1996.

Tabla 2.2: Distribución de la energía consumida por motores eléctricos en EE.UU. según el tipo de aplicación¹⁴.



Los motores de inducción tienen un gran interés en el área industrial por su simplicidad, robustez, bajo coste y escaso mantenimiento, si se los compara con los motores de corriente continua. Durante el último par de décadas, muchos investigadores han estudiado a fondo el diseño de accionamientos de motores de inducción de altas prestaciones.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos, mediante un programa denominado “Motor Challenge Program”, patrocinado por el gobierno y la industria, intenta explotar las posibilidades de conservación de energía de los motores de corriente alterna y de los accionamientos de velocidad variable haciendo énfasis en los consumidores.

Antiguamente, la mayoría de motores, sobre todo los destinados a electrodomésticos, se diseñaban con el mínimo coste posible. Hoy en día, la conservación de energía se ha convertido en un aspecto relevante en lo que se refiere a diseño de motores. Puesto que los motores de inducción son los más utilizados, su eficiencia es un aspecto muy importante en el diseño.

En condiciones nominales, las pérdidas en los devanados de rotor y estator suponen un 25-30% de las pérdidas totales. Además, deben tenerse en cuenta las pérdidas en el hierro, que normalmente suelen representar un 15-20% del total. En

¹⁴ Datos obtenidos del “A.D. Little Report”, patrocinado por la Administración Federal de la Energía de los Estados Unidos.

tercer lugar, existen unas pérdidas adicionales, debidas al efecto pelicular, los flujos alternos y las corrientes de Foucault.

Finalmente, se deben considerar las pérdidas de ventilación y por rozamientos, que suponen un 5-10% del total.

Las características del motor y los valores relativos de sus parámetros dependen del tamaño de la máquina. Se tiene que para motores grandes, el rendimiento es mayor, ya que los valores de las resistencias de los arrollamientos son menores.

Actualmente existe la tendencia al diseño de motores de inducción de alto rendimiento, en contraste con los motores de diseño estándar. Estos nuevos motores utilizan más cantidad de materiales conductores para los arrollamientos de estator y rotor, de manera que se reduzcan las resistencias de los arrollamientos, y por tanto las pérdidas. También se utiliza hierro de alta calidad con flujos más reducidos, para disminuir las pérdidas en el hierro. Sus dimensiones aumentan, si bien es un aumento longitudinal. El coste inicial aumenta hasta un 25% en la mayoría de los modelos comerciales.

Valores típicos de rendimiento para motores estándar y de alto rendimiento son, respectivamente, 84 y 90% hasta 10 kW, 92 y 94% hasta 100 kW y 93 y 96% hasta 1000 kW.

Estudios comparativos¹⁵ en motores de CC y asíncronos para carretillas eléctricas con una potencia máxima de 18 kW demuestran una diferencia del rendimiento del motor de alterna de un 7% en promedio respecto al de continua (Figura 2.4).

Se prevé¹⁶ que en el futuro se utilizarán motores trifásicos en aplicaciones típicamente monofásicas, como por ejemplo en electrodomésticos, ya que los

¹⁵ S. Salin, "Energy-Saving Drives for Fork-Lift Trucks", Power Conversion & Intelligent Motion (PCIM Europe) for Power Electronics, Drives and Motion, no. 5, pp. 308-311, Octubre 1996.

¹⁶ H.R. Andersen, C.B. Rasmussen, E. Ritchie, J.K. Pedersen, "Efficiency Comparison of Electrical Motors for Energy Optimized Variable Speed Low Power and Low Cost Household Equipment", European Power Electronics, EPE'95, vol. 3, pp. 3381-3386, Sevilla, España, 19-21 Septiembre 1995.

motores trifásicos presentan mayor rendimiento y fiabilidad e incluso generan menos ruido acústico audible.

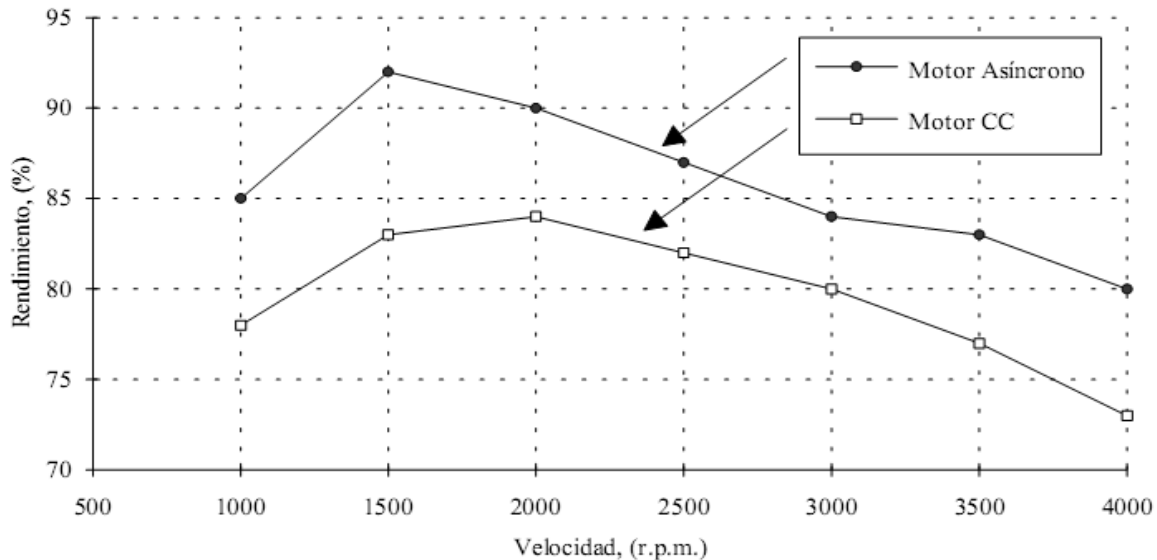


Figura 2.4: Comparación del rendimiento de un motor de CC y un motor asíncrono trifásico en función de la velocidad a potencia nominal de 18 kW¹⁷.

En aplicaciones industriales, el control digital por microprocesador de los motores eléctricos¹⁸ proporciona ventajas significativas respecto al control analógico, sobretodo en calidad de control, diagnosis y fiabilidad. Además, permite añadir prestaciones adicionales, como compensación de parámetros, monitorización y optimización del rendimiento.

Según un informe de Froster & Sullivan los considerables avances que experimenta la tecnología de CA contribuirán a la demanda, tanto de aplicaciones de frecuencia fija como de las aplicaciones que conforman el mercado de los variadores de frecuencia.

De acuerdo con el citado informe, el mercado europeo pasará de los 213.000 MPta de 1995 hasta alcanzar unos 279.000 MPta en el año 2002, aunque el aumento

¹⁷ Datos obtenidos de de FIAT OM Pimespo

¹⁸ J.M. Bodson, "Digital Control Improves Variable Speed Drives", EPE Journal, vol. 2, no. 4, pp. 243-248, Diciembre 1992.

global se verá aminorado por la continua disminución de los segmentos mecánico y eléctrico de CC.

El producto que domina el mercado es el de los variadores eléctricos de CA, que en 1995 alcanzó un volumen de facturación de unos 113.000 MPta, con una previsión de unos 188.000 MPta para el año 2002. Además, continuará ganando cuota de mercado a costa de los variadores de frecuencia de CC. Los usuarios que presentan mayor demanda son el sector de acondicionamiento de aire, el tratamiento de aguas, alimentación y bebidas, y químico y energía. Respecto al mercado de los semiconductores de potencia, se prevé pasar de los 5 billones de dólares de 1995, hasta los 11 billones de dólares para el año 2000.

Existen aplicaciones donde es interesante y ventajoso optimizar el rendimiento en régimen permanente: máquinas de papel, ventiladores, bombas, centrifugadoras, tracción eléctrica, etc.

Sin embargo, existen otras muchas aplicaciones donde el régimen transitorio es de igual duración o incluso mayor que el permanente, como por ejemplo: trenes de laminación, ascensores, grúas, vehículos eléctricos, máquina herramienta, robots, industria textil, etc. De ahí la importancia de estudiar la posibilidad de optimizar el rendimiento tanto en régimen permanente como en transitorio.

2.7 Antecedentes históricos

En México la Industria Azucarera fue una de las primeras industrias de transformación que se funda, en lo que en el siglo XVI se conoció como la Nueva España. La Industria Azucarera se ha desarrollado en México en forma ininterrumpida desde la conquista española, siendo una de las actividades de mayor tradición y trascendencia en el desarrollo del país; posiblemente fue el clima de la costa veracruzana tan parecido al de Cuba, lo que hizo pensar en establecer ahí la primera Planta de producción de azúcar; la caña de azúcar es una planta propia de los climas tropicales y subtropicales, con lluvia moderada combinada con una estación seca bien definida que permita efectuar la zafra.

A partir de este periodo los Ingenios Azucareros fueron aumentando en número e importancia; el cultivo de la caña de azúcar se extendió con rapidez por

toda la comarca y donde el clima era propicio, se establecieron pequeños molinos movidos por tracción animal, que empezaron a fabricar el azúcar morena. Como consecuencia de la guerra de independencia en México (1810-1821), la producción azucarera se vio severamente afectada con los daños de ingenios y cañaverales principalmente en la zona de Córdoba, Cuernavaca y la Amilpas. Después de este periodo, viendo la importancia del sector azucarero tanto en la Industria como en el campo, se le empezó a invertir retomando su presencia a nivel internacional.

La Industria Azucarera tiene una gran importancia en la economía nacional, su principal producción es el azúcar en grano, aunque en algunos Ingenios se produce alcohol y muy pocas ya están produciendo azúcar líquida para emplearse en otros procesos industriales como refrescos. El azúcar, sola o en combinación con otros alimentos, proporciona en promedio un 12% de hidratos de carbono, elementos productores de energía en la dieta humana.

Para el caso específico del Ingenio Cuatotolapan, en donde se va a desarrollar esta tesis, la construcción original se inicio en 1902 por Frank Miller y la primera molienda fue en 1904, procesándose aproximadamente 3,600 toneladas de caña de azúcar en un periodo de zafra de 62 días.

En 1938 el Gral. Aaron Saenz Garza se interesa en comprar el ingenio que estaba en quiebra, e inicia las negociaciones que concluyen en junio de 1939, procediendo a reparar el equipo e instalaciones.

En noviembre de 1939 se constituye la Compañía Industrial Azucarera S.A. de C.V. (CIASA), reiniciando operaciones en la zafra de 1939/40, que concluyo con una molienda de 63,900 toneladas de caña, con una producción de 5,750 toneladas de azúcar mascabado (sin refinar). La capacidad de las instalaciones era de 575 toneladas por día, en 1946 se inicia la ampliación para la capacidad de fabrica de 2,000 toneladas la superficie de cultivo era en ese año de 3,850 hectáreas. Actualmente se cuenta con una capacidad instalada de molienda de caña de azúcar 4,500 toneladas por día, en la zafra pasada 97/98 se molieron 678,891 toneladas de caña, obteniéndose 60,745 toneladas de azúcar refinada, a la fecha se tiene una superficie de cultivo de 12,850 hectáreas, se cuenta con una plantilla laboral de obreros de 450 y de empleados de confianza de 75 , con respecto a las ventas se

atiende al mercado nacional e internacional, a la fecha del total de las ventas un 70% sé a exportado y un 30% se a destinado para el consumo nacional.

El área de abastecimiento de caña de azúcar la conforman superficies de los municipios de Acayucan, Catemaco, Hueyapan de Ocampo y San Andrés Tuxtla, todos del estado de Veracruz. La tenencia de la tierra esta considerada en tres grupos: pequeños propietarios, colonos y ejidatarios.

La exportación de azúcar refinada del Ingenio Cuatotolapan dentro de su producción de azúcar de alta calidad, ha conquistado el mercado internacional, exportando durante los años 1996, 1997 y 1998 a los países de: Jordania, Turquía, Perú y Haití entre otros.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

3.1 Elementos de los Motores Eléctricos

Los motores eléctricos son máquinas que convierten la energía eléctrica tomada de la línea de alimentación, en energía mecánica, que es entregada en el eje de las mismas, esta transformación se consigue mediante la interacción magnética de los polos norte y sur generados por bobinas, cuya atracción o repulsión produce el movimiento del eje.

Según el tipo de campo magnético con que se trabaje se pueden clasificar a los motores en grupos que son:

1. Motores de Corriente Continua (C.C.)
 - a) Motor Serie
 - b) Motor Derivación
 - c) Motor Compound (serie-derivación)

2. Motores de Corriente Alterna (C.A.)
 - a) Motor Asincronico
 - b) Motor de Rotor bobinado

3. Motor Universal (C.C. y C.A.) que en realidad es un motor serie de C.C.

3.1.1 Piezas Componentes de los Motores

Definiremos a continuación los nombres y la función de los elementos eléctricos y mecánicos de los motores de C.C. y de C.A.

Rotor: Es la parte giratoria de la máquina, se compone de un núcleo de chapas de hierro silicio en cuyas ranuras se colocan las bobinas rotoricas (motores de C.C y motores asincronicos de rotor bobinado) o barras de aluminio inyectado cortocircuitadas en ambos extremos (motores asincronicos con rotor en jaula de ardilla)

3.2 Rotor Jaula de Ardilla

Estator: Es la parte estática (quieta) de la máquina, se encuentra formada también por chapas de hierro silicio laminadas, aisladas entre sí, y por bobinas de alambre de cobre ubicadas en las ranuras del mismo.

Colector: Se utiliza para realizar la alimentación de las bobinas del rotor en las máquinas de Corriente continua, está compuesto por láminas de cobre electrolítico, llamadas delgas. Las mismas están aisladas entre sí por mica y soldadas al principio y final de las bobinas.

Anillos Rozantes: Cumplen una función similar a la del colector, pero no son delgas aisladas sino un anillo enterizo sobre el que permanentemente hace contacto la escobilla, mientras que en el caso anterior se produce, a medida que gira el motor el contacto con la delga contigua, cambiando, la bobina que se está alimentando.

Escobillas: Son las que permiten haciendo contacto con el colector, que el mismo reciba la alimentación de energía, a las mismas vulgarmente se las llama carbones, dado que en general están compuestas de grafito

Porta escobillas: Son las piezas que sostienen las escobillas, hacen contacto eléctrico con ellas y con los conductores que las alimentan, asimismo pueden tener en motores de gran potencia elementos para regular la presión de las escobillas sobre el colector

Carcaza: Es el conjunto que rodea al estator en todas las direcciones, hacia el frente y detrás, o sea donde apoya el eje, están las tapas, las que pueden ser abiertas o completamente herméticas, según el uso del motor. Los motores totalmente cerrados, son utilizados en plantas, donde hay posibilidad de que penetre en el interior de los mismos, polvillo, virutas metálicas, etc., en estos casos la ventilación del motor, al no ingresar aire debe ser externa. En los motores abiertos en cambio, el ventilador, al tener orificios las tapas, permite la circulación del aire en el interior del motor, siendo la refrigeración más efectiva.

Cojinetes: Son elementos destinados al apoyo del eje, están ubicados en ambas tapas, en las que hay un orificio que permite verter aceite, para lubricar el contacto entre el eje y el cojinete, normalmente son de bronce fosforoso.

Rodamientos: Son piezas que reemplazan a los cojinetes, permitiendo un mejor movimiento del eje, ya que reemplazan el rozamiento entre el eje por un rozamiento de rodadura producido en las bolillas del rodamiento (ruleman), asimismo tienen menor desgaste y menor mantenimiento que los cojinetes.

Ventilador: Es una pieza compuesta de aletas destinadas a producir una circulación de aire con el fin de refrigerar el motor, puede ser interior a la carcasa, o exterior a la misma, en caso de la figura anterior del rotor jaula de ardilla se observan las aletas a ambos lados del rotor, estas inyectadas en aluminio junto con las barras de la jaula de ardilla.

3.2.1 Motores de jaula de ardilla.

Estos motores provienen de los motores polifásicos de inducción. Suponiendo que un motor de inducción comercial de jaula de ardilla se haga arrancar con el voltaje nominal de las terminales de línea de su estator desarrollará un par de arranque que hará que aumente la velocidad. Al aumentar la velocidad a partir del reposo (100% de deslizamiento) disminuye su deslizamiento y su par disminuye hasta que se desarrolla un par máximo. Esto hace que la velocidad aumente todavía más, reduciéndose en forma simultánea el deslizamiento y el par que desarrolla el motor de inducción.

Los pares desarrollados al arranque y al valor de desplazamiento que produce el par máximo, en ambos exceden el par de la carga, por lo tanto la velocidad del motor aumentará hasta que el valor de desplazamiento sea tan pequeño que el par que se desarrolla se reduzca a un valor igual al aplicado por la carga. El motor continuará trabajando a esa velocidad y el valor de equilibrio del desplazamiento, hasta que aumente o disminuya el par aplicado.

La característica esencial que distingue a una máquina de inducción de los demás motores eléctricos es que las corrientes secundarias son creadas únicamente por inducción.

Cuando se desarrolló por primera vez el rotor de doble jaula de ardilla se creó tal variedad y adaptabilidad en el diseño de rotores para motores de inducción que ha llevado a diversas características de curva deslizamiento - par. Al

dar la proporción correcta al devanado de doble jaula de ardilla, los fabricantes han desarrollado numerosas variaciones del diseño del rotor de vaciado o normal único. Estas variaciones tienen por consecuencia pares de arranque mayores o menores que el diseño normal y también menores corrientes de arranque.

Para distinguir entre diversos tipos disponibles, la National Eléctrica Manufacturers Association (NEMA) ha desarrollado un sistema de identificación con letras en la cual cada tipo de motor comercial de inducción de jaula de ardilla se fabrica de acuerdo con determinada norma de diseño y se coloca en determinada clase, identificada con una letra. Las propiedades de la construcción eléctrica y mecánica el rotor, en las cinco clases NEMA de motores de inducción de jaula de ardilla, se resume en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Características de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación en letras NEMA

Clase NEMA	Par de arranque (# de veces el nominal)	Corriente de Arranque	Regulación de Velocidad (%)	Nombre de clase Del motor
A	1.5-1.75	2-4	2-4	Normal
B	1.4-1.6	4.5-5	3.5	De propósito general
C	2-2.5	3.5-5	4-5	De doble jaula alto par
D	2.5-3.0	3-8	5-8, 8-13	De alto par alta resistencia
F	1.25	5-8, - 8-13	mayor de 5	De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque.

*Los voltajes citados son para el voltaje nominal en el arranque.

- Motores de inducción de jaula de ardilla clase A

El motor clase A es un motor de jaula de ardilla normal o estándar fabricado para uso a velocidad constante. Tiene grandes áreas de ranuras para una muy buena disipación de calor, y barras con ranuras ondas en el motor. Durante el periodo de arranque, la densidad de corriente es alta cerca de la superficie del rotor; durante el periodo de la marcha, la densidad se distribuye con uniformidad. Esta diferencia origina algo de alta resistencia y baja reactancia de arranque, con lo cuál

se tiene un par de arranque entre 1.5 y 1.75 veces el nominal (a plena carga). El par de arranque es relativamente alto y la baja resistencia del rotor producen una aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal. Tiene la mejor regulación de velocidad pero su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal normal, haciéndolo menos deseable para arranque con línea, en especial en los tamaños grandes de corriente que sean indeseables.

- Motores de inducción de jaula de ardilla clase B

A los motores de clase B a veces se les llama motores de propósito general; es muy parecido al de la clase A debido al comportamiento de su deslizamiento-par. Las ranuras de su motor están embebidas algo más profundamente que en los motores de clase A y esta mayor profundidad tiende a aumentar la reactancia de arranque y la marcha del rotor. Este aumento reduce un poco el par y la corriente de arranque.

Las corrientes de arranque varían entre 4 y 5 veces la corriente nominal en los tamaños mayores de 5 HP se sigue usando arranque a voltaje reducido. los motores de clase B se prefieren sobre los de la clase A para tamaños mayores.

Las aplicaciones típicas comprenden las bombas centrífugas de impulsión, las máquinas herramientas y los sopladores.

- Motores de inducción de jaula de ardilla clase C

Estos motores tienen un rotor de doble jaula de ardilla, el cual desarrolla un alto par de arranque y una menor corriente de arranque.

Debido a su alto par de arranque, acelera rápidamente, sin embargo cuando se emplea en grandes cargas, se limita la disipación térmica del motor por que la mayor parte de la corriente se concentra en el devanado superior.

En condiciones de arranque frecuente, el rotor tiene tendencia a sobre calentarse se adecua mejor a grandes cargas repentinas pero de tipo de baja inercia.

Las aplicaciones de los motores de clase C se limitan a condiciones en las que es difícil el arranque como en bombas y compresores de pistón

- Motores de inducción de jaula de ardilla clase D

Los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla clase D se conocen también como de alto par y alta resistencia.

Las barras del rotor se fabrican en aleación de alta resistencia y se colocan en ranuras cercanas a la superficie o están embebidas en ranuras de pequeño diámetro. La relación de resistencia a reactancia del rotor de arranque es mayor que en los motores de las clases anteriores.

El motor está diseñado para servicio pesado de arranque, encuentra su mayor aplicación con cargas como cizallas o troqueles, que necesitan el alto par con aplicación a carga repentina la regulación de velocidad en esta clase de motores es la peor.

- Motores de inducción de jaula de ardilla clase F

También conocidos como motores de doble jaula y bajo par. Están diseñados principalmente como motores de baja corriente, porque necesita la menor corriente de arranque de todas las clases. Tiene una alta resistencia del rotor tanto en su devanado de arranque como en el de marcha y tiende a aumentar la impedancia de arranque y de marcha, y a reducir la corriente de marcha y de arranque.

El rotor de clase F se diseñó para reemplazar al motor de clase B. El motor de clase F produce pares de arranque aproximadamente 1.25 veces el par nominal y bajas corrientes de arranque de 2 a 4 veces la nominal. Los motores de esta clase se fabrican de la capacidad de 25 hp para servicio directo de la línea. Debido a la resistencia del rotor relativamente alta de arranque y de marcha, estos motores tienen menos regulación de voltaje de los de clase B, bajan capacidad de sobrecarga y en general de baja eficiencia de funcionamiento. Sin embargo, cuando se arrancan con grandes cargas, las bajas corrientes de arranque eliminan la necesidad de equipo para voltaje reducido, aún en los tamaños grandes.

3.2.2 Clasificación de los motores de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con el enfriamiento y el ambiente de trabajo.

Los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla, y en general todos los motores eléctricos, se pueden clasificar también de acuerdo con el ambiente en que funcionan, sí también como en los métodos de enfriamiento.

La temperatura ambiente juega un papel importante en la capacidad y selección del tamaño de armazón para una máquina, parte importante del motivo es que la temperatura ambiente influye en la elevación permisible de temperatura por sobre los 40° C normales. Por ejemplo una máquina que trabaje a una temperatura ambiente de 75° C empleando aislamiento clase B tiene un aumento permisible de temperatura de tan solo 55° C. Si trabajara a su temperatura ambiente normal de 40 ° C se podría permitir un aumento de temperatura de 90° C, sin dañar su aislamiento.

También se hizo notar que la hermeticidad de la máquina afecta a su capacidad. Una máquina con un armazón totalmente abierto con un ventilador interno en su eje, permite un fácil paso de aire succionado y arrojado. Esta caja origina una temperatura final de trabajo en los devanados, menor en comparación que la de una máquina totalmente cerrada que evita el intercambio de aire con el exterior.

Esto da como resultado que existe una clasificación de los motores por el tipo de carcasa.

- Tipos de envolventes o carcasas.

La NEMA reconoce los siguientes:

1. carcasa a prueba de agua. Envolvente totalmente cerrada para impedir que entre agua aplicada en forma de un chorro o manguera, al recipiente de aceite y con medios de drenar agua al interior. El medio para esto último puede ser una válvula de retención o un agujero machuelado en la parte más inferior del armazón, para conectar un tipo de drenado.
2. carcasa a prueba de ignición de polvos. Envolvente totalmente cerrada diseñada y fabricada para evitar que entren cantidades de polvo que puedan encender o afectar desempeño o capacidad.
3. carcasa a prueba de explosión. Envolvente totalmente cerrada diseñada y construida para resistir una explosión de un determinado gas o vapor que pueda estar dentro de un motor, y también para evitar la ignición de determinado gas o vapor que lo rodee, debido a chispas o llamaradas en su interior.

4. carcaza totalmente cerrada envolvente que evita el intercambio de aire entre el interior y el exterior de ella pero que no es lo suficiente mente cerrada para poderla considerar hermética al aire.
5. carcaza protegida al temporal. Envolvente abierta cuyos conductos de ventilación están diseñados para reducir al mínimo la entrada de lluvia o nieve y partículas suspendidas en el aire, y el acceso de estas en las partes eléctricas.
6. carcaza protegida. Envolvente abierta en la cual todas las aberturas conducen directamente a partes vivas o giratorias, exceptuando los ejes lisos del motor, tienen tamaño limitado mediante el diseño de partes estructurales o parrillas coladeras o metal desplegado etc. Par< evitar el contacto accidental con las parte vivas
7. Carcaza a prueba de salpicaduras. Envolvente abierta en la que las aberturas de ventilación están fabricadas de tal modo que si caen partículas de sólidos o gotas de líquidos a cualquier ángulo no mayor de 100° con la vertical no puedan entrar en forma directa o por choque de flujo por una superficie horizontal o inclinada hacia adentro.
8. Carcaza a prueba de goteo envolvente abierta en que las aberturas de ventilación se construye de tal modo que si caen partículas sólidas o gotas de líquido a cualquier ángulo no mayor de 15° con la vertical no pueda entrar ya sea en forma directa o por choque y flujo por una superficie horizontal o inclinada hacia adentro.
9. Carcaza abierta envolvente que tiene agujeros de ventilación que permiten el flujo de aire externo de enfriamiento sobre y alrededor de los devanados de la máquina.

El costo y el tamaño de los motores totalmente cerrados es mayor que el de los motores abiertos, de la misma potencia y ciclo de trabajo y elevación sobre la temperatura ambiente.

3.2.3 Selección de velocidades nominales demotores de induccion de jaula de ardilla o de rotor devanado.

Dado que el deslizamiento de la mayor parte de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla, a la velocidad nominal en general de alrededor de un 5% , no se pueden alcanzar velocidades mayores a 3600 r.p.m. A 60 Hz, las velocidades son muy múltiplos de los inversos del números de polos en el estator: 1800, 1200, 900, 720 r.p.m. Etc. En general, se prefieren los motores de alta velocidad a los de baja velocidad, de la misma potencia y voltaje, debido a que:

- Son de tamaño menor y en consecuencia de menor peso
- Tienen mayor par de arranque
- Tienen mayores eficiencias
- A la carga nominal, tienen mayores factores de potencia
- Son menos costosos.

Por estas razones se suele dotar de cajas de engranes o embrague a los motores de inducción de jaula de ardilla para permitir velocidades de eje de cerca sobre 3600 r.p.m. y por debajo de 200 r.p.m. En muchos usos o aplicaciones comerciales particularmente en capacidades de menor potencia, la caja de engranes o de embrague va incorporada en la caja del motor, formando unidad integral con este.

3.2.4 Efecto de la variación de voltaje sobre la velocidad de un motor de inducido de jaula de ardilla o de rotor devanado.

Si solo hacemos variar el voltaje del estator no se produce una variación correspondiente en el deslizamiento y la velocidad. Entonces si los demás factores permanecen constantes, el par del motor es directamente proporcional al cuadrado del voltaje. Esto significa que si se aumenta el voltaje en el estator, se produce un aumento mucho mayor en el par y, correspondientemente, una reducción en el desplazamiento, es decir el deslizamiento varía inversamente con el cuadrado del voltaje o en proporción al inverso del par.

Para fines de cálculo, podemos resumir la relación entre par y voltaje de estator como sigue:

$$T_n = T_o \left(\frac{V_n}{V_o} \right)^2 \quad (3.1)$$

Donde el cual el subíndice "n" representa el nuevo valor, y el subíndice "o" representa el valor original.

El cálculo del deslizamiento con un cambio en el voltaje del estator (y del rotor) es un tanto más complejo, porque el deslizamiento varía también con la resistencia del rotor, el voltaje del estator y/o el par. La relación se puede resumir de la siguiente forma:

$$s_n = s_o \left(\frac{T_o}{T_n} \right) \left(\frac{Rrn}{Rr_o} \right) = s_o \left(\frac{V_o}{V_n} \right)^2 \left(\frac{Rrn}{Rr_o} \right) \quad (3.2)$$

para la cual se ha definido previamente los símbolos y subíndices.

De un motor de inducción de jaula de ardilla de propósito general. Al voltaje nominal del estator V_s , el motor entrega el par nominal a un desplazamiento aproximado de 5 %, lo cual se ve en el punto a de la figura a una reducción del 80 % del voltaje del estator, suponiendo una carga convencional cuyo par varíe con la velocidad, disminuyen tanto el par como la velocidad, con lo cual se tiene un aumento en el deslizamiento, como se muestra en el punto b. Una reducción semejante de voltaje produce tanto la reducción en el par como aumento en el desplazamiento en el punto c. La extrapolación de los puntos a, b, y c produce la línea de carga que aparece punteada para mayores reducciones en el voltaje del estator.

Por tanto si se tiene mayor calentamiento a la menor velocidad, así como una eficiencia reducida, lo cuál causa un rápido deterioro en el aislamiento del motor. Por tanto se acostumbra limitar la variación de voltaje sobre el par, el deslizamiento y la velocidad, empleando las ecuaciones (3.1) y (3.2).

3.2.5 Motor Síncrono de Inducción

Este motor se creó debido a la demanda de un motor síncrono polifásico con arranque propio en tamaños menores, de menos de 50 HP. Que no necesitarán excitación del campo con CD y que poseen las características de velocidad constante el motor. El rotor consiste de un devanado de jaula de ardilla, embobinado o vaciado, distribuido uniformemente en las ranuras.

Cuando una corriente alterna polifásica se aplica a la armadura normal de un estator polifásico, el motor arranca como motor de inducción. Debido al rotor de polo saliente, el motor llega muy fácil a su sincronía y desarrolla con rapidez el par máximo del motor síncrono de la máquina de polos salientes.

Así el motor síncrono de inducción desarrolla el par de reluctancia, proporcional a **sen de 2α** y al cuál se le llama a veces motor polifásico de reluctancia. Pero este es un nombre equivocado porque el motor síncrono de inducción trabaja con las características combinadas de par del motor síncrono y de inducción. Cuando está diseñado con devanados de rotor de alta resistencia, se pueden desarrollar pares de arranque bastante altos, hasta del 400 % del par a plena carga. Por otro lado, el empleo de devanados del rotor con alta resistencia ocasiona desplazamiento mayor, menor eficiencia y menor posibilidades entrada en sincronismo con carga mediante el par de reluctancia.

Como motor síncrono, trabaja a velocidad constante hasta un poco más del 200% de la plena carga. Si la carga aplicada es mayor que el 200% del par a plena carga se baja a su característica de inducción, en donde puede seguir trabajando como motor de inducción hasta casi el 700% del par a plena carga.

Debido a que el par crítico del motor síncrono es aproximadamente la tercera parte del correspondiente del de inducción, el armazón del estator de un motor síncrono de inducción es de tamaño tres veces mayor que un motor ordinario de inducción de la misma potencia. Además, puesto que trabaja desde sin carga hasta plena carga como motor síncrono sin excitación un mayor ángulo de par compensa la falta de excitación y el motor toma una alta corriente de retraso a bajo factor de potencia. Esto también ocasiona baja eficiencia y necesita de mayor tamaño de armazón para disipar el calor.

En motores de potencia relativamente baja, como el motor síncrono de inducción, los problemas creados por su mayor tamaño y peso, baja eficiencia y corriente en retraso no tienen importancia en comparación con las ventajas de velocidad constante, robustez, falta de excitación de CD, alto par de arranque, de marcha y de mantenimiento mínimo que caracterizan a estos motores.

3.2.6 Características de funcionamiento del motor de inducción.

Suponiendo que el motor de inducción comercial de jaula de ardilla se haga arrancar con voltaje nominal en las terminales de línea de su estator (arranque a través de la línea) desarrollará un par de arranque de acuerdo a la ecuación 1 que hará que aumente su velocidad. Al aumentar su velocidad a partir del reposo (100% de deslizamiento), disminuye su deslizamiento y su par disminuye hasta el valor en que se desarrolle el par máximo ($R_r = sX_{lr}$). Esto hace que la velocidad aumente todavía más reduciéndose en forma simultánea el deslizamiento y el par que desarrolle el par de inducción.

Los pares desarrollados al arranque y al valor de deslizamiento que produce el par máximo ambos exceden al par aplicado a la carga. Por lo tanto la velocidad del motor aumentará, hasta que el valor del deslizamiento sea tan pequeño que el par que se desarrolla se reduzca a un valor igual al par aplicado por la carga. Mientras tanto el motor continuará trabajando a esta velocidad y valor de equilibrio del deslizamiento hasta que aumente o disminuya el par aplicado.

El motor de inducción es de velocidad constante entre el funcionamiento sin carga y a plena carga (puntos d y c en la figura) y tiene una curva característica de velocidad que se asemeja a la del motor derivación.

Los motores asíncronos o de inducción, por ser robustos y baratos, son los más extensamente empleados en la industria. En estos motores el campo gira a velocidad síncrona, como en las máquinas síncronas

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (3.3)$$

Teóricamente, para el motor girando en vacío y sin pérdidas, el rotor también tendría la velocidad síncrona no obstante al ser aplicado un par externo al motor, su

rotor disminuirá su velocidad justamente en la proporción necesaria para que la corriente inducida por la diferencia de velocidad entre el campo giratorio (síncrono) y el rotor, pase a producir un par electromagnético igual y opuesto al par aplicado exteriormente. El par electromagnético es proporcional al flujo producido por el campo giratorio y a la corriente y al factor de potencia del rotor.

El par del motor electromagnético puede ser expresado por la relación:

$$C = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (3.4)$$

donde P_g es la potencia del campo que gira a una velocidad angular síncrona ω_s radianes por segundo. Por otro lado, si P es la potencia mecánica proporcionada a través del eje que gira a una velocidad angular ω radianes por segundo $C = P / \omega_s$

Por lo tanto:

$$P = P_g \quad \omega/\omega_s = (1 - s) P_g \quad (3.5)$$

O sea la potencia cedida por el eje es igual a la potencia disponible en el entre hierro de la máquina P_g (potencia de campo giratorio), menos al parte correspondiente a las pérdidas en el rotor $s * P_g$.

Para el caso de núcleos ferromagnéticos reales, la permeabilidad finita implicará una cierta corriente de magnetización I_μ , y las pérdidas en el hierro (transformadas en calor en el proceso) exigirán una componente activa de corriente I_p .

La composición de estas corrientes produce la corriente I_0 que el motor absorbe en vacío.

Ahora para una situación de carga I_2 , la corriente absorbida de la línea es la suma vectorial. $I_1 = I_2 + I_0$.

Aquí están representadas las ff.ee.mm. E_1 (f.e.m inducida en el estator) y E_2 (f.e.m. inducida en el rotor referida al estator). Ellas sirven de referencia para el diagrama de corrientes, una vez que su vector debe estar adelantado 90° eléctricos con relación al vector de la corriente de magnetización.

Alterándose la carga aplicada al motor, la componente de corriente del rotor I_2 varía, pues es proporcional al par. I_0 permanece constante, pues está vinculada a

la magnetización del motor. El lugar geométrico de la punta del vector que representa I_1 , corriente absorbida por el primario, es una circunferencia, tal como se ve en la figura de abajo:

3.2.7 Características de funcionamiento normal del motor de inducción en marcha (*desde vacío hasta plena carga*).

- Caso sin carga y vacío:

Sin carga, el deslizamiento es muy pequeño y la frecuencia, reactancia del rotor, y la FEM inducida en éste son muy pequeñas. Por lo tanto la corriente en el rotor es muy pequeña y solo la suficiente para producir el par sin carga y por lo tanto la corriente en el estator es la suma fasorial de su corriente de excitación I_e y un componente de carga primario I_o inducido en el rotor por acción del transformador.

La corriente de excitación en el primario del estator a circuito abierto es I_e , es decir la suma fasorial de un componente I_h de histéresis o de potencia, y un componente I_m , de magnetización necesario para producir el flujo rotatorio en el estator. Los componentes de potencia I_h e I_o están en fase con E_{gp} . El factor de potencia sin cargar se representa mediante θ , el ángulo entre I_{sc} y E_{gp} . Así, $I_{sc} \cos\theta$ es la suma de I_o e I_h , es decir, la pequeña corriente del estator I_o producida por la corriente del rotor y por un componente primario de pérdida de I_h , debido a la histéresis y corrientes parásitas en el hierro del estator y del rotor. Se nota que si θ es grande, el factor de potencia es extremadamente pequeña y está en retraso.

- Caso de media carga

Al aplicar la carga mecánica al rotor, la velocidad disminuye un poco. La pequeña disminución de velocidad causa un aumento en el deslizamiento y en la frecuencia y reactancia del rotor, y en la FEM inducida en éste.

$$\begin{aligned} f_r &= s \cdot f \\ X_r &= s \cdot X_{lr} \\ E_r &= s \cdot E_{lr} \end{aligned} \quad (3.6)$$

El aumento en la corriente inducida (secundaria) en el rotor se refleja con un aumento de corriente primaria en el estator, I_{sr} , este componente de la corriente primaria del estator I_{sr} , produce potencia como I_o y está en fase con el voltaje

inducido por el primario E_{gp} . La suma fasorial de la corriente sin carga I_{sc} y el componente de carga I_{sr} , produce una corriente I_s en el estator a un ángulo de factor de potencia mejorado θ_s con ello, la corriente en el estator ha aumentado desde I_{sc} hasta I_s y el ángulo de factor de potencia ha disminuido desde θ_{sc} hasta θ_s y ambos factores tienden a producir más potencia de las barras de distribución ($E_{gp} I_s \cos \theta_s$).

- Condición de plena carga

El motor de inducción de jaula de ardilla girará un valor de deslizamiento que proporciona un equilibrio entre el par desarrollado y el par aplicado. De tal manera, conforme se aplica más carga, el deslizamiento aumenta porque el par aplicado excede al par desarrollado. Cuando se aplica el valor nominal al eje del motor de inducción, el componente de la corriente del estator primario en fase que toma el motor de inducción es grande en comparación con la corriente sin carga casi de cuadratura, y el ángulo del factor de potencia es bastante pequeño. El factor de potencia a plena carga varía entre 0.8 en motores pequeños (1 HP) y 0.9 o 0.95, en los grandes motores de inducción (150 HP y superiores).

- Más allá de plena carga

Con mayor carga y deslizamiento, la frecuencia del rotor continúa aumentando y el aumento en la reactancia del rotor produce una disminución en el factor de potencia.

Considerando al motor de inducción como si fueran un transformador, se puede decir que el secundario del transformador tiene una carga en retraso, lo cual hace que el factor de potencia del primario se retrase por lo tanto cuando las cargas son mayores que la plena carga, el factor de potencia se aproxima a un máximo, para disminuir después rápidamente.

A cargas livianas, las pérdidas fijas relativamente grandes en proporción con la salida pequeña, producen una eficiencia baja.

Con cargas grandes, las pérdidas variables relativamente grandes más las pérdidas fijas producen de nuevo baja eficiencia, no obstante la salida es alta. La eficiencia máxima se da en cargas moderadas, en las cuales las pérdidas fijas y variables son iguales y la potencia es aproximadamente igual al valor nominal.

Obsérvese que el par máximo se presenta bastante más allá del doble de la potencia nominal, en donde el deslizamiento crítico o de falla es aquella frecuencia del rotor a la cual la reactancia variable del rotor es igual a la resistencia de este.

- Deslizamiento

La pérdida de velocidad angular del motor (necesaria para que sea producido un par electromagnético), expresada por unidad de velocidad síncrona, se llama deslizamiento.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (3.7)$$

donde s = deslizamiento (pérdida de velocidad angular del rotor), n = velocidad del rotor, ω = velocidad angular del rotor.

Al probar los motores de inducción y determinar el deslizamiento a diversas condiciones de carga, es esencial que el valor de deslizamiento que se obtenga sea exacto.

3.2.8 Arranque del motor de inducción.

En la mayor parte de las zonas si se cuenta con un motor pequeño de inducción de jaula de ardilla de unos cuantos caballos de fuerza se pueden poner en marcha directamente desde la línea con una caída de voltaje que es de poca importancia en la fuente de voltaje, y con un retardo pequeño o sin retardo para acelerarse a su velocidad nominal. Igualmente, los motores grandes de inducción de jaula de ardilla hasta de varios miles de HP, se pueden arrancar conectándolos directamente a la línea sin daños ni cambios indeseados de voltaje, siempre que las tomas de voltaje tengan una capacidad bastante alta.

Aunque hay algunas excepciones entre las diversas clasificaciones de motores comerciales de inducción de jaula de ardilla, que necesitan normalmente seis veces el valor de su corriente nominal para arrancar cuando se aplica el voltaje nominal a su estator en el instante de arranque la corriente del rotor está determinada por la impedancia de rotor bloqueado $R_r + jX_{lr}$. Así, el voltaje del estator se reduce a la mitad de su valor nominal, la corriente de arranque se reduciría en esa

proporción, es decir a unas tres veces la corriente nominal. Pero la ecuación: $T_s = K_t V_p^2$ indica que si el voltaje de línea en el estator se reduce a la mitad de su valor, el par se reduce a la cuarta parte de su valor original. Por lo tanto se ha alcanzado la reducción deseable en la corriente de línea al motor al costo de una reducción indeseable y a un mayor par de arranque. Si el motor se arranca bajo carga grande, esto tiene cierta importancia y hay la probabilidad de que el motor pueda arrancar con dificultad o no arranque. Por otro lado si el motor se arranca sin carga, la reducción en el par puede no ser importante para algunos casos, y es ventajosa la reducción de la corriente.

