

44
25.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

"AHORRO DE ENERGIA MEDIANTE EL USO DE
MOTORES DE INDUCCION TIPO JAULA DE ARDILLA
DE ALTA EFICIENCIA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N :

ANTONIO GARCIA JIMENEZ

FRANCISCO JAVIER JUAREZ LOPEZ

ASESOR: ING. VICTOR HUGO LANDA OROZCO

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX. 1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

266329



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA F.E.S.-CUAUTITLAN
P R E S E N T E

AT'N: Q. María del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S.-C

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: El trabajo de tesis:

"Ahorro de energía mediante el uso de motores de inducción tipo jaula de ardilla de alta eficiencia".

que presenta el pasante: García Jiménez Antonio,
con número de cuenta: 8707443-9 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 13 de Marzo de 1998

PRESIDENTE	Inq. Aquiles Reyes Flores	<u>[Firma]</u>
VOCAL	Inq. Esteban Corona Escamilla	<u>[Firma]</u>
SECRETARIO	Inq. Victor Hugo Landa Orozco	<u>[Firma]</u>
PRIMER SUPLENTE	Inq. Oscar Cervantes Torres	<u>[Firma]</u>
SEGUNDO SUPLENTE	Inq. Anselmo Anco Torres	<u>[Firma]</u>



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVANZADA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA F.E.S.-CUAUTITLAN
P R E S E N T E

AT'N: Q. Maria del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S.-C

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: El trabajo de tesis:

"Ahorro de energía mediante el uso de motores de inducción tipo jaula de
ardilla de alta eficiencia".

que presenta el pasante: Juárez López Francisco Javier,
con número de cuenta: 8727278-3 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautilán Izcalli, Edo. de México, a 13 de Marzo de 1998

PRESIDENTE	<u>Ing. Aquiles Reyes Flores</u>	
VOCAL	<u>Ing. Esteban Corona Escamilla</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Victor Hugo Landa Orozco</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Oscar Cervantes Torres</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Anselmo Angoa Torres</u>	

CAPITULO II. EL MOTOR DE INDUCCION TIPO JAULA DE ARDILLA DE ALTA EFICIENCIA.

II.1.	Diseño y fabricación.....	38
II.1.1.	Mejoras en los diseños.....	39
II.1.2.	Aplicación de nuevos materiales	42
II.1.3.	Automatización de la manufactura.....	43
II.1.4.	Ahorros de energía por innovaciones tecnológicas	43
II.2.	Clasificación y recomendaciones para reducir pérdidas en los motores.....	44
II.2.1.	Reducción de las pérdidas en los devanados.....	46
II.2.2.	Reducción de las pérdidas en el núcleo	48
II.2.3.	Reducción de las pérdidas mecánicas y de las indeterminadas.....	51
II.3.	Efecto de la eficiencia de un motor de inducción tipo jaula de ardilla de alta eficiencia en el ahorro de energía.....	52
II.3.1.	Factores que afectan al comportamiento de un motor	55
II.3.1.1.	Variación de tensión y voltaje desbalanceado	56
II.3.1.2.	Efectos de la variación de frecuencia.....	58
II.3.1.3.	Efecto de la carga.....	59
II.3.1.4.	Efecto del factor de potencia	60
II.3.1.5.	Ciclo de trabajo y arranques frecuentes.....	60
II.3.1.6.	Ahorro de energía en el mantenimiento	62
II.3.1.7.	Efecto de la altura sobre el nivel del mar	63
II.4.	Ventajas de los motores de alta eficiencia.....	64
II.4.1.	Mayor rendimiento y menor costo de operación.....	65
II.4.2.	Menores cargos por demanda máxima y menos pérdidas en vacío	66
II.4.3.	Menor capacidad en los dispositivos para corregir el factor de potencia y menores pérdidas en los ramales de alimentación.....	66
II.4.4.	Los ahorros se incrementan con el tiempo, además de reducir la carga para el acondicionamiento de aire local.....	67
II.4.5.	Eficiencia nominal de la placa	67
II.4.6.	Protección, control y operación más silenciosa con menor calentamiento	68

II.4.7. Mayor vida útil del aislamiento y de los rodamientos.....	69
II.4.8. Menor esfuerzo térmico durante el arranque y mayor capacidad de disipación térmica en condiciones de bloqueo	69
II.4.9. Mayores factores de servicio y más adecuados para los sistemas de administración de energía	70

CAPITULO III. LA TECNOLOGÍA DE LOS MOTORES EN LA ACTUALIDAD

III.1. Clasificación de rendimientos de equipos nacionales	72
III.1.1. Situación actual de los equipos nacionales	75
III.1.1.1. Industrias CONFAD.....	76
III.1.1.2. Industrias IEM	78
III.1.1.3. Industrias ABB.....	79
III.2. Clasificación de rendimientos de equipos en líderes tecnológicos	82

CAPITULO IV. AHORRO EN EL RAMO INDUSTRIAL

IV.1. Comparación y beneficio en el consumo y ahorro de energía eléctrica de un motor de inducción estándar respecto a un motor de inducción de alta eficiencia en la rama industrial	86
IV.1.1. Aplicación a un compresor de tornillo de una planta química	88
IV.1.2. Aplicación en acabados de hilados de una fábrica textil	89
IV.1.3. Aplicación a una bomba de una planta petroquímica	91
IV.2. Aplicación de motores de alta eficiencia en bombas de pozo profundo	92
IV.3. Aplicación en motobombas de una torre de enfriamiento.....	94
IV.4. Aplicaciones de motores en el área de producción en una empresa.....	96

Gracias a Dios por todas las bendiciones que me ha dado hasta el momento en mi vida, por permitirme alcanzar una meta más, con la cual pueda seguir ayudando a mis semejantes.

Mi más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México, y a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por su excelencia.

Con gratitud al Ing. Victor Hugo Landa Orozco, por su desinteresada dirección y asesoramiento en la realización de ésta tesis.

A mis padres, Sr. Antonio García Sánchez (†) y Sra. Soledad Jiménez Vázquez, por el apoyo recibido durante mi carrera, la confianza brindada aún en momentos difíciles y en especial por su cariño, para el cual no existen palabras que expresen lo que ha significado en el transcurso de mi vida, y en reconocimiento a sus generosos esfuerzos. Gracias.

A mis hermanos: Jesús, Mario, Armando, María Antonieta, Alejandro e Imelda, por su apoyo permanente y sin condiciones, su cariño y comprensión.

A mis verdaderos amigos, por su fraternidad y compañerismo.

A todos mis maestros a lo largo de mi vida, por brindarme sin condiciones ni medida, todo el caudal de conocimientos que me han ayudado a ser una persona consciente.

Por todo esto y mucho más, mi más profundo agradecimiento.

Antonio García Jiménez.

A mis padres Sr. Pedro Juárez Vázquez y Sra. María de la Paz López Galindo por todo el apoyo que me ofrecieron sin condiciones, por todas las veces que pasaron desvelos y sufrimientos.

A mis hermanos Luz María, Armando, Enrique, Norma, Alberto, Alejandro, Santiago y Margarita, por todo el apoyo y cariño ofrecido sin condiciones.

A mis Abuelos Sr. Cruz Juárez Olvera(†) que esta dentro de mi corazón y Sra. Margarita Vázquez Quiroz que siempre hubo una palabra de consuelo para salir adelante.

A todos mis amigos que siempre halle una mano de donde apoyarme.

Gracias por todo.

Francisco Javier Juárez López

OBJETIVOS

- Analizar la necesidad de ahorrar energía debido a las implicaciones que tiene desde el punto de vista económico.
- Determinar el ahorro de energía eléctrica con motores eléctricos de alta eficiencia, en comparación con motores eléctricos estándar o convencionales en la industria nacional.
- Demostrar que las etapas que han surgido en el desarrollo del motor eléctrico de inducción tipo jaula de ardilla, se han enfocado al ahorro de energía.
- Confirmar que al utilizar materiales y tecnología de punta en la fabricación de motores eléctricos de alta eficiencia, se puede ahorrar energía eléctrica.
- Observar que en la compra de un motor de alta eficiencia y utilizándolo en forma adecuada, se amortiza la inversión efectuada en poco tiempo.

INTRODUCCION

El ahorro de energía se ha convertido en una necesidad cada vez más apremiante para todo el mundo. Específicamente, la energía eléctrica, ha estado aumentando en sus costos de generación, transmisión y distribución, impactando directamente en las tarifas a los consumidores.

Desde hace varios años, se han realizado estudios, con el fin de encontrar mejores tecnologías para el ahorro de energía eléctrica. De tales estudios han surgido una serie de productos, tales como: lámparas de bajo consumo, equipos de refrigeración y calefacción optimizados, motores de alta eficiencia; así también han surgido campañas de concientización, programas para el uso eficiente y racional de la energía eléctrica, y normas para la fabricación de equipos eficientes.

En el rubro de los motores se ha comprobado que son los mayores consumidores de energía eléctrica generada, el consumo va desde un 53 hasta un 60 %, por lo tanto, son los que presentan mayores potenciales de ahorro de energía eléctrica, entre un 12 y un 15 %. Del universo de motores, se ha observado que existe un grupo que consume el 26 % de la energía eléctrica generada, se trata de los motores de inducción.

También se ha detectado que los motores en general, operan en promedio al 60 % de la carga nominal, y que poco más de la tercera parte del tiempo operan al 75 y 100 % de la carga.

De lo anterior se puede inducir, el porque este tipo de motores han presentado los mayores potenciales de ahorro, tanto de energía eléctrica como económicamente, y de ellos han resultado los motores de "alta eficiencia".