Las fluctuaciones frecuentes de voltaje pueden también afectar al equipo electrónico y a la iluminación al grado de que se necesite algún método alterno para arrancar el motor de inducción, para limitar la corriente de arranque. Si las líneas que alimentan al motor de inducción de jaula de ardilla, tienen impedancias diferentes; los voltajes del estator pueden desbalancearse, desbalanceando severamente las corrientes en las líneas y originando que el equipo de protección deje al descubierto al motor. De hecho un desbalance de 1 o 2 % en los voltajes de la línea del estator pueden originar un desbalance del 20 % en las corrientes de línea, presentando calentamiento localizado del motor y fallas del devanado

- Arranque a voltaje reducido con autotransformador

Se pueden poner en marcha los motores trifásicos comerciales de inducción de jaula de ardilla a voltaje reducido empleando un autotransformador trifásico único o compensador, o bien con tres autotransformadores monofásicos, como se muestra en la figura:

Las salidas del transformador varían del 50 al 80% del voltaje nominal. Si el motor no puede acelerar la carga a voltaje mínimo, se puede probar con salidas de mayor voltaje hasta que se obtenga el par adecuado y deseado de arranque; el interruptor de tres polos doble tiro se lleva a la posición de arranque y se deja ahí hasta que el motor ha acelerado la carga casi hasta la velocidad nominal. A continuación se pasa rápidamente a la posición de marcha, en la cual queda conectado el motor en la línea directamente.

El arrancador compensador solo se utiliza durante el periodo de arranque y su capacidad de corriente se basa en ese trabajo intermitente, y por lo tanto es algo menor que la de un transformador de capacidad equivalente que podría emplearse para suministrar un motor de inducción en forma continua desde una fuente de mayor voltaje.

El auto transformador funciona de dos maneras:

1. Para reducir la corriente de arranque del motor mediante una reducción de voltaje.
2. Reduciendo la corriente de arranque mediante la relación de vuelta del transformador bajo la cual la corriente de línea es menor que la del secundario del motor. Dado que la relación de vueltas representa también la relación de voltaje, por lo tanto se reduce la corriente de arranque de la línea, por consiguiente en proporción al cuadrado de la relación de vueltas.

Ya que el interruptor se usa solo en forma intermitente, se tiene un ahorro (eliminación de un transformador) si se usan dos transformadores en delta abierta. Este arreglo produce un ligero desbalanceo de corriente en la toma central (L2) de un 10 a 15% de la corriente de arranque, pero este desbalanceo no es excesivo y no afecta materialmente al funcionamiento del motor.

- Arranque a voltaje reducido con resistor o reactor primarios.

Si se introduce un resistor en serie con cada una de las conexiones del estator o primarias de la línea, la gran corriente de arranque produce una reducción inmediata de voltaje aplicado a las terminales del estator, pero la corriente de línea se reduce solo en proporción a la reducción del voltaje de línea. El siguiente esquema muestra un circuito con ese fin. Enseguida se muestra la curva desplazamiento - par del motor a plena carga. Empleando una resistencia o reactancia en el primario la reducción en el voltaje estator aumenta debido a la reducción en el voltaje del estator al momento de arrancar se produce la reducción en el par de arranque que se indica. Si este voltaje y la corriente en el primario fueran constantes, la curva del par motor seguiría la línea de puntos que aparece en la figura. Sin embargo a medida que acelera el motor, el voltaje a través del estator aumenta debido a la reducción en la

corriente de línea y el par aumenta de acuerdo con el cuadrado el aumento del voltaje.

El arranque a voltaje reducido mediante una resistencia en serie con el estator mejora el factor de potencia al arranque, pero se producen pérdidas algo mayores; y el par máximo no es tan grande para la misma impedancia en serie con un factor equivalente.

- Arranque en estrella - delta

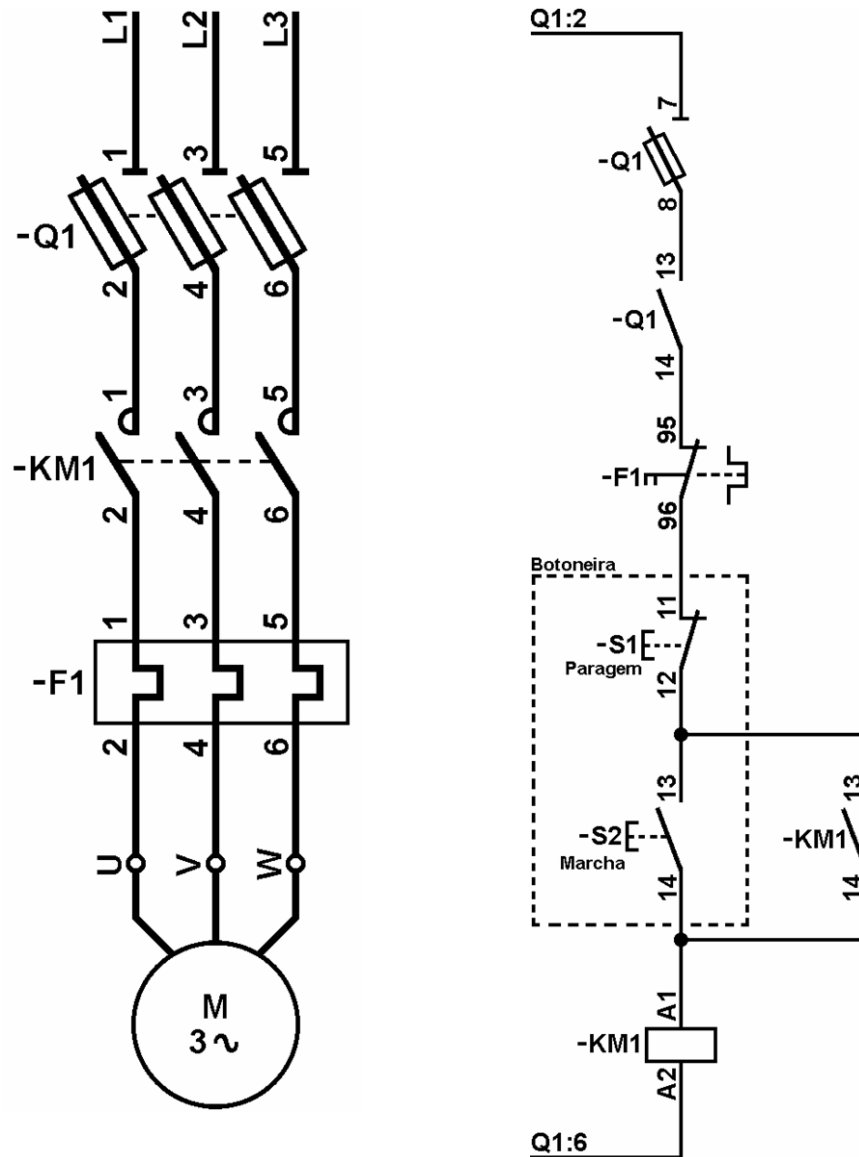


Figura 3.1: a) Arranque directo de motores trifásicos com rotor en cortocircuito. b) Circuitos de Comando

La mayor parte de los motores polifásicos se devanan con sus estatores conectados en delta. Existen fabricantes que ofrecen motores de inducción con el principio y el final de cada devanado de fase en forma saliente, con fines de conexión externa. En el caso de motores trifásicos se pueden conectar a la línea ya sea en estrella o en delta cuando se conectan en estrella, el voltaje que se imprime al devanado es $1/\sqrt{3}$, (57.8%) del voltaje de línea.

Es posible arrancar un motor con poco más de la mitad de su voltaje nominal y a continuación hacerlo trabajar en delta, con el voltaje nominal de línea y fase aplicados como el par varía de acuerdo con el cuadrado del voltaje impreso al estator la reducción del voltaje cuando se conecta en estrella producirá aproximadamente la tercera parte del par de arranque a pleno voltaje.

La conmutación de estrella a delta se debe hacer tan rápidamente como sea posible para eliminar grandes corrientes transitorias debidas a la pérdida momentánea de potencia. Por este motivo, se emplean interruptores de tres polos doble tiro con tensión de resorte y acción instantánea, en lugar de interruptores de cuchillas.

- Arranque con parte del devanado

Frecuentemente se diseñan los motores polifásicos comerciales de inducción de jaula de ardilla con devanados parciales, es decir, dos devanados de fase idénticos, cada uno de los cuales produce el mismo número de polos y el mismo campo magnético giratorio. La ventaja de esos devanados es que se pueden conectar en serie para sistemas de alto voltaje o en paralelo con sistemas de menor voltaje en la siguiente figura, la corriente de arranque que resulta es un 65% de la normal de arranque, con los devanados en paralelo, y el par de arranque es aproximadamente el 45 % del par normal de arranque. Por lo tanto, el motor se pone en marcha con la mitad de sus devanados y conectando en estrella; cuando el motor llega a determinada velocidad, el segundo devanado se conecta en paralelo.

Debido a que se tiene una baja pronunciada en la curva de par - deslizamiento durante el arranque con devanado parcial se haga cuando el motor de arranque bajo condiciones de carga ligera o sin carga, como el en caso de ventiladores, sopladores o taladros de banco.

- Arranque del motor de inducción de rotor devanado.

El par de arranque de estos motores se puede ajustar mediante una resistencia externa al rotor para dar pares de arranque que puedan llegar hasta el par máximo del motor. Como limita la corriente en el circuito del rotor y como da un mayor factor de potencia y par en el instante de arrancar, se reduce considerablemente la corriente de línea del estator.

- Característica par motor - velocidad de cargas mecánicas.

Para un sistema dotado de movimiento de rotación

$$P = C \omega \quad (3.8)$$

donde P es la potencia desarrollada, C es el par del motor desarrollado, ω es la velocidad angular del movimiento (en el sistema MKSI, P en W, C en N*m y ω en rad/seg.). Matemáticamente existen varias combinaciones de C y ω de modo que den el mismo valor de P; físicamente sin embargo, una carga mecánica específica asocia a un único par (C, ω) a la carga de la potencia P. La curva en C, en función de ω muestra tal dependencia, y es una característica fundamental para el proceso de selección del motor adecuado al accionamiento, con vistas a un funcionamiento estable, económico y satisfactorio.

En función de sus características par - velocidad, se pueden dividir las cargas mecánicas en seis grandes grupos:

1. Par constante, prácticamente independiente de la rotación, ejemplos grúas, cabrestantes, guindastes, transportadores de correas bajo cargas constantes.
2. Par que varía linealmente con la rotación. Ejemplos molinos de rodillos, bombas de pistón, cepillos y sierras para madera.
3. Par que varía con el cuadrado de la velocidad de rotación (variación parabólica) ventiladores, mezcladoras, centrifugadoras, bombas centrífugas, bombas de vacío, compresores.
4. Par que varía inversamente con la rotación, resultando potencia constante. Ejemplos máquinas - herramientas.

5. Par que varía de forma no uniforme con la rotación, no siendo suficientemente exactas las aproximaciones por funciones matemáticas. Ejemplo: horno rotativo de altas prestaciones
6. Cargas que no solicitan pares (volantes). El propósito del volante es liberar la mayor parte de la energía cinética en él almacenada para los picos de demanda de energía por parte de la máquina accionada. El motor accionado debe por tanto dejar de actuar, esto es dejar de transferir, energía en condiciones de altos pares, pero teniendo la misión de restaurar al volante su velocidad original, lo cual se lleva a cabo entre los picos de carga. Las prensas de perforación no de estampado profundo, no hidráulicas constituyen ejemplos de cargas que utilizan volantes según este principio.

Los casos presentados constituyen aproximaciones a los casos reales.

- Característica par - velocidad de motores eléctricos.

Es la curva que muestra la dependencia entre el par desarrollado por un motor eléctrico y su velocidad angular; en general, el comportamiento de esta curva característica de los motores es distinto del de las cargas, pues los motores eléctricos tienden a presentar un decrecimiento del par motor para velocidades crecientes.

$$R = n_0 - n / n \quad (3.9)$$

donde $n_0 = W_0 / 2\pi$, es la rotación del motor eléctrico en vacío, $N = W / 2\pi$, es la velocidad del motor accionando la carga.

La regulación de velocidad es un parámetro para la caracterización de los diferentes tipos de motores, en función de los valores asumidos (por regulación de velocidad) para cada velocidad. los motores asíncronos son motores cuyo par disminuye en la medida en que la velocidad aumenta, a partir de una cierta velocidad.

- Aceleración de la carga

La ecuación que rige la aceleración de una inercia J bajo la acción de un par C es:

$$C = J d \omega / dt \quad (3.10)$$

La determinación del tiempo t para que una inercia J sea acelerada desde la velocidad ω_1 hasta la velocidad ω_2 , bajo la acción de un par C puede ser hecha por:

$$\int_0^t C dt = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J d\omega \quad (3.11)$$

Admitiéndose que C es constante en el intervalo ($0 \rightarrow t$) o lo que es equivalente en el intervalo: ($\omega_1 \rightarrow \omega_2$).

$$t = \frac{1}{C} \int_{\omega_1}^{\omega_2} J d\omega = \frac{J}{C} (\omega_2 - \omega_1) \quad (3.12)$$

donde C es el par de aceleración numéricamente, el par del motor menos todos los pares resistentes, es decir todos los de fricción del motor y el de la máquina accionada y el generado por el funcionamiento de la propia máquina accionada y J es la suma de todas las inercias involucradas, es decir del rotor del motor, de la máquina accionada y del (de los) acoplamiento(s)

3.3 Bobinados en las máquinas de corriente alterna

3.3.1 Bobinados concéntricos

Se dice que un bobinado es concéntrico, cuando todas las bobinas que lo constituyen tienen un mismo centro, por lo que todas las bobinas de un mismo grupo son diferentes.

Estos bobinados se pueden construir “por polos” y “por polos consecuentes”.

- Bobinados “por polos”

En los bobinados por polos, por cada fase del devanado existen tantos grupos de bobinas como polos tiene la máquina.

$$G_f = 2P \quad (3.13)$$

Los grupos de una misma fase se unen de la siguiente forma: final del primer grupo con el final del segundo grupo; principio del segundo grupo, con el principio del tercer grupo, final del tercer grupo, con el final del cuarto grupo y así sucesivamente

Es decir, que la unión se realizará de finales con finales y principios con principios. Siendo el principio del primer grupo el principio de la fase y el principio del último grupo el final de la fase.

- Bobinados “por polos consecuentes”

En los bobinados por polos consecuentes, por cada fase del devanado existen tantos grupos como pares de polos tiene la máquina

$$G_f = P \quad (3.14)$$

Los grupos de una misma fase se unen de la siguiente manera: final del primer grupo con el principio del segundo grupo, final del segundo grupo con el principio del tercer grupo y así sucesivamente; es decir, que se unirán finales con principios.

3.3.2 Cálculo de bobinados concéntricos

Para calcular un bobinado concéntrico se han de considerar los siguientes puntos:

1. Disponer de los datos necesarios para calcular el bobinado
 - a. Número de ranuras: K
 - b. Número de polos: $2p$
 - c. Número de fases: q
 - d. Si el bobinado se realiza “por polos” o “por polos consecuentes”.

2. Posibilidad de ejecución

Solamente será posible la ejecución del bobinado, cuando el número de ranuras por polo y fase sea un número entero.

$$Kpq = \frac{K}{2pq} = \text{número entero} \quad (3.15)$$

Cálculos:

- Por polos

Número de grupos del bobinado

$$G = 2pq \quad (3.16)$$

Número de grupos por fase

$$G_f = 2p \quad (3.17)$$

Número de ranuras por polo y fase

$$Kpq = \frac{K}{2pq} \quad (3.18)$$

Número de bobinas por grupo

$$U = \frac{K}{4pq} \quad (3.19)$$

Amplitud del grupo

$$m = (q-1) \times 2U \quad (3.20)$$

- Por polos consecuentes

Número de grupos del bobinado

$$G = pq \quad (3.21)$$

Número de grupos por fase

$$G_f = p \quad (3.22)$$

Número de ranuras por polo y fase

$$Kpq = \frac{K}{2pq} \quad (3.23)$$

Número de bobinas por grupo

$$U = \frac{K}{2pq} \quad (3.24)$$

Amplitud del grupo

$$m = (q-1) \times U \quad (3.25)$$

Paso de principios. En la siguiente fórmula se da el paso de principios, teniendo presente que los bobinados aquí realizados son trifásicos.

$$Y_{120} = \frac{K}{3p} \quad (3.26)$$

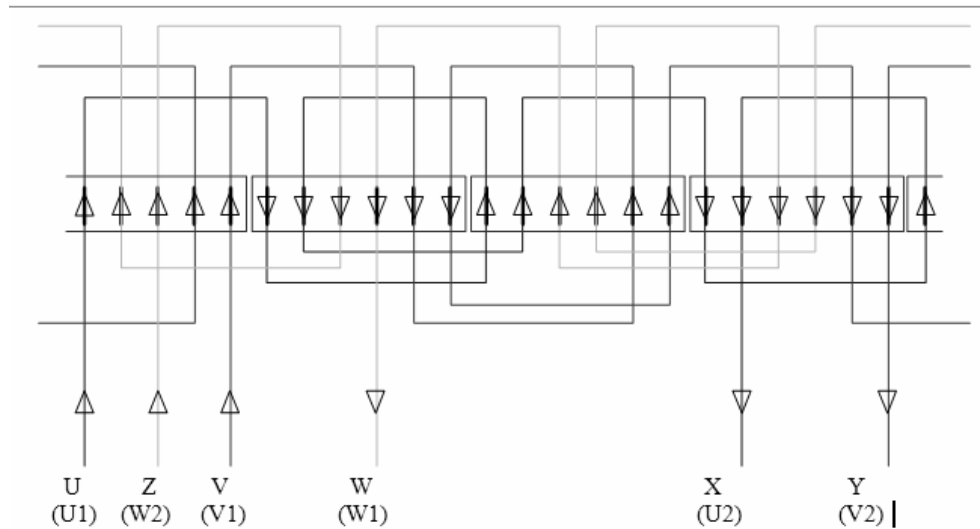


Figura 3.2: Esquema de Bobinado Concéntrico

3.3.3 Bobinados excéntricos

En los bobinados excéntricos, todas las bobinas del devanado son iguales. Todos los bobinados excéntricos son realizados “por polos”, por lo que teniendo esto presente resulta que cada fase tiene tantos grupos de bobinas como polos tiene la máquina.

Los bobinados excéntricos de corriente alterna pueden ser imbricados y ondulados y realizarse con una o dos capas.

Los bobinados imbricados pueden ser enteros y fraccionarios.

3.3.4 Bobinados imbricados enteros

A continuación se enumeran los puntos a seguir en el proceso de cálculo de bobinados imbricados enteros que pueden ser de una o dos capas. Son los más sencillos de calcular, ya que no presentan ninguna irregularidad, tanto en su cálculo como en su ejecución.

Número de grupos del bobinado

$$G = 2pq \quad (3.27)$$

Número de ranuras por polo y fase

$$Kpq = \frac{K}{2pq} \quad (3.28)$$

Número de bobinas por grupo

$$U = \frac{B}{2pq} \quad (3.29)$$

donde para 1 capa ($B = K/2$) y 2 capas ($B = K$)

Paso de ranura. Corresponde aproximadamente al paso polar

$$Y_k = \frac{K}{2p} \quad (3.30)$$

Se podrá acortar según convenga y dentro de unos límites justificados. Cuando no se acorte y el paso de ranura Y_k sea igual al paso polar Y_p , entonces el paso empleado se le llama diametral.

Paso de principios

$$Y_{120} = \frac{K}{3p} \quad (3.31)$$

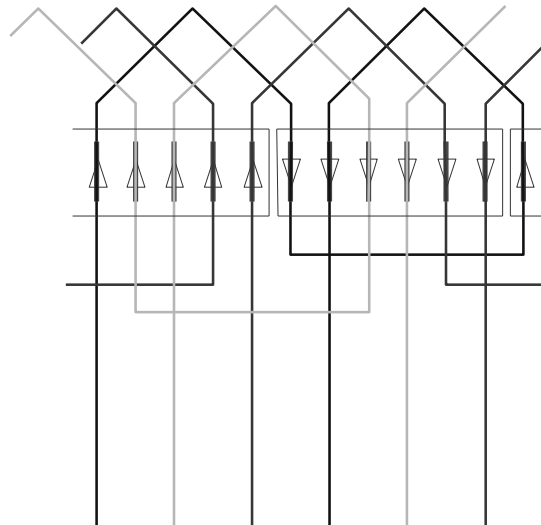


Figura 3.3: Esquema de Bobinado Excéntrico

3.4 Pérdidas en un Accionamiento Eléctrico

Un accionamiento eléctrico está formado por un convertidor de potencia y un motor de inducción. Es muy frecuente el uso de convertidores de potencia del tipo indirecto, compuestos por un rectificador (trifásico a partir de una determinada potencia) y un inversor trifásico. Para pequeñas potencias se utilizan MOSFETs, para potencias medianas (decenas de kW) se utilizan IGBTs y para potencias elevadas (a partir de 1 MW), se utilizan GTOs. La Figura 3.4 muestra un esquema general de un accionamiento eléctrico compuesto por un rectificador trifásico y un inversor basado en IGBTs con circuito intermedio de tensión.

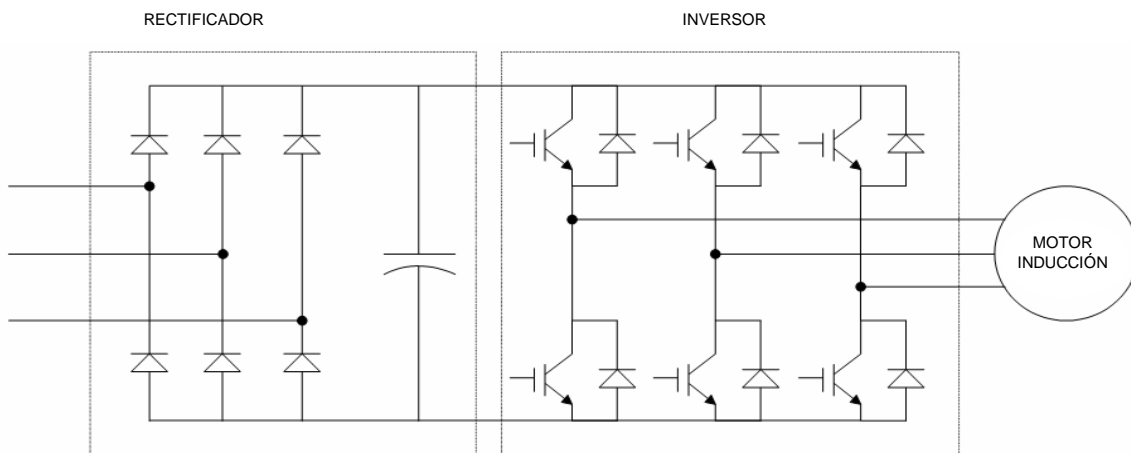


Figura 3.4: Esquema general de un accionamiento eléctrico.

El rendimiento de un accionamiento eléctrico para un motor de inducción depende en primer lugar del diseño del motor (incluyendo materiales constructivos) y en segundo lugar del tipo de control que se utilice.

Para analizar las pérdidas en el conjunto convertidor-motor, podemos agruparlas en:

- pérdidas en el motor de inducción
- pérdidas en el convertidor de potencia

3.5 Pérdidas en un Motor de Inducción

Las pérdidas en un motor de inducción se suelen dividir en dos grupos principales, pérdidas eléctricas y pérdidas mecánicas, dependiendo de su naturaleza electromagnética o mecánica. A su vez, la mayoría de autores separan las pérdidas en cinco componentes:

3.5.1 Pérdidas en el Cobre de Estator

Las pérdidas en el cobre de estator son pérdidas causadas por efecto Joule, debido a la circulación de corrientes por las resistencias de los arrollamientos del estator. Normalmente, estas pérdidas se calculan a partir de las corrientes de estator y del valor nominal de las resistencias de los devanados. Los diferentes métodos utilizados para calcular los valores de estas resistencias dependen de la norma¹⁹ adoptada (ej. Fitzgerald y colaboradores).

Según la norma ANSI Standard C50, las pérdidas en el cobre se calculan a partir de los valores de las resistencias en continua de los devanados a 75°C. El incremento de pérdidas debido a la diferencia entre las resistencias en continua y las resistencias efectivas se incluye en las denominadas pérdidas adicionales, discutidas posteriormente.

Estas pérdidas suponen aproximadamente un 35-40% de las pérdidas totales en el motor. Principalmente, las pérdidas en el cobre de estator dependen del par desarrollado por el motor, y de forma secundaria de la tensión de estator, de la frecuencia y de la temperatura.

¹⁹ Las normas comúnmente adoptadas son: American National Standards Institute (ANSI), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y National Electrical Manufacturers Association (NEMA).

3.5.2 Pérdidas en el Cobre del Rotor

Las pérdidas en el cobre²⁰ del rotor, al igual que las del estator, son debidas al efecto Joule. Son función del par, principalmente y de forma secundaria del deslizamiento y de la temperatura. Se estima que estas pérdidas suponen un 15-20% de las pérdidas totales del motor de inducción.

3.5.3 Pérdidas en el Hierro

En las máquinas eléctricas excitadas con corriente alterna se inducen flujos magnéticos alternos en los circuitos magnéticos. Estos flujos dan origen a disipación de energía en forma de calor, principalmente debido a las corrientes de Foucault y al fenómeno de histéresis magnética que aparece en el circuito magnético. Esta energía, disipada por corrientes de Foucault y por histéresis, es genéricamente conocida en la literatura como pérdidas en el hierro.

Se calcula que estas pérdidas representan un 15-20% aproximadamente de las pérdidas totales. Principalmente, las pérdidas en el hierro son función de la tensión de estator y de la frecuencia de alimentación. Para grandes potencias, las pérdidas en el hierro aumentan.

Findlay y colaboradores²¹ presentan modelos experimentales para las pérdidas en el hierro. Amin y colaboradores²² proponen un método, para evaluar las pérdidas en el hierro, útil para la mayoría de máquinas eléctricas alimentadas con formas de onda periódicas, simétricas un cuarto de onda. Levi y colaboradores proponen métodos de medida y modelos concretos para las pérdidas en el hierro^{23,24}.

²⁰ A pesar del nombre utilizado en esta tesis para denominar estas pérdidas, debe tenerse en cuenta que el rotor de los motores de inducción tipo jaula de ardilla suele estar construido de materiales diferentes al cobre, como por ejemplo aluminio.

²¹ R.D. Findlay, N. Stranges, D.K. MacKay, "Losses due to Rotational Flux in Three Phase Induction Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, no. 3, pp. 543-548, Septiembre 1994

²² Amin, "Contribution to Iron-Loss Evaluation in Electrical Machines", European Transactions on Electrical Power Engineering, vol. 5, no. 5, pp. 325-32, Septiembre 1995.

²³ E. Levi, M. Sokola, A. Boglietti, M. Pastorelli, "Iron Losses Identification and Detuning Evaluation in Rotor Flux Oriented Induction Machines", IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'96, pp. 1555-1561, Baveno, Italia, 24-27 Junio 1996.

Las pérdidas en el cobre y en el hierro suponen un 80% de las pérdidas totales.

3.5.4 Pérdidas Adicionales

Comúnmente conocidas en la literatura por su término anglosajón “stray losses”²⁵, este grupo engloba las pérdidas causadas por la saturación del hierro, los armónicos espaciales, los flujos de dispersión por razones geométricas (ranuras, entrehierro, etc.), y las corrientes adicionales que circulan por el rotor debido a imperfecciones constructivas en el aislamiento de las barras de aluminio.

Los efectos de estas pérdidas son, entre otros, calentamiento del motor, disminución de par, retrasos en los transitorios de aceleración y frenado, y reducción del rendimiento y de la potencia mecánica máxima disponible.

La estimación numérica de estas pérdidas es extremadamente compleja. Jimoh y colaboradores²⁶ proponen una serie de métodos para calcular y reducir las pérdidas adicionales. Ho y colaboradores²⁷ proponen un método de estimación de las pérdidas armónicas adicionales basado en elementos finitos y análisis de series de Fourier. La aportación más reciente es la de Bousbaine y colaboradores²⁸.

Las pérdidas descritas hasta ahora se suelen denominar pérdidas electromagnéticas, ya que son debidas a los fenómenos eléctricos y magnéticos inducidos en el motor.

²⁴ E. Levi, “Impact of Iron Losses on Behaviour of Vector Controlled Induction Machines”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 6, pp. 1287-1296, Noviembre/Diciembre 1995.

²⁵ El nombre original es “stray load losses”, “load losses” o “unknown losses”, aunque hoy en día la mayoría de autores emplean el término “stray losses”, que de forma genérica se puede traducir por pérdidas adicionales.

²⁶ A.A. Jimoh, R.D. Findlay, M. Poloujadoff, “Stray Losses in Induction Machines: Part II, Calculation and Reduction”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 104, no. 6, pp. 1506-1512, Junio 1985.

²⁷ S.L. Ho, W.N. Fu, “Computation of Harmonic Stray Losses of Induction Motors using Adaptive Time Stepping Element Method together with Externally Coupled Circuits”, 7th IEE International Conference on Electrical Machines and Drives, pp. 93-97, Londres, Inglaterra, Septiembre 1995.

²⁸ Bousbaine, W.F. Low, M. McCormick, “Novel Approach to the Measurement of Iron and Stray Losses in Induction Motors”, IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 143, no. 1, pp. 78-86, Enero 1996.

3.5.5 Pérdidas Mecánicas

Las pérdidas mecánicas son debidas fundamentalmente a los rozamientos mecánicos, acoplamientos entre ejes y a la ventilación del motor. Entre un 5 y un 10% de las pérdidas totales son pérdidas mecánicas. Básicamente, estas pérdidas son función de la velocidad mecánica del rotor. Cabe destacar que, a diferencia de las demás, las pérdidas mecánicas no pueden ser reducidas mediante ninguna técnica de control.

En la Tabla 3.2 se muestran datos sobre la distribución de pérdidas en motores de inducción convencionales.

Tabla 3.2: Distribución de pérdidas en motores de inducción convencionales, según la publicación No. MG10-1983 de National Manufacture Association (NEMA), EE.UU. ²⁹.

Pérdidas	%	% Considerado
Cobre estátor	35-40%	37.5%
Cobre rotor	15-20%	17.5%
Hierro	15-20%	17.5%
Mecánicas	5-10%	7.5%
Adicionales	10-15%	20.0%
		100.0%

Finalmente, se debe notar que las pérdidas en un motor de inducción alimentado por un inversor son prácticamente independientes de la frecuencia de conmutación del inversor. Boglietti y colaboradores³⁰, recientemente han estudiado la influencia de las características del inversor en las pérdidas en el hierro de motores de inducción alimentados por convertidores PWM.

Existen algunos trabajos relativos a la optimización del diseño de motores de inducción trifásicos, sin embargo, no están en el alcance de esta tesis.

²⁹ G.O. Garcia, "Controladores Eficientes para el Accionamiento de Motores de Inducción", Tesis doctoral, Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil, Marzo 1994.

³⁰ Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, M. Pastorelli, "Influence of the Inverter Characteristics on the Iron Losses in PWM Inverter-Fed Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 5, pp. 1190-1194, Septiembre /Octubre 1996.

3.6 Pérdidas en el Convertidor de Potencia

En este apartado se estudian las pérdidas en un convertidor de potencia compuesto por un rectificador trifásico no controlado y un inversor de IGBTs con circuito intermedio de tensión.

En un convertidor de potencia podemos clasificar las pérdidas en dos grandes grupos: pérdidas en los semiconductores y pérdidas en los circuitos adicionales. A partir de ahora consideramos el caso particular de un convertidor formado por un rectificador no controlado y un inversor trifásico basado en IGBTs.

3.6.1 Pérdidas en el Rectificador

Para pequeñas potencias es usual el empleo de rectificadores monofásicos. A partir de una determinada potencia, es más frecuente la utilización de rectificadores trifásicos no controlados.

Las pérdidas en un rectificador no controlado, como es obvio, son debidas a las pérdidas en los diodos. Para un diodo rectificador, las pérdidas de conmutación se pueden despreciar³¹ y solamente se consideran las pérdidas en conducción.

La potencia instantánea disipada por un diodo rectificador³² viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{Dinst} = V_{(FO)} i_F + r_T i_F^2 \quad (3.32)$$

Y la potencia media disipada en un diodo rectificador puede expresarse mediante:

$$P_{Dav} = V_{(FO)} i_{FAV} + r_T i_{FAV}^2 \quad (3.33)$$

³¹ G.C.D. Sousa, B.K. Bose, J. Cleland, "Loss Modeling of Converter Induction Machine System for Variable Speed Drive", Proceedings of the IECON'92, International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, vol. 1, pp. 114-120, 1992.

³² Autores varios, "Semiconductores de Potencia", SEMIKRON: Semikron International, Nuremberg, 1990.

La potencia instantánea disipada en un rectificador trifásico no controlado es dos veces la potencia instantánea disipada en un diodo, puesto que en cada instante solamente conducen dos diodos simultáneamente.

3.6.2 Pérdidas en el Inversor

En este apartado, se consideran las pérdidas de un inversor con IGBTs, ya que actualmente éstos son los semiconductores más utilizados para potencias medianas. Peak y colaboradores³³ proponen una serie de fórmulas semiempíricas para estimar las pérdidas que se producen en un inversor basado en transistores. Una aportación más reciente es la de Dahono y colaboradores³⁴, donde analizan las pérdidas en conducción de inversores trifásicos. Finalmente, Casanellas³⁵ propone una serie de fórmulas aproximadas para estimar las pérdidas en un inversor con IGBTs suponiendo corrientes senoidales.

Pérdidas en Conducción

Los interruptores de un inversor basado en IGBTs están compuestos por un IGBT con un diodo rápido en antiparalelo para permitir la circulación de corriente en caso de cargas inductivas.

Si consideramos modulación senoidal, a continuación se resumen las expresiones que determinan las pérdidas en un IGBT. Para un IGBT, la potencia disipada en conducción viene dada por la siguiente expresión:

$$P_i = \left(\frac{1}{8} + \frac{M}{3\pi} \cos \theta \right) \frac{V_{CEN} - V_{CO}}{I_{CN}} I_{CM}^2 + \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{M}{8} \cos \theta \right) V_{CO} I_{CM} \quad (3.34)$$

Para el diodo en antiparalelo:

³³ S.C. Peak, J.L. Oldenkamp, "A Study of System Losses in a Transistorized Inverter- Induction Motor Drive System", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 21, no. 1, pp. 248-258, Enero/Febrero 1985.

³⁴ P.A. Dahono, Y. Sato, T. Kataoka, "Analysis of Conduction Losses in Inverters", IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 142, no. 4, pp. 225-232, Julio 1995.

³⁵ F. Casanellas, "Losses in PWM Inverters using IGBTs", IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 141, no. 5, pp. 235-239, Septiembre 1995.

$$P_d = \left(\frac{1}{8} - \frac{M}{3\pi}\right) \frac{V_{CN} - V_{FO}}{I_{CN}} I_{CM}^2 + \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{M}{8} \cos\theta\right) V_{FO} I_{CM} \quad (3.35)$$

Las pérdidas totales en conducción para un inversor trifásico son:

$$P_{totales} = 6(P_i + P_D) \quad (3.36)$$

Pérdidas de Conmutación

Las pérdidas de conmutación pueden clasificarse como:

- Pérdidas de puesta en conducción

$$P_{on} = \frac{1}{8} V_{cc} t_{rn} \frac{I_{CM}^2}{I_{CN}} F_s \quad (3.37)$$

- Pérdidas de bloqueo

$$P_{off} = V_{cc} I_{CM} t_{fn} F_s \left(\frac{1}{3\pi} + \frac{1}{24} \frac{I_{CM}}{I_{CN}} \right) \quad (3.38)$$

- Pérdidas de recuperación inversa

Son debidas a la recuperación inversa de los diodos

$$P_{rr} = F_s V_{cc} \left[\left(0.28 + \frac{0.38}{\pi} \frac{I_{CM}}{I_{CN}} + 0.015 \left(\frac{I_{CM}}{I_{CN}} \right)^2 \right) Q_{rr} + \left(\frac{0.8}{\pi} + 0.05 \frac{I_{CM}}{I_{CN}} \right) I_{CN} t_{rrn} \right] \quad (3.39)$$

3.6.3 Pérdidas Adicionales

Pérdidas en Circuitos “Snubbers”

Peak y colaboradores³⁶ proponen unas fórmulas aproximadas para calcular las pérdidas en los circuitos adicionales de un inversor. Debe tenerse en cuenta que los datos son del año 1983.

³⁶ S.C. Peak, J.L. Oldenkamp, “A Study of System Losses in a Transistorized Inverter- Induction Motor Drive System”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 21, no. 1, pp. 248-258, Enero/Febrero 1985.

$$P_{snubber} = (1.5 \times 10^{-6}) V_{cc} I_{ac} f_{avg} \quad (3.40)$$

donde V_{cc} es la tensión del circuito intermedio de continua, I_{ac} es la componente fundamental (en valor eficaz) de la corriente del motor, y f_{avg} es la frecuencia del PWM.

Pérdidas en el Condensador del Circuito Intermedio de Continua

Considerando la resistencia equivalente serie y los armónicos que genera el inversor.

$$P_{conCC} = 0.0349 T^2 \quad (3.41)$$

siendo T el par desarrollado por el motor en *lbf xft*.

Pérdidas en Circuitos Adicionales

Estas pérdidas engloban las pérdidas de los circuitos de control, los “drivers” y las pérdidas en los conductores.

$$P_{adic} = 226.3 + 6.9 \times 10^{-4} (I_{ac}^2) \quad (3.42)$$

Kolar y colaboradores³⁷ analizan la influencia de distintos métodos de modulación PWM sobre las pérdidas en conducción y en conmutación de un inversor trifásico. Legowsky y colaboradores³⁸ proponen una estrategia de control PWM para inversores de tensión con mínimas pérdidas.

³⁷ J.W. Kolar, H. Ertl, F. C. Zach, “Influence of the Modulation Method on the Conduction and Switching Losses of a PWM Converter System”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 6, pp. 1063-1075, Noviembre/Diciembre 1991.

³⁸ A.M. Trynadowski, S. Legowski, “Minimun-Loss Vector PWM Strategy for Three-Phase Inverters”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, no. 1, pp. 26-34, Enero 1994.

3.7 Modelos de Pérdidas del Motor de Inducción

Buck y colaboradores³⁹ proponen un modelo semiempírico de pérdidas para un motor de inducción considerando la distorsión armónica provocada por la alimentación de la máquina mediante un convertidor estático de potencia. El modelo desarrollado contempla armónicos con frecuencias comprendidas entre 100 Hz y 20 kHz y potencias de 1 hasta 1000 kW. El modelo es verificado y corregido mediante datos experimentales.

Findlay y colaboradores⁴⁰ estudian las pérdidas asociadas a la presencia de flujos rotacionales en las laminaciones de una máquina de inducción trifásica y proponen modelos de pérdidas utilizando elementos finitos.

Mendes y colaboradores⁴¹ proponen un modelo de la máquina incluyendo las pérdidas en el hierro así como el efecto pelicular y el fenómeno de la saturación magnética. Este modelo es verificado mediante resultados experimentales y posteriormente utilizado en control vectorial directo.

Boys y colaboradores⁴² proponen un modelo térmico empírico para una máquina de inducción tipo jaula de ardilla alimentada con un inversor PWM. A partir del modelo, obtienen estimadores para la temperatura de los conductores del rotor y del estator, así como métodos de compensación de las respectivas resistencias.

García, en su tesis doctoral⁴³, propone una serie de modelos teóricos de pérdidas del motor de inducción enfocados a la obtención de un algoritmo de optimización del rendimiento utilizando control vectorial.

³⁹ F.G. de Buck, P. Gistelink, D. Backer, "A Simple but Reliable Loss Model for Inverter-Supplied Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 20, no. 1, pp. 190-202, Enero/Febrero 1984.

⁴⁰ R.D. Findlay, N. Stranges, D.K. MacKay, "Losses due to Rotational Flux in Three Phase Induction Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, no. 3, pp. 543-548, Septiembre 1994.

⁴¹ E. Mendes, A. Razek, "A Simple Model for Core Losses and Magnetic Saturation in Induction Machines adapted for Direct Stator Flux Orientation Control", IEE International Conference on Power Electronics and Variable-Speed drives, pp. 192-197, Octubre 1994.

⁴² J.T. Boys, M.J. Miles, "Empirical Thermal Model for Inverter-Driven Cage Induction Machines", IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 141, no. 6, pp. 360-372, Noviembre 1994.

⁴³ G.O. Garcia, "Controladores Eficientes para o Accionamiento de Motores de Indução", Tesis doctoral, Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil, Marzo 1994.

Los modelos no tienen en cuenta las pérdidas en el convertidor de potencia ni las pérdidas adicionales debidas al efecto pelicular. Las pérdidas en el hierro junto con las pérdidas debidas a la saturación magnética si son consideradas.

La complejidad de los modelos obtenidos impiden su utilización en controladores con optimización de energía. Varias simplificaciones son consideradas, obteniéndose finalmente un modelo simple de pérdidas del motor de inducción. A partir de este modelo, se propone un algoritmo de optimización del rendimiento sin considerar la saturación magnética ni la variación de parámetros por efecto de la temperatura.

3.8 Modelo de Pérdidas del Sistema Convertidor - Motor.

La aportación más reciente es la de Sousa y colaboradores⁴⁴, donde proponen un modelo completo de pérdidas para el sistema motor-convertidor de potencia enfocado al diseño y simulación de algoritmos de optimización del rendimiento para este tipo de accionamientos.

El modelo está pensado tanto para régimen permanente como para régimen dinámico y ha sido utilizado posteriormente en optimización de energía mediante lógica difusa. A continuación se hace un breve descripción de este modelo dada su importancia a nivel de simulación.

3.8.1 Modelo de Pérdidas del Motor de Inducción

Pérdidas en el Cobre

Para evaluar las pérdidas en el cobre de una forma precisa es necesario considerar la temperatura y el efecto pelicular en las resistencias de los devanados. El efecto pelicular en los arrollamientos del estator puede ser despreciado para

⁴⁴ G.C.D. Sousa, B.K. Bose, J. Cleland, "Loss Modeling of Converter Induction Machine System for Variable Speed Drive", Proceedings of the IECON'92, International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, vol. 1, pp. 114-120, 1992.

motores de baja potencia, aunque es muy dominante en las barras del rotor de las máquinas tipo jaula de ardilla.

En los motores alimentados por un inversor, el efecto pelicular debido a la frecuencia fundamental de deslizamiento puede ser despreciado, aunque para las frecuencias armónicas el rotor parece estacionario, y por lo tanto, prácticamente todas las corrientes armónicas del estator circulan por el rotor creando un efecto pelicular dominante. La resistencia del rotor a la frecuencia armónica f_n puede expresarse como:

$$R_m = R_{rdc} (1 + c_1 d f_n^{0.5}) \quad (3.43)$$

donde R_{rdc} es la resistencia del rotor en continua, d es la profundidad de las barras y c_1 es una constante que tiene en cuenta el material y la forma de las barras.

Para las frecuencias armónicas, el principio de superposición puede ser aplicado de forma aproximada, asumiendo que los parámetros de la máquina son idénticos para todas las frecuencias armónicas y calculados a la frecuencia de la portadora.

Pérdidas en el Hierro

El cálculo preciso de las pérdidas del hierro asociadas con flujos armónicos de alta frecuencia es muy complejo. Por tanto, en una primera aproximación, se asume que las pérdidas en el hierro debidas a flujos armónicos siguen una ley semejante a las pérdidas debidas a la componente fundamental del flujo del entrehierro. Las pérdidas en el hierro del estator P_{cs} debidas al flujo φ del entrehierro a la frecuencia fundamental f pueden expresarse como:

$$P_{cs} = k_h f \phi^2 + k_e f^2 \phi^2 \quad (3.44)$$

donde k_h y k_e son los coeficientes de histéresis y de las corrientes de Foucault, respectivamente.

Las pérdidas en el hierro para el rotor vienen dadas por:

$$P_{cr} = k_h s f \phi^2 + k_e (s f)^2 \phi^2 \quad (3.45)$$

puesto f que se sustituye por $s f$ (donde s es el deslizamiento).

Agrupando las pérdidas de estator y rotor, y poniendo el flujo del entrehierro en función de la tensión de entrehierro V_m con:

$$\phi = \sqrt{k_c} \frac{V_m}{f} \quad (3.46)$$

la expresión final de las pérdidas en el hierro es:

$$P_c = k_c \left[k_h \frac{(1+s)}{f} + k_e (1+s^2) \right] V_m^2 \quad (3.47)$$

Estas pérdidas pueden representarse por una resistencia equivalente R_m :

$$R_m = \frac{1}{k_c \left[k_h \frac{(1+s)}{f} + k_e (1+s^2) \right]} \quad (3.48)$$

Si se asume que los coeficientes k_h y k_e permanecen constantes a las frecuencias armónicas y puesto que el deslizamiento armónico es aproximadamente la unidad, la resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro a la frecuencia f_n puede deducirse como:

$$R_{mn} = \frac{0.5}{k_c \left[\frac{k_h}{f_n} + k_e \right]} \quad (3.49)$$

Pérdidas Adicionales

Como se ha indicado anteriormente, las pérdidas adicionales representan un grupo de pérdidas debidas a distintos efectos (pelicular, armónicos, etc.). Dada la complejidad de evaluar individualmente este tipo de pérdidas, la mayoría de autores modelan éstas como un conjunto.

La idea fundamental es que las pérdidas adicionales son debidas a las corrientes de Foucault y a la histéresis inducida por los distintos tipos de flujos de dispersión. En consecuencia, Sousa y colaboradores⁴⁵ proponen modelar estas pérdidas de forma semejante a las del hierro.

Las pérdidas adicionales por fase del estator a la frecuencia fundamental se pueden modelar como:

$$P_{s1n} = k_{s1n} \left[\frac{k_h}{f_n} + k_e \right] V_{s1n}^2 \quad (3.50)$$

donde V_{s1n} es la tensión en bornes de la inductancia de dispersión del estator y k_{s1n} es una constante. Estas pérdidas se pueden representar por una resistencia equivalente en paralelo con la inductancia de dispersión como:

$$R_{s1n} = \frac{1}{k_{s1n} \left[\frac{k_h}{f_n} + k_e \right]} \quad (3.51)$$

De forma similar se pueden modelar las pérdidas adicionales armónicas en el rotor.

Las pérdidas adicionales debidas a la componente fundamental de la corriente se concentran principalmente en el rotor y se pueden modelar con la ecuación anterior. Si se ponen en función de la corriente fundamental de estator, las pérdidas adicionales por fase debidas a la corriente fundamental pueden escribirse como:

$$P_{s11} = k_{s11} \left[k_h f + k_e f^2 \right] I_{s1}^2 = R_{s11} I_{s1}^2 \quad (3.52)$$

donde R_{s11} es la resistencia serie equivalente, e I_{s1} es la componente fundamental de la corriente de estator.

⁴⁵ G.C.D. Sousa, B.K. Bose, J. Cleland, "Loss Modeling of Converter Induction Machine System for Variable Speed Drive", Proceedings of the IECON'92, International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, vol. 1, pp. 114-120, 1992.

Pérdidas Mecánicas

Las pérdidas debidas a rozamientos y ventilación son una función de la velocidad del motor, y no dependen del tipo de fuente de alimentación. Se pueden modelar como:

$$P_{f\omega} = k_{f\omega} \omega_r^3 \quad (3.53)$$

puesto que las cargas tipo ventilador tienen una dependencia cuadrática del par respecto a la velocidad.

3.8.2 Efectos de la Temperatura

Son bien conocidos los efectos de la variación de temperatura sobre las resistencias de rotor y estator^{46,47}.

A pesar de poder medir la temperatura del estator de forma relativamente sencilla, estimar o medir la temperatura del rotor es un proceso muy complejo. Muchos autores han intentado modelar la dinámica térmica de todas las partes de una máquina de inducción, y sin embargo, los modelos suelen ser experimentales y extremadamente complejos para utilizarlos en simulación.

En una primera aproximación, se puede modelar la respuesta térmica transitoria de la máquina con una función de transferencia de primer orden, donde el incremento de temperatura es:

$$\Delta T = \frac{P_{tl}}{\theta(1 + \tau s)} \quad (3.54)$$

donde P_{tl} son las pérdidas totales del motor, θ es la resistencia térmica en régimen permanente y τ es la constante de tiempo térmica. Estos parámetros pueden ser estimados mediante ensayos experimentales.

⁴⁶ Fitzgerald, C. Kingsley, S.D. Umans, "Electric Machinery", Mc Graw-Hill, EE.UU., 1990.

⁴⁷ J.T. Boys, M.J. Miles, "Empirical Thermal Model for Inverter-Driven Cage Induction Machines", IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 141, no. 6, pp. 360-372, Noviembre 1994.

Tanto las resistencias de estator como de rotor pueden corregirse por efecto de la temperatura como:

$$R_{T_2} = R_{T_1} (1 + \alpha (T_2 - T_1)) \quad (3.55)$$

donde α es un coeficiente corrector de temperatura, y $\Delta T = T_2 - T_1$. Las resistencias corregidas con la temperatura se utilizan para calcular las pérdidas en el cobre producidas por la corriente fundamental y por los armónicos. Para las pérdidas armónicas del rotor, el efecto pelicular se superpone al efecto de la temperatura.

3.8.3 Efectos de la Saturación

Si se desprecia la saturación en las inductancias de dispersión, la saturación en la inductancia magnetizante L_m puede representarse como una función definida a trozos de la corriente magnetizante I_m :

$$\begin{aligned} L_m &= L_{mo} & , & & \text{si } I_m < I_{mo} \\ L_m &= L_{mo} - m(I_m - I_{mo}) & , & & \text{si } I_m > I_{mo} \end{aligned} \quad (3.56)$$

donde L_{mo} es la inductancia no saturada e I_{mo} es la corriente magnetizante cuando comienza el fenómeno de la saturación. El coeficiente de saturación m se selecciona considerando la curva de saturación de la máquina⁴⁸.

3.8.4 Circuito armónico Equivalente por Fase

Tradicionalmente, el efecto de los armónicos temporales ha sido estudiado mediante un circuito equivalente por fase como el que se muestra en la Figura 3.5, donde las pérdidas adicionales armónicas están representadas por resistencias

⁴⁸ M. Cipolla Ficarra, "Compensación de las Variaciones de los Parámetros por Efectos Térmicos y no Lineales en el Control Electrónico de Máquinas Asíncronas empleando Algoritmos Vectoriales", Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Cataluña, 19 Noviembre 1996.

“shunt” (R_{ssn} y R_{rsn}). El principio de superposición puede ser utilizado para obtener el efecto de todos los armónicos. De esta forma, se puede tener en cuenta la dependencia frecuencial de los parámetros de la máquina. Sin embargo, se pueden hacer una serie de hipótesis para simplificar el problema.

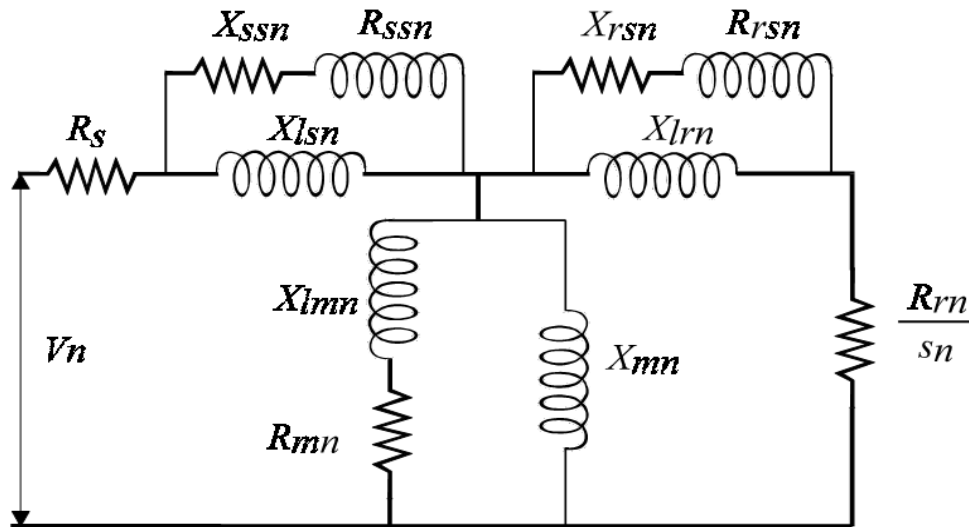


Figura 3.5: Circuito equivalente armónico por fase del motor de inducción: Circuito genérico para el armónico de orden n .

Para inversores PWM senoidales o de banda de histéresis controlados por corriente, únicamente la frecuencia de la portadora se tiene en cuenta sobre los parámetros, y el circuito resultante puede utilizarse para calcular el efecto de los armónicos con suficiente precisión.

Las frecuencias armónicas son suficientemente grandes como para que el deslizamiento armónico s_n sea la unidad.

Con estas consideraciones, el circuito de la Figura 3.5, puede convertirse en su forma equivalente serie Figura 3.6. Los parámetros con una barra indican los equivalentes serie de los parámetros originales. La única diferencia de este nuevo circuito es la separación de las componentes fundamentales con las componentes armónicas.

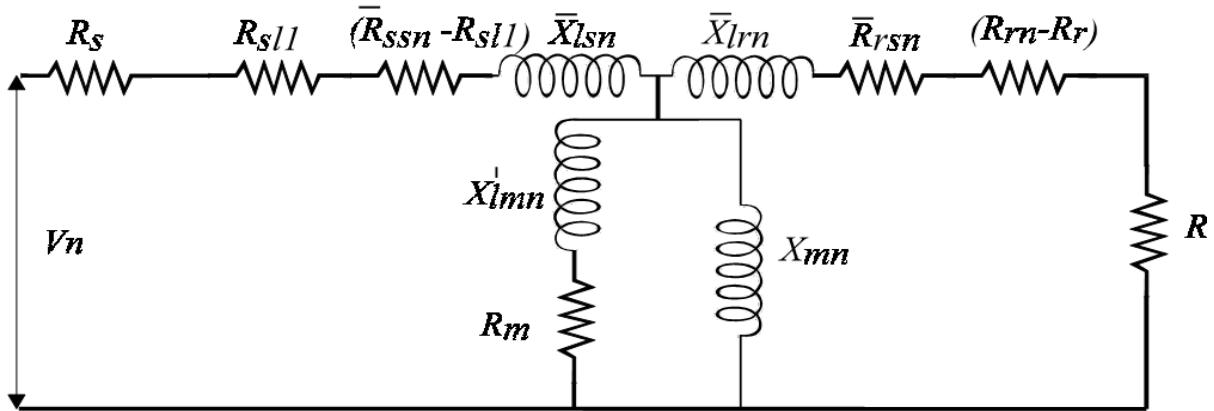


Figura 3.6: Circuito equivalente armónico por fase del motor de inducción: Forma equivalente serie del circuito.

Finalmente, el circuito de la Figura 3.7 representa el equivalente “shunt” del circuito de la Figura 3.5.

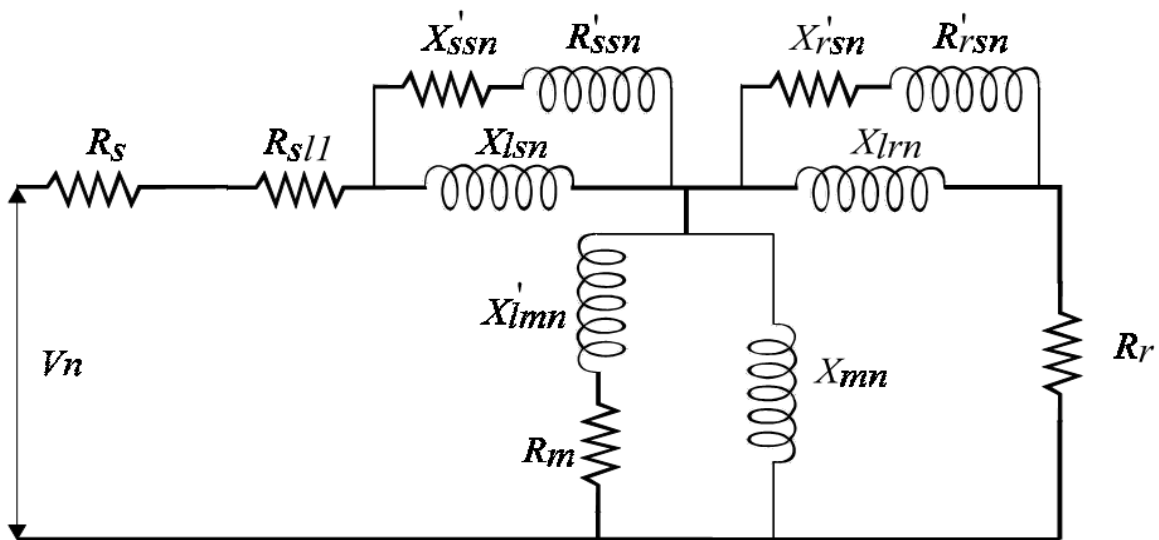


Figura 3.7: Circuito equivalente armónico por fase del motor de inducción: Circuito equivalente “shunt” del circuito.

3.8.5 Circuito Equivalente en una Referencia Síncrona

El circuito equivalente obtenido anteriormente Figura 3.7 es sólo válido para régimen permanente. Para representar el comportamiento dinámico se suelen utilizar circuitos equivalentes $d^e - q^e$ en referencia síncrona

En los circuitos equivalentes en referencia estacionaria $d^s - q^s$ es sencillo incorporar la resistencia de pérdidas en el hierro en paralelo con la inductancia magnetizante. De este modo las ecuaciones que modelan el comportamiento del motor son:

$$R_s \begin{pmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{pmatrix} + L_{ls} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{pmatrix} + R_m \begin{pmatrix} i_{qrm}^s \\ i_{drm}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \end{pmatrix} \quad (3.57)$$

$$-L_m \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qm}^s \\ i_{dm}^s \end{pmatrix} + R_m \begin{pmatrix} i_{qrm}^s \\ i_{drm}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.58)$$

$$-\omega_r \begin{pmatrix} \lambda_{dr}^s \\ \lambda_{qr}^s \end{pmatrix} + R_r \begin{pmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{pmatrix} + L_{lr} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qr}^s \\ i_{dr}^s \end{pmatrix} + L_m \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qm}^s \\ i_{dm}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{qr}^s \\ v_{dr}^s \end{pmatrix} \quad (3.59)$$

Y transformando estas ecuaciones podemos obtener el modelo para la referencia síncrona:

$$R_s \begin{pmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \end{pmatrix} + \omega_e \begin{pmatrix} \lambda_{dls}^e \\ -\lambda_{qls}^e \end{pmatrix} + L_{ls} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \end{pmatrix} + R_m \begin{pmatrix} i_{qrm}^e \\ i_{drm}^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{qs}^e \\ v_{ds}^e \end{pmatrix} \quad (3.60)$$

$$\omega_e \begin{pmatrix} \lambda_{dm}^e \\ \lambda_{qm}^e \end{pmatrix} + L_m \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qm}^e \\ i_{dm}^e \end{pmatrix} - R_m \begin{pmatrix} i_{qrm}^e \\ i_{drm}^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.61)$$

$$(\omega_e - \omega_r) \begin{pmatrix} \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{pmatrix} + R_r \begin{pmatrix} i_{qr}^e \\ i_{dr}^e \end{pmatrix} + L_{lr} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qr}^e \\ i_{dr}^e \end{pmatrix} + L_m \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qm}^e \\ i_{dm}^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{qr}^e \\ v_{dr}^e \end{pmatrix} \quad (3.62)$$

La siguiente figura muestra una representación mediante circuitos equivalentes en referencia síncrona del modelo del motor incluyendo las pérdidas en el hierro.

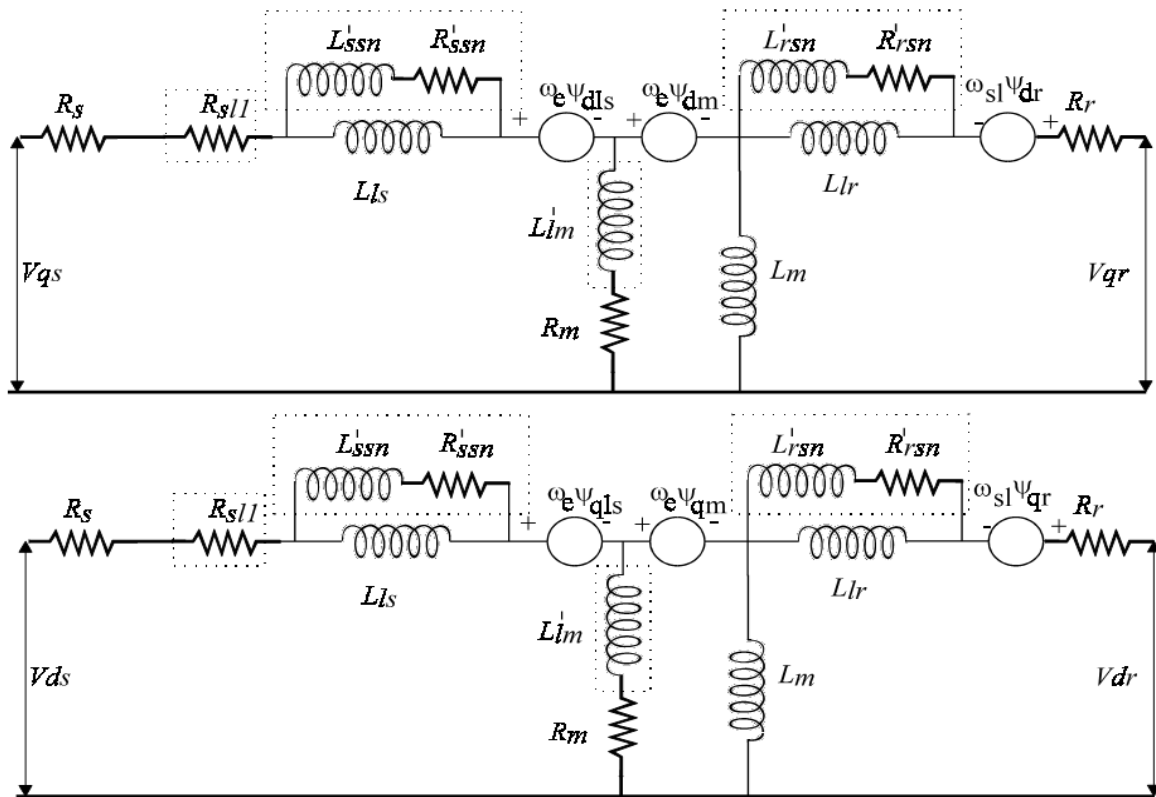


Figura 3.8: Circuitos equivalentes d-q de pérdidas en una referencia síncrona.

Para incluir las pérdidas armónicas, se puede superponer el circuito armónico equivalente anterior (Figura 3.7), siempre y cuando se considere $f_n \gg f$.

Uno de los inconvenientes del modelo obtenido es la necesidad de evaluar los parámetros para cada máquina en particular. Los parámetros a la frecuencia fundamental son fácilmente extraídos. Sin embargo, es muy difícil obtenerlos a las frecuencias armónicas con un ensayo estándar. Su obtención teórica también es extremadamente difícil. Una solución de compromiso es estimar los parámetros mediante consideraciones de tipo prácticas.

3.8.6 Modelo de pérdidas del convertidor de potencia

Para el modelado del convertidor, Sousa y colaboradores [14] proponen circuitos equivalentes de cada una de las partes del convertidor.

Modelo del Rectificador de Diodos

Despreciando las pérdidas de conmutación de los diodos rectificadores, la xxx muestra el esquema equivalente para el puente rectificador:

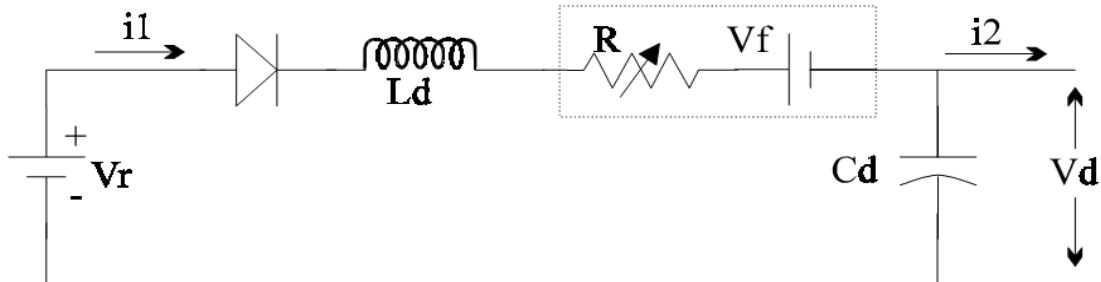


Figura 3.9: Circuito equivalente de un rectificador de diodos.

donde V_r es la tensión de un rectificador ideal, y L_d es dos veces la inductancia de dispersión por fase de la fuente de alimentación. Los dos diodos que conducen simultáneamente pueden ser modelados por una tensión de “offset” en serie con una resistencia no lineal. Para un determinado diodo es posible determinar estos dos valores ajustando los valores de corriente y tensión a su curva experimental, que suele ser del tipo:

$$v_{dd} = v_{do} + K i_d^m \quad (3.63)$$

donde v_{do} es la tensión de “offset” y m es el exponente de caída de tensión resistiva.

La potencia instantánea de conducción del puente rectificador puede expresarse como:

$$P_{ild} = 2v_{dd}i_1 \quad (3.64)$$

Modelo de Pérdidas del Inversor PWM

Para un inversor PWM, se deben considerar tanto las pérdidas en conducción como las de conmutación. Sousa y colaboradores proponen una serie de modelos de pérdidas para un inversor basado en transistores de potencia tipo Darlington.

- Pérdidas en conducción

Las pérdidas en conducción en un inversor se reparten entre los transistores y los diodos volantes (diodos en antiparalelo). La Figura 3.10 muestra el esquema equivalente de pérdidas de un interruptor compuesto por un transistor y un diodo.

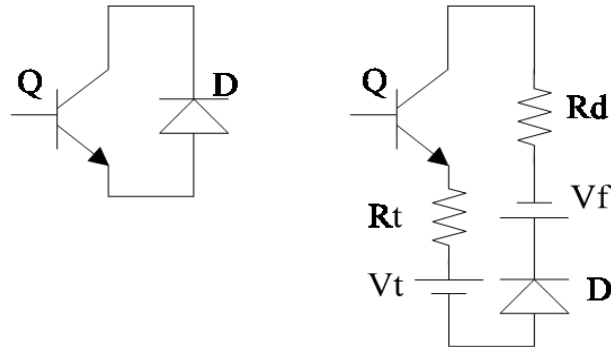


Figura 3.10: Interruptor del inversor y circuito equivalente de pérdidas.

Como en el apartado anterior, es posible ajustar la curva de saturación del transistor mediante una ecuación del tipo:

$$v_{td} = v_{to} + R_t i_c \quad (3.65)$$

Para los diodos volantes, se puede utilizar la ecuación (3.63) del apartado anterior

- Pérdidas en conmutación

La siguiente figura muestra las formas de onda de tensión y corriente durante la conmutación (puesta en conducción y bloqueo) de un transistor.

La potencia disipada en los circuitos “snubber” del inversor puede obtenerse como:

$$P_{snubber} = \left(\frac{3}{2}\right) N_s C_{snu} V_{CC}^2 f \quad (3.66)$$

donde N_s es el número de conmutaciones en una rama del inversor, por ciclo de la frecuencia fundamental f , V_{CC} es la tensión del circuito intermedio de tensión y C_{snu} es la capacidad del “snubber”. La resistencia equivalente en el circuito intermedio de CC que representa las pérdidas en los “snubbers” es:

$$R_{snu} = \frac{2}{3fN_s C_{snu}} \quad (3.67)$$

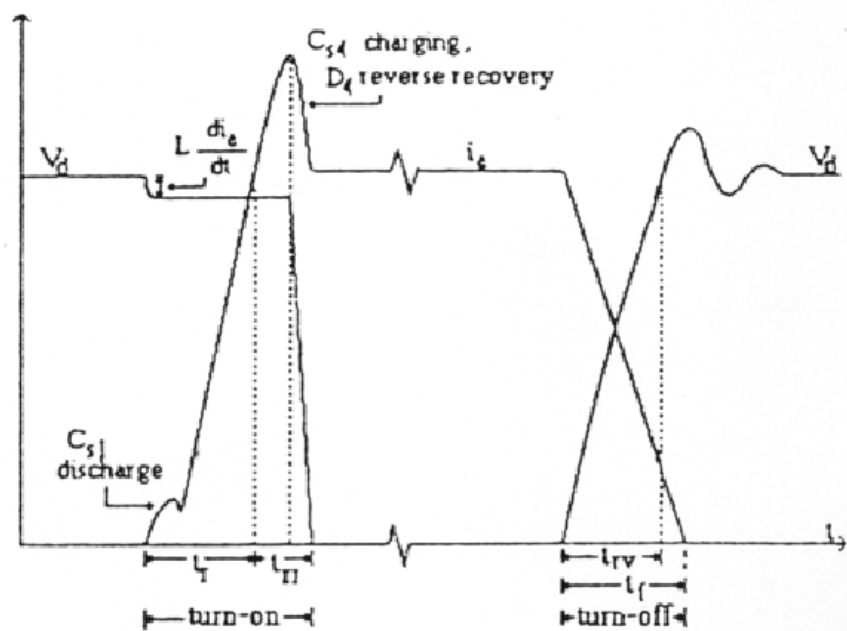


Figura 3.11: Formas de onda de conmutación para un transistor.

- Pérdidas de Bloqueo

Puede ser demostrado que para pérdidas óptimas (“snubber” + conmutación), el valor de C_{snu} del circuito “snubber” debe ser pequeño, de manera que el tiempo de subida t_{rv} de la tensión colector-emisor v_{ce} es mucho menor que el tiempo de bajada t_f de la corriente de colector i_c . Con ello, el tiempo de subida puede aproximarse por:

$$t_{rv} = \sqrt{\frac{2C_{snu}V_{CC}t_f}{I_{lav}}} \quad (3.68)$$

donde V_{CC} es la tensión de continua e I_{lav} es el valor medio (en medio ciclo) del valor absoluto de la corriente de carga. En consecuencia, las pérdidas por bloqueo de un transistor son:

$$P_{toff} = 3 \frac{t_f}{2} \left(1 - \frac{4 t_{rv}}{3 t_f} + \frac{1}{2} \left(\frac{t_{rv}}{t_f} \right)^2 \right) V_{CC} \left(\frac{N_s}{2} \right) I_{lav} f \quad (3.69)$$

donde $N_s/2$ es el número de bloqueos de los interruptores en una rama del inversor en un ciclo de la frecuencia fundamental. Las ecuaciones anteriores indican que cuanto mayor es el condensador, menores son las pérdidas por bloqueo.

- Pérdidas de Puesta en Conducción

En un inversor a base de transistores, los “snubbers” no tienen ninguna inductancia. Sin embargo, aparece una inductancia parásita debido al cableado entre el circuito intermedio de tensión y los transistores. Del mismo modo que en el caso anterior, podemos obtener las pérdidas de puesta en conducción como:

$$P_{ton} = 3 \frac{t_{fv}}{2} \left(1 - \frac{4 t_r}{3 t_{fv}} + \frac{1}{2} \left(\frac{t_r}{t_{fv}} \right)^2 \right) V_{CC} \left(\frac{N_s}{2} \right) I_{lav} f \quad (3.70)$$

donde t_r es el tiempo de subida de la corriente de colector i_c y $t_{fv} = t_r + t_{rr}$ es el tiempo de bajada de la tensión colector-emisor v_{ce} . Como en el caso anterior, el tiempo de subida es:

$$t_r = \sqrt{\frac{2 L t_{fv} I_{lav}}{V_{CC}}} \quad (3.71)$$

3.9 Control de Motores de Inducción

3.9.1 Antecedentes Históricos en el Control de Motores de Inducción

Las máquinas rotativas han ocupado siempre un lugar relevante en la industria⁴⁹. Actualmente, las máquinas de corriente alterna y continua realizan la

⁴⁹ J. Peracaula, J.M. Moreno Eguilaz, M. Cipolla, “Regulación de Máquinas Eléctricas”, Mundo Electrónico, 25 Aniversario, no. 271, pp. 69-77, 2 Noviembre 1996.

conversión de más de un 60% aproximadamente de la energía eléctrica producida en el planeta.

Las máquinas de corriente continua se han utilizado tradicionalmente en procesos donde se requieren muy buenas prestaciones debido fundamentalmente a su fácil controlabilidad.

Desde que Ward Leonard introdujo su accionamiento eléctrico de velocidad variable, la máquina de continua presentó un dominio total en el campo de los accionamientos eléctricos, cuando se deseaba obtener unas excelentes prestaciones de control para aquellas aplicaciones que requerían un amplio rango de control de velocidad y funcionamiento en los cuatro cuadrantes del plano par-velocidad. Los motores de continua eran alimentados por generadores de CC trabajando a velocidad constante.

Históricamente se ha evolucionado desde los grupos rotativos del tipo Ward Leonard a los sistemas de alimentación estáticos, primero con diodos de silicio no controlados y amplificadores magnéticos empleados como dispositivos de control y posteriormente, con diodos de silicio controlados (SCR, tiristores) y bucles de regulación analógicos.

Por supuesto, el conmutador mecánico (escobillas y delgas) fue siempre el punto débil del motor de continua, limitando la potencia y la velocidad, aumentando el volumen (importante en accionamientos de tracción), causando problemas de compatibilidad en algunos ambientes (atmósferas explosivas, por ejemplo) y requiriendo mantenimientos periódicos.

Actualmente los motores de continua se utilizan, con control digital por microprocesador, en aplicaciones que requieren gran precisión⁵⁰ y extraordinarias características de respuesta dinámica como trenes de laminación de gran potencia y

⁵⁰ Castellet, J.M. Moreno Eguilaz, "Diseño de un Control Deslizante de un Motor de CC para una Silla de Ruedas", I Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial, SAEI'94, pp. 275-278, Tarragona, España, 12-14 Septiembre 1994.

altas prestaciones, o máquinas de fabricación de papeles especiales a altas velocidades⁵¹.

La excitación independiente de la máquina de continua tiene un sencilla estructura de control basada en los ejes ortogonales, donde el flujo magnético y el par están desacoplados; de esta forma resulta fácil el diseño de controladores para accionamientos de altas prestaciones dinámicas, con debilitamiento de campo y limitación de par.

Durante las últimas décadas, la máquina de corriente alterna ha ido desplazando progresivamente a la de continua gracias a la aparición de la técnicas de “control de flujo” (control escalar y vectorial), que las hace comparables y en muchos casos prácticamente equivalentes, desde el punto de vista de las prestaciones dinámicas a las máquinas de corriente continua. Sumando a lo anterior su gran robustez, bajo coste de fabricación y casi nulo mantenimiento, ha hecho que la utilización industrial de la máquina de inducción se haya acabado imponiendo sobre la de continua^{52,53}.

Inicialmente con el control escalar se conseguía una buena regulación de velocidad donde no se requerían grandes prestaciones. Con el control vectorial, a diferencia del escalar, se consigue separar dinámicamente el par y el flujo de la máquina de alterna. Para conseguir esto, es necesario un exacto conocimiento del flujo del motor^{54,55}.

⁵¹ J. Peracaula, “Convertidores Alterna-Continua con Tiristores - Aplicaciones a los Accionamientos Industriales”, Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 1989.

⁵² W. Leonhard, “Control of Electrical Drives”, 2ª Edición, Springer Verlag ,Berlín, 1995.

⁵³ W. Leonhard, “30 Years Space Vectors, 20 Years Field Orientation, 10 Years Digital Signal Processing with Controlled AC Drives, a Review”, EPE Journal, vol. 1, no. 2, pp. 89-102, 1991.

⁵⁴ J.M.D. Murphy, F.G. Turnbull, “Power Electronic Control of AC Motors”, Pergamon Press, Oxford, 1988.

⁵⁵ W. Leonhard, “Controlled AC Drives, a Successful Transfer from Ideas to Industrial Practice”, CETTI'95, Curitiba, Brasil, pp. 1-12, Septiembre 1995.

3.9.2 Métodos Escalares

Las técnicas de control escalar están basadas en el modelo de la máquina en régimen permanente^{56,57} y son empleadas en aplicaciones donde no se requiere una buena respuesta dinámica ni un control preciso.

La técnica escalar más utilizada en la práctica es la denominada tensión/frecuencia (V/f). Esta estrategia de control se basa en mantener el flujo del motor a un valor determinado, haciendo que la relación amplitud/frecuencia de la tensión de alimentación sea constante. En la Figura 3.12 se muestra un esquema de un control de velocidad tensión-frecuencia (V/f).

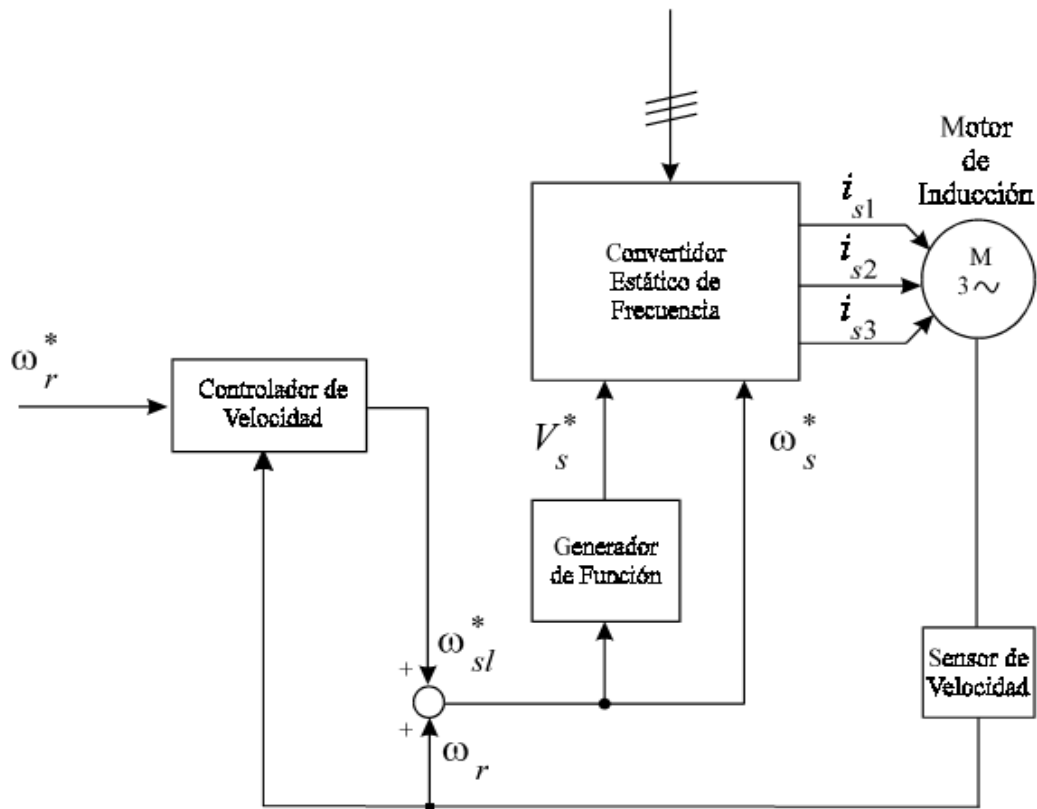


Figura 3.12: Esquema de un control escalar tipo tensión-frecuencia (V/f).

⁵⁶ J.M.D. Murphy, F.G. Turnbull, "Power Electronic Control of AC Motors", Pergamon Press, Oxford, 1988.

⁵⁷ B.K. Bose, "Scalar Decoupled Control of Induction Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 20, no. 1, pp. 216-225, Enero/Febrero 1984.

Para conseguir arranques suaves de motores de inducción mediante convertidores de frecuencia se suele utilizar el arranque en rampa de tensión y frecuencia. Se trata de mantener el deslizamiento a valores relativamente bajos durante todo el arranque de manera que se limite la amplitud de la corriente máxima por los devanados del estator, lo cual se consigue incrementando de forma continua tanto la amplitud como la frecuencia de la tensión de alimentación del estator de la máquina.

En los métodos de control escalares, el módulo de la tensión o intensidad de estator y su frecuencia son las variables de control. En un control con realimentación de tensión, tanto el par como el flujo del entrehierro son funciones directas de tensión y de la frecuencia. Este acoplamiento es el responsable de una mala respuesta del motor de inducción produciendo una degradación del comportamiento dinámico de la máquina.

La técnica denominada control de velocidad por deslizamiento controlado es una de las más conocidas. Básicamente, esta estrategia de control consiste en mantener el flujo de magnetización de la máquina constante (valor máximo admisible), mediante el control de la corriente de magnetización. De esta forma, se intenta conseguir una mayor sensibilidad del par en función de la corriente de estator en toda la zona de trabajo. En régimen permanente, se consigue un control de par preciso, si bien no es eficiente durante los transitorios^{58,59,60}. En la Figura 3.13 se representa el diagrama de bloques simplificado de un sencillo control de velocidad por deslizamiento controlado.

⁵⁸ J.M.D. Murphy, F.G. Turnbull, "Power Electronic Control of AC Motors", Pergamon Press, Oxford, 1988.

⁵⁹ B.K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, Nueva Jersey, 1986.

⁶⁰ G.O. García, R.M. Stephan, E.H. Watanabe, "Comparing the Indirect Field Oriented Control with a Scalar Method", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, no. 2, pp. 201-207, Abril 1994.

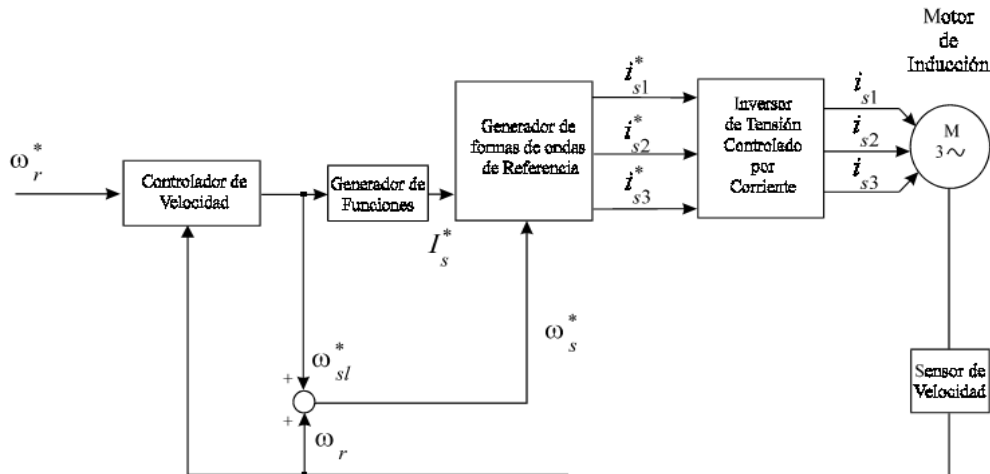


Figura 3.13: Esquema de un control de velocidad por deslizamiento controlado.

3.9.3 Métodos Vectoriales⁶¹

El principio del método de control vectorial fue desarrollado por K. Hasse y F. Blaschke en la Universidad de Darmstadt y Braunschweig y en los laboratorios de Siemens AG, en Alemania, a finales de los años 60^{62,63}. Estas técnicas pueden ser clasificadas en dos grandes grupos según el método usado para la determinación de la posición del vector del flujo rotórico: el método directo y el indirecto^{64,65}.

El control vectorial directo fue primeramente sugerido por Blaschke y para la determinación de la magnitud y de la posición del vector flujo rotórico se realiza un sensado directo del flujo a través de bobinas exploradoras o sondas especiales, como las sondas Hall, introducidas en el interior del motor, o también es posible conocer el flujo rotórico a través de una estimación a partir de las magnitudes

⁶¹ Existen diversas denominaciones para el control vectorial, control por orientación de campo, campo orientado, control desacoplado, si bien el término control vectorial suele englobar una serie de técnicas más avanzadas que las escalares.