El presente trabajo de investigación, tiene como objetivo primordial, demostrar que con un motor de inducción tipo jaula de ardilla de alta eficiencia, se puede ahorrar tanto en el ámbito energético, como en el económico en corto tiempo; comparando este motor de alta eficiencia, con

un motor de eficiencia estándar, aplicando una misma operación, y observando el tiempo que permanecen en servicio, observaremos este ahorro.

En el capítulo I, se mencionan brevemente los antecedentes de lo que es un motor eléctrico, se menciona también el principio de funcionamiento del motor de inducción, de qué materiales se fabrica, y cuáles son sus partes principales, cuáles son las pérdidas que en él se presentan, y cómo es su eficiencia al utilizar los materiales con los que se fabrican estos motores.

En el capítulo II, se hace mención del motor de inducción de alta eficiencia, qué herramientas se utilizan para diseñar al motor y qué materiales se utilizan para la fabricación de este; también se considera cómo reducir las pérdidas e incrementar la eficiencia al hacer uso de nuevos materiales, así como las ventajas que surgen al utilizar un motor de alta eficiencia.

En el capítulo III, se clasifican las diferentes empresas dedicadas a la fabricación de los motores de inducción de alta eficiencia a nivel nacional, y de los principales países industrializados del mundo.

En el capítulo IV, se hace una comparación del motor de inducción tipo jaula de ardilla de alta eficiencia, con un motor de inducción de eficiencia estándar, aplicándolos a una misma actividad dentro del ramo industrial; se menciona además, como característica principal, el beneficio que trae en el consumo y ahorro de energía en dicha comparación.

Dentro del capítulo V, se menciona la forma en la que se puede regular la velocidad de un motor de inducción tipo jaula de ardilla, y cuáles son los métodos que se utilizan para efectuar dicha regulación para el ahorro de energía eléctrica; se menciona al varedor de frecuencia como el método más sencillo a utilizar junto con el motor de inducción de alta eficiencia, para poder utilizar hasta el 100 % de la energía, al surgir menos pérdidas.

En el capítulo VI, se mencionan los beneficios que se tiene al utilizar motores eléctricos de alta eficiencia, tanto para la compañía generadora y suministradora de la energía eléctrica, como para los usuarios de la misma.

Los motores eléctricos de inducción, son el “caballo de batalla” de la industria nacional, son el medio más sencillo y económico para la producción de fuerza motriz, tienen una mayor amplitud y gama de potencias, además de que son los mayores consumidores de energía; para el ahorro de energía se han utilizado hasta el momento arrancadores o limitadores de corriente de arranque, se han cambiado motores antiguos por motores modernos normalizados, vareadores de frecuencia para motores con cargas variables, la operación de motores un mayor número de horas, la secuencia de arranque de motores para reducir el pico de la corriente de arranque. Pero gracias a los nuevos materiales y a procesos de fabricación más precisos y eficientes, se han podido implementar para la construcción de motores de alta eficiencia, que en conjunto con los métodos tradicionales de ahorro de energía, traen como consecuencia un ahorro más significativo de energía eléctrica, beneficiando al medio ambiente al no utilizar tantos hidrocarburos para la producción de energía eléctrica, trayendo importantes ahorros a la nación, mayor concientización de los usuarios de energía eléctrica para el uso más racional de la energía.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	I
CAPITULO I. ANTECEDENTES	
I.1. Generalidades.....	1
I.2. El motor de inducción tipo jaula de ardilla de eficiencia estándar.....	6
I.2.1. Principio de funcionamiento del motor de inducción.....	7
I.2.2. Producción de un campo magnético rotatorio por aplicación de C.A. polifásica a la armadura del estator	8
I.2.3. Deslizamiento	10
I.2.4. Conductores del rotor, FEM inducida y par del rotor en reposo	12
I.2.5. Par de arranque, par de plena carga y par máximo de un motor de inducción.....	13
I.2.6. Curvas características.....	18
I.2.7. Diagrama de saturación sin carga	18
I.2.8. Diagrama de saturación a rotor bloqueado	19
I.2.9. Diagrama de operación	20
I.2.10. Circuito equivalente del motor de inducción.....	22
I.2.11. Características par-velocidad.....	25
I.3. Fabricación de un motor de inducción tipo jaula de ardilla.....	27
I.3.1. Generalidades	27
I.3.2. Partes principales que constituyen al motor de inducción y sus características.....	28
I.4. Pérdidas y eficiencias	30
I.4.1. Generalidades	30
I.4.2. Pérdidas mecánicas	31
I.4.3. Pérdidas magnéticas.....	32
I.4.4. Pérdidas eléctricas en los devanados.....	33
I.4.5. Pérdidas indeterminadas.....	34
I.4.6. Eficiencia.....	34

CAPITULO II. EL MOTOR DE INDUCCION TIPO JAULA DE ARDILLA DE ALTA EFICIENCIA.

II.1.	Diseño y fabricación.....	38
II.1.1.	Mejoras en los diseños.....	39
II.1.2.	Aplicación de nuevos materiales	42
II.1.3.	Automatización de la manufactura	43
II.1.4.	Ahorros de energía por innovaciones tecnológicas	43
II.2.	Clasificación y recomendaciones para reducir pérdidas en los motores.....	44
II.2.1.	Reducción de las pérdidas en los devanados.....	46
II.2.2.	Reducción de las pérdidas en el núcleo	48
II.2.3.	Reducción de las pérdidas mecánicas y de las indeterminadas.....	51
II.3.	Efecto de la eficiencia de un motor de inducción tipo jaula de ardilla de alta eficiencia en el ahorro de energía.....	52
II.3.1.	Factores que afectan al comportamiento de un motor	55
II.3.1.1.	Variación de tensión y voltaje desbalanceado	56
II.3.1.2.	Efectos de la variación de frecuencia.....	58
II.3.1.3.	Efecto de la carga.....	59
II.3.1.4.	Efecto del factor de potencia	60
II.3.1.5.	Ciclo de trabajo y arranques frecuentes.....	60
II.3.1.6.	Ahorro de energía en el mantenimiento	62
II.3.1.7.	Efecto de la altura sobre el nivel del mar	63
II.4.	Ventajas de los motores de alta eficiencia	64
II.4.1.	Mayor rendimiento y menor costo de operación.....	65
II.4.2.	Menores cargos por demanda máxima y menos pérdidas en vacío	66
II.4.3.	Menor capacidad en los dispositivos para corregir el factor de potencia y menores pérdidas en los ramales de alimentación.....	66
II.4.4.	Los ahorros se incrementan con el tiempo, además de reducir la carga para el acondicionamiento de aire local.....	67
II.4.5.	Eficiencia nominal de la placa	67
II.4.6.	Protección, control y operación más silenciosa con menor calentamiento	68

II.4.7. Mayor vida útil del aislamiento y de los rodamientos.....	69
II.4.8. Menor esfuerzo térmico durante el arranque y mayor capacidad de disipación térmica en condiciones de bloqueo	69
II.4.9. Mayores factores de servicio y más adecuados para los sistemas de administración de energía	70

CAPITULO III. LA TECNOLOGÍA DE LOS MOTORES EN LA ACTUALIDAD

III.1. Clasificación de rendimientos de equipos nacionales	72
III.1.1. Situación actual de los equipos nacionales	75
III.1.1.1. Industrias CONFAD	76
III.1.1.2. Industrias IEM	78
III.1.1.3. Industrias ABB	79
III.2. Clasificación de rendimientos de equipos en líderes tecnológicos	82

CAPITULO IV. AHORRO EN EL RAMO INDUSTRIAL

IV.1. Comparación y beneficio en el consumo y ahorro de energía eléctrica de un motor de inducción estándar respecto a un motor de inducción de alta eficiencia en la rama industrial	86
IV.1.1. Aplicación a un compresor de tornillo de una planta química	88
IV.1.2. Aplicación en acabados de hilados de una fábrica textil	89
IV.1.3. Aplicación a una bomba de una planta petroquímica	91
IV.2. Aplicación de motores de alta eficiencia en bombas de pozo profundo	92
IV.3. Aplicación en motobombas de una torre de enfriamiento.....	94
IV.4. Aplicaciones de motores en el área de producción en una empresa.....	96

**CAPITULO V. EL CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES DE INDUCCION TIPO
JAULA DE ARDILLA PARA EL AHORRO DE ENERGIA ELECTRICA**

V.1. Antecedentes	100
V.2. Regulación de velocidad	100
V.3. Vareadores de frecuencia.....	102
V.3.1. Teoría del vareador de velocidad	103
V.4. Tipos de vareadores de frecuencia	105
V.5. Aspectos a considerar en el ahorro de energía.....	106
V.6. Aplicaciones industriales.....	107
V.6.1. Ahorro de energía en aplicaciones de par variable	109
V.6.2. Ahorro de energía en aplicaciones de par constante	110
V.7. Estudio técnico-económico.....	111

CAPITULO VI. RECOMENDACIONES Y BENEFICIOS

VI.1. Demanda de energía eléctrica.....	117
VI.2. Capacidad instalada	118
VI.3. Efectos de la conversión de energía	119
VI.4. Conclusiones sobre la energía	120
VI.5. Conclusiones sobre motores eléctricos.....	122
VI.6. Posibilidades de ahorro de energía	122
VI.7. Recomendaciones para el ahorro de energía en motores eléctricos	123
VI.8. Beneficios del ahorro de energía en motores eléctricos.....	124

CONCLUSIONES.....	126
-------------------	-----

BIBLIOGRAFIA.....	130
-------------------	-----

CAPITULO I
ANTECENENTES

I.1 GENERALIDADES

La posibilidad de intercambio entre energía mecánica y eléctrica, se registró por primera vez en 1831, gracias al químico y físico inglés Michael Faraday (nació en 1791 en Nervington Butts y murió en 1867 en Hampton Curt). Este descubrimiento dio lugar al generador y al motor eléctrico, micrófono, bocina, transformador, galvanómetro, etc.

La conversión de energía electromagnética relaciona las fuerzas eléctricas y magnéticas del átomo con la fuerza mecánica que se aplica a la materia y al movimiento. La energía mecánica se puede convertir en energía eléctrica y viceversa mediante generadores y motores. Aunque en esta conversión se produce también otras formas de energía como calor y luz, para la mayor parte de los fines prácticos se mantienen al mínimo esas pérdidas de energía y se logra una conversión relativamente directa en ambas direcciones.

Algunos de los efectos electromagnéticos más importantes, que se mencionan a continuación, son los que relacionan la fuerza mecánica que se aplica a un cuerpo, (masa que consiste de partículas cargadas, protones y electrones en movimiento), que hace que se mueva, en presencia de campos eléctricos y magnéticos.

- LEY DE FARADAY DE LA INDUCCION ELECTROMAGNETICA.

La más importante contribución del descubrimiento de Faraday en 1831 fue la generación de un voltaje debido al movimiento relativo entre un campo magnético y un conductor de electricidad. A esto le denominó Faraday "voltaje inducido" porque sólo se presentaba cuando había movimiento relativo entre el conductor y un campo magnético sin contacto "físico" real entre ellos. El principio de la inducción electromagnética se comprende mejor con el diagrama que aparece en la figura I-1.

El enunciado general de la Ley de Faraday es el siguiente:

“La magnitud del voltaje inducido en una espira única de conductor es proporcional a la velocidad de cambio de líneas de fuerza que pasan a través de esa espira”

En 1845 Franz Ernst Neumann físico mineralogista alemán (nació en 1798 en Joachimsthal y murió en 1895 en Königsberg) cuantificó este enunciado en forma de ecuación en la cual la magnitud de una fuerza electromotriz generada (FEM) es directamente proporcional a la rapidez de cambio de los eslabonamientos de flujo:

(SI) $E = \frac{\phi}{t}$ volts (V) (I .1a)

(Sistema Ingles) $E = \frac{\phi}{t} \times 10^{-8}$ volts (V) (I .1b)

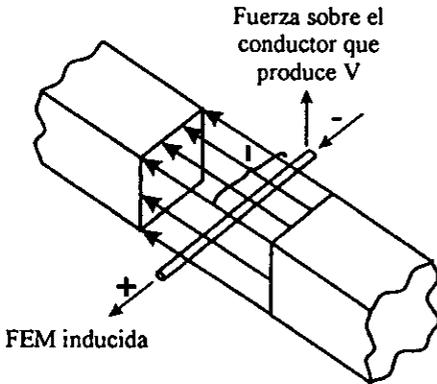


Figura I.1 Conductor de longitud l que se mueve a través de un campo magnético B para generar un FEM

En las cuales ϕ es el flujo en líneas o maxwells (sistema ingles) o en webers (SI), t es el tiempo en segundos en el cual se enlazan ϕ líneas, y E es el voltaje promedio generado por conductor.

• FACTORES QUE AFECTÁN A LA MAGNITUD DE LA FEM INDUCIDA

La cuantificación que hizo Neumann de la Ley de Faraday, tiene validez sólo cuando el circuito magnético es físicamente igual en su terminación y en su principio y durante el periodo de cambio de los eslabonamientos de flujo. Es más útil expresar la velocidad de cambio en términos de una densidad de flujo promedio, que se supone constante, y de la velocidad relativa entre este campo y un sólo conductor que se mueve a través de él. En la figura I-1, para el conductor de longitud activa l , se puede expresar la FEM instantánea inducida como:

$$\text{(Sistema Ingles)} \quad e = Blv \times (10^{-8} \text{V} \cdot \text{s} / \text{línea}) \quad \text{volts(V) (I .2a)}$$

$$\text{(SI)} \quad e = Blv \times (1 \text{V} \cdot \text{s} / \text{Wb}) \quad \text{volts(V) (I .2b)}$$

siendo B la densidad de flujo en líneas/pulg² (sist. inglés) o en teslas o Wb/m² (SI)

l es la longitud activa del conductor en pulg (sistema ingles) o en metros (SI)

v es la velocidad lineal relativa entre el conductor y el campo en pulg/seg, o en m/s.

Si tanto la densidad de flujo B como la velocidad relativa v del conductor o el campo son ambas uniformes y constantes, entonces el voltaje instantáneo e y el valor promedio E de la FEM inducida son iguales.

Las ecuaciones (I .1) y (I .2) están sujetas a varias restricciones. En la figura I-1 se supone que:

1. El campo B tiene densidad uniforme.
2. La fuerza que se aplica para mover el campo o el conductor, o ambos, producen movimiento relativo uniforme entre ellos.
3. El conductor, el campo y la dirección en la cual se mueve el conductor con respecto al campo, son perpendiculares entre sí.

Para una longitud activa dada del conductor, el producto ($\mathbf{B} \times \mathbf{v}$) en la ecuación (I.2) representa la rapidez de cambio del eslabonamiento de flujo de la cual depende la FEM inducida en un conductor determinado de longitud l . Si se aumenta bien sea la densidad de flujo o la velocidad relativa (o ambas), aumentarán, a su vez, la rapidez de cambio de los eslabonamientos de flujo y la FEM inducida en un conductor dado. También es bastante evidente que si se aumenta la longitud general del conductor no aumentará la FEM, ya que permanece invariable la longitud activa. La longitud activa l del conductor se puede aumentar: Empleando polos de campo más grandes, o más polos; o bien arrollando el conductor sobre sí mismo para que se conecten en serie varias longitudes activas, y que se presenten al campo magnético de tal modo que se muevan todas ellas en la misma dirección.

- DIRECCION DE LA FEM INDUCIDA. REGLA DE FLEMING.

La relación entre las direcciones de la FEM inducida, campo magnético y movimiento del conductor se representa mediante la regla de Fleming (John A. Fleming 1849-1945, Ingeniero Electricista inglés) que se muestra en la figura I-2a. Cuando se emplea una corriente convencional para determinar la dirección de la FEM, se llamará la regla de Fleming "de la mano derecha" como se muestra en la figura antes mencionada.

La regla de Fleming de la mano derecha supone que el campo es estacionario, y que el conductor se mueve con respecto a dicho campo. Como el voltaje inducido depende del movimiento relativo entre el conductor y el campo, se puede aplicar el caso de un conductor estacionario y un campo móvil, pero con la hipótesis de que el conductor se mueve en la dirección contraria. Como el pulgar en la figura I-2a indica la dirección del movimiento relativo del conductor hacia arriba solamente, la dirección en la figura de la FEM inducida representaría un movimiento hacia abajo del campo con respecto al conductor estacionario. Si se usa el pulgar para representar al movimiento del conductor, el índice para representar a la dirección del campo magnético y el dedo medio para representar la FEM inducida, verificamos la dirección de la FEM en la figura I-2b, debido a que se ha invertido su dirección.

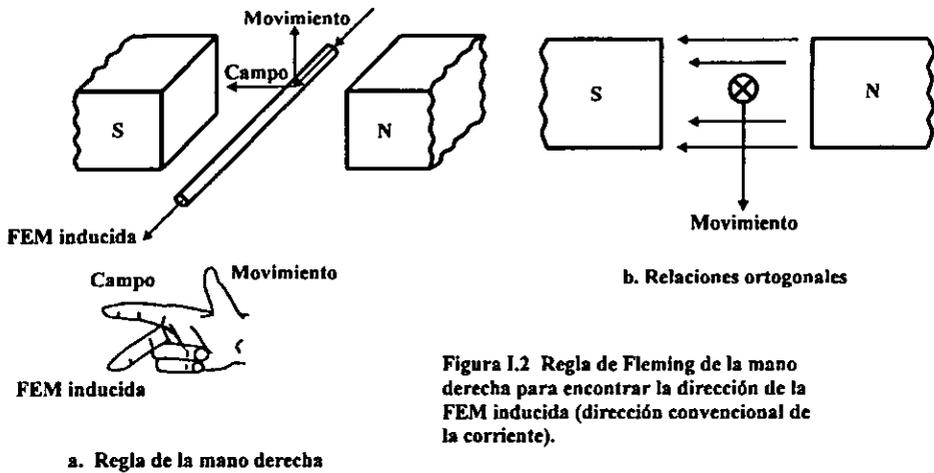


Figura 1.2 Regla de Fleming de la mano derecha para encontrar la dirección de la FEM inducida (dirección convencional de la corriente).

- LEY DE LENZ

Heinrich Friedrich Lenz (1804-1865) fué un fisico aleman que sin conocer el trabajo de Faraday, repitió casi simultaneamente muchos de sus descubrimientos. La ley que lleva su nombre constituye una regla útil para conocer el sentido de una FEM inducida.

Las direcciones del voltaje y la corriente inducidos en un conductor, tienen una relación definida con el cambio en el eslabonamiento de flujo que las induce. Esta relación se enuncia mediante la Ley de Lenz:

“En todos los casos de inducción electromagnética, un voltaje inducido hará que fluya una corriente en un circuito cerrado en dirección tal que su efecto magnético se oponga al cambio que la produce.”

En efecto, cuando un circuito o componente posee la propiedad de oponerse a cualquier cambio de la corriente en sí mismo, a esa propiedad se le llama inductancia y la FEM generada se llama de autoinducción.