⁶² K. Hasse, "Zur Dynamik Drehzahl geregelter Antriebe Mit Stromrichtergespeisten Asynchron Kurzschlussläufer Maschinen", 1969.

⁶³ F. Blaschke, "The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed-Loop Control System for Rotating Field Machines", Siemens Review, vol. 39, no. 5, pp. 217-220, Mayo 1972.

⁶⁴ W. Leonhard, "Control of Electrical Drives", 2ª Edición, Springer Verlag, Berlín, 1995.

⁶⁵ B.K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, Nueva Jersey, 1986.

accesibles en bornes del motor. Hasse propuso el método indirecto, el en cual no se mide directamente el flujo pero se requiere un sensor de posición del rotor de alta resolución, tal como un “encoder” o “resolver” para determinar la posición del flujo.

En 1980 en Dusseldorf, se realizó la primera demostración pública de un accionamiento de velocidad con orientación de campo, mediante el empleo de un microprocesador.

Para la implementación del control vectorial es necesario el empleo de microprocesadores debido a su complejidad, pero permite regular la máquina de inducción de manera semejante que la de corriente continua con excitación independiente, con las ventajas adicionales de una mayor robustez y un mantenimiento nulo.

El mayor coste económico del regulador de velocidad, empleando el control vectorial, debido al uso del microprocesador y del convertidor, quedan compensados a partir de una cierta potencia por la gran diferencia de precio que existe entre un motor de corriente continua y uno de alterna de la misma potencia.

En la figura siguiente se muestra el principio del control vectorial. En ella se supone que el comportamiento del convertidor y del inversor es ideal.

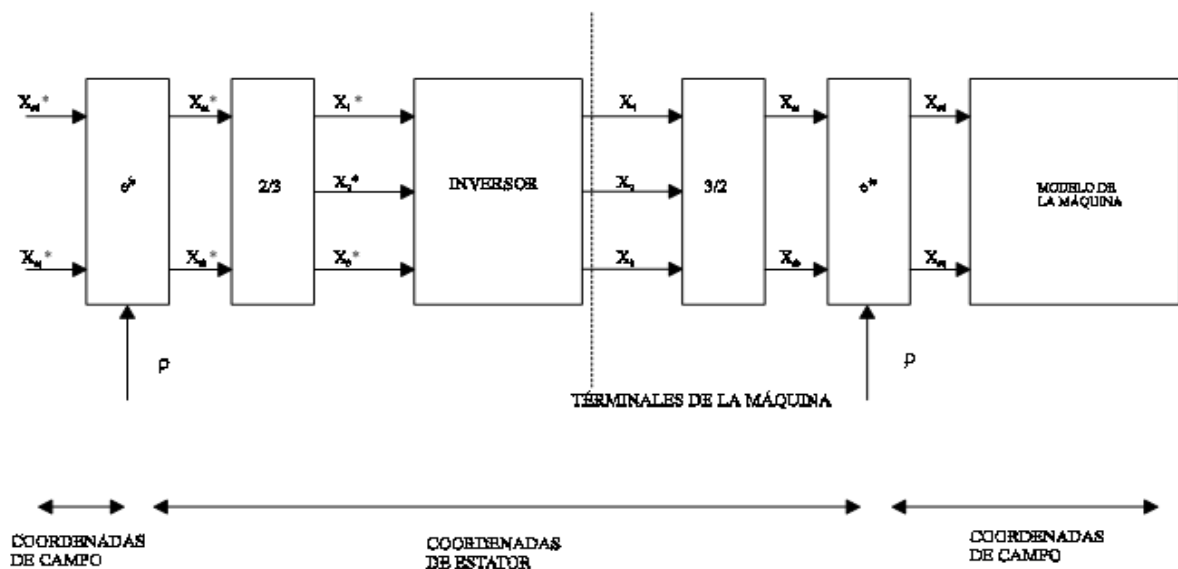


Figura 3.14: Principio de la regulación del control vectorial.

A partir de las señales de consigna, que suelen ser las señales de velocidad y flujo, se obtienen las señales en referencias de campo i_{ds}^* e i_{qs}^* , y de ellas, las correspondientes i_{ds}^e e i_{qs}^e en referencia estática. Finalmente se realiza la transformación de un sistema bifásico de estator a uno trifásico y se inyectan estas señales al inversor, que al ser supuesto ideal, estas señales trifásicas son aplicadas directamente al motor. Una transformación inversa “se produce” dentro del motor.

Para realizar estos cambios de sistemas de referencias es necesario conocer de forma exacta y en todo momento la posición del fasor del flujo rotórico. Existen dos grandes grupos para determinar esta posición: Método directo e indirecto^{66,67}.

En el método directo la posición del flujo rotórico puede ser obtenido por medición del flujo rotórico en el entrehierro de la máquina mediante la utilización de sensores de flujo, sondas de efecto Hall o bien bobinas exploradoras, colocadas en las ranuras del estator. Este método en la actualidad no se usa por que requiere realizar modificaciones en la máquina y las sondas se ven fuertemente afectadas por la temperatura y mecánicamente son frágiles. La otra solución que es la actualmente empleada para obtener la posición del flujo del rotor consiste en estimarla a partir de las señales a bornes del motor, tensión y las corrientes de estator y la velocidad del eje del rotor.

En el método indirecto la posición del flujo rotórico se calcula a partir de la integración de la velocidad de deslizamiento y la del rotor. La velocidad de deslizamiento del rotor se estima a partir de las señales de referencia mientras que la del eje del rotor se obtienen por medición o estimación⁶⁸.

⁶⁶ W. Leonhard, “Control of Electrical Drives”, 2ª Edición, Springer Verlag ,Berlín, 1995.

⁶⁷ B.K. Bose, “Power Electronics and AC Drives”, Prentice-Hall, Nueva Jersey, 1986.

⁶⁸ Y. Kao, C. Liu, “Analysis and Design of Microprocessor-based Vector-Controlled Induction Motor Drives”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 39, no. 1, pp. 46-54, Febrero 1992.

3.9.4 Control por Aceleración de Campo (FAM)⁶⁹

El control por aceleración de campo fue propuesto por Yamamura en 1986 y está basado en el esquema equivalente del motor en régimen permanente⁷⁰. Se podría decir que consiste en una mejora del clásico método de control tensión/frecuencia, pero a diferencia de éste, incorpora el calculo vectorial para la obtención de la referencia de intensidad (de ahí que este método sea una técnica de control vectorial). En la Figura 3.15 se represente el diagrama en bloques de un control por aceleración de campo.

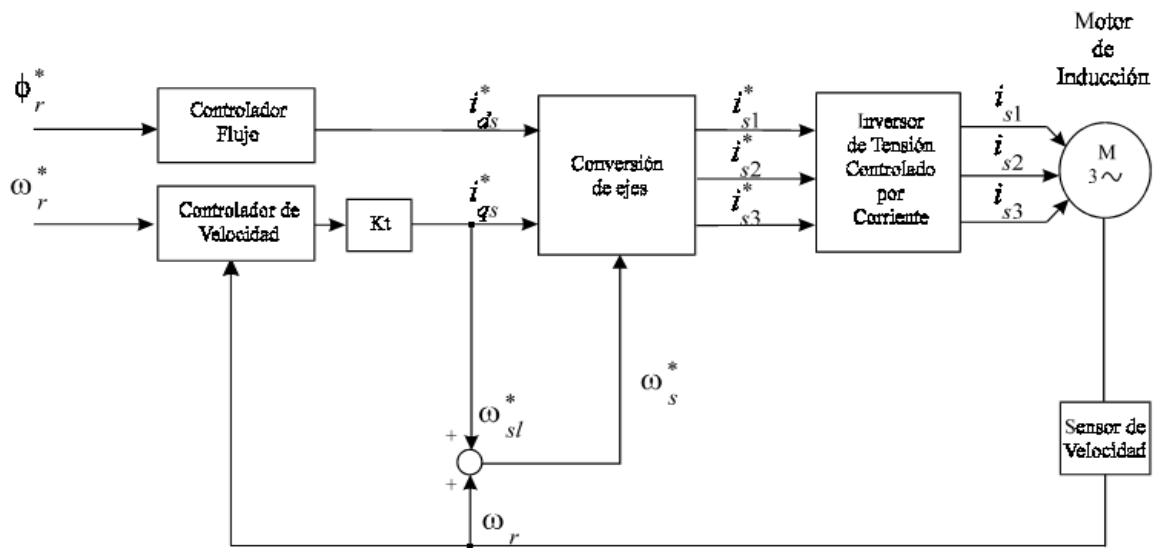


Figura 3.15: Esquema de un control por aceleración de campo.

La idea principal del control por aceleración de campo es mantener constante el módulo de la intensidad magnetizante (de forma semejante al control tensión/frecuencia), además de intentar mantener a su vez el ángulo de la corriente magnetizante, mejorando el control de velocidad.

⁶⁹ Las siglas FAM provienen de la terminología anglosajona "Field Acceleration Method". El método de control por aceleración de campo también suele denominarse "Control Yamamura", en referencia a su inventor.

⁷⁰ S. Yamamura, "AC Motors for High-Performance Applications", Marcel Dekker, Nueva York, 1986.

Desde el punto de vista de implementación, este método requiere pocos cálculos y por lo tanto es posible realizarlo con un microprocesador de bajo coste. Sin embargo, al estar basado en un esquema en régimen permanente, no presentan tan buenas prestaciones dinámicas como otras técnicas vectoriales más evolucionadas.

3.9.5 Control por Orientación de Campo Universal (UFO)⁷¹

En 1988, De Doncker⁷² propuso un nuevo esquema de control vectorial genérico denominado control por orientación de campo universal. Este método permite alinear la referencia síncrona a los vectores del flujo del rotor, del estator o del entrehierro. El UFO no requiere necesariamente el conocimiento del flujo del rotor para efectuar el desacoplo entre las componentes de par y de flujo de la corriente estatórica, puesto que puede funcionar con cualquier referencia síncrona. En la teoría tradicional del control por orientación de campo el flujo del rotor se debe estimar, dado que no se puede medir directamente. Los eventuales errores en los parámetros del modelo producen variaciones en el cálculo de la posición del flujo del rotor, discrepando con la posición real del mismo. El UFO permite realizar el desacoplo en un modo correcto para un sistema de referencia arbitrario.

En régimen permanente, el control universal basado en el flujo del entrehierro y en el del estator, no se ve afectado por errores en las inductancias de dispersión estimadas de la máquina. Cuando se produce una gran desintonización de las inductancias de dispersión, ambos son superiores al control universal basado en el flujo del rotor. El control universal basado en el flujo del estator y del entrehierro no requiere métodos sofisticados de estimación de parámetros ni observadores

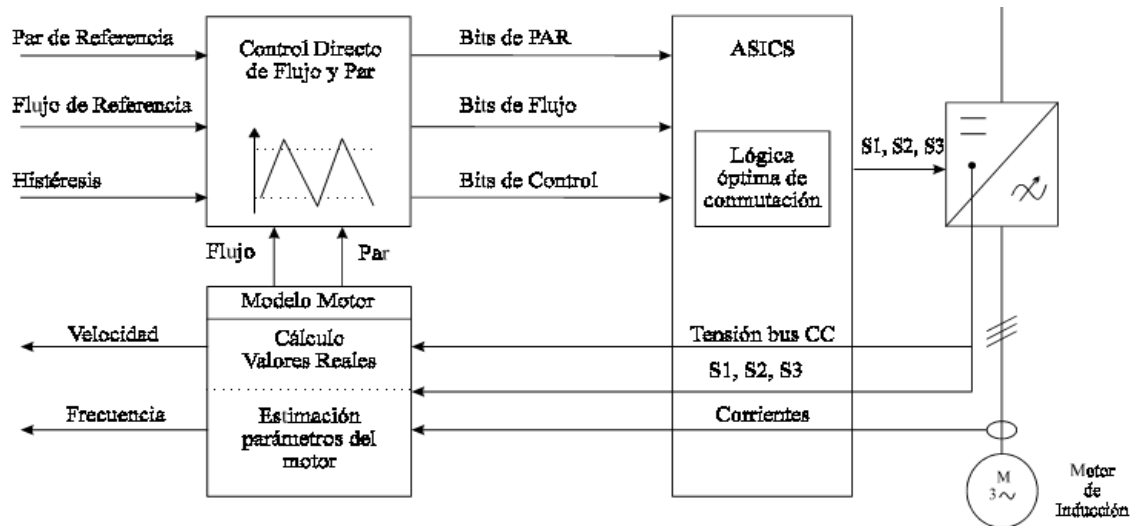
⁷¹ En la literatura el control universal por orientación de campo es conocido por las siglas UFO, (Universal Field Oriented).

⁷² R. Doncker, D.W. Novotny, "The Universal Field Oriented Controller", Conference Record IEEE-Industry Application Society Annual Meeting, pp. 450-456, Octubre 1988.

basados en complejos modelos de la máquina, con lo que se obtiene un control de par preciso y relativamente robusto⁷³.

3.9.6 Control Directo de Par (DTC)⁷⁴

El control directo de par⁷⁵ es uno de los métodos de control vectorial, donde se incorpora el control del convertidor dentro del algoritmo de regulación de velocidad. En la figura 3.5 se muestra un esquema básico del control directo de par. La conmutación de los semiconductores de potencia se realiza directamente en base al estado electromagnético del motor. La conmutación óptima de los interruptores se realiza en cada ciclo de control, con un tiempo de ciclo de 25µs aproximadamente. Para ello, es preciso el cálculo del flujo de estator, mediante un modelo preciso del motor y la medida de las tensiones y corrientes del motor. No es necesaria la medida de velocidad del rotor. El motor es identificado en vacío y sus parámetros son adaptados en línea durante su funcionamiento.



⁷³ R. Doncker, F. Profumo, M. Pastorelli, P. Ferraris, "Comparison of Universal Field Oriented (UFO) Controllers in Different Reference Frames", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 10, no. 2, pp. 205-212, Marzo 1995.

⁷⁴ El control directo de par, DTC, ("Direct Torque Control"), es el método de control de motores de CA más reciente. La idea surgió en una universidad europea y posteriormente fue desarrollada por ABB.

⁷⁵ P. Tiitinen, P. Pohjalainen, J. Lalu, "The Next Generation Motor Control Method: Direct Torque Control (DTC)", EPE Journal, vol. 5, no. 1, pp. 14-18, Marzo 1995.

Figura 3.16: Esquema del Control Directo de Par (DTC)..

El control directo de par ofrece características dinámicas excelentes, con un control preciso de par, incluso a velocidad cero (rotor parado). Su implementación se realiza mediante DSPs y circuitos específicos (ASICs).

3.9.7 Nuevas Tencencias

La investigación actual está concentrada en mejorar la identificación del modelo de la máquina en línea sin conocer previamente los parámetros⁷⁶, de manera que se puedan utilizar las modernas técnicas de control hoy en día existentes. Sin embargo, se deben resolver algunos problemas actuales:

- Permitir que el modelo en línea siga los inevitables cambios de los parámetros de la máquina, por efecto de la saturación, y de la temperatura.
- Identificación de la máquina y de la dinámica de la carga, para la autosintonización (“self-tuning”) del controlador, ya sea en la fase inicial de sintonizado o bien de forma continua, creando un control adaptativo.
- Reducir los requerimientos de sensado por razones de coste.
- Otra de las metas importantes es la eliminación del sensor de velocidad o de posición, que es indeseable por razones mecánicas y económicas; la posibilidad de estimar la velocidad a partir de las señales eléctricas es ya una realidad. Esto ha conducido a una intensa investigación para obtener accionamientos sin sensores (“sensorless”).

Las técnicas actuales de identificación de los parámetros de la máquina de inducción están basadas en el uso de redes neuronales (“neural networks”)⁷⁷, o en combinación con otras técnicas de vanguardia como la lógica difusa (“fuzzy logic”)⁷⁸.

⁷⁶ B.K. Bose, “Special Issue on Power Electronics and Motion Control”, Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, pp. 1101-1328, Agosto 1994.

⁷⁷ M.T. Wishart, R.G. Harley, “Identification and Control of Induction Machines using Artificial Neural Networks”, Conference Record IEEE-Industry Application Society Annual Meeting IAS’93, vol. 1, pp. 703-709, Toronto, Canadá, 2-8 Octubre 1993.

En la actualidad existen soluciones tentativas teóricas para la mayoría de los problemas citados anteriormente, si bien deben ser llevados a la práctica para ser aplicados industrialmente.

En los próximos años se prevé el aumento de la robustez de los nuevos métodos de identificación en línea de los parámetros de la máquina y de las técnicas de adaptación automática del controlador a sus variaciones, de tal manera que pasará a ser corriente su aplicación a nivel industrial.

Desde el punto de vista de ejecución física irá ganando terreno, para muchas aplicaciones, el concepto de motor integral, una combinación de motor asíncrono estándar y un convertidor de frecuencia de pequeño volumen, siguiendo las tendencias de la miniaturización creciente, montado sobre el mismo motor en el lado contrario del accionamiento.

Esta solución aportará posibilidades nuevas a la técnica de los accionamientos. Algunas máquinas que hasta ahora funcionaban en muchos casos a velocidades fijas, como las bombas y los ventiladores, obtendrán grandes beneficios de estas técnicas: su configuración e instalación se harán más sencillas y el funcionamiento con un factor de potencia alto y sin elementos mecánicos de transmisión o adaptación, aumentará el rendimiento energético y el motor integral se amortizará en corto tiempo⁷⁹.

Los precios de los convertidores de frecuencia se han reducido de forma continua desde su introducción, que tuvo lugar en los años setenta. En la actualidad, el precio de un convertidor, es unas cuatro veces mayor que el correspondiente motor. El rapidísimo desarrollo de la electrónica de potencia hará, probablemente, que en el curso de los próximos cinco años se establezcan los precios entorno a dos veces el precio del motor asíncrono.

⁷⁸ Consoli, E. Cerruto, A. Raciti, A. Testa, "Adaptive Vector Control of Induction Motor Drives based on a Neuro-Fuzzy Approach", IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'94, vol. 1, pp. 225-232, Taipei, Taiwan, 20-25 Junio 1994.

⁷⁹ M. Henze, "El Motor Integral. Un Nuevo Accionamiento Compacto de Velocidad Variable", Revista ABB, no. 4, 1996.

El incesante crecimiento de la densidad de potencia hará posible reducir el volumen requerido por el sistema electrónico. Esto permitirá construir motores integrales cada vez más potentes, cuyas dimensiones se irán acercando continuamente a la de los motores estándar.

CAPÍTULO 4: MARCO METODOLÓGICO

4.1 Evaluación de los motores eléctricos

4.1.1 Objetivos

Es significativo el hecho de que los motores eléctricos suministran en su mayor parte la energía que mueve los accionamientos industriales, por lo que la operación y conservación de los motores en la industria representa uno de los campos más fértiles de oportunidades en el ahorro de energía, que se traducen en una reducción en los costos de producción y en una mayor competitividad.

El ahorro de energía comienza desde la selección apropiada de los motores. Siempre hay uno adecuado a las necesidades de la carga, tanto en lo que respecta a su tipo por condiciones ambientales de operación, por condiciones de arranque o regulación de velocidad, así como por su tamaño o potencia. Los mayores ahorros de energía eléctrica se obtienen cuando el motor y su carga operan a su máxima eficiencia.

Los objetivos generales que comprenden la evaluación de motores eléctricos comprenden:

- Comprobar la viabilidad técnica y económica de la optimización de los sistemas electromotrices, abarcando la sustitución de motores estándar por motores de alta eficiencia, la optimización en la operación y mantenimiento de los equipos auxiliares, así como las ventajas que implica el uso de convertidores de frecuencia en estos equipos.
- Elaborar una base de datos en la que se especifiquen las características de operación en planta de distintos tipos, clases, marcas y tamaños de motores eléctricos que se encuentren en operación.
- Identificar medidas de ahorro de energía en los sistemas electromotrices y equipos auxiliares y calcular los potenciales de ahorro de energía eléctrica.

- Conocer los usos finales más comunes de las máquinas electromotrices en las ramas industriales principalmente.

4.1.2 Metodología de trabajo.

A continuación se presenta la metodología de trabajo recomendada para la realización de los diagnósticos energéticos a sistemas electromotrices.

4.1.3 Información previa

El usuario debe proporcionar, a solicitud del consultor, la siguiente información:

- Inventario de todos los motores eléctricos instalados, integrando su identificación en planta, localización, marca, tamaño, antigüedad, aplicación y horas de operación al año.
- Motores nuevos instalados en los últimos dos años: como parte de una sistema e independientes
- Relación detallada de los sistemas que utilizan variadores de velocidad, indicando sus características de operación y los tipos de variadores utilizados.
- Descripción de los procesos productivos por medio de diagramas de bloque.
- Datos mensuales de energía eléctrica y demanda por un mínimo de dos años.
- Planes de expansión o compra de nuevas máquinas o motores en los próximos 12 meses.
- Costo de rebobinado para diferentes tipos y tamaños de motores.
- Listado de acciones realizadas para el ahorro y uso eficiente de energía.

Por su parte, el Consultor deberá contar con la siguiente información:

- Curvas características de funcionamiento de motores eléctricos y convertidores de frecuencia, así como el soporte y asesoría de

los principales fabricantes y distribuidores de motores eléctricos y convertidores de frecuencia.

- Listado de precios de motores y convertidores de frecuencia de los principales fabricantes y distribuidores de estos equipos disponibles en México.

4.1.4 Recopilacion y verificacion de la informacion.

La información general ayuda al consultor a ubicar a la empresa dentro del contexto nacional y es una herramienta útil para desarrollar la metodología aplicable. Una etapa posterior dentro del estudio consiste en la verificación de la información preliminar.

- Información general de la empresa.
- Rama industrial.
- Principales productos.
- Turnos de trabajo.
- Calidad y antecedente de falla del suministro eléctrico de la compañía suministradora y en los equipos consumidores.

En cuanto a los motores eléctricos se obtendrá:

- Datos de placa y diseño.
- Verificación de los usos finales.
- Dispositivos usados para control y arranque.
- Programas de mantenimiento aplicados, indicando el tipo de monitoreo efectuado por la planta.
- Reporte de fallas mecánicas y/o eléctricas, describiendo las áreas de la planta en donde ocurren, las características de los motores, el número y tipo de fallas al año.
- Reporte de los motores que han sido rebobinados en los últimos dos años describiendo el taller donde normalmente se realizan las reparaciones.
- Métodos de alineación utilizados.
- Tipo de transmisión y acoplamiento de motor.

Para los equipos accionados por los motores se deben recopilar los siguientes datos:

- Características de diseño y operación.
- Curvas características de funcionamiento.
- Dispositivos de control instalados (flujo y presión en ductos y tuberías).
- Dispositivo de control (manual ó automático), especificando los parámetros de referencia.
- Horas de operación por nivel de carga.

4.1.5 Analisis de información previa.

Este análisis es necesario para determinar prioridades en las mediciones y descartar aquellas que no impacten en el consumo global de la empresa:

- Describir el comportamiento Histórico de los parámetros de consumo y facturación eléctrica que demanda la empresa y de los volúmenes de producción y ventas para un mínimo de dos años.

Para los motores se requiere recopilar la siguiente información:

- Comparación de las condiciones actuales de operación del motor contra sus características nominales de diseño.
- Determinar si los equipos de arranque y control son los adecuados a las condiciones de operación y diseño (principalmente arrancadores a tensión plena).
- Verificar la efectividad de los programas de mantenimiento establecidos.
- Causas y efectos de las fallas eléctricas y mecánicas de motores.
- Historial de los motores para determinar el número de veces que han sido rebobinados, el costo de la reparación, el lugar donde se reparó, la causa por la que se quemó y la fecha de la última reparación.

- Determinar si las características de operación de los acoplamientos y transmisiones son adecuados a las condiciones de trabajo.
- En base a las horas de operación y potencias de los motores, hacer el cálculo de los KWH anuales consumidos para cada motor y demostrar que se aproxima al consumo anual facturado, menos el consumo por iluminación y otras cargas.

En caso de los equipos accionados por los motores analizar:

- Condiciones óptimas de funcionamiento en base a la información de los manuales de operación y curvas características.
- Periodicidad de los ajustes en la variación de flujo en ventiladores, sopladores, compresores y bombas.
- Identificación de los diferentes mecanismos de variación de velocidad en los motores eléctricos así como su correcta utilización.
- Variaciones en las condiciones de operación de los equipos susceptibles de aceptar convertidores de frecuencia, identificando las diferentes necesidades de flujos, presiones y número de horas por nivel de carga a lo largo de la jornada de trabajo o ciclos de operación.

4.1.6 Mediciones

Se recomienda analizar por lo menos 10 curvas características de los siguientes puntos de medición.

- Curvas características del comportamiento de la carga y de los parámetros eléctricos de toda la planta, medidos desde la subestación principal, por 48 horas.
- En cuanto a cada uno de los alimentadores principales de los centros de control de motores, se deben conectar 24 horas los analizadores de redes, midiendo los siguientes parámetros eléctricos para cada una de las fases:

- Corriente.
 - Voltaje.
 - Factor de potencia.
 - KW
 - KWh.
 - Corrientes armónicas.
- Efectuar las mediciones puntuales necesarias, para determinar las condiciones de carga de las variables eléctricas, de todo motor mayor de 5 HP y con más de 1,000 horas de operación al año.
 - Para los motores de mayor consumo dentro de la planta, las mediciones deberán de estar enfocadas a identificar cuáles son las características del comportamiento de la carga y operación para poder recomendar aquellas medidas de ahorro que sean aplicables.
 - Para los motores de 15 HP o mayores operando abajo del 40% de carga y aquellos motores sobrecargados, las mediciones se realizarán por un tiempo suficiente para determinar sus características de operación.
 - Para sistemas de bombeo, compresión y ventilación, se deberán realizar mediciones de flujo, presión estática y/o velocidad del aire en áreas de ductos.
 - Estas mediciones se deben hacer en la sección previa y posterior al dispositivo de control de flujo. Se deben medir los parámetros eléctricos en los motores susceptibles de instalación de convertidores de frecuencia. Las mediciones se efectuarán durante un período de tiempo suficiente para identificar el perfil de operación del sistema.
 - En los manómetros instalados en las bombas y compresores, se requiere medir las presiones de operación.

4.1.7 Analisis de mediciones.

El análisis de las mediciones en campo permite evaluar las condiciones reales de operación de los motores y proponer las medidas operativas, de reemplazo ó de reubicación de motores que permitan explotar al máximo el potencial de ahorro detectado:

- Presentar las variaciones en las condiciones de operación de los equipos susceptibles de instalación de convertidores de frecuencia, identificando las diferentes necesidades de flujo, presiones y números de horas por nivel de carga a lo largo de la jornada de trabajo o ciclos de producción.
- Comparar datos nominales de operación contra las condiciones reales de funcionamiento.
- Analizar la posible sustitución o reubicación de los motores que estén trabajando sobrecargados o con un porcentaje de carga menor de 40%.
- Relacionar los niveles de producción y de carga de los motores, para establecer los patrones de referencia al momento de la aplicación de alguna de las medidas de ahorro.

En base al porcentaje de carga y diseño del motor se determina la eficiencia de operación de los motores, utilizando las curvas características de funcionamiento proporcionadas para ese fin.

- En esta etapa se analizan los factores que afectan la eficiencia de los motores como son:
 - Porcentaje de variación del voltaje indicando los valores máximos y mínimos.
 - Porcentaje de desbalanceo en el voltaje entre fases, indicando los valores por fase.
 - Identificación de motores sobredimensionados y sobrecargados, indicando el comportamiento de la carga

durante un periodo típico de trabajo así como la eficiencia del motor en operación.

- Motores con bajo factor de potencia.
- Utilización apropiada de los motores en base a su diseño.
- Comparación de las condiciones de operación de los equipos accionados contra sus características de diseño.
- Determinación de los efectos de las corrientes armónicas en los sistemas electromotrices.
- Comparación de funcionamiento de un convertidor de frecuencia, contra las condiciones de operación del reductor de velocidad mecánico instalado.

4.1.8 Evaluación de las oportunidades de ahorro de energía.

A continuación se presenta una lista indicativa pero no exhaustiva de las oportunidades a evaluar.

- Suministro de energía eléctrica.
 - Mala regulación de voltaje.
 - Desbalanceo de fases.
 - Existencia de corrientes armónicas.
- Reubicación de motores.
 - Sobredimensionamiento.
 - Bajo porcentaje de carga.
- Accesorios
 - Optimización de transmisión de bandas sincrónicas o cadenas.
- Características de la instalación
 - Tipo de alineación del motor
- Reemplazo de motores
 - Instalación de motores de alta eficiencia.
 - Por una nueva adquisición.

- Para sustitución de equipos operando.
- Por el remplazo de motores dañados.
- Equipos accionados por motores:
 - Ajuste de las condiciones de operación del equipo accionado por los motores.
 - Instalación de dispositivos de control para compresores, bombas y ventiladores.
 - Reemplazo de equipo accionado por otro de mayor eficiencia.
 - Mejor control de los compresores de aire.

4.1.9 Oportunidades de Ahorro de Energía.

Toda medida de ahorro de energía, debe contar con su respectiva memoria de cálculo. Dicha memoria deberá exponer en forma clara los ahorros teóricos potenciales de energía eléctrica (KWh, KW) y su equivalente en unidades monetarias, además de contener en forma explícita los antecedentes y consideraciones, en los que se basan las diversas opciones.

Cada medida de ahorro de energía debe contener:

- Acción concreta.- Explicación clara y específica de la acción a realizar para lograr un ahorro de energía.
- Descripción y antecedentes.- Breve descripción de la situación actual, mostrando las anomalías encontradas y los fundamentos en los que se basa la acción de ahorro de energía a implementar.
- Ahorros económicos y energéticos.- Se debe exponer en forma clara los ahorros teóricos potenciales de energía eléctrica (KWh, KW).
- Inversión Necesaria.- Se presenta el volumen de obra necesario incluyendo, el costo del equipo a instalar y los costos propios de la instalación.
- Período de Recuperación de la Inversión.- Se reportarán los parámetros económicos más usuales, como son el período de

recuperación (payback), y su equivalente en unidades monetarias presentando los análisis de valor presente neto (V.P.N.), así como la tasa interna de retorno (TIR).

- Contexto Técnico. En el caso de que la aplicación de esta medida, requiera de alguna acción específica por parte del personal de la planta, se debe explicar ampliamente en esta sección si dichas acciones se refieren a modificaciones en las instalaciones eléctricas, civiles y mecánicas de la empresa, condiciones de operación, o cursos de capacitación.

4.2 Recomendaciones generales para ahorrar energía

ELEGIR CORRECTAMENTE LA POTENCIA DEL MOTOR. El rendimiento máximo se obtiene cuando éste opera entre el 75% y el 95% de su potencia nominal y cae bruscamente para cargas reducidas o cuando trabaja sobrecargado. Además, los motores de inducción operan con factor de potencia muy bajo cuando trabajan con cargas reducidas o en vacío.

AUMENTAR LA EFICIENCIA INTRINSECA DE LOS MOTORES. Con el empleo de motores ahorradores de energía -con alta eficiencia nominal- se logran ahorros que pueden alcanzar hasta 20% en los motores menores de 5 HP y hasta 40% en motores de 7.5 HP o mayores, si se les compara con motores antiguos de potencia equivalente, sin un incremento considerable en la inversión inicial.

SELECCIONAR EL MOTOR DE ACUERDO CON SU CICLO DE TRABAJO. Operar un motor para servicio continuo, en accionamientos de operación intermitente, con frecuentes arranques y paros ocasiona una depreciación de las características de operación y eficiencia. Además, la elevación de temperatura producida puede causar daño irreversible a los aislamientos.

SELECCIONAR EL TIPO DE MOTOR DE ACUERDO CON EL AMBIENTE DE TRABAJO. Los motores abiertos son más sencillos y por lo tanto, menos costosos, además de que operan con mayor factor de potencia que los cerrados. Sin embargo, en condiciones adversas del medio los segundos son los indicados.

SELECCIONAR LA VELOCIDAD. Si la carga lo permite son preferibles los motores de alta velocidad, porque son más eficientes -en especial los de 4 y 8 polos- además de que trabajan con mejor factor de potencia. Cuando se tienen operaciones o procesos industriales en que se tienen claramente detectados dos regímenes de funcionamiento -como en algunas bombas y ventiladores- es recomendable el uso de motores de 2 velocidades fijas, en lugar de un motor de velocidad variable, ya que éste último presenta menores eficiencias.

USAR MOTORES DE INDUCCION TRIFASICOS EN LUGAR DE MONOFASICOS. En motores de potencia equivalente, la eficiencia de los motores trifásicos es de 3% a 5% mayor que en los monofásicos. Tienen además otras ventajas como: requerir circuitos más simples, relación \$/HP menor, corrientes de operación menores, menor vibración mecánica y factor de potencia notablemente mayor.

PREFERIR MOTORES DE INDUCCION JAULA DE ARDILLA. En aquellas aplicaciones en que es necesario tener control de la velocidad, actualmente es más conveniente el uso de variadores estáticos aplicados a motores con rotor jaula de ardilla, en lugar de la práctica común de usar motores de rotor devanado.

ESTUDIAR LA POSIBILIDAD DE USAR MOTORES SINCRONOS. Cuando se requieren motores de gran potencia y velocidad constante debe considerarse la elección de un motor síncrono. Tienen eficiencias altas y pueden contribuir a mejorar el factor de potencia de toda la instalación.

REEMPLAZAR LOS MOTORES ANTIGUOS. Los costos de operación y mantenimiento de motores viejos o de motores que por su uso se han degradado sus características nominales, casi siempre justifican su sustitución por motores nuevos normalizados y de alta eficiencia.

EFFECTUAR LA INSTALACION Y MONTAJE DE ACUERDO CON LAS N.T.I.E. Las Normas Técnicas de Instalaciones Eléctricas y los instructivos de los fabricantes de motores son consulta obligada para asegurar el funcionamiento adecuado de los equipos y obtener así la máxima eficiencia nominal.

ASEGURAR UNA BUENA CONEXION A TIERRA. Una tierra defectuosa o la ausencia de ésta puede poner en peligro la vida de los operarios si se presenta una falla, además de ocasionar corrientes de fuga altamente productoras de pérdidas.

EVITAR CONCENTRACIONES INNECESARIAS. Se debe evitar concentrar motores en lugares reducidos o mal ventilados. Un sobrecalentamiento del motor se traduce en una disminución de la eficiencia.

VIGILAR LA CAIDA DE TENSION EN LOS ALIMENTADORES. Una tensión reducida en las terminales del motor acarrea, entre otros problemas, incremento de la corriente, sobrecalentamiento y disminución de la eficiencia. Las normas permiten una caída máxima del 3% (ó del 5% en la combinación del alimentador y el circuito derivado) pero es recomendable que no rebase el 1%.

EQUILIBRAR LA TENSION EN BORNES DE LOS MOTORES. El desequilibrio entre fases no debe excederse en ningún caso del 5%, pero mientras menor sea el desbalanceo, mayor será la eficiencia de los motores.

CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA. Compensar la energía reactiva demandada por los motores de C.A. más importantes o con mayor número de horas de funcionamiento, con lo que se reducen las pérdidas de energía y la caída de tensión en los conductores.

AJUSTAR LA EXCITACION DE LOS MOTORES SINCRONOS. A través del control de la excitación del rotor (en c.c.) se puede variar el factor de potencia de los motores síncronos y mejorar el factor de toda la instalación.

EVITAR LA OPERACION SIMULTANEA DE MOTORES GRANDES. Se debe evitar hasta donde sea posible la operación simultánea de motores, sobre todo los de mediana y gran capacidad, para disminuir la demanda máxima.

USAR ARRANCADORES A TENSION REDUCIDA. En motores que deban realizar un número elevado de arranques, el uso de arrancadores a tensión reducida evita calentamiento excesivo en los conductores y disminuye las pérdidas durante la aceleración.

ESTUDIAR LA APLICACION DE OTROS TIPOS DE ARRANCADORES. Cuando la carga impulsada no requiere un alto par de arranque es recomendable el uso de arrancadores estrella-delta ó devanado partido. Son más económicos y

consumen menos energía que los de tensión reducida, aunque tienen el inconveniente de que el par de arranque se reduce notablemente.

USAR REGULADORES DE VELOCIDAD ELECTRONICOS PARA MOTORES DE INDUCCION En los motores de rotor devanado se llega a consumir hasta 20% de la energía total tomada de la red en los resistores para control de velocidad. Los modernos reguladores electrónicos son mucho más eficientes.

USAR ARRANCADORES ELECTRONICOS. El uso de arrancadores electrónicos en lugar de reóstatos convencionales para motores de corriente continua, permiten importantes ahorros de energía en el arranque.

USAR CONTROLADORES DE VELOCIDAD PARA APLICACIONES DE VELOCIDAD VARIABLE. Los controladores estáticos de velocidad permiten eliminar engranes, poleas, bandas y otros tipos de transmisión que producen pérdidas importantes al variar la velocidad y en general son aplicables en aquellos sistemas donde la carga se pueda variar con la velocidad, como en sistemas de bombeo o compresión.

ADMINISTRAR LOS SISTEMAS DE VENTILACION. Conectar la ventilación solamente durante las bajas velocidades, en aquellos motores de velocidad ajustable y separada, provista por equipos auxiliares.

PREFERIR EL ACOPLAMIENTO INDIVIDUAL. En accionamientos con grupos de motores se consigue más fácilmente que cada motor trabaje a máxima eficiencia si el acoplamiento es individual.

PREFERIR EL ACOPLAMIENTO DIRECTO. Siempre que el accionamiento lo permita, es preferible acoplar la carga directamente al motor, ya que se reducen las pérdidas en el mecanismo de transmisión.

USAR ACOPLAMIENTOS FLEXIBLES. En motores sometidos a un número elevado de arranques súbitos es recomendable usar acoplamientos flexibles para atenuar los efectos de una alineación defectuosa, reducir los esfuerzos de torsión en la flecha y disminuir las pérdidas por fricción.

INSTALAR CONTROLES DE TEMPERATURA. En motores de gran capacidad es conveniente controlar la temperatura del aceite de lubricación de cojinetes, a fin de minimizar las pérdidas por fricción.

MANTENER AJUSTADO EL EQUIPO DE PROTECCION. Los equipos de protección evitan los daños mayores a los motores producidos por sobrecalentamientos o sobrecargas, evitando que operen con baja eficiencia.

REVISAR PERIODICAMENTE LAS CONEXIONES. Las conexiones flojas o mal realizadas originan con frecuencia un mal funcionamiento del motor, además de ocasionar pérdidas por disipación de calor.

EFFECTUAR MANTENIMIENTO A MOTORES QUE REQUIERAN ESCOBILLAS Y ANILLOS ROZANTES. Los motores de corriente directa, síncronos y de rotor devanado requieren de un buen contacto entre las escobillas y los anillos rozantes. Un asentamiento incorrecto, suciedad o una deficiente presión de contacto provocan sobrecalentamiento y pérdidas de energía.

MANTENER AJUSTADO EL INTERRUPTOR CENTRIFUGO EN MOTORES MONOFASICOS. El mal funcionamiento del interruptor centrífugo en motores monofásicos de fase hendida y de arranque por capacitor provoca sobrecalentamiento en los conductores con la consiguiente pérdida de energía, y en caso extremo, la falla del motor.

VERIFICAR PERIODICAMENTE LA ALINEACION. Una alineación defectuosa entre el motor y la carga impulsada incrementa las pérdidas por rozamiento y puede ocasionar daños al motor y a la carga.

REEMPLAZAR EJES DAÑADOS. Si los ejes del motor o de la transmisión se han doblado o dañado, las pérdidas por fricción se incrementan y pueden causar daños severos a los cojinetes.

DAR MANTENIMIENTO AL SISTEMA DE TRANSMISION. Mantener en buen estado las poleas, engranes, bandas y cadenas o corregir la instalación puede evitar daños al sistema, reduciendo una carga inútil para el motor.

MANTENER EN OPTIMAS CONDICIONES LOS COJINETES DEL MOTOR. Si los cojinetes se encuentran en mal estado o si su lubricación es inadecuada, las pérdidas de energía pueden ser considerables. Repárelos o sustitúyalos si tienen algún desperfecto y siga las instrucciones del fabricante para lograr una correcta lubricación.

MONITOREAR PERIODICAMENTE LOS PARAMETROS MAS IMPORTANTES. Es recomendable verificar periódicamente las condiciones de operación y eficiencia a través de la medición de los parámetros más importantes, y tomar acciones correctivas cuando sean requeridas.

EFFECTUAR LIMPIEZA GENERAL RUTINARIAMENTE. Con el propósito de eliminar la suciedad, el polvo y objetos extraños, se debe efectuar una limpieza periódica a todos los componentes. La periodicidad depende de las horas de uso y de las condiciones de operación en general.

EVITAR EL FUNCIONAMIENTO EN VACIO. Cuando un motor eléctrico trabaja en vacío opera prácticamente con el factor de potencia más bajo y con eficiencia cero, porque en esas condiciones toma energía de la red pero no produce ningún trabajo útil en la flecha. Es una situación que debe detectarse y evitarse oportunamente.

EVITAR EL USO DE MOTORES DE FRECUENCIA NOMINAL DIFERENTE A LA FRECUENCIA DE LA RED. Operar motores de 50 Hz en redes de 60 Hz produce cambios en las reactancias de los devanados y aumento en la velocidad del campo rotatorio. Estas situaciones provocan que los motores trabajen con eficiencia muy inferior a la nominal.

ESTABLECER UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO COMPLETO Y VIGILAR SU OBSERVANCIA. Es conveniente elaborar un programa de mantenimiento que considere acciones preventivas así como pruebas que permitan conocer las condiciones exactas en que se encuentra el equipo, con lo cual se pueden tomar las medidas correctivas pertinentes.

MANTENER ACTUALIZADOS LOS MANUALES DE OPERACION. Mantener actualizados los manuales de operación es una acción que permite establecer instrucciones concretas para los operarios, con lo que los motores trabajan con la mayor seguridad y eficiencia.