Consideremos al conductor que aparece en la figura I-3a como un generador elemental que se mueve mediante alguna máquina en dirección hacia arriba, tal como se indica. Si se conecta alguna carga eléctrica a este generador elemental, la corriente tenderá a pasar en el conductor en la misma dirección que la FEM, produciendo un campo magnético alrededor del mismo como se muestra en la figura I-3b. El campo magnético en sentido contrario al de las manecillas del reloj que rodea al conductor repele al campo magnético arriba de él y atrae al campo magnético abajo de él; es decir, la corriente inducida produce un campo que se opone al movimiento que la origina. La tendencia del campo magnético es, por lo tanto, de tal naturaleza, según, la Ley de Lenz, que se opone al movimiento del conductor hacia arriba.

Aunque los generadores comerciales tienen muchas bobinas, y cada una de ellas consiste de conductores individuales y espiras conectadas en serie, es conveniente extraer de una bobina elemental de una sola espira que gira en el sentido de las manecillas del reloj en un campo bipolar, como se muestra en la figura I-3a. La dirección de la FEM inducida en cada conductor o lado de bobina se puede determinar mediante la regla de Fleming, o mediante la Ley de Lenz.

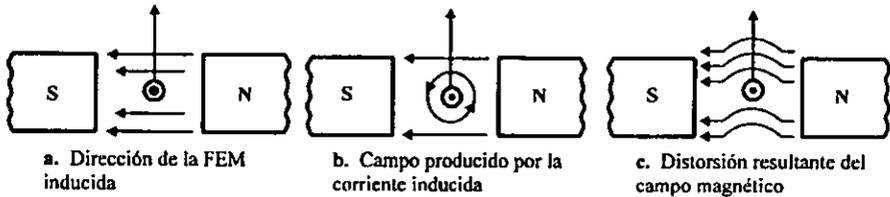


Figura I.3 Ilustración de la Ley de Lenz

I.2 EL MOTOR DE INDUCCION TIPO JAULA DE ARDILLA DE EFICIENCIA ESTANDAR

La máquina de inducción, es un motor de doble excitación que tiene un voltaje de C.A. aplicado tanto en su devanado de estator como en su devanado de rotor. El voltaje aplicado en la armadura del estator es un voltaje de excitación de frecuencia constante y potencial constante suministrado por una barra de distribución polifásica o monofásica. El voltaje que se aplica al

rotor es un voltaje inducido de frecuencia y potencial variable que se produce como consecuencia de la velocidad del rotor con respecto a la velocidad sincrónica del estator.

El motor de inducción de jaula de ardilla es el de construcción más simple, no tiene conmutador ni anillos rozantes, ni contactos móviles entre el rotor y el estator. Esta construcción tiene muchas ventajas incluyendo su desempeño libre de mantenimiento, sus aplicaciones a lugares aislados y su trabajo en ambientes hostiles a la maquinaria, donde hay polvo y otros materiales abrasivos. Por todo ello, es el motor de C.A. que más se usa.

1.2.1 Principio de funcionamiento del motor de inducción

Si se suspende un imán permanente de un hilo sobre una tornamesa de cobre o aluminio que gira en un cojinete colocado en una placa fija de hierro. El campo del imán permanente se completa así a través de la placa de hierro. El pivote debería estar relativamente sin fricción y el imán permanente debe tener la suficiente densidad de flujo. Cuando gira el imán en el hilo, se observará que el disco que está debajo gira con él, independientemente de la dirección de giro del imán. Se puede ilustrar el funcionamiento del motor de inducción con el aparato que se muestra en la figura I-4a.

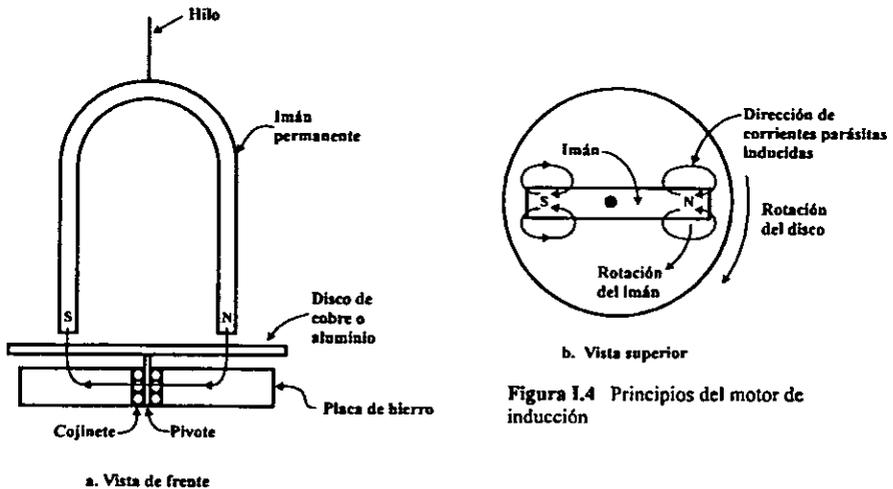


Figura I.4 Principios del motor de inducción

El disco sigue el movimiento del imán, como se muestra en la figura I-4b, debido a las corrientes parásitas inducidas que se producen por el movimiento relativo de un conductor (el disco) y el campo magnético; las corrientes parásitas que se producen tienden a producir a su vez un polo S unitario en el disco en un punto bajo el polo N unitario del imán y un polo N unitario en el disco bajo el polo S giratorio del imán. Por lo tanto, siempre que el imán continúe moviéndose, continuarán produciéndose corrientes parásitas y polos de signo contrario en el disco que está abajo. El disco, por lo tanto, gira en la misma dirección que el imán, pero debe girar a velocidad menor que la del imán. Si el disco girará a la misma velocidad que la del imán, no habría movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético y no se producirían corrientes parásitas en el disco.

En una máquina de inducción, no es posible que la acción de motor ni la de generador se lleven a cabo a la velocidad síncrona. Por esta razón, a las máquinas con principio de inducción se les clasifica como máquinas asíncronas o asíncronas de inducción.

I.2.2 Producción de un campo magnético rotatorio por aplicación de C.A. polifásica a la armadura del estator.

Se puede producir un campo magnético resultante rotatorio y constante que gire a velocidad síncrona ($S=120f/p$) mediante cualquier grupo polifásico de devanados que estén desplazados en el espacio sobre una armadura, así las corrientes que pasan por los devanados también están desplazadas en el tiempo. Todas las máquinas trifásicas de inducción, para producir un campo magnético rotatorio constante, necesitan tres devanados idénticos e individuales, desplazados 120° en su fase o en el tiempo.

La figura I-5a muestra el diagrama fasorial de las corrientes que pasan por la armadura del rotor trifásico en secuencia de fases ABCABCA. En la figura I-5b se muestra la relación gráfica y variación senoidal de cada corriente para un ciclo. La figura I-5c muestra el desplazamiento en el espacio de un devanado trifásico concentrado típico conectado en estrella.

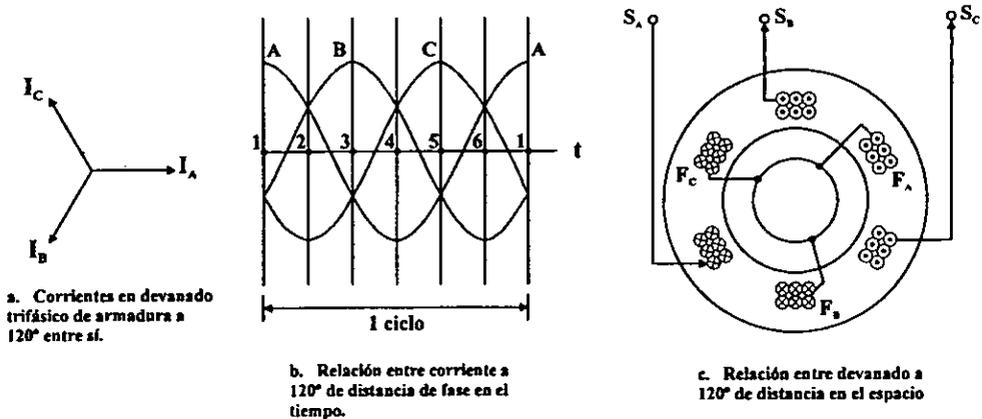


Figura 1.5 Generación de un campo magnético constante rotatorio a velocidad síncrona producida mediante un suministro trifásico.

Cada grupo de fase en la figura 1-5c consta de doce conductores o seis bobinas por fase. En el tiempo t_1 que se indica en la figura 1-5b, se muestra la corriente en cada bobina de cada devanado. En el tiempo t_1 la fase A está en un máximo en una dirección, mientras que la corriente de los arrollamientos B y C de fase es igual a 0.707 por su valor máximo en su dirección opuesta. A todo esto notamos lo siguiente:

1. Se produce un campo magnético único, constante y giratorio mediante un devanado trifásico en el estator.
2. El desplazamiento del campo magnético resultante en el espacio corresponde exactamente al desplazamiento en el tiempo de la frecuencia del suministro.

El devanado concentrado de la figura 1-5c produjo dos polos empleando seis ranuras para un devanado trifásico [6 ranuras/(3 fases)], o sea una ranura/polo-fase. Si se emplea un estator que tenga dos ranuras por polo por fase, y si las bobinas de la misma fase están desplazadas 90° , las corrientes de bobina que resultan producirán un campo magnético giratorio que tiene cuatro polos. Igualmente, un estator que tenga tres ranura/polo-fase, producirá un campo magnético giratorio de seis polos, y así sucesivamente

Puesto que el periodo o intervalo de tiempo de la variación senoidal de la corriente que se muestra en la figura I-5b, es el mismo en los conductores, la velocidad del campo magnético giratorio varía directamente con la frecuencia, pero inversamente con el número de polos ($S=120f/P$). Así, la velocidad del campo rotatorio de la figura I-5 a una frecuencia de 60 Hz y 2 polos es igual a 3600 rpm. De igual manera, la velocidad del campo rotatorio referida a 4 polos, es 1800 rpm, y así sucesivamente.

1.2.3 Deslizamiento

Los motores de inducción no operan nunca a velocidad de sincronismo (S), ya que sus rotores tienen que girar siempre con una velocidad ligeramente menor a la del campo magnético giratorio de los estatores, para que las líneas de fuerza corten a los conductores del rotor e induzcan en ellos la corriente necesaria.

Esta diferencia entre la velocidad real de operación de los motores de inducción asíncrono y la velocidad de sus campos magnéticos se llama DESLIZAMIENTO DEL MOTOR y en general se expresa como un porcentaje de la velocidad sincrónica, como por ciento de deslizamiento o simplemente como deslizamiento:

$$s = \frac{\text{Velocidad de deslizamiento}}{\text{Velocidad Sincrónica}} = \frac{\text{Velocidad sincrónica} - \text{Velocidad del rotor}}{\text{Velocidad Sincrónica}}$$

o sea
$$s = \frac{(S - S_r) \times 100}{S} \dots (I.3)$$

- donde:
- S_r es la velocidad del eje del rotor en rpm
 - s es el porcentaje de deslizamiento (para utilizarlo en cálculos, el porcentaje siempre se expresa en decimal).
 - S es la velocidad sincrónica en rpm del campo magnético rotatorio producido por el estator.

El deslizamiento de un motor variará según la carga. Aumentando la carga se reduce la velocidad del rotor y esto hace que el campo magnético corte los conductores del rotor, por tanto se produzca en el rotor la corriente inducida más intensa necesaria para mantener el par motor que ha aumentado con la carga mayor.

Si por alguna razón se detiene, el deslizamiento es de 100%, la tensión (FEM) E_r inducida en cada barra del rotor es igual a la fuerza contraelectromotriz (FCEM) por conductor en el estator. Si se conoce el valor de la tensión del rotor E_r en esas condiciones, la tensión a cualquier deslizamiento s será:

$$E_r = s \times E_r \quad \text{volts (V)} \quad \dots \quad (1.4)$$

En forma parecida, puede concluirse que la frecuencia en el rotor f_r a cualquier deslizamiento s , como función de la frecuencia f de alimentación es:

$$f_r = s \times f \quad \text{Hertz (Hz)} \quad \dots \quad (1.5)$$

La corriente que circula por las barras y el circuito total del rotor crea un flujo local o disperso a su alrededor que representa una reactancia local (o de dispersión) cuyo valor, por ser proporcional a la frecuencia (ecuación 1.4) será también proporcional al deslizamiento.

En cuanto a la corriente en el rotor I_r , su valor está dado por el cociente:

$$I_r = \frac{\text{Tensión inducida}}{\text{Impedancia}} \quad \text{Ampers} \quad \dots \quad (1.6)$$

Puesto que a valores bajos de deslizamiento la impedancia es prácticamente constante, la corriente será casi proporcional al deslizamiento s , mientras que a valores de deslizamiento, tanto el voltaje inducido como la impedancia son proporcionales al deslizamiento, por lo que la corriente es prácticamente constante.

El deslizamiento necesario para producir la fuerza que impulsa la carga nominal del motor depende de las características de éste. Según el tipo de motor, el deslizamiento a plena carga puede variar entre 2 y 20%.

1.2.4 Conductores del rotor, FEM inducida y par del rotor en reposo

La figura I-6 muestra tres conductores del rotor: A, B y C, y su relación con un campo magnético de varios polos producido por un devanado polifásico.

Supongamos que el rotor se atasca y se encuentra detenido o en reposo, y que el flujo del estator gira a la velocidad síncrona en el sentido de las manecillas del reloj con respecto al conductor A del rotor (estacionario), directamente bajo un polo N unitario. La dirección del movimiento relativo del conductor A es hacia la izquierda para propósitos de la determinación de la FEM inducida (regla de la mano derecha). Este movimiento relativo produce una FEM hacia el observador y la corriente de ésta produce un flujo en sentido contrario a las manecillas del reloj alrededor de A, como se indica. Con respecto al campo que entra al núcleo de hierro en las cercanías del conductor A, la fuerza que actúa sobre dicho conductor produce una repulsión en el lado izquierdo y una atracción en el lado del conductor, o sea, movimiento en la misma dirección que el campo magnético. Por la regla de la mano izquierda, se vera que el conductor desarrolla un par electromagnético, que tiende a mover el rotor también en la misma dirección que la rotación del campo magnético.

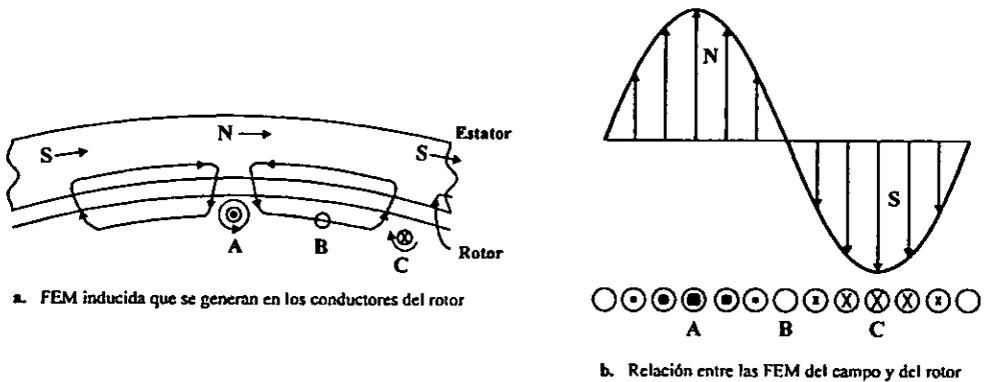


Figura I.6 Desarrollo de par en los conductores del rotor.

De manera similar, el conductor C, directamente abajo de un polo S unitario en la figura I-6a, producirá una FEM que se aleja del observador y un campo magnético giratorio en sentido a

las manecillas del reloj, que resulta de una corriente inducida que produce movimiento en la misma dirección del sentido de las manecillas del reloj, que el campo magnético rotatorio.

Sin embargo, el conductor B en el instante que se muestra en la figura I-6a no está bajo un cambio en el enlazamiento de flujo, y no se induce FEM en él.

La distribución de la FEM en los conductores del rotor alcanzados por el campo magnético giratorio se parece, a cada instante, a la distribución de flujo, que se muestra en la figura I-6b; ya que el campo gira a una velocidad síncrona, la dirección de la FEM inducida en cualquier conductor dado variará senoidalmente de acuerdo con la magnitud del flujo que lo enlaza, como se muestra en la figura.

El par que desarrolla cada conductor individual en reposo en el rotor se puede expresar en términos del flujo o corriente en el estator y rotor, respectivamente, como:

$$T = K_t \phi I_r \cos \theta_r \quad \dots (I.7)$$

- donde:
- K_t es una constante adimensional de para el número de polos, devanado, unidades empleadas, etc.
 - ϕ es el flujo en webers (SI) o en líneas o Maxwells (sistema inglés) que produce cada polo unitario del campo magnético rotatorio que enlaza al conductor del rotor.
 - $I_r \cos \theta_r$ es la componente de corriente en amperes en el rotor que está en fase con ϕ .

Lo que produce un par promedio útil es sólo aquel componente de la corriente que esté en fase con el flujo del rotor ϕ .

1.2.5 Par de arranque, par de plena carga y par máximo de un motor de inducción.

- **PAR.** En el movimiento lineal, una fuerza aplicada a un cuerpo que produce un cambio en su velocidad. Entre más grande sea la fuerza aplicada, más rápido es el cambio de la velocidad.

En el movimiento rotacional, cuando un cuerpo está girando, su velocidad angular es constante, a menos que, sobre él, exista un par. En la medida que el par sea mayor, el cambio en la velocidad angular es más rápido.

En términos generales puede decirse que un par es la “fuerza de torsión” sobre un objeto. No obstante, resulta más fácil entender qué es un par con el siguiente ejemplo:

Imaginemos un cilindro que puede girar libremente alrededor de su eje. Si se le aplica una fuerza de tal manera que su línea de acción pase por el eje, entonces el cilindro no gira; sin embargo, si la misma fuerza se localiza de tal manera que su línea de acción pase a la derecha del eje, entonces el cilindro tenderá a girar en dirección contraria a las manecillas del reloj. El par o acción de torsión sobre el cilindro depende de:

1. La magnitud de la fuerza aplicada, y
2. La distancia entre el eje de rotación y la línea de acción de la fuerza.

El par producido sobre un cuerpo se define como: el producto de la fuerza aplicada al cuerpo por la menor distancia entre la línea de acción de la fuerza y el eje de rotación del cuerpo. Si r es un vector que va desde el eje de rotación hasta el punto de aplicación de la fuerza y F es la fuerza aplicada, entonces el par está dado por:

$$T = (\text{fuerza aplicada}) \times (\text{distancia perpendicular})$$

$$T = F r \text{ sen } \theta \quad \dots (1.8)$$

donde: θ es el ángulo entre el vector r y el vector F .

La dirección del par es horaria, si tiende a causar rotación en sentido contrario al de las manecillas del reloj.



Se expresa en unidades de fuerza por distancia, en Newtons·metro (SI), o en Libras - pie (Sistema Inglés).