4.3 Procedimiento de Evaluación para la Sustitución de Motores Eléctricos de Eficiencia Estándar por Motores de Alta Eficiencia

4.3.1 Notación

La notación empleada en este punto es la siguiente

Tabla 4.1: Notación de la sección

Variables		Subíndices	
A	Ahorro	α	Referente al Motor Nuevo de Alta Eficiencia
FA	Factor de Ajuste	ε	Referente al Motor Existente de Eficiencia Estándar
FC	Factor de Carga	Adj	Ajustada
FP	Factor de Potencia	C	Consumo
I	Corriente	D	Demanda
Pot	Potencia	π	Dato de placa
V	Tensión		
η	Eficiencia		

4.3.2 Levantamiento de Datos

Con el fin de exponer la metodología propuesta, se tomará un motor como ejemplo de la misma para detallar los cálculos del procedimiento.

$$\begin{array}{ll}
 \text{(a) Datos Medidos } \varepsilon & \text{Datos de Placa } \pi \\
 V_{\varepsilon 1} := 445.1 \cdot V & V_{\pi} := 440 \cdot V \\
 V_{\varepsilon 2} := 446.9 \cdot V & \text{Pot}_{\pi} := 100 \cdot \text{hp} \\
 V_{\varepsilon 3} := 445.1 \cdot V & \eta_{\pi} := 0.9184 \\
 I_{\varepsilon} := 63.2 \cdot A & \\
 \text{FP}_{\varepsilon} := 0.67 &
 \end{array} \tag{4.1}$$

(b) Facturación anual

$$\begin{aligned} \$ &:= 1 & \text{Costo}_D &:= 68.970 \cdot \frac{\$}{\text{kW} \cdot \text{yr}} & (4.2) \\ t_{\text{op}} &:= 7200 \cdot \frac{\text{hr}}{\text{yr}} & \text{Costo}_{\text{Pond}} &:= 0.4283 \cdot \frac{\$}{\text{kW} \cdot \text{hr}} \end{aligned}$$

(c) Datos de Placa Motor Eficiente y Precio de Mercado

$$\begin{aligned} V_{\alpha} &:= 460 \cdot V \\ \text{Pot}_{\alpha\pi} &:= 60 \cdot \text{hp} \\ C_{\text{MotorNuevo}} &:= 15624.13 \cdot \$ \end{aligned} \quad (4.3)$$

(d) Datos de Tabla de Eficiencias

Motor Estándar	Motor Eficiente o Nuevo
$FC_{\varepsilon 25} := 0.25$	$FC_{\alpha 50} := 0.50$
$\eta_{\varepsilon 25} := 0.8858$	$\eta_{\alpha 50} := 0.9469$
$FC_{\varepsilon 50} := 0.50$	$FC_{\alpha 75} := 0.75$
$\eta_{\varepsilon 50} := 0.9221$	$\eta_{\alpha 75} := 0.9499$

(4.4)

(e) Datos de Tabla de Rebobinados

$$FA_{\text{Re}} := 0.025 \quad (4.5)$$

4.3.3 Potencia del Motor Estándar Demandada

$$V_{\varepsilon} := \frac{V_{\varepsilon 1} + V_{\varepsilon 2} + V_{\varepsilon 3}}{3} \quad V_{\varepsilon} = 445.7 \text{ V} \quad (4.6)$$

$$\text{Pot}_{\varepsilon} := \sqrt{3} \cdot V_{\varepsilon} \cdot I_{\varepsilon} \cdot \text{FP}_{\varepsilon} \quad \text{Pot}_{\varepsilon} = 32.689 \text{ kW} \quad (4.7)$$

4.3.4 Factor de Carga y Eficiencia del Motor Estándar

$$\text{Pot}_{\text{Flecha}} := \eta_{\pi} \cdot \text{Pot}_{\varepsilon} \qquad \text{Pot}_{\text{Flecha}} = 3.002 \times 10^4 \text{ W} \qquad (4.8)$$

Observación: Cuando la eficiencia de placa η_{π} no esté disponible, se considera la de la Tabla a FL (Full Load o 100% de la carga)

$$\text{FC}_{\varepsilon} := \frac{\text{Pot}_{\text{Flecha}}}{\text{Pot}_{\pi}} \qquad \text{FC}_{\varepsilon} = 0.403 \qquad (4.9)$$

Interpolación lineal para obtener la eficiencia

$$\eta_{\varepsilon} := \frac{\text{FC}_{\varepsilon} - \text{FC}_{\varepsilon 25}}{\text{FC}_{\varepsilon 50} - \text{FC}_{\varepsilon 25}} \cdot (\eta_{\varepsilon 50} - \eta_{\varepsilon 25}) + \eta_{\varepsilon 25} \qquad \eta_{\varepsilon} = 0.908 \qquad (4.10)$$

4.3.5 Ajustes de Eficiencia

(a) FA_{VV} : Ajuste por diferencia en tensión

$$\text{VV}_{\varepsilon} := \frac{V_{\varepsilon}}{V_{\pi}} - 1 \qquad (4.11)$$

$$\text{FA}_{\text{VV}} := \text{VV}_{\varepsilon} \cdot (0.07 - 1.334 \cdot \text{VV}_{\varepsilon}) - 0.0009 \qquad \text{FA}_{\text{VV}} = -0.000217$$

(b) Ajuste por desbalanceo en Tensión

$$\text{DV}_{\varepsilon} := \left(\frac{\max(\max(V_{\varepsilon 1}, V_{\varepsilon 2}, V_{\varepsilon 3}) - V_{\varepsilon}, V_{\varepsilon} - \min(V_{\varepsilon 1}, V_{\varepsilon 2}, V_{\varepsilon 3}))}{V_{\varepsilon}} \right) \qquad (4.12)$$

$$\text{FA}_{\text{DV}} := 1 - \text{DV}_{\varepsilon} \cdot (0.0113 + 0.0073 \cdot \text{DV}_{\varepsilon}) \qquad \text{FA}_{\text{DV}} = 0.99997$$

(c) Ajuste por rebobinado

$$\eta_{\varepsilon\text{Adj}} := FA_{DV} \cdot (\eta_{\varepsilon} + FA_{VV} - FA_{Re}) \quad \eta_{\varepsilon\text{Adj}} = 0.882712 \quad (4.13)$$

4.3.6 Potencia de Freno del Motor Estándar

$$Pot_{\varepsilon\text{Mec}} := \eta_{\varepsilon\text{Adj}} \cdot Pot_{\varepsilon} \quad Pot_{\varepsilon\text{Mec}} = 28.85 \text{ kW} \quad (4.14)$$

4.3.7 Potencia de Freno del Motor de Alta Eficiencia y Factor de Carga

Dado que usualmente los motores de alta eficiencia operan al 75% de la carga:

$$Pot_{\alpha\text{Mec}} := \frac{Pot_{\varepsilon\text{Mec}}}{0.75} \quad Pot_{\alpha\text{Mec}} = 38.47 \text{ kW} \quad (4.15)$$

Observación: Corresponde la selección de un Motor de Alta Eficiencia de

$$Pot_{\alpha\pi} = 60 \text{ hp} \quad Pot_{\alpha\pi} = 44.742 \text{ kW} \quad (4.16)$$

pues se trata de una potencia superior a la obtenida anteriormente.

$$FC_{\alpha} := \frac{Pot_{\varepsilon\text{Mec}}}{Pot_{\alpha\pi}} \quad FC_{\alpha} = 0.645 \quad (4.17)$$

4.3.8 Eficiencia del Nuevo Motor

$$\eta_{\alpha} := \frac{FC_{\alpha} - FC_{\alpha 50}}{FC_{\alpha 75} - FC_{\alpha 50}} \cdot (\eta_{\alpha 75} - \eta_{\alpha 50}) + \eta_{\alpha 50} \quad \eta_{\alpha} = 0.948639 \quad (4.18)$$

4.3.9 Ajustes de la Eficiencia

$$\begin{aligned} \text{Por ser nuevo: } \quad FA_{DV\alpha} &:= 0.9999 \\ & \\ & FA_{Re\alpha} := 0 \end{aligned} \quad (4.19)$$

Se sigue en forma análoga al motor de eficiencia estándar

$$VV_{\alpha} := \frac{V_{\varepsilon}}{V_{\alpha}} - 1 \quad (4.20)$$

$$FA_{VV\alpha} := VV_{\alpha} \cdot (0.07 - 1.334 \cdot VV_{\alpha}) - 0.0009 \quad FA_{VV\alpha} = -0.004365$$

$$\eta_{\alpha Adj} := FA_{DV\alpha} \cdot (\eta_{\alpha} + FA_{VV\alpha} - FA_{Re\alpha}) \quad \eta_{\alpha Adj} = 0.944179 \quad (4.21)$$

4.3.10 Nueva Potencia Demandada

$$Pot_{\alpha} := \frac{Pot_{\alpha\pi} \cdot FC_{\alpha}}{\eta_{\alpha Adj}} \quad Pot_{\alpha} = 30.56 \text{ kW} \quad (4.22)$$

4.3.11 Ahorro Energético y Económico

(a) Ahorro en Potencia (Demanda)

$$A_D := Pot_{\varepsilon} - Pot_{\alpha} \quad A_D = 2.13 \text{ kW} \quad (4.23)$$

$$\frac{A_D}{Pot_{\varepsilon}} = 6.51 \%$$

(b) Ahorro en Energía (Consumo)

$$A_C := A_D \cdot t_{op} \quad A_C = 15322 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{\text{yr}} \quad (4.24)$$

(c) Ahorro Económico

$$A_E := 12 \cdot A_D \cdot \text{Costo}_D + A_C \cdot \text{Costo}_{Pond} \quad A_E = 8324 \frac{\$}{\text{yr}} \quad (4.25)$$

4.3.12 Período de Amortización

También llamado Período Simple de Recuperación

$$\text{PSR} := \frac{C_{\text{MotorNuevo}}}{A_E} \quad \text{PSR} = 1.877 \text{ yr} \quad (4.26)$$

4.4 Desarrollo del Software para la Sustitución de Motores

Como se mencionó en el Capítulo I el software se desarrolló bajo los siguientes principios

- Portabilidad: Se escogió Excel a la hora de desarrollar el código y cálculos
- Flexibilidad: Dado que los informes deberán ser presentado ante organismos oficiales, con el consiguiente empleo de membretes y estipulaciones, se escogió Microsoft Word para complementar el desenvolvimiento de Microsoft Excel.
- Disponibilidad: Se asume que en todas las plantas industriales se dispondrá de Excel.
- Robustez: Para el manejo y mantenimiento de la base de datos de Motores disponibles, se escogió Microsoft Access. El mismo será para el auxilio exclusivo del maestrante, no habiendo necesidad de implementarlo en las plantas visitadas.

4.4.1 Levantamiento de Datos y Acometida de los Cálculos. Microsoft Excel

Se presenta la planilla de cálculo desarrollada. En ella se establece en primer término una interfaz amigable de levantamiento de datos de los motores industriales estudiados.

CAPÍTULO 4: MARCO METODOLÓGICO

Banda dosificadora inicial Motor No 3 BATEY MOTOR GRUA CAÑERA No. 2 MOTOR BOMBA HIDRAULICA VOLTEAD MOTOR MESA ALIMENTADORA No. 1 L. MOTOR MESA ALIMENTADORA No. 1 L. MOTOR MESA ALIMENTADORA No. 2 L. MOTOR MESA ALIMENTADORA No. 2 L.	3	DATOS DEL MOTOR EXISTENTE <table border="1"> <tr> <th>PLACA EXISTENTE</th> <th>DATOS DE CAMPO</th> <th>EFL. EXISTENTE</th> </tr> <tr> <td>Volt 440 V</td> <td>Volt 477 V</td> <td>EF FL 89.1</td> </tr> <tr> <td>Corr. 31 A</td> <td>Corr. 19.59 A</td> <td>EF 75 89.8</td> </tr> <tr> <td>Pot. 25 HP</td> <td>KW1 11.8</td> <td>EF 50 87.1</td> </tr> <tr> <td>VEL. 1780 RPM</td> <td>KW2 8.62</td> <td>EF 25 83.4</td> </tr> <tr> <td></td> <td>KVA 22.2</td> <td></td> </tr> </table>	PLACA EXISTENTE	DATOS DE CAMPO	EFL. EXISTENTE	Volt 440 V	Volt 477 V	EF FL 89.1	Corr. 31 A	Corr. 19.59 A	EF 75 89.8	Pot. 25 HP	KW1 11.8	EF 50 87.1	VEL. 1780 RPM	KW2 8.62	EF 25 83.4		KVA 22.2		CÁLCULOS <table border="1"> <tr> <td>KVA 16.185</td> <td>Fadt -0.0044</td> <td>Fadt -0.0001</td> </tr> <tr> <td>FP 0.53106</td> <td>DT 0</td> <td>DT 0</td> </tr> <tr> <td>KW1 8.6</td> <td>FADT 1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>XXX 0.89706</td> <td>Ef ajus 0.81693</td> <td>Ef ajus 93.14%</td> </tr> <tr> <td>Ef. Std. 89.10%</td> <td>P std me 7.02557</td> <td>P dem AE 7.54314</td> </tr> <tr> <td></td> <td>HP 9.41765</td> <td>A dem 1.05686</td> </tr> <tr> <td>F.C. 0.41086</td> <td>FC AE 0.37671</td> <td>Ahorro 12.3%</td> </tr> <tr> <td>Ef std 86.14%</td> <td>Ef AE 93.15%</td> <td>H op 4000</td> </tr> <tr> <td>VV std 0.08409</td> <td>VV AE 0.03696</td> <td>KWh/año 4227.45</td> </tr> <tr> <td>A.Anual 4,946</td> <td>Costo MAE 19,146</td> <td>P.S.R. 3.87066</td> </tr> </table>	KVA 16.185	Fadt -0.0044	Fadt -0.0001	FP 0.53106	DT 0	DT 0	KW1 8.6	FADT 1		XXX 0.89706	Ef ajus 0.81693	Ef ajus 93.14%	Ef. Std. 89.10%	P std me 7.02557	P dem AE 7.54314		HP 9.41765	A dem 1.05686	F.C. 0.41086	FC AE 0.37671	Ahorro 12.3%	Ef std 86.14%	Ef AE 93.15%	H op 4000	VV std 0.08409	VV AE 0.03696	KWh/año 4227.45	A.Anual 4,946	Costo MAE 19,146	P.S.R. 3.87066
	PLACA EXISTENTE	DATOS DE CAMPO	EFL. EXISTENTE																																																
Volt 440 V	Volt 477 V	EF FL 89.1																																																	
Corr. 31 A	Corr. 19.59 A	EF 75 89.8																																																	
Pot. 25 HP	KW1 11.8	EF 50 87.1																																																	
VEL. 1780 RPM	KW2 8.62	EF 25 83.4																																																	
	KVA 22.2																																																		
KVA 16.185	Fadt -0.0044	Fadt -0.0001																																																	
FP 0.53106	DT 0	DT 0																																																	
KW1 8.6	FADT 1																																																		
XXX 0.89706	Ef ajus 0.81693	Ef ajus 93.14%																																																	
Ef. Std. 89.10%	P std me 7.02557	P dem AE 7.54314																																																	
	HP 9.41765	A dem 1.05686																																																	
F.C. 0.41086	FC AE 0.37671	Ahorro 12.3%																																																	
Ef std 86.14%	Ef AE 93.15%	H op 4000																																																	
VV std 0.08409	VV AE 0.03696	KWh/año 4227.45																																																	
A.Anual 4,946	Costo MAE 19,146	P.S.R. 3.87066																																																	
	DATOS DEL MOTOR NUEVO <table border="1"> <tr> <th>PLACA REEMPLAZO</th> <th>COSTO DEL MOTOR</th> <th>EFL. REEMPLAZO</th> </tr> <tr> <td>Volt 440 V</td> <td>MAE 3,096 \$</td> <td>EF FL 92.9</td> </tr> <tr> <td>Corr. 31 A</td> <td>Inst. 95 \$</td> <td>EF 75 93.6</td> </tr> <tr> <td>Pot. 25 HP</td> <td></td> <td>EF 50 93.3</td> </tr> <tr> <td>VEL. 1780 RPM</td> <td></td> <td>EF 25 91</td> </tr> </table>	PLACA REEMPLAZO	COSTO DEL MOTOR	EFL. REEMPLAZO	Volt 440 V	MAE 3,096 \$	EF FL 92.9	Corr. 31 A	Inst. 95 \$	EF 75 93.6	Pot. 25 HP		EF 50 93.3	VEL. 1780 RPM		EF 25 91																																			
PLACA REEMPLAZO	COSTO DEL MOTOR	EFL. REEMPLAZO																																																	
Volt 440 V	MAE 3,096 \$	EF FL 92.9																																																	
Corr. 31 A	Inst. 95 \$	EF 75 93.6																																																	
Pot. 25 HP		EF 50 93.3																																																	
VEL. 1780 RPM		EF 25 91																																																	

Area	Aplicación	TAG	Marca	Serie	DATOS DE PLACA				DATOS DE CAMPO					Reb.	
					Voltaje (V)	Corr. (A)	Pot. (HP)	Vel. (RPM)	Voltaje (V)	Corr. (A)	KW1 R1 N3 I1	KW1 R2 N3 I1	KVA		
	BATEY														0%
Batey	MOTOR GRUA CAÑERA No. 2		IEM	780001	440	124	75	885	481	111.5	52.8	12.1	54		4%
Batey	MOTOR BOMBA HIDRAULICA VOLTEADORES		SIEMENS	780003	440	31	25	1780	477	19.59	11.8	8.62	22.2		4%
Batey	MOTOR BOMBA HIDRAULICA VOLTEADORES		IEM	780005	440	31	25	1780	476.7	18.43	8.17	0.98	8.37		4%
Batey	MOTOR MESA ALIMENTADORA No. 1 L.N.		SIEMENS	780006	440	28	20	1780	483	25.49	11.8	3.39	12.3		4%

Figura 4.1: Levantamiento de Datos de Motores en Planta.

De desarrollan los cálculos necesarios, y se elabora el informe correspondiente en forma de resumen general

Informe de Sustitución de Motores



Costo por KW \$1.12

Fecha: 10/02/2008

#	Aplicación	TAG	HP	RPM	FC	Ahorro KWH/AÑO	Ahorro \$	C. MOTOR \$	PRS AÑOS
Batey (4000)									
2	MOTOR GRUA CAÑERA No. 2	0	75	885	1.044	21,613	\$24,206	\$63,612	2.52
3	MOTOR BOMBA HIDRAULICA VO	0	25	1780	0.411	4,227	\$4,735	\$19,146	3.87
4	MOTOR BOMBA HIDRAULICA VO	0	25	1780	0.459	4,523	\$5,066	\$19,146	3.62
5	MOTOR MESA ALIMENTADORA N	0	20	1780	0.885	6,341	\$7,101	\$8,112	1.09
6	MOTOR MESA ALIMENTADORA N	0	20	1780	0.523	3,270	\$3,662	\$13,170	3.44
7	MOTOR MESA ALIMENTADORA N	0	30	1750	0.576	5,267	\$5,899	\$31,278	5.07
8	MOTOR MESA ALIMENTADORA N	0	30	1750	0.478	4,160	\$4,659	\$11,544	2.37
9	MOTOR NIVELADOR MESA DE C	0	60	1770	0.317	6,189	\$6,932	\$15,942	2.20
10	MOTOR NIVELADOR MESA DE C	0	75	885	0.450	9,442	\$10,575	\$19,284	1.75
11	MOTOR NIVELADOR CONDUCTO	0	75	1780	0.310	7,848	\$8,790	\$33,900	3.69
12	MOTOR RODIILLO ALIMENTADO	0	15	1185	0.150	1,178	\$1,320	\$10,890	7.90
13	MOTOR BANDA RAPIDA	0	25	1780	0.687	5,372	\$6,017	\$19,146	3.05
14	MOTOR BBA. LAVADO DE CAÑA	0	200	1185	0.696	27,796	\$31,132	\$78,696	2.42
Molinos (4000 h Op.)									
16	MOTOR CONDUCTOR DONELLY	0	25	1767	0.640	4,743	\$5,312	\$9,810	1.77
17	MOTOR CONDUCTOR DONELLY	0	30	1782	0.416	3,627	\$4,063	\$11,544	2.72

Figura 4.2: Vista parcial del Resumen del Informe.

En la misma planilla de Excel se dispone para los cálculos de dos bases de datos: una para el levantamiento de datos acerca de las eficiencias de motores de

eficiencia normal con carcasa y sin ella, para distintas potencias y velocidades, así como los datos correspondientes para motores de alta eficiencia. Las mismas están basadas en los promedios de “Motormaster Data” para motores de 1,800 rpm instalados en EE.UU. y en funcionamiento al momento de realizar la encuesta, para los motores de eficiencia estándar, y en los promedios de los datos suministrados por los fabricantes de las unidades vendidas de motores de alta eficiencia.

MMaster DB

Motor Size hp LF	Existing Motor Efficiency 100.0%	Existing Motor Efficiency 75.0%	Existing Motor Efficiency 50.0%	Existing Motor Efficiency 25.0%	Proposed Motor Efficiency 100.0%	Proposed Motor Efficiency 75.0%	Proposed Motor Efficiency 50.0%	Proposed Motor Efficiency 25.0%							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Aux de Búsqueda	HP	Speed	Enclosure	Eff100l	Eff75l	Eff50l	Eff25l	Eff100h	Eff75h	Eff50h	Eff25h	Priceh	Priceel	Installation_Cost	
19000	1	900	0	69.4	68.6	62.6	48	74	72.1	71.5	60.6	390	339	50	
19001	1	900	1	68.2	66.4	60.7	46.1	75.9	76.6	72.4	60.6	550	425	50	
112000	1	1200	0	74.9	72	67.1	54.2	81.3	80.4	76.1	64	271	241	50	
112001	1	1200	1	74.1	70.3	66.1	46	82.5	81.6	78.1	67.6	356	271	50	
118000	1	1800	0	77.4	76.1	70.8	60.5	83.5	83	80	74.1	211	187	50	
118001	1	1800	1	77.6	75.8	69.5	57.8	86.5	85.7	83.2	80	286	217	50	
136000	1	3600	0	77.6	75.8	69.5	57.8	77.4	76.7	73	73	228	189	50	
136001	1	3600	1	77.6	75.8	69.5	57.8	77.1	77.5	71.1	73	252	210	50	
1.59000	1.5	900	0	70.9	70.5	65.5	52.6	77	75.8	71.3	59.2	475	411	55	
1.59001	1.5	900	1	72.1	71.4	67.5	55.7	79.9	80	76.7	76.2	618	514	55	
1.512000	1.5	1200	0	77.9	76.7	71.4	57.7	85.4	85.9	83.6	74.1	298	265	55	
1.512001	1.5	1200	1	77.9	76.6	72.9	58.7	86.5	85.8	83.3	77.1	348	290	55	
1.518000	1.5	1800	0	79.4	78.3	74.4	61.9	85.2	84.7	82.5	73.3	230	205	55	
1.518001	1.5	1800	1	79.2	78.2	74.9	61.7	86.4	86.3	84	76.3	315	245	55	
1.536000	1.5	3600	0	77.4	77.8	74.5	64	83.9	82	78	69.7	230	205	55	
1.536001	1.5	3600	1	75.6	74.3	71.3	64	84	83.5	80.4	72.9	341	250	55	
29000	2	900	0	76.8	76.4	73.5	61.2	86	86.2	84.2	77.4	638	541	60	
29001	2	900	1	76.2	76.2	73.3	60	85.4	85.2	82.4	75	819	688	60	
212000	2	1200	0	79.7	78.1	74.3	64	86.9	87.5	85.3	77.4	383	271	60	
212001	2	1200	1	78.9	78.2	75	63.2	87.5	87.5	85.3	78.5	383	320	60	
218000	2	1800	0	80.3	79.8	76.3	65.2	84.8	85.1	83	74.3	254	226	60	
218001	2	1800	1	80.8	80.2	77.5	68.8	86.5	86.9	84.9	76.5	331	262	60	
236000	2	3600	0	79.4	79	77	69.5	85.4	85.5	84	74.5	271	241	60	
236001	2	3600	1	78.6	79.3	75.5	72	86.5	86.9	85.5	75.1	341	264	60	
39000	3	900	0	79	78.9	76.8	66.7	86.5	86.7	84.9	76.7	797	675	65	

Figura 4.3: Vista parcial de la tabla correspondiente a eficiencias y costos de motores de eficiencia estándar y motores de alta eficiencia.

En cuanto al estudio de los motores propuesto en forma más detalla, se verá más adelante, cuando se analice el funcionamiento de la implementación en MS Access de la selección de motores disponibles en plaza para la sustitución.

4.4.2 Obtención de Informes Personalizados para cada Motor de cada Planta.

Microsoft Word

Una vez que se ha ingresado los datos correspondientes a un motor en Excel, ya es posible ver el detalle del cálculo para ese motor en particular por medio de MS Word. El documento ha sido diseñado de tal modo que se adecue a los

requerimientos exigidos por los organismos nacionales cuando estudien la solicitud de inclusión en programas de sustitución de motores.

Se presenta la planilla de cálculo desarrollada. En ella se establece en primer término una interfaz amigable de levantamiento de datos de los motores industriales estudiados.

ANÁLISIS DE MOTOR TIPO.

Con el objeto de presentar la metodología empleada, la cual es proporcionada por el FIDE, se presentará un caso de los motores analizados, para ello tomaremos el motor de **Bomba de lodos** con TAG BAR-1603, el cual se tienen los siguientes datos:

DATOS DE PLACA			DATOS MEDIDOS		
Potencia	200	HP	Potencia	142.44	kW
Velocidad	1200	RPM	Factor de potencia	87.4%	
Voltaje	440	V	Voltaje	448	V
Corriente	240	A	Corriente	210	A
Marca	US Motors				

Considerando que el motor es de eficiencia *Standard Efficiency* y una carcasa *Open Drip Proof*, se obtiene un 92.0% de eficiencia. Con estos datos obtenemos el factor de carga (Fc):

$$F_c = \frac{(Pot_{std\ elec})(\eta)}{(Pot_{placa})(0.746)} = \frac{(142.44)(92.0\%)}{(200)(0.746)} = 0.88$$

De acuerdo a este factor de carga y considerando las eficiencias de los motores en función a su carga, tenemos:

POTENCIA (HP)	CARGA			
	100 %	75 %	50 %	25 %
200	92.5	92	90.5	81.7

Por lo anterior, la eficiencia se interpola y nos da 93.25 %

Considerando que los motores la principal causa de daño es la temperatura que puede ser causada tanto por cuestiones externas, como por exceso de corriente que genera una gran cantidad de calor ($W=I^2R$) y daña tanto el aislamiento como afecta las características eléctricas del laminado, aunado a eso, la calidad del embobinado también afecta las características de diseño del equipo, por lo que para este caso, se considera como pérdidas por reembobinado un 4 %, aunado a esto, de acuerdo a las características de diseño comparadas con las de operación con respecto al Voltaje en este caso tenemos:

Variación de voltaje:

$$VV_{std} = \frac{V_{std\ medido}}{V_{std\ placa}} - 1 = \frac{497.3}{440} - 1 = 0.13$$

Factor de ajuste por diferencia de tensión:

$$FA_{wv} = (VV_{std})[0.07-1.334(VV_{std})]-0.0009 = -0.014$$

Figura 4.4: Vista parcial del Informe obtenido para un motor en particular.

Cabe señalar que la sistematización obtenida por este medio es de una eficiencia bastante elevada, teniendo en cuenta que este informe deberá presentarse para cada motor de la planta. Además se minimiza notablemente la posibilidad de cometer errores a la hora de elaborar los cálculos necesarios, pues se automatizaron ya en forma elegante en la hoja de cálculo de Excel.

4.4.3 Mantenimiento de la Base de Datos de Motores en Plaza. Microsoft Acces.

Los cálculos anteriores se han basado exclusivamente en los promedios para motores de alta eficiencia. Dado que dentro de los alcances de esta tesis está llegar hasta el nivel de toma de decisiones, habrá que tener presente el empleo de motores reales a la hora de optar por una decisión.

Para ello se repiten los cálculos anteriormete descriptos, pero ahora empleando los datos recabados de EuroDEEM Internacional, donde se dispone de Motores de los Estados Unidos de Norteamérica (60 Hz) con Motores NEMA Premium™.

The screenshot shows a Microsoft Access form titled 'Motores'. The form has a tabbed interface with 'Main' selected. Below the tabs, there is a title 'Utilidad para la Administración de la Base de Datos de Motores.' followed by a horizontal line. The form contains two columns of input fields for motor data. The first column includes fields for idMotor (17395), idMotorType (1), HP (1), RPM (1800), idEnclosureT (0), kW (0), idManufactur (16), Model (T481), Catalog (D1E2D), Frame (143T), NEMADesign (B), and Insulation (F). The second column includes fields for Weight (30), WindingResi (0), UFrame (No), VerticalShaft (No), CFace (No), idDefinitePur (0), idFeature (0), idVoltage (5), RPM_FL (1740), and ServiceFact (1.15).

Field Name	Value
idMotor	17395
idMotorType	1
HP	1
RPM	1800
idEnclosureT	0
kW	0
idManufactur	16
Model	T481
Catalog	D1E2D
Frame	143T
NEMADesign	B
Insulation	F
Weight	30
WindingResi	0
UFrame	No
VerticalShaft	No
CFace	No
idDefinitePur	0
idFeature	0
idVoltage	5
RPM_FL	1740
ServiceFact	1.15

Figura 4.5: Adeministración de la base de Datos de Motores disponibles en plaza por medio de Microsoft Access.

Este elemento es para poder seleccionar de entre casi 20.000 motores distintos el que más se adecue a las necesidades de la planta. Esta selección se lleva a cabo por medio de las herramientas de acces de búsqueda y filtrado de registros:

Motors: Filtro por formulario

Utilidad para la Administración de la Base de Datos de Motores.

idMotor		Weight	<input type="text"/>
idMotorType	<input type="text"/>	WindingResi	<input type="text"/>
HP	150	UFrame	<input type="text"/>
RPM	1800	VerticalShaft	<input type="text"/>
idEnclosureT	<input type="text"/>	CFace	<input type="text"/>
kW	<input type="text"/>	idDefinitePur	<input type="text"/>
idManufactur	<input type="text"/>	idFeature	<input type="text"/>
Model	<input type="text"/>	idVoltage	<input type="text"/>
Catalog	<input type="text"/>	RPM_FL	<input type="text"/>
Frame	<input type="text"/>	ServiceFact	<input type="text"/>
NEMADesign	<input type="text"/>		
Insulation	<input type="text"/>		

Buscar Or

Figura 4.6: Vista parcial del Informe obtenido para un motor en particular.

Estos datos pueden ser analizados por medio de la misma planilla de Microsoft Excel desarrollada. Para tal fin, se levantan los datos mediante una consulta SQL y se implementa el cálculo necesario en la misma planilla anteriormente descrita

Selección de Motor de Reemplazo



Selección de Motor		DATOS DEL MOTOR EXISTENTE					
Motor No.	3	PLACA EXISTENTE		DATOS DE CAMPO		EFI. EXISTENTE	
BATEY		Volt	440 V	Volt	477 V	EF FL	89.1
MOTOR GRUA CAÑERA No. 2		Corr.	31 A	Corr.	19.59 A	EF 75	89.8
MOTOR BOMBA HIDRAULICA		Pot.	25 HP	KW1	11.8	EF 50	87.1
MOTOR BOMBA HIDRAULICA		VEL.	1780 RPM	KW2	8.62	EF 25	83.4
MOTOR MESA ALIMENTADOR				KVA	22.2		
MOTOR MESA ALIMENTADOR							
Batey		DATOS DEL MOTOR NUEVO					
MOTOR BOMBA HIDRAULICA		PLACA REEMPLAZO		COSTO DEL MOTOR		EFI. REEMPLAZO	
0		Volt	440 V	MAE	3,096 \$	EF FL	92.9
SIEMENS		Corr.	31 A	Inst.	95 \$	EF 75	93.6
780003		Pot.	25 HP			EF 50	93.3
		VEL.	1780 RPM			EF 25	91

Figura 4.7: Hoja de cálculo para Motor de Catálogo con los ahorros correspondientes a la selección efectuada.

CONCLUSIONES

La metodología de trabajo comienza, desde el punto de vista práctico, con el levantamiento de datos. Para ello se disponen de modelos perfectamente establecidos en publicaciones de la IEEE, de normas ISO y de Normas Oficiales mexicanas, publicadas en el diario oficial de la Federación. Sin embargo el principal punto de racionamiento con el objeto de estudio (nuestras unidades de análisis) no lo constituyen las máquinas en sí, sino precisamente quienes están involucrados en su manejo diario, cosa que ninguno de los protocolos nombrados en esta tesis refleja con claridad.

Es en el factor humano en donde estas máquinas consiguen a la larga un correcto desempeño; y de él es que depende el ahorro de energía que pueda obtenerse o no en el reemplazo de motores propuesto.

Es por este motivo que el correcto relacionamiento con el personal directamente encargado de poner las plantas en funcionamiento constituye ya de por sí un objetivo con trascendencia propia, en opinión del maestrante.

AUXILIAR DE CÁLCULOS



DATOS DEL MOTOR EXISTENTE					Selección de Motor		DATOS DEL MOTOR EXISTENTE					
PLACA EXISTENTE		DATOS DE CAMPO		EFI. EXISTENTE		Motor No.	PLACA EXISTENTE		DATOS DE CAMPO		EFI. EXISTENTE	
Volt	440 V	Volt	477 V	75	89.8	3	Volt	440 V	Volt	477 V	EF FL	89.1
Corr.	31 A	Corr.	19.59 A	50	87.1		Corr.	31 A	Corr.	19.59 A	EF 75	89.8
Pot.	25 HP	KW1	11.8 KW				Pot.	25 HP	KW1	11.8	EF 50	87.1
VEL.	1780 RPM	KW2	8.62	FL	0.891		VEL.	1780 RPM	KW2	8.62	EF 25	83.4
		KVA	22.2						KVA	22.2		

DATOS DEL MOTOR NUEVO					Batey		DATOS DEL MOTOR NUEVO					
PLACA REEMPLAZO		COSTO DEL MOTOR		EFI. REEMPLAZO		MOTOR BOMBA HIDRAULICA	PLACA REEMPLAZO		COSTO DEL MOTOR		EFI. REEMPLAZO	
Volt	440 V	MAE	3,096 \$	75	93.6	0	Volt	440 V	MAE	3,096 \$	EF FL	92.9
Corr.	31 A	Inst.	95 \$	50	93.3	SIEMENS	Corr.	31 A	Inst.	95 \$	EF 75	93.6
Pot.	25 HP					780003	Pot.	25 HP			EF 50	93.3
VEL.	1780 RPM			FL			VEL.	1780 RPM			EF 25	91

CÁLCULOS					Datos de Operación					CÁLCULOS				
KVA	16.185 KW	Fadt	-0.0044	Fadt	-0.0044	Perd. Reb.	0.04	KVA	16.185	Fadt	-0.0044	Fadt	-0.0001	
FP	0.53106 KW	DT	0	DT	0	Hr. Operación	4000	FP	0.53106	DT	0	DT	0	
KW1	8.6	FADT	1			C. Por Demanda	122.68	KW1	8.6	FADT	1			
XXX	0.89706	Ef ajus	0.81693	Ef ajus	92.71%	C. Cons. Pond	0.802	XXX	0.89706	Ef ajus	0.81693	Ef ajus	93.14%	
Ef. Std.	89.10%	P std me	7.02557	P dem AE	7.57822	FA Precios:	0.5	Ef. Std.	89.10%	P std me	7.02557	P dem AE	7.54314	
		HP	9.41765	A dem	1.02178	Gravámenes:	1.2			HP	9.41765	A dem	1.05686	
F.C.	0.41086	FC AE	0.37671	Ahorro	11.9%	Costo por KW	1.12	F.C.	0.41086	FC AE	0.37671	Ahorro	12.3%	
Ef std	86.14%	EF AE	93.15%	H op	4000	Cotización US\$:	10	Ef std	86.14%	EF AE	93.15%	H op	4000	
VV std	0.08409	VV AE	0.08409	KWh/año	4087.12			VV std	0.08409	VV AE	0.03696	KWh/año	4227.45	
A.Anual	4,782	Costo MAE	19,146	P.S.R.	4.00356			A.Anual	4,946	Costo MAE	19,146	P.S.R.	3.87066	

Figura 4.8: Hoja empleada como auxiliar para los cálculos de la eficiencia del motor existente.

Es así que se considera que junto con las medidas deben ir la calificación del operador responsable, la motivación que pueda tener o recibir ante una propuesta de cambio, así como también las condiciones en las que la máquina se desempeña, tales como temperatura, niveles de partículas y micro partículas atmosféricas y calidad de asientos y bases del motor.

Para el cálculo de la eficiencia del motor simplemente se emplearán las lecturas, lo cual queda reflejado en la planilla correspondiente, pero es en la planilla de la selección del motor sustituto en donde todas estas consideraciones adquieren realización práctica. Será en base factores tanto técnicos como humanos en los que se basará la decisión que hemos de tomar acerca de qué motor proponer en cada caso particular.

Sin embargo en este proceso no es donde reside la hipótesis que he propuesto contrastar.

Una vez que se hayan evaluado las eficiencias de los motores existentes y seleccionado los motores adecuados para su reemplazo, disponemos los cálculos en una hoja de trabajo que permita apreciar la globalidad de los cálculos, como forma además de detectar incoherencias o posibles yerros.

Desde esta hoja pueden generarse automáticamente informes personalizados para cada uno de los motores en formato de documento de Microsoft Word, el cual se atiene a las disposiciones que en la materia exige el FIDE y pueden ser presentados ante este organismos u otras instituciones tanto crediticias como técnicas para cumplir con los trámites de rigor. Siendo que hay que incluir los membretes y logos de la empresa solicitante, y el elevado número de tales informes es una herramienta muy poderosa la que se diseñó, permitiendo que sea una sola persona la que pueda elaborar tanta cantidad de papelería.

Selección de Motor de Reemplazo



Selección de Motor		DATOS DEL MOTOR EXISTENTE					
Motor No.	3	PLACA EXISTENTE		DATOS DE CAMPO		EFI. EXISTENTE	
BATEY		Volt	440 V	Volt	477 V	EF FL	89.1
MOTOR GRUA CAÑERA No. 2		Corr.	31 A	Corr.	19.59 A	EF 75	89.8
MOTOR BOMBA HIDRAULICA		Pot.	25 HP	KW1	11.8	EF 50	87.1
MOTOR BOMBA HIDRAULICA		VEL.	1780 RPM	KW2	8.62	EF 25	83.4
MOTOR MESA ALIMENTADOR/				KVA	22.2		
MOTOR MESA ALIMENTADOR/							
Batey		DATOS DEL MOTOR NUEVO					
MOTOR BOMBA HIDRAULICA		PLACA REEMPLAZO		COSTO DEL MOTOR		EFI. REEMPLAZO	
0		Volt	440 V	MAE	3,096 \$	EF FL	92.9
SIEMENS		Corr.	31 A	Inst.	95 \$	EF 75	93.6
780003		Pot.	25 HP			EF 50	93.3
		VEL.	1780 RPM			EF 25	91
Datos de Operación		CÁLCULOS					
Perd. Reb.	0.04	KVA	16.185	Fadt	-0.0044	Fadt	-0.0001
Hr. Operación	6300	FP	0.53106	DT	0	DT	0
C. Por Demanda	122.68	KW1	8.6	FADT	1	Ef ajus	93.14%
C. Cons. Pond	0.802	XXX	0.89706	Ef ajus	0.81693	P dem AE	7.54314
FA Precios:	0.5	Ef. Std.	89.10%	P std me	7.02557	A dem	1.05686
Gravámenes:	1.2	0	0	HP	9.41765	Ahorro	12.3%
Costo por KW	1.12	F.C.	0.41086	FC AE	0.37671	H op	4000
Cotización U\$S:	10	Ef std	86.14%	Ef AE	93.15%	KWh/año	4227.45
		VV std	0.08409	VV AE	0.03696		
		A.Annual	4,946	Costo MAE	19,146	P.S.R.	3.87066
Selección de Motor		DATOS DEL CATÁLOGO DE FABRICANTE DEL MOTOR NUEVO					
HP	7.5	Weight	B	Eff_FL	1765	Torque_FL	70.6
RPM	1800	WindingR	F	Eff_75	1.15	Torque_BD	49.3
Tipo	NEMA Design B	UFrame	90	Eff_50	91	Torque_LR	22.3
Carcasa	ODP	VIShaft	0	Eff_25	92.2	Amps_Idle	65.116
Fabrica	US Motors	CFace	0			Amps_FL	49.952
		Purpose	0			Amps_LR	3.5
		idFeature	0	PF_FL	91.6	ListPrice	9.3
		idVoltage	0	PF_75	87.5	Warranty	60
		RPM_FL	0	PF_50	83.2		
		ServiceFact	6	PF_25	79.3		
19 MOTORES							
Model	T563						
	R341						
	G38025						
	S501						
	S475						
	BC04						
Catalog	16						
Frame	G38025						
NEMA	D7V2B						
Aisla	213T						
CÁLCULOS PARA EL MOTOR NUEVO SEGÚN CATÁLOGO							
Área despejada para elaborar cálculos de ajuste con los datos a la vista de: <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> MOTOR EXISTENTE <input type="radio"/> MOTOR EFICIENTE PROMEDIO <input type="radio"/> MOTOR EFICIENTE DE CATÁLOGO 							

Figura 4.9: Hoja empleada como auxiliar para los cálculos de la eficiencia y la selección del motor de reemplazo.

CONCLUSIONES

Considerando un motor de Alta Eficiencia de 150 H.P., 460 V, nuevo, el cual tiene una eficiencia (η) de 95.6 % de acuerdo a datos proporcionados por US Motors en motores de Alta Eficiencia.