Los períodos importantes del par motor que hay que tener en cuenta al elegir los motores de características apropiadas, deben ser: el par de arranque, el par de plena carga y el par máximo.

• EL PAR DE PLENA CARGA.

El par de plena carga de un motor se toma como base, y el par de arranque y el par máximo se compara con él y se expresan en la forma de un cierto porcentaje del par de plena carga de 2 m·kg y un par de 4 m·kg, el par de arranque es de dos veces mayor del de plena carga, o sea, el 200%.

Puesto que el par de plena carga sirve de base de comparación, es importante disponer de algún medio que permita determinar este par. El par de plena carga de un motor puede calcularse por medio de la formula siguiente:

$$T = \frac{K \times C.P.}{r.p.m.} \quad \dots \quad (I.9)$$

Donde:

T = par de plena carga en metros sobre kilogramo.

C.P. = Potencia nominal del motor en caballos de potencia.

K = 716.5 adimensionales

La constante K, se obtiene de:

$$K = \frac{75\text{Kg} - \text{m} \times 60\text{seg}}{2 \times 3.14} = 716.$$

si se considera el sistema inglés, la constante será 5252 que se obtiene de

$$K = \frac{33000\text{ft} \times (\text{lbs} / \text{seg})}{2 \times 3.14} = 5252$$

- **PAR DE ARRANQUE.**

El esfuerzo de giro ejercido por un motor al arrancar, es determinante, y debe tenerse siempre en cuenta al seleccionar lo que tiene que arrancar con fuertes cargas.

El par de arranque de los motores de inducción varía de 2 a 5 veces del par de plena carga, dependiendo del tipo de construcción del motor y el voltaje de línea aplicado durante el arranque, es decir, varía en proporción directa al cuadrado de la tensión durante el arranque.

- **PAR MAXIMO.**

Es el valor más alto de par que puede desarrollar el motor sin que tienda a frenarse, suele llamarse también "par de desenganche", porque es el valor de par que hace que el motor disminuya de velocidad súbitamente y tienda a "desengancharse" de la carga. El par máximo de los motores ordinarios de C.A. varía entre 1.5 y 3 veces el par de plena carga.

El motor de inducción, como se ve en la figura I-7, es de velocidad casi constante entre el funcionamiento sin carga y a plena carga (puntos *d* a *c* en la figura).

I.2.6 Curvas características.

Desde el inicio del motor de inducción, los investigadores descubrieron que para cualquier carga y a cualquier velocidad, la corriente está localizada, como diagrama, en el arco de un círculo referido al voltaje aplicado. De este hecho se deduce el diagrama circular que permite graficar el comportamiento completo de un motor a partir de tres juegos de lecturas:

- 1) Corriente, tensión y potencia sin carga.
- 2) Corriente, tensión y potencia a rotor bloqueado.
- 3) Resistencia óhmica del devanado del estator a una temperatura determinada.

I.2.7 Diagrama de saturación sin carga

Para estas pruebas el motor no debe tener carga en la flecha. Se hace variar la tensión de alimentación desde 30 o 40 % de sobretensión hasta el valor mínimo que permita que la máquina continúe trabajando. Para cada valor de tensión se obtienen las lecturas correspondientes de amperes y watts, y se trazan las curvas indicadas en la figura I-8.

Con base en estas gráficas es posible deducir los siguientes valores:

- 1.- Corriente magnetizante únicamente para el entrehierro, la cual corresponde a la ordenada **AB** levantada en el punto de voltaje o tensión nominal hasta la tangente (**M**) a la curva de amperes que pasa por el origen.
- 2.- Corriente magnetizante para el entrehierro y el hierro (ordenada **AC**)
- 3.- El factor de saturación, cociente de **AC** entre **AB**, que indica el grado al cual se trabajó el material magnético.
- 4.- Pérdidas mecánicas (por fricción), ordenada **AE**.
- 5.- Pérdidas magnéticas en el hierro, ordenada **ED**.

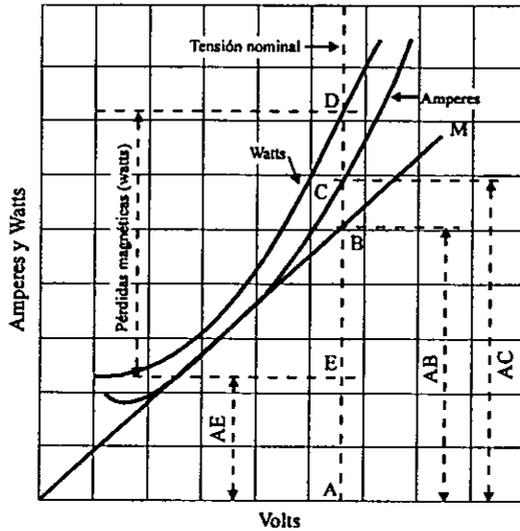


Figura 1.8 Diagrama de saturación sin carga

Los dos últimos conceptos se denominan pérdidas constantes de la máquina, ya que prácticamente son independientes de la carga.

Estas curvas son de utilidad para estimar el factor de potencia y la eficiencia (o rendimiento) de la máquina a diferentes cargas, ya que la corriente magnetizante constituye la mayor parte de la corriente reactiva y tiene un efecto definitivo sobre el factor de potencia.

1.2.8 Diagrama de saturación a rotor bloqueado.

Estos diagramas (figura I-9) se trazan tomando lecturas de tensión, corriente y potencia mientras se aplica un freno a la flecha para evitar el giro del motor. Por lo general, se aplica un brazo de palanca que permita leer al mismo tiempo el par mecánico ejercido por el motor.

Cuando no es posible tomar lecturas a voltaje nominal se toma a voltaje reducido y se extrapola, teniendo presente que la gráfica corriente-tensión es prácticamente una recta, y que potencia y par varían como función del cuadrado del voltaje.

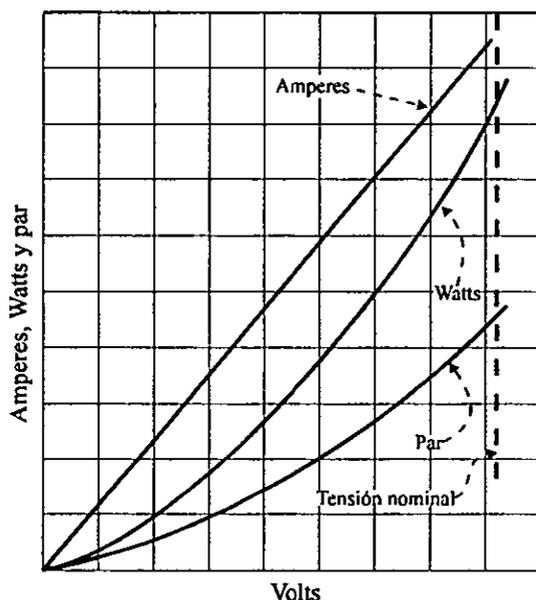


Figura I.9 Diagrama de saturación a rotor bloqueado

Las curvas de saturación a rotor bloqueado proporcionan directamente el valor de la impedancia del motor, el par de arranque a diferentes tensiones, y la corriente requerida para producir un par determinado.

A su vez las lecturas de potencia en watts y la resistencia del devanado en ohms del estator permiten calcular la resistencia del rotor referida al estator.

I.2.9 Diagrama de operación.

De las lecturas obtenidas de las pruebas sin carga y a rotor bloqueado a tensión nominal y del valor de la resistencia del estator, es posible determinar por medio de gráficas los valores de eficiencia, factor de potencia y velocidad como función del par. Desde luego, estas curvas pueden obtenerse directamente a partir de una prueba con dinamómetro en la cual se varía la carga aplicada al motor desde aproximadamente el 25% hasta el 150% de la carga nominal,

manteniendo la tensión aplicada en su valor nominal y tomando lecturas de velocidad, corriente, par y potencia de entrada.

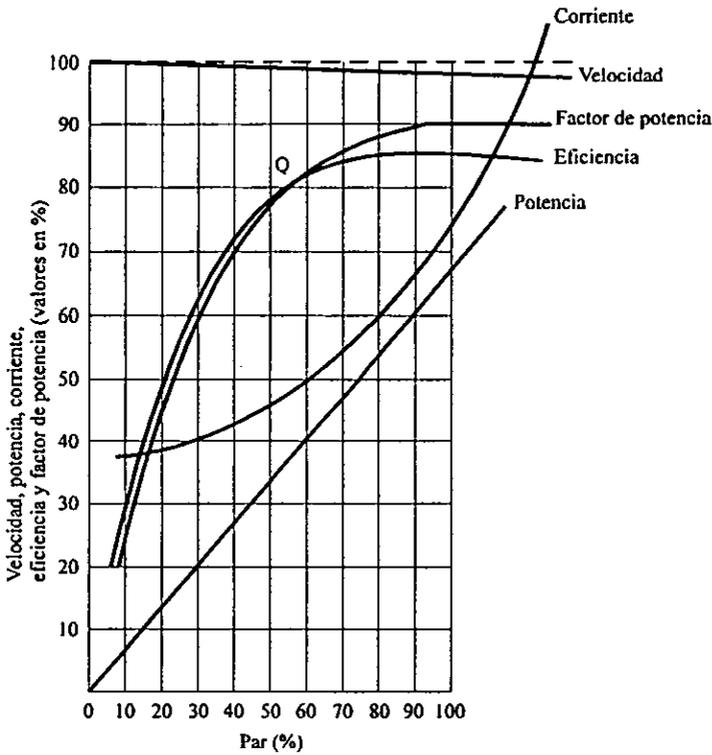


Figura I.10 Diagrama de operación

Es evidente que las lecturas de operación son las más importantes, ya que proporcionan una imagen completa del comportamiento del motor, con excepción del aumento de temperatura.