POTENCIA (HP)	CARGA			
	100 %	75 %	50 %	25 %
150	95.6	95.4	94.7	93.1

De la misma manera que el motor de Eficiencia Estándar, se realiza el ajuste de eficiencia por Variación de Voltaje, teniendo:

Variación de voltaje:

$$VV_{AE} = \frac{V_{std\ medido}}{V_{AE\ placa}} - 1 = \frac{497.3}{460} - 1 = 0.08$$

Factor de ajuste por diferencia de tensión:

$$FA_{wv} = (VV_{AE})[0.07 - 1.334(VV_{AE})] - 0.0009 = -0.004$$

Por lo tanto, para este caso la eficiencia considerando las pérdidas será:

$$\eta_{AE\ ajustada} = 0.956 - 0.004 = 0.952$$

Figura 4.10: Detalle parcial de los documentos emitidos en forma automática por medio del software desarrollado.

Es en este punto donde finalmente considera el maestrante que están dadas las condiciones que le permitan contrastar su hipótesis de trabajo, ya sea para aceptarla o rechazarla. Puesto que serán los mandos superiores de las empresas las encargadas de tomar en definitiva la resolución, sí está en manos de quien presenta esta tesis tomar una resolución en cuanto a los actos que se recomiendan, y que se desprendan de los estudios llevados a cabo.

Es así que en el espíritu de legarles a los niños de hoy un mundo menos dañado, las consideraciones medio ambientales adquieren una singular importancia a la hora de tomar una resolución.

Hablamos de “daño” global, puesto que la frase “legar un mundo mejor” hoy por hoy es un imposible. Heredarán nuestros hijos un planeta en condiciones realmente lamentables. Esto es un hecho irreversible, y a lo sumo habrá que prepararlos intelectual y emocionalmente para que puedan sobrevivir y prosperar en lo que le dejamos. El calentamiento global, el cambio climático que trae aparejado junto con las consecuencias de sequías más intensas y prolongadas, inundaciones y temporales más devastadores llegaron para quedarse.

Pero eso precisamente refuerza la voluntad de impedir que la destrucción mundial avance aún más, haciendo el aporte a no aumentar el daño ya hecho.

La importancia de los motores eléctricos en el consumo energético mundial, y mexicano en particular, ya han sido expuestos. Habrá que analizar en el caso de las instalaciones que se han sometido a estudio qué peso relativo pueda tener; sin embargo no constituyen de por sí un argumento fuerte ante los responsables de las plantas.

En cambio será analizando cuántas emisiones nocivas le estaremos amputando a la galopante contaminación atmosférica en donde puede comenzarse a evaluar la pertinencia de nuestra hipótesis.

Es así que por cada gigawatt-hora de ahorro energético se estarán evitando emisiones de CO₂ (principal gas responsable del efecto invernadero) del orden de las 750 toneladas, así como 150 toneladas compuestos de la familia NO_x⁸⁰.

Asumimos que los responsables de las plantas estudiadas comparten estas y otras preocupaciones. Así que resta por dilucidar la viabilidad tanto económica como técnica y logística de la propuesta.

No bastará con señalar con el dedo los motores de mayor eficiencia y más alta tecnología para que por sus cualidades técnicas, esbelto diseño y altísimas prestaciones, sean los preferidos de los ingenieros a cargo de mantener niveles de producción y continuidad de tareas agobiantes.

Ante todo se impone la consideración de los factores de disponibilidad en el mercado, plazos de entrega, calidad del servicio técnico de respaldo y suministro de repuestos. Es principalmente por estos motivos que el parque de motores de la región se encuentra en tan deficiente estado; pues ante rotura o falla de un motor, su rebobinado se efectúa en plazos sumamente perentorios, con los cuales resulta muy difícil competir.

Es así que resulta inviable una propuesta del tipo “esperar a que se rompa y compramos uno nuevo”. Y es por esta razón también por la cual es tan trascendente

⁸⁰ Fuente: OLADE. www.olade.org

desde el punto de vista práctico el presentar la propuesta como un todo, ya que de lo contrario carecería de viabilidad logística.

La viabilidad técnica de la propuesta pasa por una correcta capacitación del personal obrero en contacto directo con las máquinas y responsables de su operación y mantenimiento, objetivo que trae acarreado enormes beneficios sociales y económicos al conjunto de la región.

Finalmente, para el análisis económico habrá que tomar en cuenta muchas de las variables ya presentadas, y además otras nuevas. Por ejemplo, entre las ya mencionadas hay que acotar que difícilmente todos los motores de reemplazo puedan ser de la misma marca, así que el trabajo de evaluar el “service” se incrementa. Tampoco serán iguales los plazos de entrega y otros imponderables de cada motor en particular, como puede ser tener que realizar nuevos anclajes o nueva cimentación.

Entre las nuevas cabe resaltar la disponibilidad de capital de inversión de la empresa. Sus contadores analizarán detalladamente los periodos de retorno y montos globales de ahorro. Pero estos de nada sirven si no se cuenta con el crédito necesario

Es por este motivo que se ha diseñado la hoja de trabajo final con la posibilidad de incluir o descartar determinados motores. Habrá que contrastar para cada motor en particular cual ha sido su desempeño histórico, la sensibilidad para la empresa de la tarea que desempeña, y contrastar eso con su inclusión o no en el plan de recambio a proponer.

Es aquí donde queda reflejada la posición del autor en el sentido de que este trabajo no se refiere a ningún motor en particular, sino precisamente al colectivo de ellos. Algunos de ellos seguramente no han llegado al final de sus días útiles, y no siempre su eficiencia será la principal ventaja que exhiban para justificar su durabilidad.

Informe de Sustitución de Motores



Costo por KW \$1.12

Fecha: 10/02/2008

AHORROS GLOBALES						911,103	\$1,020,435	\$2,304,414		
Batey						\$107,227	\$120,095	\$343,866		
Molinos						\$58,911	\$65,980	\$152,472		
Caldera						\$82,566	\$92,474	\$287,262		
Clarificación						\$142,288	\$159,363	\$386,214		
Evaporación						\$36,306	\$40,663	\$136,314		
Cristalización						\$30,320	\$33,958	\$73,974		
Centrifugas						\$34,279	\$38,393	\$98,880		
Refinado						\$1,152	\$1,290	\$11,544		
Secado						\$33,823	\$37,882	\$116,382		
Bombeo						\$384,231	\$430,338	\$697,506		
\$1,020,435										
#	Aplicación	TAG	HP	RPM	FC	Ahorro KWH/AÑO	Ahorro \$	C. MOTOR \$	PRS AÑOS	
Batey (4000)										
2	MOTOR GRUA CAÑERA No. 2	0	75	885	1.044	21,613	\$24,206	\$63,612	2.52	
3	MOTOR BOMBA HIDRAULICA VO	0	25	1780	0.411	4,227	\$4,735	\$19,146	3.87	
4	MOTOR BOMBA HIDRAULICA VO	0	25	1780	0.459	4,523	\$5,066	\$19,146	3.62	
5	MOTOR MESA ALIMENTADORA N	0	20	1780	0.885	6,341	\$7,101	\$8,112	1.09	
6	MOTOR MESA ALIMENTADORA N	0	20	1780	0.523	3,270	\$3,662	\$13,170	3.44	
7	MOTOR MESA ALIMENTADORA N	0	30	1750	0.576	5,267	\$5,899	\$31,278	5.07	
8	MOTOR MESA ALIMENTADORA N	0	30	1750	0.478	4,160	\$4,659	\$11,544	2.37	
9	MOTOR NIVELADOR MESA DE C	0	60	1770	0.317	6,189	\$6,932	\$15,942	2.20	
10	MOTOR NIVELADOR MESA DE C	0	75	885	0.450	9,442	\$10,575	\$19,284	1.75	
11	MOTOR NIVELADOR CONDUCTO	0	75	1780	0.310	7,848	\$8,790	\$33,900	3.69	
12	MOTOR RODIILLO ALIMENTADO	0	15	1185	0.150	1,178	\$1,320	\$10,890	7.90	
13	MOTOR BANDA RAPIDA	0	25	1780	0.687	5,372	\$6,017	\$19,146	3.05	
14	MOTOR BBA. LAVADO DE CAÑA	0	200	1185	0.696	27,796	\$31,132	\$78,696	2.42	
Molinos (4000 h Op.)										
16	MOTOR CONDUCTOR DONELLY	0	25	1767	0.640	4,743	\$5,312	\$9,810	1.77	
17	MOTOR CONDUCTOR DONELLY	0	30	1782	0.416	3,627	\$4,063	\$11,544	2.72	
18	MOTOR CONDUCTOR DONELLY	0	30	1782	0.505	4,372	\$4,897	\$11,544	2.26	

Figura 4.11: Detalle de la hoja de cálculo propuesta para la contrastación de la hipótesis.

La selección de los motores será la etapa donde la hipótesis del autor de este trabajo será puesta a prueba, ateniéndose tanto a los réditos económicos en cuanto a la ganancia que de ella obtendrá la empresa, así como también al ajuste a la logística propia del ámbito regional, al aspecto humano del personal implicado en su manejo, y finalmente a las consecuencias favorables referentes a las características medioambientales que se consideren dignas para la supervivencia y normal desarrollo de nuestros hijos.

No creemos conveniente que aquellos motores que sean confirmados en sus puestos no figuren en lo que representa la conclusión del estudio. No sólo es necesario tenerlos presentes a la hora de su calificación sino que será necesario incluirlos en el siguiente paso, la evaluación de las mejores realizadas.

¿Pueden la tecnología y los avances científicos auxiliarnos en nuestra labor? Puesto que no es precisamente a hachazos que se están destruyendo las pluviselvas ecuatoriales, por citar un ejemplo, sino con maquinaria que soporta rigurosísimas condiciones de trabajo y se desempeña con los estándares más altos observables de rendimiento. ¿La amenaza de la autodestrucción de la civilización no provenía de las guerras, tan repudiadas en el corazón de los honestos, sino de provocar el colapso de los ecosistemas? No lo sabemos, pero sí recordamos lo que respondió Einstein cuando fue interrogado acerca de cómo iba a ser la tercera guerra mundial. Afirmó que la tercera no sabía, pero que con toda certeza, la cuarta sería con palos y piedras.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía específica

1. Amin, H. "Contribution to Iron-Loss Evaluation in Electrical Machines", European Transactions on Electrical Power Engineering, vol. 5, no. 5, pp. 325-32, Septiembre 1995.
2. Andersen, H.R., Rasmussen, C.B., Ritchie, E., Pedersen, J.K. "Efficiency Comparison of Electrical Motors for Energy Optimized Variable Speed Low Power and Low Cost Household Equipment", European Power Electronics, EPE'95, vol. 3, pp. 3381-3386, Sevilla, España, 19-21 Septiembre 1995.
3. Autores Varios, "Evaluación del Progreso del Programa de Incentivos a Motores", sitio web del FIDE.
4. Autores Varios. "A.D. Little Report", Administración Federal de la Energía de los Estados Unidos.
5. Autores Varios. "Material de Apoyo al Curso Investigación Educativa", Instituto de Estudios Universitarios. Maestría en Ciencias a la Educación. 2006
6. Autores varios, "Semiconductores de Potencia", SEMIKRON: Semikron International, Nuremberg, 1990.
7. Autores varios, "World Energy Consumption; Projections for the Year 2000 through 2010", IEEE Power Engineering Review, vol. 15, no. 12, pág. 10, Diciembre 1995.
8. Blaschke, F. "The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed-Loop Control System for Rotating Field Machines", Siemens Review, vol. 39, no. 5, pp. 217-220, Mayo 1972.
9. Bodson, J.M. "Digital Control Improves Variable Speed Drives", EPE Journal, vol. 2, no. 4, pp. 243-248, Diciembre 1992.

10. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, M. Pastorelli, "Influence of the Inverter Characteristics on the Iron Losses in PWM Inverter-Fed Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 5, pp. 1190-1194, Septiembre /Octubre 1996.
11. Bonnet, A.H. "An Update on AC Induction Motor Efficiency", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 5, pp. 1362-1372, Septiembre/Octubre 1994.
12. Bonnet, A.H., "Regulatory Impact on the Application of AC Induction Motors", IEEE Industry Applications Magazine, vol. 2, no. 2, pp. 4-15, Marzo/Abril 1996.
13. Bose, B.K. "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, Nueva Jersey, 1986.
14. Bose, B.K. "Scalar Decoupled Control of Induction Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 20, no. 1, pp. 216-225, Enero/Febrero 1984.
15. Bose, B.K. "Special Issue on Power Electronics and Motion Control", Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, pp. 1101-1328, Agosto 1994.
16. Bousbaine, W.F. Low, M. McCormick, "Novel Approach to the Measurement of Iron and Stray Losses in Induction Motors", IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 143, no. 1, pp. 78-86, Enero 1996.
17. Boys, J.T., Miles, M.J. "Empirical Thermal Model for Inverter-Driven Cage Induction Machines", IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 141, no. 6, pp. 360-372, Noviembre 1994.
18. de Buck, F.G., Gistelink, P., Backer, D. "A Simple but Reliable Loss Model for Inverter-Supplied Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 20, no. 1, pp. 190-202, Enero/Febrero 1984.

19. Casanellas, F. "Losses in PWM Inverters using IGBTs", IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 141, no. 5, pp. 235-239, Septiembre 1995.
20. Castellet, J.M. Moreno Eguilaz, "Diseño de un Control Deslizante de un Motor de CC para una Silla de Ruedas", I Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial, SAEI'94, pp. 275-278, Tarragona, España, 12-14 Septiembre 1994.
21. Cipolla Ficarra, M. "Compensación de las Variaciones de los Parámetros por Efectos Térmicos y no Lineales en el Control Electrónico de Máquinas Asíncronas empleando Algoritmos Vectoriales", Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Cataluña, 19 Noviembre 1996.
22. Consoli, A., Cerruto, E., Raciti, A., Testa, A. "Adaptive Vector Control of Induction Motor Drives based on a Neuro-Fuzzy Approach", IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'94, vol. 1, pp. 225-232, Taipei, Taiwan, 20-25 Junio 1994.
23. Dahono, P.A., Sato, Y., Kataoka, T. "Analysis of Conduction Losses in Inverters", IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 142, no. 4, pp. 225-232, Julio 1995.
24. Doncker, R., Novotny, D.W. "The Universal Field Oriented Controller", Conference Record IEEE-Industry Application Society Annual Meeting, pp. 450-456, Octubre 1988.
25. Doncker, R., Profumo, F., Pastorelli, M., Ferraris, P. "Comparison of Universal Field Oriented (UFO) Controllers in Different Reference Frames", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 10, no. 2, pp. 205-212, Marzo 1995.
26. Findlay, R.D., Stranges, N., MacKay, D.K. "Losses due to Rotational Flux in Three Phase Induction Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, no. 3, pp. 543-548, Septiembre 1994

27. Fitzgerald, C. Kingsley, C., Umans, S.D. "Electric Machinery", Mc Graw-Hill, EE.UU., 1990.
28. Garcia, G.O. "Controladores Eficientes para el Accionamiento de Motores de Inducción", Tesis doctoral, Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil, Marzo 1994.
29. García, G.O., Stephan, R.M., Watanabe, E.H. "Comparing the Indirect Field Oriented Control with a Scalar Method", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, no. 2, pp. 201-207, Abril 1994.
30. Hammons, T.J., Kim, C. , Jennings, J.S. , Fresco, P., Nasu, S., Baker, J. "World Energy Council 16th Congress Review", IEEE Power Engineering Review, vol. 16, no. 3, pp. 11-18, Marzo 1996.
31. Henze, M. "El Motor Integral, Un Nuevo Accionamiento Compacto de Velocidad Variable", Revista ABB, no. 4, 1996.
32. Ho, S.L. Fu, W.N. "Computation of Harmonic Stray Losses of Induction Motors using Adaptive Time Stepping Element Method together with Externally Coupled Circuits", 7th IEE International Conference on Electrical Machines and Drives, pp. 93-97, Londres, Inglaterra, Septiembre 1995.
33. Jimoh, A.A., Findlay, R.D., Poloujadoff, M. "Stray Losses in Induction Machines: Part II, Calculation and Reduction", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 104, no. 6, pp. 1506-1512, Junio 1985.
34. Kao, Y., Liu, C. "Analysis and Design of Microprocessor-based Vector-Controlled Induction Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 39, no. 1, pp. 46-54, Febrero 1992.
35. Kessel, Georgina. "Reseña de la Ponencia ante el presidente de la República Dr. Felipe Calderón en ocasión del "Foros de Consulta para la Integración del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012"", sitio web del FIDE.

36. Kolar, J.W., Ertl, H., Zach, F. C. "Influence of the Modulation Method on the Conduction and Switching Losses of a PWM Converter System", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 6, pp. 1063-1075, Noviembre/Diciembre 1991.
37. Leonhard, W. "30 Years Space Vectors, 20 Years Field Orientation, 10 Years Digital Signal Processing with Controlled AC Drives, a Review", EPE Journal, vol. 1, no. 2, pp. 89-102, 1991.
38. Leonhard, W. "Control of Electrical Drives", 2ª Edición, Springer Verlag ,Berlín, 1995.
39. Leonhard, W. "Controlled AC Drives, a Successful Transfer from Ideas to Industrial Practice", CETTI'95, Curitiba, Brasil, pp. 1-12, Septiembre 1995.
40. Levi, E. "Impact of Iron Losses on Behaviour of Vector Controlled Induction Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 6, pp. 1287-1296, Noviembre/Diciembre 1995.
41. Levi, E. Sokola, M., Boglietti, A., Pastorelli, M. "Iron Losses Identification and Detuning Evaluation in Rotor Flux Oriented Induction Machines", IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'96, pp. 1555-1561, Baveno, Italia, 24-27 Junio 1996.
42. Mendes, E., Razek, A. "A Simple Model for Core Losses and Magnetic Saturation in Induction Machines adapted for Direct Stator Flux Orientation Control", IEE International Conference on Power Electronics and Variable-Speed drives, pp. 192-197, Octubre 1994.
43. Murphy, J.M.D., Turnbull, F.G. "Power Electronic Control of AC Motors", Pergamon Press, Oxford, 1988.
44. Ortega Solís, Javier. "Caso de Eficiencia de Motores", IV taller nacional "Promoviendo un sector público energéticamente eficiente: acciones locales que mueven al país", FIDE
45. Peak, S.C., Oldenkamp, J.L. "A Study of System Losses in a Transistorized Inverter- Induction Motor Drive System", IEEE

- Transactions on Industry Applications, vol. 21, no. 1, pp. 248-258, Enero/Febrero 1985.
46. Peracaula, J. "Convertidores Alterna-Continua con Tiristores - Aplicaciones a los Accionamientos Industriales", Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 1989.
 47. Peracaula, J., Moreno Eguilaz, J.M., Cipolla, M. "Regulación de Máquinas Eléctricas", Mundo Electrónico, 25 Aniversario, no. 271, pp. 69-77, 2 Noviembre 1996.
 48. Salin, S. "Energy-Saving Drives for Fork-Lift Trucks", Power Conversion & Intelligent Motion (PCIM Europe) for Power Electronics, Drives and Motion, no. 5, pp. 308-311, Octubre 1996.
 49. Sousa, G.C.D., Bose, B.K., Cleland, J. "Loss Modeling of Converter Induction Machine System for Variable Speed Drive", Proceedings of the IECON'92, International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, vol. 1, pp. 114-120, 1992.
 50. Tiitinen, P., Pohjalainen, P., Lalu, J. "The Next Generation Motor Control Method: Direct Torque Control (DTC)", EPE Journal, vol. 5, no. 1, pp. 14-18, Marzo 1995.
 51. Trynadowski, A.M., Legowski, S. "Minimun-Loss Vector PWM Strategy for Three-Phase Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, no. 1, pp. 26-34, Enero 1994.
 52. Wishart, M.T., Harley, R.G. "Identification and Control of Induction Machines using Artificial Neural Networks", Conference Record IEEE-Industry Application Society Annual Meeting IAS'93, vol. 1, pp. 703-709, Toronto, Canadá, 2-8 Octubre 1993.
 53. Yamamura, S. "AC Motors for High-Performance Applications", Marcel Dekker, Nueva York, 1986.

Bibliografía complementaria de temas generales (No referenciada en este trabajo)

54. Berrosteguieta, J. "Introducción a los transformadores de medida". Editorial Artech.
55. Chapman, S. J. "Maquinas electricas". Editorial McGraw-Hill. Colombia. 1987.
56. Cortés Cherta, M. "Curso moderno de maquinas electricas rotativas. tomo 1: la maquina electrica en general". Editores Técnicos Asociados. Barcelona. 1970.
57. Cortés Cherta, M. "Curso moderno de maquinas electricas rotativas. tomo 2: maquinas de corriente continua". Editores Técnicos Asociados. Barcelona. 1972.
58. Cortés Cherta, M. "Curso moderno de maquinas electricas rotativas. tomo 3: maquinas de corriente alterna asincronas". Editores Técnicos Asociados. Barcelona. 1974.
59. Cortés Cherta, M. "Curso moderno de maquinas electricas rotativas. tomo 4: maquinas sincronas y motores c.a. de colector". Editores Técnicos Asociados. Barcelona. 1977.
60. Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch. y Umans, S. "Maquinas electricas". Editorial McGraw-Hill. México. 1992.
61. Fraile Mora, J. "Maquinas electricas". Editorial McGrawHill. 2003.
62. Hindmarsh, H. "Maquinas electricas y sus aplicaciones". Editorial Urmo. Bilbao. 1975.
63. Ivanov-Smolenski, A.V. "Maquinas electricas. Tomo 1". Editorial Mir. Moscú. 1984.
64. Ivanov-Smolenski, A.V. "Maquinas electricas. Tomo 2". Editorial Mir. Moscú. 1984.
65. Ivanov-Smolenski, A.V. "Maquinas electricas. Tomo 3". Editorial Mir. Moscú. 1984.

66. Kosow, I.L. "Maquinas electricas y transformadores". Editorial Reverté. Barcelona. 1980.
67. Kostenko, M. P. y Piotrovsky, L. M. "Maquinas electricas II". Editorial Mir. Moscú. 1976.
68. Kostenko, M. P. y Piotrovsky, L. M. "Maquinas electricas I". Editorial Mir. Moscú. 1979.
69. Lladonosa Giró, V. "Arranque de motores mediante contactores. Parte I: por conmutacion de polos". Editorial Marcombo. Barcelona. 1986.
70. Lladonosa Giró, V. "Arranque de motores mediante contactores. Parte II: por resistencias estatoricas". Editorial Marcombo. Barcelona. 1987.
71. Lladonosa Giró, V. "Arranque de motores mediante contactores. Parte III: por conmutacion estrella-triangulo resistencias - triangulo". Editorial Marcombo. Barcelona. 1987.
72. Lladonosa Giró, V. "Arranque de motores mediante contactores. Parte IV: por autotransformador". Editorial Marcombo. Barcelona. 1988.
73. Lladonosa Giró, V. "Arranque de motores mediante contactores. Parte V: por resistencias rotoricas". Editorial Marcombo. Barcelona. 1988.
74. Nasar, S. A. y Unnewhr, L. E. "Electromecanica y maquinas electricas". Editorial Limusa. México. 1982.
75. Nasar, S. A. "Teoría y problemas de màquinas eléctricas y electromecánicas". Editorial MacGraw Hill. 1990.
76. Ortega Gómez, Guillermo et al. "Problemas resueltos de máquinas eléctricas". Editorial Thomson. 2002.
77. Ras Oliva, E. "Transformadores de potencia, de medida y de proteccion". Editorial Marcombo. Barcelona. 1978.
78. Roldán Viloría, J. "Motores electricos. accionamiento de maquinas. 30 tipos de motores". Editorial Paraninfo. Madrid. 1992.

79. Roldán Vilorio, J. "Motores electricos. aplicacion industrial". Editorial Paraninfo. Madrid. 1992.
80. Roldán Vilorio, J. "Motores electricos. variacion de velocidad". Editorial Paraninfo. Madrid. 1993.
81. Sanjurjo Navarro, R. "Maquinas electricas". Editorial Mc-Graw-Hill. Madrid. 1989.
82. Sanz Feito, Javier. "Maquinas electricas". Editorial Prentice may. 2002. 1982.
83. Say, M. G. and Openshaw Taylor, E. "Direct current machines". Editorial Pitman. Inglaterra. 1980.
84. Say, M. G. "Alternating current machines". Editorial Pitman. Inglaterra. 1983.
85. Staff, E.E. "Circuitos magneticos y transformadores". Editorial Reverté. Argentina. 1980.
86. UNED. "Teoria general de maquinas electricas". 6 Unidades didácticas. Madrid.

Anexo I: Procedimiento de Mediciones en Motores Trifásicos

IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators

1. Overview

1.1 Scope

This standard covers instructions for conducting and reporting the more generally applicable and acceptable tests of polyphase induction motors and generators. Many of the tests described may be applied to both motors and generators, as needed, and no attempt is made to partition the test procedure into clauses and subclauses that separately apply to motors or to generators. Whenever the term *motor* is used, it is to be understood that it may be replaced by the term *generator*, if applicable. Likewise, whenever *machine* is used, it may be replaced by either *motor* or *generator*, if applicable. Since polyphase power systems are almost universally three-phase systems, the equations in this standard have been written specifically for three phases. When the test is performed on other than three-phase power, the equations shall be modified appropriately.

1.2 Purpose

Instructions for conducting and reporting the more generally applicable and acceptable tests are covered to determine the performance and characteristics of polyphase induction motors and generators. Additional tests, not specified herein, may be required to satisfy specific research or application needs. These procedures shall not be interpreted as requiring the performing of any specific test in a given transaction.

2. References

This standard shall be used in conjunction with the following standards. When the following standards are superseded by an approved revision, the latest revision shall apply.

IEEE Std 43™-2000, IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.^{1,2}

¹IEEE publications are available from the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854, USA (<http://www.ieee.org>).

²The IEEE standards or products referred to in this clause are trademarks of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Anexo I: Procedimiento de Mediciones en Motores Trifásicos

IEEE
Std 112-2004

IEEE STANDARD TEST PROCEDURE FOR

POLYPHASE INDUCTION MOTORS AND GENERATORS

IEEE
Std 112-2004

IEEE Std 118™-1978 (Reaff 1992), IEEE Standard Test Code for Resistance Measurements.

IEEE Std 119™-1974, IEEE Recommended Practice for General Principles of Temperature Measurement as Applied to Electrical Apparatus.³

IEEE Std 120™-1989 (Reaff 1997), IEEE Master Test Guide for Electrical Measurements in Power Circuits.

3. General

3.1 Power Supply

3.1.1 Selection

Because the performance of an induction machine is dependent not only upon the value of the line voltage and frequency but also on the wave shape and the balance in magnitude and phase angle of the line voltages, correct data can be obtained only by careful measurement with accurate instrumentation and by employing a suitable source of power.

3.1.2 Waveform

The power supply shall provide balanced voltages closely approaching a sinusoidal waveform. The harmonic distortion coefficient, THD, shall not exceed 0.05. The THD is defined as shown in Equation (1).

$$THD = \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2 + \dots}}{E_1} \quad (1)$$

where

E_1 is the root-mean-square value of the fundamental of the voltage wave, in volts (V),

E is the total root-mean-square value of the voltage wave, in V.

3.1.3 Voltage unbalance

The voltage unbalance shall not exceed 0.5%. The percent voltage unbalance equals 100 times the maximum voltage deviation from the average voltage divided by the average voltage.

Example: With line voltages of 220 V, 215 V, and 210 V, the average voltage is 215 V, the maximum deviation from the average is 5, and the unbalance equals $(100 \times 5)/215 = 2.3\%$.

3.1.4 Frequency

For general testing, the frequency shall be within $\pm 0.5\%$ of the value required for the test being conducted, unless otherwise specified. Any departure from the specified frequency during the test directly affects the efficiency obtained with Efficiency Test Methods A, B, and B1. When these Methods are used, the frequency shall be within $\pm 0.1\%$ of the specified test value.

³IEEE Std 119-1974 has been withdrawn; however, copies can be obtained from Global Engineering, 15 Inverness Way East, Englewood, CO 80112-5704, USA, tel. (303) 792-2181 (<http://global.ze.com>).

Rapid changes in frequency cannot be tolerated during testing because such variations affect not only the machine being tested, but also the output measuring devices. Variations in frequency during a test shall not exceed 0.33% of the average frequency.

3.2 Types of tests

3.2.1 Typical

Polyphase induction machines are normally given a routine test, but they may also be given additional tests.

For machine tests included in a typical routine test, refer to NEMA MG 1-2003 [B7]⁴ parts 12 and 20.

A typical form for reporting routine test data is shown in Annex B. A typical form for reporting additional test data is shown in Annex C.

3.2.2 Preliminary tests

The measurement of the winding resistance is commonly the first test performed. The resistance or the continuity of all windings and circuits should be measured at this time.

The ambient temperature is measured using the procedure of IEEE Std 119-1974. If the machine has embedded detectors, these may be used to confirm that the winding is at the ambient temperature.

3.2.3 Idle running tests

Running tests without load are made for the determination of core loss and windage and friction losses. Some other tests such as shaft voltage may also be performed under these conditions.

3.2.4 Tests with load

Tests with load are made for the determination of efficiency, power factor, speed, current, and temperature rise. Some of the miscellaneous tests outlined in Clause 8 are also made with load. For all tests with load, the machine shall be properly aligned and securely fastened. For readings to be used in performance determinations, the machine temperature rise shall be some value between 50% and 120% of the rated temperature rise. The usual procedure is to take readings at higher loads first and then follow with readings at lower loads.

3.2.5 Tests with rotor locked

It should be recognized that the testing of induction machines under locked-rotor conditions with polyphase power involves high mechanical stresses and high rates of heating. Therefore, it is necessary that

- The mechanical means of securing the machine and locking the rotor are of adequate strength to prevent possible injury to personnel or damage to equipment.
- The direction of rotation is established prior to the test.
- The machine is at approximately ambient temperature before the test is started.

The current and torque readings shall be taken as quickly as possible, and, to obtain representative values, the machine temperature should not exceed rated temperature rise plus 40 °C. The readings for any point shall be taken within 5 seconds after voltage is applied.

⁴The numbers in brackets correspond to those of the bibliography in Annex A.

3.2.6 Choice of tests

A complete list of tests covered by this standard is given in the table of contents. Alternate methods are described for making many of the tests suitable for different sizes and types of machines and different conditions. In some cases, the preferred method is indicated. Also see 6.2.1.

The schedule of factory and field tests that may be required on new equipment is normally specified by applicable standards or by contract specifications. The manufacturer's choice of method for factory or field tests on new equipment will govern in lieu of prior agreement or contract specification.

3.3 Standardized temperatures

3.3.1 Reference ambient temperature

The reference ambient temperature shall be 25 °C. If the ambient temperature during any performance test differs from the reference ambient, the performance determinations shall be corrected to an ambient temperature of 25 °C. The actual test temperatures shall be used in the separation of losses in the no-load test and in determining the stray-load loss by the direct method.

3.3.2 Specified temperature

The efficiency of the machine, at all loads, shall be determined based on the machine being at the specified temperature.

To accurately determine the values of some of the component losses with some efficiency test methods, it is necessary that the actual test temperatures be used in the analysis. If these test temperatures are not equal to the specified temperatures, appropriate corrections of the temperature dependent I^2R losses shall be made.

The specified temperature shall be determined by one of the following, which are listed in order of preference:

- a) The specified temperature is the measured temperature rise by resistance from a rated load temperature test plus 25°C. Rated load is the rating identified on the nameplate at a 1.0 service factor.
- b) The specified temperature is the measured temperature rise, as outlined in item a), on a duplicate machine. A duplicate machine is defined here as one of the same construction and electrical design.
- c) When the rated load temperature rise has not been measured, the specified temperature is selected from Table I based on the class of the insulation system. If the rated temperature rise is stipulated to be that of a lower class of insulation system than that used in the construction, the temperature value listed for the lower insulation class shall be used as the specified temperature.

Preference c) shall not be used in Efficiency Test Method B; only preferences a) and b) are acceptable.

3.4 Use of this standard

After the test and test method are chosen, all necessary data may be obtained by following the instructions and precautions given in the subclause describing the test. Many of these subclauses include alternate methods for obtaining the necessary data. Unless otherwise specified, the manufacturer may choose the method best suited to the facilities available. It is anticipated that the development of improved practices and new equipment, such as electronic and automatic devices, will result in new or improved methods of carrying out the intent of this test standard. New or modified methods may be used as substitutes when their results have been shown to be reliable and consistent with those obtained by the methods given in this test procedure.

Table 1—Specified temperature for efficiency calculations when the machine rated load temperature is not measured

Class of insulation system	Temperature In °C (Total temperature including 25°C reference ambient)
A	75
B	95
F	115
H	130

3.5 Precautions

CAUTION

Many of the tests described in these procedures subject the machine to thermal and/or mechanical stresses beyond normal operating limits. To minimize the risk of damage to the machine, it is recommended that all tests be performed either under the manufacturer's supervision or in accordance with the manufacturer's recommendations.

4. Measurements

4.1 Electrical

4.1.1 RMS quantities

All voltage and current measurements are root-mean-square (rms) values, unless otherwise indicated.

4.1.2 Instrument selection

Calibrated, high-accuracy instrumentation and accessory equipment shall be used. Either analog or digital instruments may be used in testing. Factors affecting accuracy, particularly with nonelectronic analog instruments, are

- a) Loading of the signal source
- b) Lead calibration
- c) Range, condition, and calibration of the instrument

Since instrument accuracy is generally expressed as a percentage of full scale, the range of the instrument chosen shall be as low as practical.

Electronic instruments are generally more versatile and have much higher input impedances than nonelectronic instruments. Higher input impedance reduces the need to make corrections for the current drawn by the instrument. However, high input impedance instruments can be more susceptible to noise.

Common sources of noise are

- Inductive or electrostatic coupling of signal leads to power systems
- Common impedance coupling or ground loops
- Inadequate common-mode rejection
- Conducted interference from the power line

Anexo I: Procedimiento de Mediciones en Motores Trifásicos

IEEE
Std 112-2004

IEEE STANDARD TEST PROCEDURE FOR

Good practice requires using shielded twisted pairs for signal leads, grounding the shield at only one point, keeping the signal cables as far away as possible from power cables, and keeping the crossings at right angles when signal and power cables do cross. All exposed metal parts of instruments should be grounded for safety.

The instruments shall bear record of calibration, within 12 months of the test, indicating limits of the error no greater than $\pm 0.5\%$ of full scale for general testing or no greater than $\pm 0.2\%$ of full scale when the test results are for use with Efficiency Test Method B. When several instruments are connected in the circuit simultaneously, additional corrections of the instrument indication may be required.

When suitable automatic data acquisition systems or high-speed recorders are available, they may be used. Further information regarding the use of instruments is given in IEEE Std 120-1989.

4.1.3 Instrument transformers

When current and potential instrument transformers are used, corrections shall be made for ratio errors in voltage and current measurements, and for ratio and phase angle errors in power measurements.

The errors of the transformers used shall not be greater than $\pm 0.5\%$ for general testing or not greater than $\pm 0.3\%$ when the test results are for use with Efficiency Test Method B. When instrument transformers and instruments for measuring voltage, current, or power are calibrated as a system, the errors of the system shall not be greater than $\pm 0.2\%$ of full scale when the test results are for use with Efficiency Test Method B.

4.1.4 Voltage

Each of the line-to-line voltages shall be measured with the signal leads connected to the machine terminals. If local conditions will not permit such connections, the difference between the voltage at the machine terminals and the point of measurement shall be evaluated and the readings shall be corrected. The arithmetic average shall be used in calculating machine performance from the test data.

4.1.5 Current

The line currents to each phase of the motor shall be measured, and the arithmetic average value shall be used in calculating machine performance from the test data.

4.1.6 Power

Power input to a three-phase motor or power output from a three-phase generator may be measured by two single-phase wattmeters connected as in the two wattmeter method, one polyphase wattmeter, or three single phase wattmeters. Power readings shall be corrected for meter losses if they are significant.

All power measurements and calculations, both electrical and mechanical, herein are in watts. On large machines it may be more practical to work with power quantities expressed in kilowatts. If the unit of measure is changed, take care that all affected values are properly converted.

4.2 Resistance

4.2.1 Instrument selection

Calibrated high-accuracy instrumentation shall be used. Either analog instruments (such as a Kelvin bridge) or digital instruments may be used in testing.

6

Copyright © 2004 IEEE. All rights reserved.

POLYPHASE INDUCTION MOTORS AND GENERATORS

IEEE
Std 112-2004

The instruments shall bear record of calibration, within 12 months of the test, indicating limits of the error no greater than $\pm 0.2\%$ of full scale.

When a suitable automatic data acquisition system is available, it may be used.

4.2.2 Resistance measurement

The procedures given in IEEE Std 118-1978 and IEEE Std 119-1974 should be used when measuring the resistance of the stator winding (and the rotor winding on wound-rotor machines).

4.3 Mechanical

4.3.1 Power

Mechanical power measurements shall be taken with the greatest care and accuracy. If a mechanical brake is to be used, the tare, if present, shall be carefully determined and compensated for. If dynamometer output measurements are used, coupling and bearing friction losses must be compensated for. Properly sized dynamometers should be used, such that the coupling, friction, and windage losses of the dynamometer (see the note below) measured at rated speed of the machine being tested should not be greater than 15% of the rated output of the machine being tested; and the dynamometer should be sensitive to a change of torque of 0.25% of the rated torque.

NOTE—A dynamometer is defined as a device for applying torque to the rotating member of the test machine. It is equipped with means for indicating torque and speed, and is not limited to a cradle base construction. An in-line torque transducer may be used to provide a direct measurement of torque at the test machine shaft.⁵

The errors of the instrumentation used to measure mechanical torque shall not be greater than $\pm 0.2\%$ of full scale.

4.3.2 Speed and slip

4.3.2.1 Instruments

Stroboscopic or digital tachometer methods shall be used to determine slip or speed. When a stroboscope is used to measure slip, the power supply for the stroboscope shall have the same frequency as the motor power supply.

When the speed is measured, the instrumentation used shall have an error of not greater than ± 1.0 r/min of the reading.

4.4 Temperature

4.4.1 Methods of measuring temperatures

The temperature of various machine parts or coolant may be measured by the following:

- Alcohol thermometer
- Local temperature detector
- Embedded detector
- Winding resistance

⁵Notes in text, tables, and figures are given for information only, and do not contain requirements needed to implement the standard.

Copyright © 2004 IEEE. All rights reserved.

7

Anexo I: Procedimiento de Mediciones en Motores Trifásicos

IEEE
Std 112-2004

IEEE STANDARD TEST PROCEDURE FOR

POLYPHASE INDUCTION MOTORS AND GENERATORS

IEEE
Std 112-2004

The temperatures measured by any of these methods can deviate substantially from those determined by the other listed methods. Therefore, the temperatures so measured by one method shall not be interpreted in relation to standards written in terms of the other methods.

For general information, refer to IEEE Std 119-1974 and IEEE Std 1™-1986 [B5].

4.4.1.1 Alcohol thermometer

Alcohol thermometers are used to measure the temperature of accessible parts of the machine under test.

Temperatures taken by the alcohol thermometer method may be measured on the following parts:

- a) Stator coils, in at least two places
- b) Stator core, in at least two places
- c) Ambient
- d) Air discharged from frame or air discharge ducts, or internal coolant discharged to the inlet of coolers of machines with recirculating cooling system
- e) Frame
- f) Bearings (when part of the machine)

The alcohol thermometers should be located to obtain the highest temperature for the item being measured, except for incoming and discharge air or other coolant temperature, for which they should be placed to obtain average values.

4.4.1.2 Local temperature detector

The local temperature of various parts of a machine can be determined using local temperature detectors such as

- a) Thermocouples
- b) Small resistance thermometers
- c) Thermistors

The maximum dimension of the detecting element of these local temperature detectors should not exceed 5 cm.

These detectors can be used to measure temperatures in the same locations as alcohol thermometers, see 4.4.1.1, and are commonly used in areas on or within the machine that are not accessible to an alcohol thermometer. They are frequently installed as permanent parts of a machine and are available for use during tests.

The detecting element should be located on or in close thermal proximity to the part at which the local temperature is to be measured to obtain the highest temperature for that item, except for the incoming and discharge air or other coolant temperature, for which it should be placed to obtain the average value.

Specially designed instruments should be used with local temperature detectors to prevent the introduction of significant errors or possibly damaging the detector during the measurement. Because of the variety of materials used in these detectors, take care to insure the instrument selected is suitable for the specific material used in the detector or is matched to the resistance value when resistance thermometers are used. Many ordinary resistance measuring devices may not be suitable for use with resistance thermometers because of the relatively large current that may be passed through the resistance element while making the measurement.

8

Copyright © 2004 IEEE. All rights reserved.

4.4.1.3 Embedded detector

Embedded detectors, such as resistance temperature detectors (rtds) or thermocouples, are commonly used on large machines to monitor the winding temperature during operation and are available for use during machine testing. They are usually installed between coil sides within a stator slot. An rtd gives a reading that is the average of the temperature of the two abutting coil sides over the length of the sensing element. A thermocouple measures the temperature of the spot where the thermocouple junction is located between the two coil sides.

The precautions on the selection of instrumentation in 4.4.1.2 also apply here.

4.4.1.4 Winding resistance

The average temperature of a winding can be determined by comparing the resistance of the winding at the temperature to be determined with the resistance at a known temperature. This method utilizes the characteristic of the conductor material where, in the temperature range of interest, the winding resistance changes in direct proportion to the winding temperature. See 5.2.1.

4.4.2 Ambient temperature

The procedure of IEEE Std 119-1974 should be followed in measuring the ambient temperature.

4.5 Procedure

Whenever a series of increasing or decreasing readings of data are made, care should be taken in each case not to overrun the desired setting to avoid the introduction of hysteresis losses caused by a reversal in the direction of the test.

4.6 Safety

CAUTION

Because of the dangerous currents, voltages, and forces encountered, safety precautions shall be taken for all tests. No attempt is made here to list or review the manifold general safety precautions that are well established throughout industry. However, this standard includes special safety precautions applicable to the particular tests described. All tests should be performed by knowledgeable and experienced personnel.

5. Machine losses and tests for losses

This clause identifies the losses of an induction machine and describes tests and calculations to be used to determine these losses and the machine performance characteristics. The results of these tests are used in making the efficiency and performance determinations of Clause 6. All tests and procedures of this clause are not required in all of the efficiency analysis methods. Refer to the specific efficiency test method of interest in Clause 6.

Alternate test methods are presented where appropriate.

Copyright © 2004 IEEE. All rights reserved.

9

5.1 Types of losses

The losses of an induction machine include:

- Stator I^2R loss, see 5.2
- Rotor I^2R loss, see 5.3
- Friction and windage loss, see 5.5.4
- Core loss, see 5.5.5
- Stray-load loss, see 5.7
- Brush-contact loss, see 5.10

Other individual tests or procedures are required to support some of the efficiency test methods. These include:

- Shaft power, see 5.6.1.1
- Dynamometer correction, see 5.6.1.2
- Equivalent circuit, see 5.9
- Temperature test, see 5.8

5.2 Stator I^2R loss

For a three-phase machine, the stator I^2R loss, P_{SIR} , in watts is as shown in Equation (2).

$$P_{SIR} = 1.5I^2R = 3I^2R_1 \quad (2)$$

where

- I is the measured or calculated current per line terminal, in amperes (A),
- R is the dc resistance, in ohms, between any two line terminals—corrected to the appropriate temperature, if required (see 5.2.1),
- R_1 is the per phase dc resistance, in ohms (see 5.9).

5.2.1 Resistance correction for temperature

Some of the test analyses require that the winding resistance be adjusted or corrected to another temperature. With the winding resistance value, R_a , available at a known temperature, t_a , the resistance value at any other temperature, t_b , can be determined using Equation (3).

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \quad (3)$$

where

- R_a is the known value of winding resistance, in ohms, at temperature t_a ,
- t_a is the temperature, in °C, of winding when the resistance R_a was measured,
- t_b is the temperature, in °C, to which the resistance is to be corrected,
- R_b is the winding resistance, in ohms, corrected to the temperature t_b ,
- k_1 is 234.5 for 100% IACS conductivity copper, or 225 for aluminum, based on a volume conductivity of 62%.

For other winding materials, a suitable value of k_1 (inferred temperature for zero resistance) shall be used.

When a winding resistance value is calculated for a different temperature, t_a and t_b shall be based on the same method of measure. See 4.4. When any winding I^2R loss is determined at a temperature, the calculation shall use a winding resistance value that is based on the winding being at an average (or uniform) temperature. The specified temperature, the temperature at shutdown (measured by resistance) and the temperature when the cold resistance is obtained are all average temperatures. It may not be possible to obtain average temperature readings during some tests (such as during a load test) and special procedures for evaluating the average winding temperature using local detector readings may be necessary. One such procedure is utilized in 6.4.2.4.

5.3 Rotor I^2R loss

The rotor I^2R loss, including brush-contact losses for wound-rotor machines, shall be determined from the slip using Equation (4) or Equation (5) as follows:

$$\text{motor rotor } I^2R \text{ loss} = (\text{measured stator input power} - \text{stator } I^2R \text{ loss} - \text{core loss}) \times s \quad (4)$$

$$\text{generator } I^2R \text{ loss} = (\text{measured stator output power} + \text{stator } I^2R \text{ loss} + \text{core loss}) \times s \quad (5)$$

where

s is slip, in per unit (p.u.), with synchronous speed as base speed, see Equation (8).

All power items are in watts (W).

5.3.1 Slip

The slip speed, in r/min, can be measured directly by stroboscopic means or it can be calculated from the measured speed. This value then must be converted to a numeric or per unit value for use in the analyses.

The slip speed is the difference between synchronous speed and measured speed, in r/min [see Equation (6)].

$$\text{slip speed} = n_s - n_m \quad (6)$$

where

$$n_s = 120 \times \frac{f}{p} \quad (7)$$

and

- n_s is the synchronous speed, in r/min,
- n_m is the measured speed, in r/min,
- f is the line frequency, in hertz,
- p is the number of poles.

Slip expressed as a per unit quantity is

$$s = \frac{\text{slip speed (in r/min)}}{\text{synchronous speed (in r/min)}} \quad (8)$$

NOTE—It is assumed the number of poles is known. If not, the number of poles can be determined by using no-load test data and by rearranging Equation (7) to solve for p . (Multiply the input frequency times 120 and then divide by the measured idle speed.) This calculation will result in a value very near an even number (0% to 4% high). Round this value to the nearest lower even number (such as, 2, 4, 6, etc.) and this is the number of poles in the machine.

5.3.2 Slip correction for temperature

The slip, in p.u., is directly related to the rotor resistance. Thus, the slip can be corrected for temperature using the same basic relationship as for resistance and temperature. The corrected value of slip is used in determining the rotor I^2R loss in the final adjustments when using Efficiency Test Methods B, B1, and C. Use Equation (9) to correct the test slip measurements to the specified stator temperature.

$$s_s = \frac{s_t(t_s + k_1)}{(t_t + k_1)} \quad (9)$$

where

- s_s is the slip, in p.u., corrected to specified stator temperature, t_s ,
- s_t is the slip, in p.u., measured at stator winding temperature, t_t ,
- t_s is the specified temperature for resistance correction, in °C, see 3.3.2,
- t_t is the observed stator winding temperature during load test, in °C,
- k_1 is 234.5 for 100% IACS conductivity copper, or 225 for aluminum, based on a volume conductivity of 62% (based on rotor conductor material).

NOTES:

- 1—For other rotor winding materials, a suitable value of k_1 (inferred temperature for zero resistance) shall be used.
- 2—The values for t_s and t_t shall be based on the same method of measurement of temperature, see 5.2.1.

5.4 Winding resistance—cold

With the machine at ambient temperature, measure the terminal-to-terminal winding resistance with the machine connected in the configuration to be used in the efficiency testing. Measure and record all combinations, i.e., T1-T2, T2-T3, and T3-T1, to assure that the specific precise value needed in further analyses will be available. Also measure and record the ambient temperature. See 3.2.2.

5.5 No-load test

This test is performed by running the machine as a motor at rated voltage and frequency with no connected load. When separation of no-load losses is to be accomplished, run this test and read temperature, voltage, current, and power input at rated frequency and at voltages ranging from 125% of rated voltage down to the point where further voltage reduction increases the current.

5.5.1 Bearing loss stabilization

Some motors may experience a change in friction loss until the bearings reach a stabilized operating condition. In grease lubricated antifriction bearings, stabilization will not occur until there is no excess grease present in the path of the moving parts. This may require a number of hours of running to completely stabilize the no-load input power. Stabilization can be considered to have occurred whenever the power input at no-load does not vary by more than 3% between two successive readings at the same voltage at half-hour intervals. This bearing loss stabilization test may not be necessary if a temperature test has been performed prior to no-load testing.

5.5.2 No-load current

The average of the line currents at rated voltage is the no-load current.

5.5.3 No-load losses

The measured input power is the total of the losses in the motor at no-load. These losses consist of the stator I^2R , friction (including brush-friction loss on wound-rotor motors), windage, and core losses.

5.5.4 Friction and windage

The friction and windage loss may also be determined by performing a linear regression analysis using three or more lower points of the power versus voltage squared curve. To determine the friction and windage loss, subtract the stator I^2R loss (at the temperature of the test) from the total losses (i.e., input power) at each of the test voltage points and plot the resulting power curve versus voltage, extending the curve to zero voltage. The intercept with the zero voltage axis is the friction and windage loss. This intercept may be determined more accurately if the input power minus stator I^2R loss is plotted against the voltage squared for values in the lower voltage range.

5.5.5 Core loss

The core loss, P_c , at each test voltage is obtained by subtracting the value of friction and windage loss (determined in 5.5.4) from the input power minus stator I^2R loss (determined in 5.5.4). A plot of core loss versus voltage can be constructed for use in determining the core loss at any desired voltage.

5.6 Load test

Most of the efficiency test methods require that a load test be performed either to directly determine the efficiency as in Efficiency Test Method A or to determine the stray-load loss as in Efficiency Test Methods B, B1, and C. The machine is coupled to a load machine and is subjected to loads at four load points approximately equally spaced between not less than 25% and up to and including 100% load, and two load points suitably chosen above 100% load but not exceeding 150% load. A spread in load test points is necessary to determine the efficiency accurately over the entire load range of the machine and more than six load points may be used if desired.

Readings of electrical power, current, voltage, frequency, speed or slip, torque, stator winding temperature or stator winding resistance, and ambient temperature shall be obtained at each load point. In loading the machine, start at the highest load value and move in descending order to the lowest.

The common loading means are as follows:

- Dynamometer. See 5.6.1.
- Direct loading without torque measurement. See 5.6.2.
- Duplicate machine loading. See 5.6.3.

5.6.1 Dynamometer loading

For this test, the machine is loaded by means of a mechanical brake or dynamometer (see 4.3.1) and tested as described in 5.6.

This test should be performed as quickly as possible to minimize temperature changes in the machine during testing.

For Efficiency Test Method B, the temperature of the stator winding shall be within 10 °C of the hottest temperature reading recorded during the rated load temperature test on this or the duplicate machine prior to the start of recording data for this test.

5.6.1.1 Mechanical power

The shaft power, in W, of the machine under test at each load point is obtained from Equation (10) using the test values of torque and speed. The torque may require correction for dynamometer losses. See 5.6.1.2.

$$P = \frac{2\pi n_s T}{60} = \frac{n_s T}{k_2} \quad (10)$$

where

- P is shaft power, in watts (W),
- n_s is the measured speed or the speed calculated using measured slip, in r/min,
- k_2 is 9.549 for torque in Newton meters (N-m),
- T is the torque⁶, in N-m. See Equation (11) if dynamometer correction is required.

$$T = T_f \pm T_D \quad (11)$$

where

- T_f is a measured machine shaft torque, in N-m,
- T_D is the dynamometer correction from Equation (12), in N-m.

NOTE—In Equation (11), use the plus sign for motoring and the minus sign for generating. The terms *motoring* and *generating* refer to the action of the machine under test.

5.6.1.2 Dynamometer correction

A dynamometer no-load test combined with a machine no-load test can be used to determine the dynamometer correction to compensate for coupling and bearing friction losses of the dynamometer. This test is not generally necessary when the load on the test machine is measured using a torque transducer in line with the shaft of the machine because the low coupling losses do not significantly affect efficiency. The machine is operated as a motor at rated voltage while coupled to the dynamometer and all electrical power removed from the dynamometer. The electrical input power, voltage, current, slip or speed, torque, and stator winding resistance or stator winding temperature shall be recorded. The machine is then uncoupled from the dynamometer and operated at no load at rated voltage with the electrical input power, voltage, current, slip or speed, and stator winding resistance or stator winding temperature again recorded. Test data from a no-load test point at rated voltage (see 5.5) may be used for the no-load data when it is not practical to uncouple the machine from the dynamometer for this test. The dynamometer correction, in N-m, is determined from Equation (12).

$$T_D = k_2 \times \frac{P_A - P_B}{n_A} - T_A \quad (12)$$

where

$$P_A = (P_{inA} - P_{stRA} - P_b) \times (1 - s_A) \quad (13)$$

$$P_B = (P_{inB} - P_{stRB} - P_b) \quad (14)$$

and

⁶For other units of measure, see Annex D.

- T_D is the correction to be applied the load torque before performing the power calculation of 5.6.1.1,
- P_{inA} is input power, in W, when the machine under test is operated as a motor when coupled to a dynamometer with the dynamometer armature circuit open, (Test A),
- P_{stRA} is the stator I^2R loss, in W, during Test A,
- s_A is slip, in p.u., during Test A,
- T_A is the torque, in N-m, registered by the dynamometer during Test A,
- n_A is the measured speed or the speed calculated using measured slip, in r/min, during Test A,
- P_{inB} is the input power, in W, during a no load test at rated voltage, (Test B),
- P_{stRB} is the stator I^2R loss, in W, during a no load test at rated voltage, (Test B),
- P_b is the core loss, in W, during a no load test at rated voltage,
- k_2 is 9.549 for torque in N-m.

5.6.2 Direct loading with no torque measurement

To obtain the required data in Efficiency Test Method E, it is necessary to couple, belt, or gear the machine to a variable load and then perform the test as described in 5.6. A reading of torque at each load point is not required.

The stator winding resistance for each load point can be estimated by comparing the temperature rise measured by an embedded temperature detector, a temperature sensor located on the stator coil end, or the air outlet temperature rise, with corresponding temperature rise measurements obtained as steady-state values during a temperature test. When no temperature test is performed on this or on a duplicate machine, the calculations in the efficiency analysis are made with the stator winding resistance corrected to the total specified winding temperature assumed for the test. See 3.3.2, item c).

5.6.3 Duplicate machine loading

The load test for Efficiency Test Method C utilizes two duplicate machines coupled together. Varying the frequency of the voltage applied to one machine controls the load level and the direction of power flow between machines. This procedure is presented in 6.6.

5.7 Stray-load loss

The stray-load loss is that portion of the total loss in a machine not accounted for by the sum of the friction and windage loss, the stator I^2R loss, the rotor I^2R loss, and the core loss.

5.7.1 Indirect measurement

The stray-load loss is determined indirectly by measuring the total losses, and subtracting from these losses the sum of the friction and windage, core loss, stator I^2R loss, and rotor I^2R loss. The remaining value is the stray-load loss. The indirect measurement procedure is used in Efficiency Test Methods B, B1, C, and C/F (see 6.4, 6.5, 6.6, and 6.9).

5.7.2 Direct measurement

Direct measurement of the stray-load loss is used in efficiency methods E, F, and E/F (see 6.7, 6.8, and 6.9). The fundamental frequency and the high-frequency components of the stray-load loss are determined and the sum of these two components is the total stray-load loss.

Anexo I: Procedimiento de Mediciones en Motores Trifásicos

IEEE
Std 112-2004

IEEE STANDARD TEST PROCEDURE FOR

Annex B

(informative)

Typical report of test form for routine tests

Name of Manufacturer _____
 Address of Manufacturer _____ Date of Test _____
 Manufacturer's Order No. _____
 Purchaser's Order No. _____

Nameplate Data

Rated hp/kW	Service Factor	Rated Speed r/min	Phase	Frequency Hz	Volts	Ampères

Type	Frame	(Temp Rise by method indicated)	(Ambient temp and insulation Class)	Time Rating	Design Letter	Code Letter for Locked kVAhp

Test Characteristics

Serial No.	No Load				Locked Rotor			Wound Rotor Open-Circuit Voltage	High Potential Test Voltage	Stator Winding Resistance Between Terminals	
	Volts	Freq- uency Hz	Speed r/min	Amp- ères	Kilo- watts*	Volts	Freq- uency Hz			Amp- ères	Kilo- watts*

*If measured, optional.
None

Data on test from _____ machine Approved by _____ Date _____
 (this or duplicate)

IEEE
Std 112-2004

IEEE STANDARD TEST PROCEDURE FOR

9.14 Test and equivalent circuit results

Machine _____ Serial No. _____ Model No. _____
 Type _____ Rating _____ Voltage _____ Synchronous Speed _____ Frequency _____ Phase _____

Summary of Tests

No Load	
Line Current, I_L in A	Stator Power, P_0 in W

Impedance Data by Method _____ of 5.9.1			
Frequency Hz	Line Volts V_L	Line Current, I_L in A	Stator Power, P_0 in W

Constants and Summary of Equivalent Circuit Parameters:

- F_1 _____ volts per phase
- R_1 _____ ohms
- R_2 _____ ohms
- R_0 _____ ohms
- X_1 _____ ohms
- X_2 _____ ohms
- $(X_1 + X_2)$ _____ ohms
- B_w _____ siemens
- G_0 _____ siemens
- P_f _____ * watts See 5.5.4
- P_A _____ *watts See 5.5.5
- F_{sc} _____ ** watts at $I_2 =$ _____ amperes
- N_s _____ r/min

*See 5.7.2, 5.7.3, or 5.7.4

**When used in Method F, F1, CF, BF, or E1/F1 tests, these quantities are for the total machine and all others are per phase.

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

Lunes 13 de enero de 2003

DIARIO OFICIAL

(Primera Sección) 41

SECRETARÍA DE ENERGÍA

NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 a 373 kW. Límites, método de prueba y marcado.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Energía.- Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.- Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-016-ENER-2002, EFICIENCIA ENERGÉTICA DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA, TRIFÁSICOS, DE INDUCCIÓN, TIPO JAULA DE ARDILLA, EN POTENCIA NOMINAL DE 0,746 A 373 kW. LÍMITES, MÉTODO DE PRUEBA Y MARCADO.

ODÓN DE BUEN RODRÍGUEZ, Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE) y Director General de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), con fundamento en los artículos 33 fracciones VIII y IX de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 3 fracción VI inciso c), 34 fracción XXII y 40 del Reglamento Interior de la Secretaría de Energía; 38 fracción II, 40 fracciones I, X y XII, 41, 43, 46 y 47 fracción IV de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 28 y 34 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 1, 2, 3 fracción I y 8 del Decreto por el que se crea la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, como órgano desconcentrado de la Secretaría de Energía y 1o. del Acuerdo por el que se delega en favor del Director General de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, las facultades para presidir el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, así como expedir las normas oficiales mexicanas en el ámbito de su competencia, publicados en el **Diario Oficial de la Federación** el 20 de septiembre de 1999 y el 29 de octubre de 1999, respectivamente, y

CONSIDERANDO

Que las reformas a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 28 de diciembre de 1994, delimitaron las facultades de la Secretaría de Energía, mismas entre las que se encuentra la de expedir normas oficiales mexicanas que promuevan la eficiencia del sector energético;

Que el Programa Nacional de Normalización de 2002 publicado en el **Diario Oficial de la Federación** el 25 de marzo de ese mismo año, contempla la expedición de la presente Norma Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 a 373 kW. Límites, método de prueba y marcado, cuya finalidad es la preservación y uso racional de los recursos energéticos;

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, para la elaboración de proyectos de normas oficiales mexicanas, el presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, ordenó la publicación del Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-016-ENER-2002, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 a 373 kW. Límites, método de prueba y marcado; lo que se realizó en el **Diario Oficial de la Federación** el 23 de septiembre de 2002, con el objeto de que los interesados presentaran sus comentarios al citado Comité Consultivo que lo propuso;

42 (Primera Sección)

DIARIO OFICIAL

Lunes 13 de enero de 2003

Que durante el plazo de 60 días naturales contados a partir de la fecha de publicación de dicho proyecto de Norma Oficial Mexicana, la Manifestación de Impacto Regulatorio a que se refiere el artículo 45 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, estuvo a disposición del público en general para su consulta y que dentro del mismo plazo, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto de norma, los cuales fueron analizados por el citado Comité Consultivo, realizándose las modificaciones procedentes;

Que con fecha 19 de diciembre de 2002 se publicaron en el **Diario Oficial de la Federación** las respuestas a los comentarios recibidos respecto del Proyecto de Norma PROY-NOM-016-ENER-2002, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 a 373 kW. Límites, método de prueba y marcado;

Que en la sesión XXIX ordinaria del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, celebrada el 27 de noviembre de 2002, los miembros del Comité aprobaron por consenso la norma referida, y

Que la Ley Federal sobre Metrología y Normalización establece que las normas oficiales mexicanas se constituyen como el instrumento idóneo para la prosecución de estos objetivos, por lo que he tenido a bien expedir la siguiente:

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-016-ENER-2002, EFICIENCIA ENERGÉTICA DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA, TRIFÁSICOS, DE INDUCCIÓN, TIPO JAULA DE ARDILLA, EN POTENCIA NOMINAL DE 0,746 A 373 kW. LÍMITES, MÉTODO DE PRUEBA Y MARCADO

Sufragio Efectivo. No Reelección.

México, D.F., a 20 de diciembre de 2002.- El Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE) y Director General de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), **Odón de Buen Rodríguez**.- Rúbrica.

PREFACIO

La presente Norma Oficial Mexicana fue elaborada bajo la Coordinación de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía y aprobada en el pleno del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos y con la colaboración de los siguientes organismos, instituciones y empresas:

- ### ASESORIA Y PRUEBAS A EQUIPO ELECTRICO Y ELECTRONICO, S.A. DE C.V.
- ### ASOCIACION DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION, A.C.
- ### ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C.
- ### FIDEICOMISO PARA EL AHORRO DE ENERGIA ELECTRICA
- ### INDUSTRIAS IEM, S.A. DE C.V.
- ### INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS
- ### MABE MEXICO, S. DE R.L. DE C.V.
- ### MOTORES US DE MEXICO, S.A. DE C.V.
- ### POTENCIA INDUSTRIAL, S.A.
- ### ROCKWELL AUTOMATION-POWER SYSTEMS

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

SIEMENS, S.A. DE C.V.
WEG DE MEXICO, S.A. DE C.V.

CONTENIDO

- 0. Introducción
- 1. Objetivo
- 2. Campo de aplicación
- 3. Referencias
- 4. Definiciones
 - 4.1 Dinamómetro
 - 4.2 Eficiencia
 - 4.3 Eficiencia mínima asociada
 - 4.4 Eficiencia nominal
 - 4.5 Equilibrio térmico a carga plena
 - 4.6 Factor de Corrección del Dinamómetro (FCD)
 - 4.7 Motor abierto
 - 4.8 Motor cerrado
 - 4.9 Motor de eficiencia normalizada
 - 4.10 Motor de inducción
 - 4.11 Motor eléctrico
 - 4.12 Motor trifásico
 - 4.13 Motor tipo jaula de ardilla
 - 4.14 Pérdidas en el núcleo
 - 4.15 Pérdidas indeterminadas
 - 4.16 Pérdidas por efecto Joule
 - 4.17 Pérdidas por fricción y ventilación
 - 4.18 Pérdidas totales
 - 4.19 Potencia de entrada
 - 4.20 Potencia de salida
 - 4.21 Potencia nominal
 - 4.22 Régimen continuo
 - 4.23 Régimen nominal

- 4.24 Resistencia entre terminales del motor
- 4.25 Torsiómetro
- 5. Clasificación
- 6. Especificaciones
 - 6.1 Eficiencia del motor
 - 6.2 Eficiencia mínima asociada
 - 6.3 Determinación de la eficiencia
- 7. Muestreo
- 8. Criterios de aceptación
 - 8.1 Placa de datos
 - 8.2 Resultados de las pruebas
- 9. Método de prueba
 - 9.1 Condiciones de prueba
 - 9.2 Instrumentos de medición y equipo de prueba
 - 9.3 Procedimiento de prueba
 - 9.4 Segregación de pérdidas
 - 9.5 Corrección por temperatura para las pérdidas por efecto Joule
 - 9.6 Cálculo de la potencia de salida a 25°C
 - 9.7 Cálculo de la eficiencia
 - 9.8 Eficiencia en cualquier punto de carga
- 10. Marcado
- 11. Vigilancia
- 12. Evaluación de la conformidad
- 13. Bibliografía
- 14. Concordancia con normas internacionales
- 15. Transitorios

Apéndice A análisis de regresión lineal

Apéndice B nomenclatura

Apéndice C

0. Introducción

La presente Norma Oficial Mexicana establece los valores de eficiencia nominal y mínima asociada, el método de prueba para su evaluación, y la especificación de marcado de la eficiencia nominal en la placa de

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

Lunes 13 de enero de 2003 DIARIO OFICIAL (Primera Sección) 45

datos de los motores eléctricos de corriente alterna, trifásicos, de inducción, jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 kW hasta 373 kW, abiertos y cerrados; que se comercializan en los Estados Unidos Mexicanos. Esto ha sido como resultado de los avances tecnológicos y las condiciones del mercado nacional e internacional.

Esta Norma permitirá, además de responder a las necesidades de promover el ahorro de energía, contribuir a la preservación de recursos naturales no renovables de la nación.

1. Objetivo

Esta Norma Oficial Mexicana establece los valores de eficiencia nominal y mínima asociada, el método de prueba para su evaluación, y la especificación de marcado de la eficiencia nominal, en la placa de datos de los motores que se comercializan en los Estados Unidos Mexicanos.

2. Campo de aplicación

Esta Norma se aplica a motores eléctricos de corriente alterna, trifásicos, de inducción, jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 kW hasta 373 kW, con tensión eléctrica nominal de hasta 600 V, abiertos y cerrados, de una sola frecuencia de rotación, de posición de montaje horizontal o vertical.

3. Referencias

La presente Norma Oficial Mexicana se complementa con la siguiente Norma vigente o la que la sustituya:

NOM-008-SCFI, Sistema General de Unidades de Medida.

4. Definiciones

Para efectos de la presente Norma Oficial Mexicana se establecen las definiciones siguientes:

4.1 Dinamómetro

Aparato para aplicar carga mecánica a un motor en forma continua y controlada, y que puede incluir dispositivos para medir el par torsional y la frecuencia de rotación desarrollados por dicho motor.

4.2 Eficiencia

La eficiencia se define como la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada del motor. Se expresa en porcentaje y se calcula con alguna de las siguientes relaciones:

- (a) $[\text{Potencia de salida} / \text{potencia de entrada}] \times 100$,
- (b) $[(\text{Potencia de entrada} - \text{pérdidas}) / \text{potencia de entrada}] \times 100$,
- (c) $[\text{Potencia de salida} / (\text{potencia de salida} + \text{pérdidas})] \times 100$.

4.3 Eficiencia mínima asociada

Cada eficiencia nominal tiene una eficiencia mínima asociada especificada en la columna B de la Tabla 1.

4.4 Eficiencia nominal

46 (Primera Sección) DIARIO OFICIAL Lunes 13 de enero de 2003

Es el valor de la eficiencia mostrado en la placa de datos del motor, seleccionado de la Columna A de la Tabla 1 por el fabricante. Este valor no debe ser mayor que la eficiencia promedio de una población grande de motores del mismo diseño.

4.5 Equilibrio térmico a carga plena

Cuando la diferencia entre la temperatura del motor y la temperatura ambiente no excede de 1°C, en un lapso de 30 min trabajando a carga plena.

4.6 Factor de Corrección del Dinamómetro (FCD)

Es el par torsional necesario para vencer la oposición que presenta el dinamómetro al movimiento mecánico, en su condición de carga mínima. Su determinación es importante cuando el dinamómetro está situado entre el motor a probar y el transductor usado para medir el par.

4.7 Motor abierto

Es un motor que tiene aberturas para ventilación que permiten el paso del aire exterior de enfriamiento, sobre y a través del embobinado del motor.

4.8 Motor cerrado

Es un motor cuya armazón impide el intercambio libre de aire entre el interior y el exterior de éste, sin llegar a ser hermético. Dentro de esta clasificación se incluyen los motores a prueba de explosión.

4.9 Motor de eficiencia normalizada

Es aquel que tiene una eficiencia nominal igual o mayor que la indicada en la Tabla 2, según su tipo de enclaustramiento y número de polos.

4.10 Motor de inducción

Es un motor eléctrico en el cual solamente una parte, el rotor o el estator, se conecta a la fuente de energía y la otra trabaja por inducción electromagnética.

4.11 Motor eléctrico

Es una máquina rotatoria para convertir energía eléctrica en mecánica.

4.12 Motor trifásico

Es un motor que utiliza para su operación energía eléctrica de corriente alterna trifásica.

4.13 Motor tipo jaula de ardilla

Es un motor de inducción, en el cual los conductores del rotor son barras colocadas en las ranuras del núcleo secundario, que se conectan en circuito corto por medio de anillos en sus extremos semejando una jaula de ardilla.

4.14 Pérdidas en el núcleo

Son las debidas a las alternaciones del campo magnético en el material activo del estator y el rotor por efectos de histéresis y corrientes parásitas.

4.15 Pérdidas indeterminadas

Son la porción de las pérdidas que no se incluyen en la suma de las pérdidas por efecto Joule en el estator y en el rotor, las pérdidas en el núcleo, y las pérdidas por fricción y ventilación.

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

(Viene de la página 46)

4.18 Pérdidas totales

Son la diferencia de la potencia de entrada y la potencia de salida del motor.

4.19 Potencia de entrada

Es la potencia eléctrica que el motor toma de la línea.

4.20 Potencia de salida

Es la potencia mecánica disponible en el eje del motor.

4.21 Potencia nominal

Es la potencia mecánica de salida indicada en la placa de datos del motor.

4.22 Régimen continuo

Es el régimen nominal con el cual debe cumplir un motor en funcionamiento continuo.

4.23 Régimen nominal

Es la condición de operación a la tensión y frecuencia eléctricas nominales, medidas en las terminales, en la que el motor desarrolla los parámetros indicados en su placa de datos.

4.24 Resistencia entre terminales del motor

Es la resistencia medida entre dos terminales en la caja de conexiones del motor.

4.25 Torsiómetro

Aparato acoplado entre los ejes del motor y del dinamómetro, que transmite y mide el par torsional. Algunos tipos, miden además la frecuencia de rotación y permiten determinar la potencia mecánica desarrollada por el motor.

5. Clasificación

Los motores sujetos a esta Norma se clasifican por su tipo de enclaustramiento:

- a) Motor abierto
- b) Motor cerrado

6. Especificaciones

6.1 Eficiencia del motor

Cualquier motor debe tener indicada en su placa de datos una eficiencia nominal igual o mayor a la especificada en la Tabla 2.

6.2 Eficiencia mínima asociada

Cualquier motor debe tener una eficiencia mayor o igual a la eficiencia mínima asociada a la eficiencia nominal que muestre en su placa de datos de acuerdo con la Tabla 1.

6.3 Determinación de la eficiencia

Para determinar la eficiencia energética de motores de inducción trifásicos en potencia nominal de 0,746 a 373 kW, se precisa como prueba única el método descrito en el capítulo 9 de la presente Norma Oficial Mexicana.

7. Muestreo

De acuerdo con el artículo 73 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la Secretaría de Energía, a través de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, establecerá el procedimiento para la evaluación de la conformidad de los motores con las especificaciones de esta Norma.

Tabla 1.- Eficiencia nominal y mínima asociada, en por ciento

Columna A Eficiencia Nominal	Columna B Eficiencia Mínima	Columna A Eficiencia Nominal	Columna B Eficiencia Mínima
99,0	98,8	94,1	93,0
98,9	98,7	93,6	92,4
98,8	98,6	93,0	91,7
98,7	98,5	92,4	91,0
98,6	98,4	91,7	90,2
98,5	98,2	91,0	89,5
98,4	98,0	90,2	88,5
98,2	97,8	89,5	87,5
98,0	97,6	88,5	86,5
97,8	97,4	87,5	85,5
97,6	97,1	86,5	84,0
97,4	96,8	85,5	82,5
97,1	96,5	84,0	81,5
96,8	96,2	82,5	80,0
96,5	95,8	81,5	78,5
96,2	95,4	80,0	77,0
95,8	95,0	78,5	75,5
95,4	94,5	77,0	74,0
95,0	94,1	75,5	72,0
94,5	93,6	74,0	70,0
		72,0	68,0

Nota: Los valores de la eficiencia nominal de la Columna A se obtienen a partir del 99,0%, con incrementos de pérdidas del 10%. Los valores de eficiencia mínima asociada de la Columna B, se obtienen incrementando las pérdidas en un 20%.

8. Criterios de aceptación

8.1 Placa de datos

La eficiencia nominal marcada por el fabricante en la placa de datos del motor, debe ser igual o mayor que la eficiencia de la Tabla 2 de esta Norma, de acuerdo con su potencia nominal en kW, número de polos y tipo de enclaustramiento.

8.2 Resultados de las pruebas

La eficiencia determinada con el método de prueba del capítulo 9, para cada motor probado, debe ser igual o mayor que la eficiencia mínima asociada a la eficiencia nominal marcada en la placa de datos por el fabricante.

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

Tabla 2.- Valores de eficiencia nominal a plena carga para motores verticales y horizontales, en por ciento

Potencia Nominal, kW	Potencia Nominal Cp	MOTORES CERRADOS				MOTORES ABIERTOS			
		2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
0,746	1	75,5	82,5	80,0	74,0	75,5	82,5	80,0	74,0
1,119	1,5	82,5	84,0	85,5	77,0	82,5	84,0	84,0	75,5
1,492	2	84,0	84,0	86,5	82,5	84,0	84,0	85,5	85,5
2,238	3	85,5	87,5	87,5	84,0	84,0	86,5	86,5	86,5
3,730	5	87,5	87,5	87,5	85,5	85,5	87,5	87,5	87,5
5,595	7,5	88,5	89,5	89,5	85,5	87,5	88,5	88,5	88,5
7,460	10	89,5	89,5	89,5	88,5	88,5	89,5	90,2	89,5
11,19	15	90,2	91,0	90,2	88,5	89,5	91,0	90,2	89,5
14,92	20	90,2	91,0	90,2	89,5	90,2	91,0	91,0	90,2
18,65	25	91,0	92,4	91,7	89,5	91,0	91,7	91,7	90,2
22,38	30	91,0	92,4	91,7	91,0	91,0	92,4	92,4	91,0
29,84	40	91,7	93,0	93,0	91,0	91,7	93,0	93,0	91,0
37,30	50	92,4	93,0	93,0	91,7	92,4	93,0	93,0	91,7
44,76	60	93,0	93,6	93,6	91,7	93,0	93,6	93,6	92,4
55,95	75	93,0	94,1	93,6	93,0	93,0	94,1	93,6	93,6
74,60	100	93,6	94,5	94,1	93,0	93,0	94,1	94,1	93,6
93,25	125	94,5	94,5	94,1	93,6	93,6	94,5	94,1	93,6
111,9	150	94,5	95,0	95,0	93,6	93,6	95,0	94,5	93,6
149,2	200	95,0	95,0	95,0	94,1	94,5	95,0	94,5	93,6
186,5	250	95,4	95,0	95,0	94,5	94,5	95,4	95,4	94,5
223,8	300	95,4	95,4	95,0	---	95,0	95,4	95,4	---
261,1	350	95,4	95,4	95,0	---	95,0	95,4	95,4	---
298,4	400	95,4	95,4	---	---	95,4	95,4	---	---
335,7	450	95,4	95,4	---	---	95,8	95,8	---	---
373	500	95,4	95,8	---	---	95,8	95,8	---	---

9. Método de prueba

Todos los motores se prueban por el método de las pérdidas segregadas, en este método, a partir de mediciones y cálculos, se determinan las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator y del rotor, las pérdidas del núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación; al final, las pérdidas indeterminadas se obtienen por diferencia.

9.1 Condiciones de la prueba

Todos los motores se deben de probar en posición horizontal.

La frecuencia eléctrica de alimentación para todas las pruebas debe ser la frecuencia eléctrica nominal que se indica en la placa de datos del motor con una variación de ± 0,5%.

La tensión eléctrica de corriente alterna de alimentación para la prueba, debe ser la tensión eléctrica nominal indicada en la placa de datos del motor, medida en sus terminales, sin exceder una variación de ±0,5%, con un desbalance máximo permitido de ±0,5%. El porcentaje de desbalance es igual a 100 veces la desviación máxima de la tensión eléctrica de cada fase con respecto a la tensión eléctrica promedio, dividida entre la tensión eléctrica promedio.

La Distorsión Armónica Total (DAT) de la onda de tensión eléctrica no debe ser mayor al 5%.

La Distorsión Armónica Total (DAT) es un indicador del contenido de armónicas en una onda de tensión eléctrica. Se expresa como un porcentaje de la fundamental y se define como:

$$DAT = \left(\frac{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}{V_1^2} \right) * 100$$

donde:

V_i es la amplitud de cada armónica

V_1 es la amplitud de la fundamental

Las magnitudes eléctricas que varíen senoidalmente, deben expresarse en valores eficaces, a menos que se especifique otra cosa.

9.2 Instrumentos de medición y equipo de prueba

Los instrumentos de medición deben seleccionarse para que el valor leído esté dentro del intervalo de la escala recomendado por el fabricante del instrumento, o en su defecto en el tercio superior de la escala del mismo.

Los instrumentos analógicos o digitales deben estar calibrados con una incertidumbre máxima de ±0,5% de plena escala.

Cuando se utilicen transformadores de corriente y de potencial, se deben realizar las correcciones necesarias para considerar los errores de relación y fase en las lecturas de tensión, corriente y potencia eléctricas. Los errores de los transformadores de corriente y potencial no deben ser mayores de 0,5%.

El dinamómetro debe seleccionarse de forma que a su carga mínima, la potencia de salida demandada al motor no sea mayor del 15% de la potencia nominal del mismo.

Para evitar la influencia por el acoplamiento del motor con el dinamómetro durante el desarrollo de las pruebas de equilibrio térmico, funcionamiento, y carga mínima posible en el dinamómetro, éstas deben realizarse sin desacoplar el motor entre ellas.

Los instrumentos de medición, equipos y aparatos para aplicar este método de prueba son los siguientes:

- (a) aparato para medir la temperatura detectada por los detectores de temperatura por resistencia o termopares;
- (b) óhmetro a cuatro terminales, para medir resistencias bajas;
- (c) equipo para controlar la tensión de alimentación;
- (d) frecuencímetro;
- (e) vóltmetros;
- (f) ampérmetros;
- (g) wáttmetro trifásico;
- (h) dinamómetro;
- (i) torsiómetro o aparato para medir par torsional;
- (j) tacómetro, y
- (k) cronómetro.

9.3 Procedimiento de prueba

Antes de comenzar las pruebas se deben registrar la temperatura y la resistencia óhmica de los devanados del estator. Para ello, se deben instalar dentro del motor, como mínimo, dos detectores de temperatura por resistencia o termopares, entre o sobre cada uno de los cabezales del devanado, o en las ranuras del núcleo del estator, procurando que queden fuera de las trayectorias del aire de enfriamiento del motor.

9.3.1 Parámetros iniciales

Se miden las resistencias entre terminales de los devanados del estator y la temperatura correspondiente.

Se registran los siguientes parámetros:

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

- 1) Las resistencias entre terminales de los devanados del estator, en Ohm;
- 2) El promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator t_d , en °C, y
- 3) La temperatura ambiente t_{amb} , en °C.

Se designa como resistencia de referencia R_i , a aquélla con el valor más cercano al promedio de las tres registradas. Por ejemplo, si:

$$R_{1,2} = 4,8 \text{ ###} \quad R_{1,3} = 5,0 \text{ ###} \quad R_{2,3} = 5,2 \text{ ###}$$

Entonces el valor de la resistencia de referencia será $R_i = 5,0 \text{ ###}$

9.3.2 Prueba para alcanzar el equilibrio térmico

Mediante esta prueba se determinan la resistencia y temperatura de los devanados del motor operando a carga plena.

Se hace funcionar el motor a su régimen nominal hasta alcanzar el equilibrio térmico definido en el inciso 4.5 en todos los detectores de temperatura. Se desenergiza y se desconectan las terminales de línea del motor, se mide y registra la resistencia entre las terminales de la resistencia de referencia determinada en el inciso 9.3.1, en el tiempo especificado en la Tabla 3.

TABLA 3.- Tiempo al cual se debe realizar la medición de la resistencia de referencia de los devanados del estator

Potencia Nominal, en kW	Tiempo [s]
37,5 o menor	30
Mayor de 37,5 a 150	90
mayor de 150	120

Si se excede el tiempo establecido en la Tabla 3, se traza una curva de enfriamiento basada en la resistencia entre el par de terminales de referencia, utilizando por lo menos 10 valores espaciados a intervalos de 30 s, para determinar la resistencia al tiempo de retardo especificado en la Tabla 3.

Si los tiempos especificados en la tabla 3 se exceden en más del doble para el registro de la primera lectura, se anula y se repite la prueba.

Se miden y registran:

- 1) La resistencia entre las terminales de referencia, R_r , en ohm;
- 2) El promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator, t_d , en °C;
- 3) La temperatura ambiente, t_{amb} , en °C, y
- 4) El tiempo al que se midió o determinó la resistencia R_r , en s.

9.3.3 Prueba de funcionamiento

Al término de la prueba anterior, se hace funcionar el motor a su tensión eléctrica medida en sus terminales, frecuencia eléctrica y potencia nominales, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio térmico definido en el inciso 4.5. Se aplican en forma descendente dos valores de carga arriba de la potencia nominal, 130% y 115%; así como cuatro valores de carga al 100%, 75%, 50% y 25% de la potencia nominal, con una tolerancia de ### 2%.

Se miden y registran los siguientes parámetros para cada uno de los valores de carga:

- 1) El promedio de las tensiones eléctricas entre terminales, en V;
- 2) Frecuencia eléctrica de alimentación, en Hz;
- 3) El promedio de las corrientes eléctricas de línea, I_m , en A;
- 4) La potencia de entrada, P_e , en kW
- 5) El par torsional del motor, T_m , en N m;
- 6) La frecuencia de rotación, n_m , en min^{-1} ;

- 7) El promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator para cada valor de carga, t_m , en °C, y
- 8) La temperatura ambiente para cada valor de carga, t_{amb} , en °C.

9.3.4 Carga mínima posible en el dinamómetro

Se ajusta el dinamómetro a su carga mínima y se opera el motor a su tensión eléctrica medida en sus terminales y frecuencia eléctrica nominales hasta que la potencia de entrada no varíe más del 3% en un lapso de 30 min.

Con la potencia de entrada estabilizada a la carga mínima del dinamómetro, se miden y registran:

- 1) El promedio de las tensiones eléctricas entre terminales, en V;
- 2) La frecuencia eléctrica de alimentación, en Hz;
- 3) El promedio de las corrientes eléctricas de línea, I_{min} , en A;
- 4) La potencia de entrada, P_{min} , en kW;
- 5) El par torsional del motor, T_{min} , en N m;
- 6) La frecuencia de rotación, n_{min} , en min^{-1} ;
- 7) El promedio de las temperaturas detectadas por los detectores de temperatura de los devanados, t_{min} , en °C, y
- 8) Se verifica que la potencia de salida P_d demandada al motor bajo prueba, sea menor al 15% de su potencia nominal. Donde P_d en kW, se calcula de la siguiente forma:

$$P_d = \frac{T_{min} \cdot n_{min}}{9549} \quad [\text{kW}]$$

9.3.5 Prueba de operación en vacío

Se desacopla el motor del dinamómetro y se opera en vacío a su tensión eléctrica medida en las terminales del motor y frecuencia eléctrica nominales hasta que la potencia de entrada varíe no más del 3% en un lapso de 30 min. Se aplican en forma descendente tres o más valores de tensión eléctrica entre el 125% y el 60% de la tensión eléctrica nominal, espaciados en forma regular; de la misma manera, tres o más valores entre el 50% y el 20% de la tensión eléctrica nominal o hasta donde la corriente eléctrica de línea llegue a un mínimo o se haga inestable.