El análisis de las curvas de un diagrama de operación, como las que se muestran en la figura I-10, permite deducir algunos hechos, no evidentes a primera vista, que pueden ser de gran utilidad para juzgar la correcta aplicación de un motor. Por ejemplo, el codo en la curva de eficiencia indicaría que las pérdidas constantes son relativamente más bajas que las pérdidas variables en el caso ilustrado, la eficiencia máxima ocurre al 75% de la carga nominal, lo que

indica un diseño bien equilibrado y una distribución de las pérdidas que permite obtener un balance adecuado entre el funcionamiento y el aumento de la temperatura.

1.2.10 Circuito equivalente del motor de inducción.

El circuito equivalente constituye la herramienta más útil para estudiar el funcionamiento del motor de inducción, así como para calcular todos los parámetros relacionados, una vez que se han determinado las constantes del circuito. El circuito equivalente tiene muchas ventajas que permite visualizar con toda claridad la forma en que se interrelacionan las reactancias y resistencias del estator y del rotor, y cómo afectan al comportamiento del motor.

El circuito constituye una base ideal para realizar el cálculo sistematizado de todos los valores que definen el funcionamiento del motor en cualquiera de las etapas de operación: arranque, plena carga, marcha en vacío o sin carga, etc.

Con frecuencia se compara al motor de inducción con un transformador, con base en el hecho de que las corrientes en el secundario o rotor son inducidas. Sin embargo, lo que se conoce como circuito equivalente exacto, de un motor de inducción, es prácticamente el mismo que el de un transformador, con la salvedad de que la impedancia de la carga ha sido sustituida por una resistencia variable, con lo que el circuito es como se indica en la figura I-11,

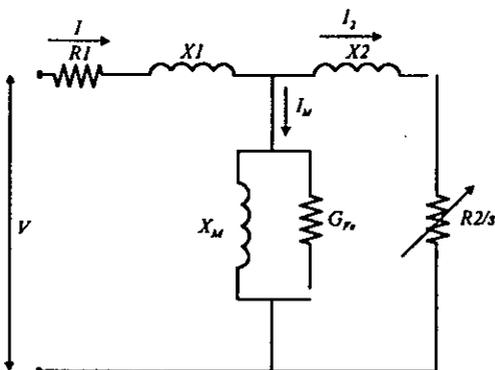


Figura I.11 Circuito equivalente de un motor de inducción

- donde:
- V = tensión aplicada al motor.
 - I = corriente de línea que circula por el estator.
 - R_1 = resistencia del devanado del estator.
 - X_1 = reactancia local (o de dispersión) del rotor referida al estator.
 - I_M = corriente magnetizante
 - X_M = reactancia de magnetización
 - G_{Fe} = Conductancia que representa las pérdidas en el hierro.
 - X_2 = reactancia local (o de dispersión) del rotor referida al estator.
 - R_2 = resistencia del devanado del rotor
 - s = deslizamiento
 - I_2 = corriente que circula por la resistencia R_2 del rotor

La conductancia G_{Fe} puede sustituirse por una resistencia equivalente en serie con X_M para simplificar el circuito, ajustando también el valor de X_M .

La primera suposición en que se basa el circuito equivalente es que la tensión, la potencia y la corriente en cada fase son iguales de manera que una fase puede representar a todo el motor. Si la máquina esta conectada en delta, en el circuito se representa el valor de una fase de la estrella equivalente; V representa la tensión al neutro; I , la corriente de línea que circula por el estator, ocasionando una caída de tensión $I(R_1 + jX_1)$; I_M es también la corriente magnetizante; I_2 es la corriente que circula por la resistencia R_2 del rotor.

El flujo de la energía que se transmite podría representarse como sigue:

Potencia de entrada - (pérdidas en el cobre del estator - pérdidas en el hierro - potencia transferida al entrehierro - potencia de entrada al rotor - pérdidas en el rotor) = Potencia de salida

Examinando el circuito puede verse que la potencia de entrada al rotor es equivalente a la potencia disipada en la resistencia R_2/s ; es decir,

Potencia de Entrada al Rotor = P.E.R. = $(R_2 / s) \cdot I_2^2$ por fase

o bien

$$P.E.R. = 3 \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2 \quad \text{Para las tres fases} \quad \dots \quad (I.10)$$

y como las pérdidas totales en el rotor (PTR) están dadas por

$$P.T.R. = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad \dots \quad (I.11)$$

La potencia de salida (PS) sería el resultado de restar la ecuación (I.10) - (I.11); es decir,

$$P.S. = 3 \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2 - 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2$$

reagrupando términos nos queda la expresión:

$$P.S. = 3 \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2 (1-s) \quad \dots \quad (I.12)$$

El par puede representarse como T, y la velocidad como S (en rpm). De este modo la potencia de salida será:

$$P.S. = \frac{TS}{K} \quad \dots \quad (I.13)$$

donde K es una constante dimensional que depende de las unidades de T. Igualando las expresiones (I.12) y (I.13) se obtiene:

$$\frac{TS}{K} = 3 \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2 (1-s) \quad \dots \quad (I.14)$$

despejando T de la expresión (I.12) queda lo siguiente:

$$\begin{aligned} T &= \frac{K}{S} \cdot 3 \frac{I_2^2 R_2}{s} (1-s) = \\ &= \frac{K}{S/(1-s)} \cdot 3 \frac{I_2^2 R_2}{s} \end{aligned}$$

como $S/(1-s)$ es la velocidad síncrona del motor, S_s , se tiene finalmente:

$$T = \frac{K}{S_s} \cdot 3 \frac{I_2^2 R_2}{s} \quad \dots \quad (I.15)$$

I.2.11 Características par-velocidad.

Modificando el diseño de un motor tipo jaula de ardilla es posible controlar hasta cierto punto la corriente y el par de arranque. Dentro de las normas NEMA (National Electrical Manufacturers Association), estos diseños se han agrupado en cuatro clasificaciones principales:

1. Motores de par normal y corriente de arranque normal (diseño NEMA A).
2. Motores de par normal y baja corriente de arranque (diseño NEMA B).
3. Motores de alto par y baja corriente con doble jaula en el rotor (diseño NEMA C).
4. Motores de alto deslizamiento (diseño NEMA D).

Existen otras variantes de motores, como los de baja resistencia que en el arranque toman una corriente 8 o 10 veces mayor que la de plena carga. Estos motores tienen alta eficiencia y se aplican frecuentemente a cargas de operación continua, como ventiladores, máquinas herramientas, bombas y grupos motor-generator.

Los tipos básicos de motores mencionados se derivan de la norma NEMA MG1-1.16. Las curvas par-velocidad para cada tipo (o diseño NEMA) se muestran en la figura I-12. En la figura I-13 se indica la variación de la potencia con la velocidad.

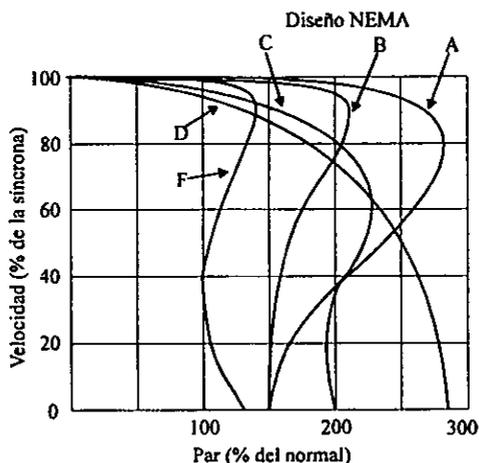


Figura I.12 Curvas velocidad-par correspondiente a los distintos diseños NEMA

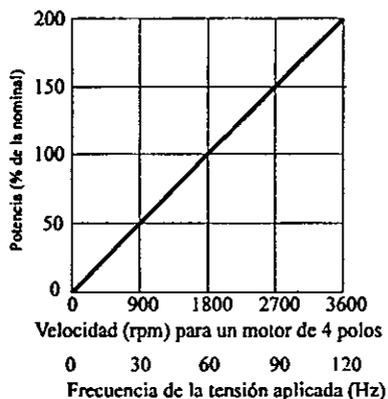


Figura I.13 La potencia de un motor aumenta con la velocidad. Sin embargo, el par permanece constante, y es esencial que no varíe la relación de voltaje a frecuencia

Un motor diseño NEMA A tiene corriente de arranque de 6 a 10 veces la corriente nominal. Tiene además eficiencia y factor de potencia aceptable, alto par máximo y bajo deslizamiento. El par de arranque es cercano al 150% del par normal y el par máximo sobrepasa al 200% de este último.

Un motor diseño NEMA B tiene mayor reactancia que uno de diseño A, lo cual se logra mediante el uso de barras delgadas y profundas en el rotor. Esto permite reducir la corriente de arranque a un valor del orden de cinco veces la nominal.

El motor diseño NEMA C tiene mayor par de arranque que los diseños A o B aproximadamente un 200% del nominal. Por otra parte, el par máximo es menor que el de los diseños A o B, aproximadamente 180% del nominal. Combina un alto par de arranque con baja corriente de arranque.

El motor diseño NEMA D, produce un par de arranque muy alto: aproximadamente el 275% del nominal. Sin embargo, no tiene en realidad un par máximo bien definido, ya que el par disminuye en forma continua al aumentar la velocidad. La corriente de arranque de este motor es

reducida, su deslizamiento es alto y su eficiencia es baja. El deslizamiento con cargas de un motor de este tipo es mayor que el de cualquier otro, y se emplea en casos en que se requiere de un elevado par de arranque, pero donde la carga es ligeramente intermitente.