Para cada valor de tensión eléctrica, se miden y registran:

- 1) El promedio de las tensiones eléctricas entre terminales, en V;
- 2) La frecuencia eléctrica de alimentación, en Hz;
- 3) El promedio de las corrientes eléctricas de línea, I_0 , en A;
- 4) La potencia de entrada en vacío, P_0 , en kW;
- 5) La frecuencia de rotación, n_0 , en min^{-1} , y
- 6) El promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator en cada valor de tensión, t_0 , en °C.

9.4 Segregación de pérdidas

9.4.1 Determinación de las pérdidas por fricción y ventilación y cálculo de las pérdidas en el núcleo

Los siguientes cálculos se utilizan para separar el origen de las pérdidas en vacío.

- a) Se resta de la potencia de entrada medida en el inciso 9.3.5 en vacío, P_0 , las pérdidas de los devanados del estator $I^2 R_{E0}$ para cada valor de tensión eléctrica del inciso 9.3.5, calculadas con la siguiente ecuación:

$$I^2 R_{E0} = 0,0015 \cdot I_0^2 \cdot R_{E0} \quad [\text{kW}]$$

donde:

- I_0 Es el promedio de las corrientes eléctricas de línea en vacío del inciso 9.3.5, en A, y

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

Lunes 13 de enero de 2003 DIARIO OFICIAL (Segunda Sección) 7

R_{E0} es la resistencia entre las terminales de referencia, en ohm, del inciso 9.3.1, corregida al promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator para cada valor de tensión eléctrica, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_{E0} = R_i \cdot \frac{t_0 + K}{t_i + K} \quad [\Omega]$$

donde:

- R_i** es la resistencia de referencia del inciso 9.3.1, en ohm;
- t₀** es el promedio de las temperaturas de los devanados para cada valor de tensión el inciso 9.3.5, en °C;
- t_i** es el promedio de las temperaturas de los devanados del estator en frío del inciso 9.3.1, en °C, y es la constante del material y es igual a 234,5 para el cobre puro. Para otros materiales en los devanados, deberá usarse el valor especificado por el fabricante del material.
- b)** Se traza una curva con la potencia de entrada con el motor operando en vacío P₀ menos las pérdidas en los devanados del estator I²R_{E0} contra la tensión eléctrica en vacío, para cada valor de tensión eléctrica entre el 125% y el 60% del valor nominal.
- c)** Se traza una curva con los valores de potencia de entrada en vacío P₀ menos las pérdidas en los devanados del estator I²R_{E0}, contra el cuadrado de la tensión eléctrica, para cada valor de tensión eléctrica entre el 50% y el 20% del valor nominal o hasta el valor correspondiente a la corriente eléctrica de línea mínima o inestable. Se extrapola la curva a la tensión eléctrica en vacío igual a cero. El valor de la potencia de entrada en este punto corresponde a las pérdidas por fricción y ventilación P_{fv}.
- d)** De la curva obtenida en el inciso (b), se calculan las pérdidas del núcleo, P_h, a la tensión eléctrica nominal, restando de la potencia de entrada en vacío, P₀, las pérdidas en los devanados del estator I²R_{E0} según el inciso (a), y las pérdidas de fricción y ventilación P_{fv} según el inciso (c).

9.4.2 Cálculo de las pérdidas por efecto Joule en el estator

Se calculan las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator I²R_m para cada uno de los seis valores de carga aplicados según el inciso 9.3.3, utilizando la siguiente ecuación:

$$I^2 R_m = 0,0015 \cdot I_m^2 \cdot R_m \quad [kW]$$

donde:

- I_m** es el promedio de las corrientes de línea del inciso 9.3.3, en A;
- R_m** es la resistencia entre las terminales de referencia del estator, inciso 9.3.1, corregida a la temperatura de los devanados para cada valor de carga mediante la siguiente ecuación:

$$R_m = R_i \cdot \frac{t_m + K}{t_i + K} \quad [\Omega]$$

donde:

- R_i** es la resistencia de referencia del inciso 9.3.1, en ohm;
- t_m** es el promedio de las temperaturas de los devanados por cada valor de carga del inciso 9.3.3, en °C;
- t_i** es el promedio de las temperaturas de los devanados del estator del inciso 9.3.1, en °C, y
- K** es la constante del material y es igual a 234,5 para el cobre puro. Para otros materiales en los devanados, deberá usarse el valor especificado por el fabricante.

9.4.3 Cálculo de las pérdidas por efecto Joule en el rotor

Se calculan las pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor I²R_r, en cada uno de los seis valores de carga aplicados según el inciso 9.3.3 utilizando la siguiente ecuación:

$$I^2 R_r = (P_e - I^2 R_m - P_h) \cdot S_m \quad [kW]$$

donde:

- P_e** es la potencia de entrada para cada valor de carga medida en el inciso 9.3.3
- P_h** son las pérdidas del núcleo calculadas en el inciso 9.4.1

8 (Segunda Sección) DIARIO OFICIAL Lunes 13 de enero de 2003

S_m es el deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona n_s para cada valor de carga, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S_m = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

donde:

- n_s** es la frecuencia de rotación síncrona en min⁻¹, y
- n_m** es la frecuencia de rotación para cada valor de carga medida en el inciso 9.3.3 en min⁻¹.

9.4.4 Cálculo del Factor de Corrección del Dinamómetro (FCD)

Cuando la medición del par se hace entre el motor de prueba y el dinamómetro, las pérdidas del dinamómetro no afectan a la medición, por lo que este paso no es necesario.

Con las mediciones realizadas en el inciso 9.3.4 y 9.3.5, se calcula:

- a)** El deslizamiento por unidad de la frecuencia de rotación con respecto a la frecuencia de rotación síncrona, con el dinamómetro a su carga mínima, de acuerdo con la siguiente ecuación (S_{min}):

$$S_{min} = \frac{n_s - n_{min}}{n_s}$$

donde:

- n_s** es la frecuencia de rotación síncrona, en min⁻¹, y
- n_{min}** es la frecuencia de rotación con el dinamómetro a su carga mínima medida en el inciso 9.3.4, en min⁻¹.
- b)** Las pérdidas por efecto Joule en el estator con el dinamómetro a su carga mínima:

$$I^2 R_{min} = 0,0015 \cdot I_{min}^2 \cdot R_{min} \quad [kW]$$

donde:

I_{min} es el promedio de las corrientes de línea durante la prueba con carga mínima en el dinamómetro del inciso 9.3.4, en A, y

R_{min} es la resistencia de referencia corregida a la temperatura de los devanados del estator durante la prueba con carga mínima en el dinamómetro, calculada mediante la siguiente ecuación:

$$R_{min} = R_i \cdot \frac{t_{min} + K}{t_i + K} \quad [\Omega]$$

donde:

- R_i** es la resistencia de referencia del inciso 9.3.1, en ohm;
- t_{min}** es el promedio de las temperaturas de los devanados del estator con el dinamómetro a su mínima carga del inciso 9.3.4, en °C;
- t_i** es el promedio de las temperaturas de los devanados del estator del inciso 9.3.1, en °C, y
- K** es la constante del material y es igual a 234,5 para el cobre puro. Para otros materiales en los devanados, deberá usarse el valor especificado por el fabricante del material.
- c)** El factor de corrección del dinamómetro:

$$FCD = \frac{9549}{n_{min}} \left[(P_{min} - I^2 R_{min} - P_h)(1 - S_{min}) \right] - \frac{9549}{n_0} [P_0 - I^2 R_{E0} - P_h] - T_{min} \quad [N \cdot m]$$

donde:

- P_{min}** es la potencia de entrada con el dinamómetro a su carga mínima, medida en el inciso 9.3.4, en kW
- P_h** son las pérdidas en el núcleo calculadas en el inciso 9.4.1 en kW
- P₀-I²R_{E0}** es calculado en el inciso 9.4.1 a), en kW

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

T_{min} es el par torsional del motor con el dinamómetro a su carga mínima, medida en el inciso 9.3.4 en N·m

n_o es la frecuencia de rotación en vacío, en min⁻¹

9.4.5 Cálculo de la potencia de salida corregida

Cuando la medición del par se hace entre el motor de prueba y el dinamómetro, las pérdidas del dinamómetro no afectan a la medición, por lo que este paso no es necesario.

a) Se calculan los valores de par torsional corregido T_c, sumando el factor de corrección del dinamómetro FCD, a los valores de par medidos T_m.

b) Se calcula la potencia de salida corregida de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_s = \frac{T_c \cdot n_m}{9\,549} \quad [\text{kW}]$$

donde:

T_c es el par torsional corregido del motor para cada valor de carga, en N·m

n_m es la frecuencia de rotación para cada valor de carga, en min⁻¹

9.4.6 Cálculo de las pérdidas indeterminadas

Para calcular las pérdidas indeterminadas en cada uno de los seis valores de carga medidos en el inciso 9.3.3, se calcula la potencia residual P_{res} como sigue:

$$P_{res} = P_e - P_s - I^2 R_m - P_h - P_{fv} - I^2 R_r \quad [\text{kW}]$$

donde:

P_e es la potencia de entrada para cada valor de carga medida en el inciso 9.3.3

P_s Potencia de salida corregida para cada punto de carga, en kW

I²R_m Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para cada punto de carga, en kW

P_h Pérdidas en el núcleo, en kW

P_{fv} Pérdidas por fricción y ventilación, en kW

I²R_r Pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor para cada punto de carga, en kW

Para suavizar la curva de potencia residual, P_{res}, contra el cuadrado del par torsional, T_c², para cada valor de carga, se usa el análisis de regresión lineal del Apéndice A.

$$P_{res} = AT_c^2 + B \quad [\text{kW}]$$

donde:

T_c es el par torsional corregido del motor para cada valor de carga, calculado en el inciso 9.4.5 (a), en N·m;

A es la pendiente de la recta para el análisis de regresión lineal, y

B es la intersección de la recta con el eje de las ordenadas

Si el coeficiente de correlación ### es menor que 0,9, se elimina el peor punto y se calculan nuevamente A y B. Si el valor de ### se incrementa hasta hacerlo mayor que 0,9, se usa el segundo cálculo. En caso contrario, la prueba no fue satisfactoria, indicando errores en la instrumentación, de lectura o ambos. Se debe investigar la fuente de estos errores y corregirse, para posteriormente repetir las pruebas. Cuando el valor de A se establece conforme al párrafo anterior, se pueden calcular las pérdidas indeterminadas para cada uno de los valores de carga del inciso 9.3.3 de la siguiente forma:

$$P_{nd} = AT_c^2 \quad [\text{kW}]$$

donde:

T_c es el par torsional corregido del motor para cada valor de carga, calculado en el inciso 9.4.5(a), en N·m, y

A es la pendiente de la recta

9.5 Corrección por temperatura para las pérdidas por efecto Joule

9.5.1 Cálculo de las pérdidas por efecto Joule en el estator corregidas por temperatura

Se calculan las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator corregidas de la temperatura ambiente t_{af}, medida en el inciso 9.3.2, a la temperatura ambiente de 25°C, para cada uno de los seis valores de carga medidos en el inciso 9.3.3, usando la siguiente ecuación:

$$I^2 R_{mc} = 0,0015 \cdot I_m^2 \cdot R_{mc} \quad [\text{kW}]$$

donde:

I_m es el promedio de las corrientes de línea para cada valor de carga del inciso 9.3.3, en A;

R_{mc} es la resistencia de referencia R_f del inciso 9.3.2, corregida a una temperatura ambiente de 25°C de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_{mc} = R_f \cdot \frac{t_c + K}{t_f + K} \quad [\Omega]$$

donde:

t_c promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator, t_f, del inciso 9.3.2, corregida a una temperatura ambiente de 25°C (t_c = t_f + 25°C - t_{af}), en °C;

t_f es el promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator, durante la prueba de equilibrio térmico a plena carga del inciso 9.3.2, en °C, y

K es la constante del material y es igual a 234,5 para el cobre puro. Para otros materiales en los devanados, deberá usarse el valor especificado por el fabricante del material.

9.5.2 Cálculo de las pérdidas por efecto Joule en el rotor corregidas por temperatura

Se calculan las pérdidas por efecto Joule en los devanados del rotor, corregidas de la temperatura ambiente t_{af}, medida en el inciso 9.3.2, a la temperatura ambiente de 25°C, para cada uno de los seis valores de carga medidos en el inciso 9.3.3, usando la siguiente ecuación:

$$I^2 R_{rc} = (P_e - I^2 R_{mc} - P_h) \cdot S_{mc} \quad [\text{kW}]$$

donde:

$$S_{mc} = S_m \cdot \frac{t_c + K}{t_m + K}$$

donde:

S_{mc} es el deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, referido a una temperatura ambiente de 25°C;

S_m es el deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona medida en el inciso 9.3.3 y calculado en el inciso 9.4.3;

t_m es el promedio de las temperaturas de los devanados por cada valor de carga del inciso 9.3.3, en °C;

t_c promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator, t_f, medida en el inciso 9.3.2, corregida a una temperatura ambiente de 25°C (t_c = t_f + 25 °C - t_{af}), en °C;

t_{af} es la temperatura ambiente durante la prueba de equilibrio térmico a plena carga del inciso 9.3.2, en °C;

K es la constante del material y es igual a 234,5 para el cobre puro. Para otros materiales en los devanados, deberá usarse el valor especificado por el fabricante del material.

9.6 Cálculo de la potencia de salida a 25 °C

Se calcula la potencia de salida corregida a la temperatura ambiente de 25 °C, para cada uno de los seis valores de carga del inciso 9.3.3 usando la siguiente ecuación:

$$P_{sc} = P_e - P_h - P_{fv} - P_{nd} - I^2 R_{mc} - I^2 R_{rc} \quad [\text{kW}]$$

donde:

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

- P_{sc}** Potencia de salida corregida para cada punto de carga, referido a una temperatura ambiente de 25 °C, en kW
- P_e** es la potencia de entrada para cada valor de carga medida en el inciso 9.3.3
- P_h** Pérdidas en el núcleo, en kW
- P_{fv}** Pérdidas por fricción y ventilación, en kW
- P_{ind}** Pérdidas indeterminadas, en kW
- I²R_{mc}** Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para cada punto de carga, referidas a una temperatura ambiente de 25°C, en kW
- I²R_{ro}** Pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor para cada punto de carga, referidas a una temperatura ambiente de 25°C en kW

9.7 Cálculo de la eficiencia

Se calcula la eficiencia **###_m** para cada uno de los seis valores de carga del inciso 9.3.3 usando la siguiente ecuación:

$$\eta_m = \frac{P_{sc}}{P_e} \quad [\%]$$

donde:

- P_{sc}** Potencia de salida corregida para cada punto de carga, referida a una temperatura ambiente de 25 °C, en kW
- P_e** Potencia de entrada para cada valor de carga, en kW

9.8 Eficiencia en cualquier punto de carga

Para determinar la eficiencia en algún valor preciso de carga, se traza una curva con la eficiencia calculada según el inciso 9.7 contra la potencia de salida corregida calculada en el inciso 9.6.

10. Marcado

La información mínima que se debe marcar en la placa de datos del motor es:

- ###** La marca, modelo, tipo de enclaustramiento;
- ###** La eficiencia nominal precedida del símbolo "###" (2 dígitos enteros y 1 decimal);
- ###** La eficiencia mínima asociada precedida del símbolo "###_{min}" (2 dígitos enteros y 1 decimal);
- ###** La potencia nominal en kW;
- ###** La tensión eléctrica en V;
- ###** La frecuencia eléctrica en Hz, y
- ###** La frecuencia de rotación en min⁻¹ o r/min.

Además de la información especificada por otras normas oficiales mexicanas vigentes que sean aplicables.

Los motores certificados en el cumplimiento de esta Norma, podrán ostentar la contraseña del organismo certificador dentro o fuera de la placa de datos.

11. Vigilancia

La Secretaría de Energía y la Procuraduría Federal del Consumidor, conforme a sus atribuciones y en el ámbito de sus respectivas competencias, son las autoridades que están a cargo de vigilar el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana.

El incumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana debe ser sancionado conforme a lo dispuesto por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, su Reglamento y demás disposiciones.

12. Evaluación de la conformidad

La evaluación de la conformidad de los motores con las especificaciones de la presente Norma Oficial Mexicana, se realiza por personas acreditadas y aprobadas en términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento.

13. Bibliografía

Ley Federal sobre Metrología y Normalización, publicado en el **Diario Oficial de la Federación** el 1 de julio de 1992.

Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, publicado en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de enero de 1999.

- NOM-016-ENER-1997 Eficiencia energética de motores de corriente alterna trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0,746 a 149,2 kW. Límites, método de prueba y marcado, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 17 de junio de 1998.
- NMX-Z-013/1-1977 Guía para la redacción, estructuración y presentación de las normas oficiales mexicanas, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 31 de octubre de 1977.
- NMX-J-075/1-ANCE Aparatos Eléctricos-Máquinas Rotatorias Parte 1: Motores de Inducción de Corriente Alterna del Tipo de Rotor en Cortocircuito, en Potencias Desde 0,062 a 373 kW-Especificaciones.
- NMX-J-075/2-ANCE Aparatos Eléctricos-Máquinas Rotatorias Parte 2: Motores de Inducción de Corriente Alterna del Tipo de Rotor en Cortocircuito, en Potencias Grandes-Especificaciones.
- NMX-J-075/3-ANCE Aparatos Eléctricos-Máquinas Rotatorias Parte 3: Métodos de Prueba para Motores de Inducción de Corriente Alterna del Tipo de Rotor en Cortocircuito, en Potencias desde 0,062 kW-Métodos de Prueba.
- CSA C390 Energy Efficiency Test Methods for Three-Phase Induction Motors.
- CSA C22.2-100 Motors and Generators.
- IEC 34 PT-1 Rotating Electrical Machines. Part 1: Rating and Performance.
- IEC 34 PT-2 Rotating Electrical Machines. Part 2: Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machines.
- IEEE Std. 112 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
- NEMA MG 1 Motors and Generators.
- IEEE 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems

14. Concordancia con normas internacionales

Esta Norma no concuerda con ninguna norma internacional, por no existir referencia alguna en el momento de su elaboración.

15. Transitorios

1. Esta Norma Oficial Mexicana cancela y sustituye a la NOM-016-ENER-1997, Eficiencia energética de motores de corriente alterna trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0,746 kW a 149,2 kW. Límites, método de prueba y marcado que fue publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 17 de junio de 1998.
2. La presente Norma entrará en vigor a los 60 días naturales después de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación** y a partir de esta fecha todos los motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 kW a 149,2 kW comprendidos en el campo de aplicación de esta Norma Oficial Mexicana, deben ser certificados con base a la misma.
3. El marcado del valor de la eficiencia mínima asociada "###_{min}" indicado en el inciso 10. Marcado (placa de datos), entrará en vigor el 1 de enero de 2004.

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

4. Para los motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal mayores a 149.2 kW y hasta 373 kW, el cumplimiento será exigible hasta que se cuente con la infraestructura para la evaluación de la conformidad.
5. Los motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla con certificado de cumplimiento con la NOM-016-ENER-1997, expedido por los organismos de certificación acreditados y aprobados antes de esta fecha, podrán ser comercializadas como máximo hasta el término de su vigencia estipulada en el mismo.
6. No es necesario esperar el vencimiento del certificado de cumplimiento con la NOM-016-ENER-1997 para obtener el certificado de cumplimiento con la NOM-016-ENER-2002, si así le interesa al comercializador.

México, D.F., a 20 de diciembre de 2002.- El Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos y Director General de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, **Odón de Buen Rodríguez**.- Rúbrica.

**Apéndice A
Análisis de Regresión Lineal**

El propósito del análisis de regresión lineal es el encontrar una relación matemática entre dos conjuntos de variables, tal que los valores de una variable puedan ser usados para predecir la otra. La regresión lineal asume que los dos conjuntos de variables están relacionados linealmente, esto es, que si los valores de dos variables (x_i, y_i) son graficados, los puntos casi se ajustarán a una línea recta. El coeficiente de correlación (###), indica qué tan bien se ajustan estos pares de valores a una línea recta.

La relación de una línea recta se expresa de la siguiente forma:

$$Y = AX + B$$

donde:

- Y es la variable dependiente;
- X es la variable independiente;
- A es la pendiente de la recta, y
- B es la intersección de la recta con el eje de las ordenadas.

La pendiente de la recta (A) y la intersección con el eje de las ordenadas se calculan usando las siguientes dos fórmulas de regresión lineal:

$$A = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$B = \frac{\sum Y}{N} - A \frac{\sum X}{N}$$

donde:

N es el número de parejas (x_i, y_i), el coeficiente de correlación (###) se calcula usando la siguiente fórmula:

$$r = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{(N \sum X^2 - (\sum X)^2)(N \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}}$$

Los valores del coeficiente de correlación van desde -1 a +1. Un valor negativo indica una relación negativa (es decir, si X aumenta, Y disminuye o viceversa), y un valor positivo indica una relación positiva (es decir, si X aumenta, Y aumenta). Entre más cercano es el valor a -1 o +1 es mejor la relación. Un coeficiente de correlación cercano a cero indica una inexistencia de relación.

**Apéndice B
Nomenclatura**

- A Pendiente de la recta para el análisis de regresión lineal.

- B Intersección de la recta con el eje de las ordenadas para el análisis de regresión lineal.
- FCD Factor de Corrección del Dinamómetro, en N m
- I_0 Promedio de las corrientes de línea con el motor operando en vacío, en A
- I_m Promedio de las corrientes de línea para cada punto de carga, en A
- I_{min} Promedio de las corrientes de línea con el dinamómetro a su carga mínima, en A
- I^2R_{EO} Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para la operación en vacío del motor, en kW
- I^2R_m Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para cada punto de carga, en kW
- I^2R_{mc} Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para cada punto de carga, referidas a una temperatura ambiente de 25°C, en kW
- I^2R_{min} Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator durante la prueba con carga mínima en el dinamómetro, en kW
- I^2R_r Pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor para cada punto de carga, en kW
- I^2R_{rc} Pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor para cada punto de carga, referidas a una temperatura ambiente de 25°C en kW
- K Constante del material de los devanados del estator
- n_m Frecuencia de rotación para cada punto de carga, en min^{-1}
- n_{min} Frecuencia de rotación con el dinamómetro a su carga mínima, en min^{-1}
- n_0 Frecuencia de rotación en vacío, en min^{-1}
- n_s Frecuencia de rotación síncrona, en min^{-1}
- P_0 Potencia de entrada con el motor operando en vacío, en kW
- P_d Potencia demandada al motor bajo prueba por el dinamómetro a su carga mínima, en kW
- P_e Potencia de entrada para cada valor de carga, en kW
- P_{fv} Pérdidas por fricción y ventilación, en kW
- P_h Pérdidas en el núcleo, en kW
- P_{ind} Pérdidas indeterminadas, en kW
- P_{min} Potencia de entrada con el dinamómetro a su carga mínima, en kW
- P_{res} Potencia residual para cada punto de carga, en kW
- P_s Potencia de salida corregida para cada punto de carga, en kW
- P_{sc} Potencia de salida corregida para cada punto de carga, referida a una temperatura ambiente de 25°C, en kW
- R_{EO} Resistencia del estator medida entre las terminales de referencia, a la temperatura de la prueba de operación en vacío, en ###
- R_r Resistencia del estator medida entre las terminales de referencia después de la estabilización térmica del motor al 100% de su carga nominal, en ###
- R_i Resistencia de referencia medida inicialmente con el motor en frío, en ###
- R_m Resistencia del estator corregida a la temperatura de los devanados para cada punto de carga, en ###
- R_{mc} Resistencia del estator corregida a la temperatura de los devanados para cada punto de carga, referida a una temperatura ambiente de 25°C, en ###
- R_{min} Resistencia de referencia corregida a la temperatura de los devanados durante la prueba con carga mínima en el dinamómetro, en ###
- S_m Deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, para cada punto de carga medido

Anexo II: NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002

S_{mc}	Deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, para cada punto de carga medido, referido a una temperatura ambiente de 25°C
$S_{mín}$	Deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, con el dinamómetro a su carga mínima
T_c	Par torsional del motor corregido para cada punto de carga, en N·m
T_m	Par torsional del motor para cada punto de carga, en N·m
$T_{mín}$	Par torsional del motor con el dinamómetro a su carga mínima, en N·m
t_D	Promedio de las temperaturas de los devanados del estator para cada uno de los valores de tensión con el motor operando en vacío, en °C
t_{af}	Temperatura ambiente durante la prueba de estabilidad térmica a carga plena, en °C
t_{ai}	Temperatura ambiente durante la medición de los valores iniciales de resistencia y temperatura de los bobinados, en °C
t_{am}	Temperatura ambiente durante las pruebas a diferentes cargas, en °C
t_c	Temperatura t_r referida a una temperatura ambiente de 25°C, en °C
t_r	Promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator después de la estabilización térmica a la cual se midió la resistencia R_r en las terminales de referencia, en °C
t_i	Promedio de las temperaturas de los devanados del estator con el motor en frío, en °C
t_m	Promedio de las temperaturas de los devanados del estator para cada punto de carga, en °C
$t_{mín}$	Promedio de las temperaturas de los devanados del estator con el dinamómetro a su carga mínima, en °C
###	Factor de correlación para el análisis de regresión lineal
###	Eficiencia nominal, en por ciento
### _m	Eficiencia calculada a la potencia nominal del motor, en por ciento
DAT	Distorsión armónica total, en por ciento

55,95	75
74,60	100
93,25	125
111,9	150
149,2	200
186,5	250
223,8	300
261,1	350
298,4	400
335,7	450
373,0	500

Apéndice C
EQUIVALENCIA ENTRE kW y Cp

Potencia en kW	Potencia en Cp
0,746	1
1,119	1,5
1,492	2
2,238	3
3,730	5
5,595	7,5
7,460	10
11,19	15
14,92	20
18,65	25
22,38	30
29,84	40
37,30	50
44,76	60

Anexo III: Guía de aplicaciones del Multímetro Fluke 43B Power Quality Analyzer

Capítulo 4 Motores

Introducción

Esta sección presenta ejemplos que pueden utilizarse para la localización de averías en motores de inducción con y sin variadores de velocidad.

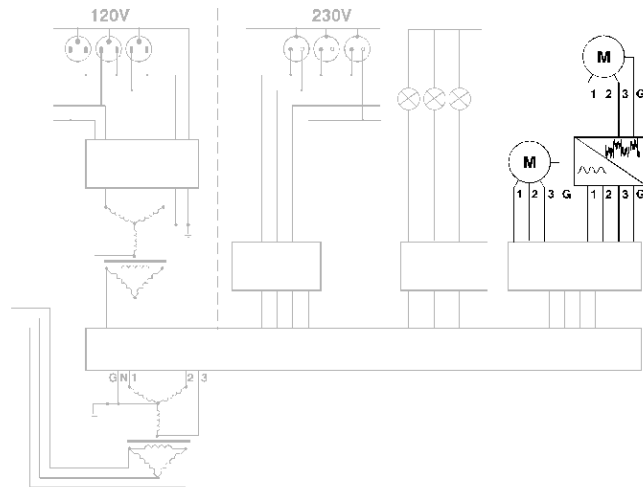


Figura 4. Sistema de distribución: Motores

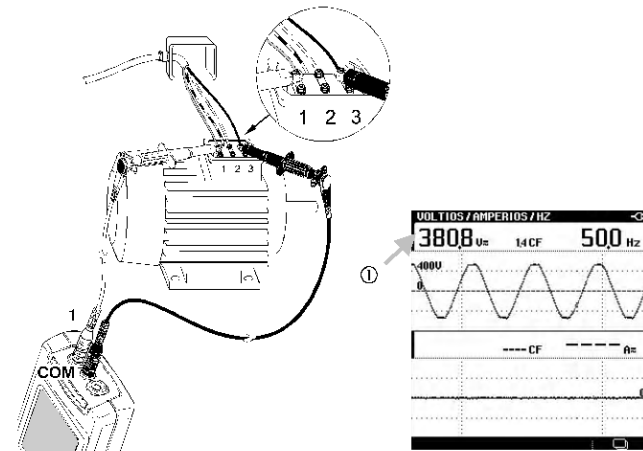
Fluke 43B
Guía de aplicaciones

Motores de inducción

Comprobación del desequilibrio de tensión

En los motores de inducción trifásicos, la tensión de alimentación de las tres fases debe estar equilibrada. El desequilibrio de tensión provoca corrientes altamente desequilibradas en el devanado del estator, provocando el recalentamiento y el acortamiento de la vida útil del motor.

- 1 Abra el menú principal.
- 2 **VOLTIOS/AMPERIOS/HZ** →
- 3 Realice las conexiones como indica la imagen:



- ① Anote la tensión registrada de fase 1 a fase 3 (V_{1-3}).
- 4 Repita esta medición de fase 2 a fase 3, y de fase 1 a fase 2. Anote los valores de V_{2-3} y V_{1-2} .

Motores **4**
Motores de inducción

5 Calcule el desequilibrio de tensión (escriba los resultados de la medición):

a Calcule primero la media de tensión:

Media de tensión:

$$\frac{\text{--- } V_{1-3} + \text{--- } V_{2-3} + \text{--- } V_{1-2}}{3} = \frac{\text{--- } V}{3} = \text{--- } V_{\text{MEDIA}}$$

b A continuación, calcule la desviación máxima de la media. Ignore los signos menos (-):

Desviación máxima:

$$V_{1-3} - V_{\text{MEDIA}} = \text{--- } V$$

$$V_{2-3} - V_{\text{MEDIA}} = \text{--- } V$$

$$V_{1-2} - V_{\text{MEDIA}} = \text{--- } V$$

Mayor desviación: $\text{--- } V_{\text{DESVIACIÓN}}$

c Por último, calcule el desequilibrio de tensión:

Desequilibrio de tensión:

$$\frac{\text{--- } V_{\text{DESVIACIÓN}}}{\text{--- } V_{\text{MEDIA}}} \times 100\% = \text{--- } \%$$

El desequilibrio de la tensión de los motores trifásicos no debe ser superior al 1%. El desequilibrio de tensión puede ser consecuencia de conexiones, contactos o fusibles deficientes, o bien de problemas en el transformador de fuente.

Ejemplo

a
$$\frac{403 V_{1-3} + 391 V_{2-3} + 406 V_{1-2}}{3} = \frac{1200 V}{3} = 400 V_{\text{MEDIA}}$$

b
$$403 V_{1-3} - 400 V_{\text{MEDIA}} = 3 V$$

$$391 V_{2-3} - 400 V_{\text{MEDIA}} = -9 V$$
 Mayor desviación: $9 V_{\text{DESVIACIÓN}}$




$$406 V_{1-2} - 400 V_{\text{MEDIA}} = 6 V$$

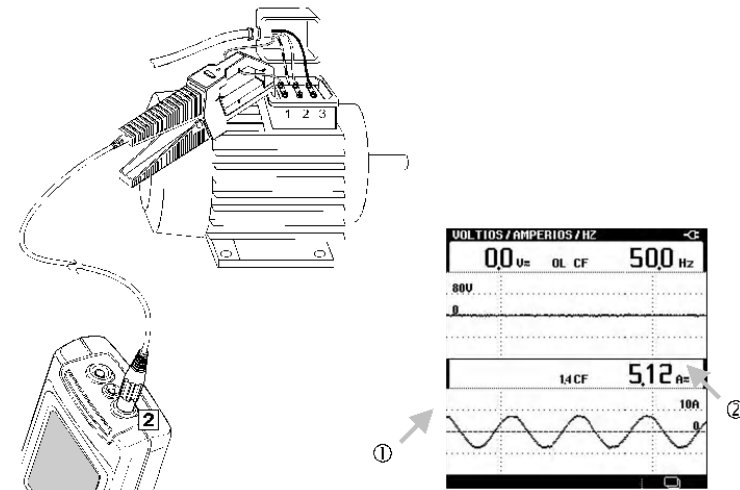
c
$$\frac{9 V_{\text{DESVIACIÓN}}}{400 V_{\text{MEDIA}}} \times 100\% = 2,25 \%$$

Fluke 43B
Guía de aplicaciones

Comprobación de la corriente y del desequilibrio de corriente

Tras comprobar el desequilibrio de tensión, compruebe la corriente y el desequilibrio de corriente. Las corrientes desequilibradas provocan recalentamientos y reducen la vida útil del motor. También la puesta a una fase (pérdida total de corriente en una de las fases que alimenta al motor) puede causar recalentamientos en los devanados de las otras dos fases.

- 1  Abra el menú principal.
- 2  **VOLTIOS/AMPERIOS/HZ** 
- 3 Realice las conexiones como indica la imagen. Ponga en marcha el motor a plena carga.



- 1 Si no detecta la presencia de corriente, es posible que haya un fusible o devanado abierto.
- 2 Anote la lectura de la corriente (A₁).

Motores
Motores de inducción **4**

- 4 Repita esta medición en las fases 2 y 3. Anote los valores de A_2 y A_3 .
- 5 Calcule el desequilibrio de corriente. Utilice la misma fórmula que en la sección anterior, aunque sustituyendo corriente por tensión.

El desequilibrio de corriente en los motores trifásicos no debe exceder del 10%.

Ejemplo

a	$33 A_1 + 29 A_2 + 34 A_3 = 96 A_{TOTAL}$ <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> $3 = 32 A_{MEDIA}$
b	$33 A_1 - 32 A_{MEDIA} = 1 A$ $29 A_2 - 32 A_{MEDIA} = - 3 A$ Mayor valor: $3 A_{DESMIACION}$ $34 A_3 - 32 A_{MEDIA} = 2 A$
c	$\frac{3 A_{DESMIACION}}{32 A_{MEDIA}} \times 100\% = 9,4 \%$

Nota





Para detectar una puesta a una fase compruebe siempre la corriente de las tres fases. Al realizar una medición de tensión en los terminales del motor, los resultados registrados serán próximos a los normales, por cuanto el accionamiento del motor induce tensión en el devanado abierto.

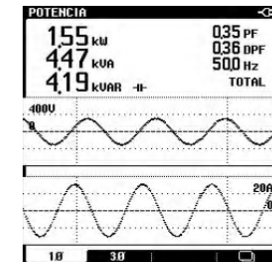
Fluke 43B
Guía de aplicaciones

MEDICIÓN DE LA POTENCIA EN SISTEMAS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS.

El Fluke 43B puede realizar mediciones de potencia en sistemas de potencia equilibrados trifásicos de tres conductores. La carga debe tener aproximadamente la misma tensión y corriente en las tres fases, y debe seguir una configuración en Y o delta.

El hecho de que la carga esté equilibrada hace posible que se pueda calcular la potencia trifásica desde un canal de corriente y un canal de tensión. Las mediciones de potencia trifásica sólo se pueden realizar en la componente fundamental.

- 1  Abra el menú principal.
- 2  **POTENCIA** 
- 3  Seleccione la medición trifásica.
- 4 Realice las conexiones como se indica en la pantalla de ayuda.






Motores 4
Motores de inducción

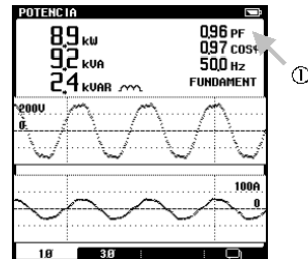
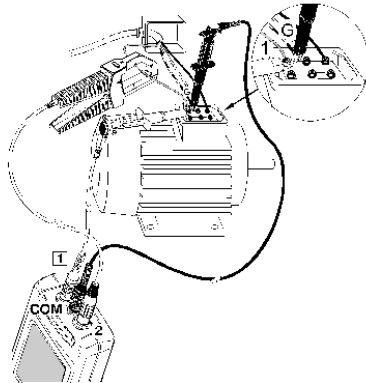
Medición del factor de potencia de motores trifásicos

Un factor de potencia de valor próximo a 1 significa que el motor consume casi toda la potencia suministrada. Un factor de potencia inferior a 1 da como resultado corrientes adicionales, denominadas *corrientes reactivas*. Esto requiere mayores líneas de alimentación y transformadores. Además, habrá más pérdida de energía en las líneas de transmisión.

Conexión en estrella puesta a tierra con carga equilibrada

En los motores equilibrados con conexión en estrella puesta a tierra, es posible leer el factor de potencia directamente en la pantalla. Para realizar una prueba de estrella puesta a tierra límitese a comprobar las tres tensiones de fase a tierra. Si son estables e iguales, el sistema está cableado en estrella. Mida el factor de potencia del siguiente modo:

- 1  Abra el menú principal.
- 2  **POTENCIA** → 
- 3 Realice las conexiones como indica la imagen. Ponga a funcionar el motor a plena carga normal (el factor de potencia disminuye a menos de la carga plena).






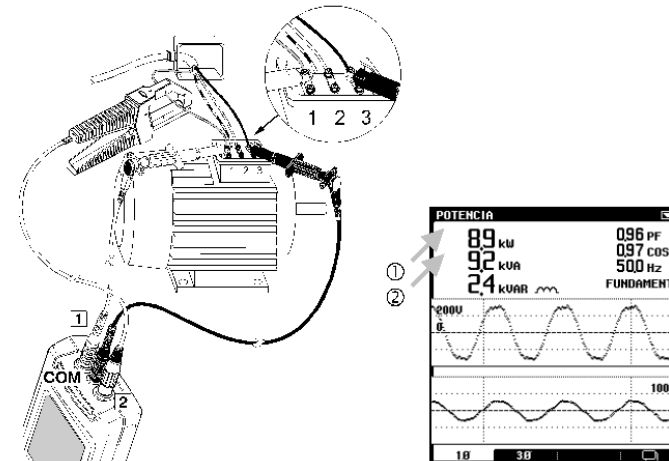
① Observe el factor de potencia (PF).

Fluke 43B
Guía de aplicaciones

Conexión delta o sistemas flotantes

En sistemas delta, el procedimiento es más complejo. Utilice el siguiente método para calcular el factor de potencia de un motor trifásico con conexión delta puesta a tierra o con fuentes flotantes.

- 1  Abra el menú principal.
- 2  **POTENCIA** → 
- 3 Haga las conexiones a las fases 1 y 3 como indica la imagen. Ponga a funcionar el motor a plena carga (el factor de potencia disminuye a menos de la carga plena).



- ① Anote el resultado de la potencia real (kW_1) desde fase 1 a 3.
- ② Anote el resultado de la potencia aparente (kVA).

Motores **4**
Motores de inducción

- 4** Mueva el cable de prueba rojo y la sonda de corriente a la fase 2 (mantenga el cable de prueba negro conectado a la fase 3).

Anote el resultado de la potencia real (kW_2). Si el factor de potencia es inferior a 1, kW_1 y kW_2 serán diferentes incluso si las corrientes de carga están equilibradas. Obsérvese que la potencia aparente (kVA) es idéntica a la primera medición.

- 5** Calcule el factor de potencia (escriba los resultados de la medición):

$$\frac{\text{___ } kW_1 + \text{___ } kW_2}{\sqrt{3} * \text{___ } kVA} = \frac{\text{___ } kW_{TOTAL}}{\text{___ } kVA} = \text{___}$$

Ejemplo

Medición: $kW_1 = 170 \text{ kW}$ $kW_2 = 68 \text{ kW}$ $kVA = 188 \text{ kVA}$

$$\frac{170 \text{ kW} + 68 \text{ kW}}{1,73 * 188 \text{ kVA}} = \frac{238 \text{ kW}_{TOTAL}}{325,6 \text{ kVA}} = 0,73$$

Un factor de potencia deficiente puede mejorarse añadiendo condensadores en paralelo con la carga.

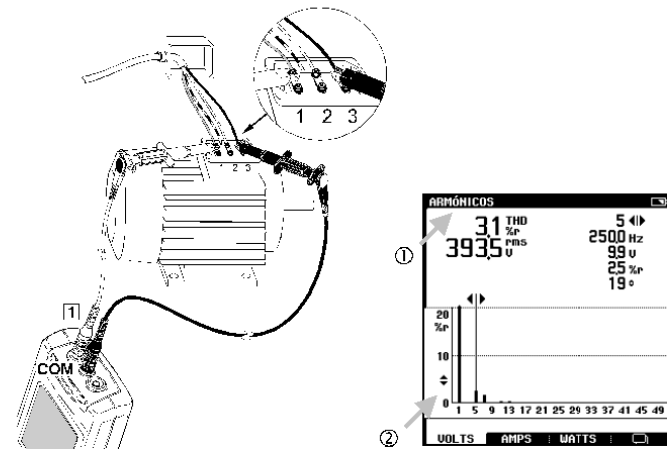
Si se detecta la presencia de armónicos, consulte con un técnico cualificado antes de instalar condensadores. Las cargas no lineales, como los variadores de velocidad, generan corrientes de carga no sinusoidales con armónicos. Las corrientes de armónicos incrementan la kVA y, por consiguiente, disminuyen el factor de potencia total. Un factor de potencia total deficiente provocado por armónicos requiere filtrado para su corrección.

Fluke 43B
Guía de aplicaciones

Medición de los armónicos de la tensión

Cuando la tensión de alimentación es distorsionada por armónicos, el motor puede sufrir recalentamientos.

- 1 Abra el menú principal.
- 2
- 3 Realice las conexiones como indica la imagen:



- 1 Observe la lectura de THD. En general, la distorsión armónica total de la tensión de alimentación suministrada a un motor de inducción no debe exceder del 5%.
- 2 Observe el espectro de armónicos. Los armónicos de secuencia negativa (5°, 11°, 17°, etc.) provocarán la mayor parte del recalentamiento, ya que intentarán accionar el motor más lentamente que el fundamental (pueden crear campos magnéticos de rotación inversa dentro del motor). Los armónicos de secuencia positiva (7°, 13°, 19°, etc.) también provocan recalentamiento porque intentan hacer funcionar el motor más rápidamente que el fundamental.