La corriente que toma un motor de inducción consta de dos componentes: una reactiva o magnetizante y otra activa o de trabajo. La componente que produce el par (es decir, la que realiza el trabajo útil) está prácticamente en fase con el voltaje, es decir su factor de potencia es casi 100%. La componente magnetizante podría considerarse puramente inductiva, salvo por la pequeña resistencia del devanado y porque tal corriente está atrasada 90° respecto al voltaje. Por lo tanto, su factor de potencia es prácticamente cero.

I.3 FABRICACION DE UN MOTOR DE INDUCCION TIPO JAULA DE ARDILLA

I.3.1 Generalidades.

La fabricación del motor de inducción tipo Jaula de Ardilla es relativamente sencilla, teniendo dos partes fundamentales que se denominan estator y rotor, en ambas partes, llevan un devanado que al ser excitado con energía eléctrica se crean dos campos magnéticos que al acoplarse desarrollan un par de fuerzas que dan origen a la rotación, creando así un movimiento en el rotor y que esta energía mecánica se manifiesta en la flecha del motor. Esto puede entenderse aplicando la ley fundamental del magnetismo respecto a que polos iguales se repelen y polos desiguales se atraen.

Existe un amplio rango de tipos y tamaños de motores, naturalmente no todos los motores están hechos en la misma forma. Las partes principales que intervienen en la manufactura de un motor y particularmente de un motor de inducción tipo jaula de ardilla que es el que más se emplea, son las que se describen a continuación.

1.3.2 Partes principales que constituyen al motor de inducción y sus características.

- **Carcasa.**

Es la parte que le da rigidez y forma al motor y donde es ensamblado el estator, puede ser de lámina de acero rolada y soldada o de fundición de fierro gris; esta última se usa para motores cerrados con ventilación exterior y debido a ello lleva en toda la superficie aletas, lo que permitirá una mejor disipación de calor del motor. La carcasa debe ser maquinada con tolerancias muy precisas para permitir un buen funcionamiento del motor.

- **Núcleo del estator.**

Está formado por laminaciones troqueladas de un rollo de lamina de acero eléctrico que puede ser al silicio o de bajo carbono con pérdidas controladas. Con estas laminaciones se forma un paquete de ciertas dimensiones dependiendo del tamaño del núcleo, este paquete puede ser remachado o soldado, ya sea individualmente o a la carcasa, dependiendo el tamaño y el tipo de motor.

- **Devanado.**

Es la parte más importante del motor, desde el punto de vista eléctrico, componiéndose de bobinas formadas por uno o más conductores de cobre aislado, actualmente se está usando barniz como aislante de una calidad que depende del tipo de motor. Se apoyan en las ranuras del núcleo laminado. Sus terminales están en la caja de conexiones. En el devanado se origina el campo magnético necesario para el funcionamiento del motor. Hay distintos tipos de devanados, sin embargo, los que más se destacan son: el concéntrico que es usado en los motores pequeños de carcasa rolada, el cual es realizado en una máquina automática y el devanado de canasta que es hecho manualmente y el cual es el más usado.

- **Aislamientos.**

Las funciones básicas del sistema aislante en los motores son separar con seguridad los componentes de conducción eléctrica entre sí, y proteger contra agentes ambientales nocivos como el polvo, productos químicos y otros, además de calor y vibraciones. El tipo de sistema de

aislamiento requerido depende no sólo del lugar en que trabajará el motor, sino también de las características de los materiales aislantes.

Los aislamientos para motor suelen clasificarse con letras A, B, F y H; cada una corresponde a un límite (en °C) para la temperatura máxima de funcionamiento:

Clase de aislamiento	Límite de temperatura °C
A	105
B	130
F	155
H	180

- Núcleo del rotor.

Formado igual que el núcleo del estator, pero con la diferencia que el paquete de laminaciones es prensado en unos moldes, que al inyectarle aluminio fundido a presión, forma dentro del paquete lo que es la jaula de ardilla con sus anillos que forman el circuito corto ya integrado, este proceso se elabora manualmente, cuando la jaula es de cobre. Para ensamblar la flecha, el núcleo es flameado con el objeto de eliminar rebabas y a la vez dilatarlo. Los anillos del circuito corto llevan en la parte exterior unas aletas o aspas, las cuales al girar el rotor remueve el aire mejorando el enfriamiento del motor.

- Flecha.

Es la parte más resistente del motor, porque transmite la energía mecánica obtenida hacia la carga aplicada al motor; está hecha de acero con ligero contenido de manganeso, azufre y fósforo para darle alta resistencia al esfuerzo torsional que se presenta al estar operando el motor.

El conjunto núcleo del rotor y flecha es balanceado dinámicamente, colocándose pesos compensadores en unas tetillas del anillo de circuito corto o en otros casos sobre las aletas.

- Rodamientos.

Generalmente son las únicas partes del motor que por su funcionamiento sufren desgaste, ya que son ellos los que resisten el mayor trabajo en el motor y bajo condiciones normales de operación serían las únicas partes que se reemplazan. El montaje de los rodamientos debe tener en cuenta la dilatación longitudinal que la flecha sufre a consecuencia del calentamiento del rotor.

- **Tapas.**

Estas pueden ser de aluminio o de fierro fundido y son partes mecánicas de sostén, pues en ellos se alojan los rodamientos (o baleros) que servirán de apoyo al rotor. El maquinado de los alojamientos del rodamiento y de los ajustes con la carcasa deben ejecutarse muy cuidadosamente. Es importante que el centrado del rotor quede concéntrico con los diámetros de las tapas, para que el entrehierro sea rigurosamente idéntico en todas las direcciones. El cuidado con que se efectúen estas operaciones influyen mucho en la eficiencia y calidad del motor.

- **Ventiladores.**

En el caso de los motores cerrados con ventilación exterior además de las partes ya descritas llevan un ventilador, el cual puede ser de plástico o de aluminio, clasificándose en bidireccionales o unidireccionales, que hacen fluir el aire de manera forzada, para activar la disipación del calor producido por la corriente al circular por las bobinas del estator y del rotor.

- **Cajas de conexiones.**

Esta es una pieza que da protección mecánica a las terminales, se construye de fundición de fierro o de aluminio.

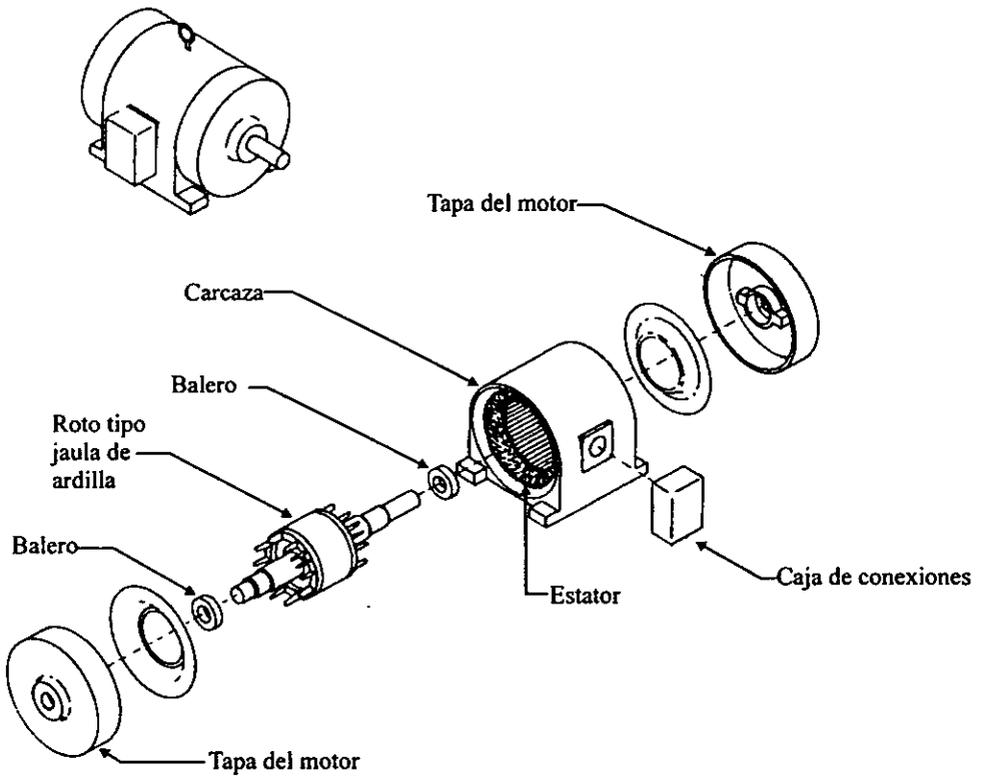
Las demás piezas que constituyen el motor son partes común y corrientes, encontrándose entre ellas: tornillería, pintura, grasa, empaques, placas descriptivas, etc.

I.4 PERDIDAS Y EFICIENCIAS.

I.4.1 Generalidades.

Durante la conversión de energía eléctrica a mecánica, también se genera energía calorífica, que por lo general no se utiliza, por lo que se ha denominado pérdida de energía.

MOTOR DE INDUCCION TIPO "JAULA DE ARDILLA"



MOTOR DESPIEZADO

Esto se puede comprobar de la siguiente manera: a un motor eléctrico que está en reposo se le toma la temperatura y luego se hace funcionar hasta alcanzar las condiciones normales de operación con carga, se puede observar que dicha máquina elevó sensiblemente su temperatura, al pasar del estado de reposo al estado de movimiento; es decir, el motor ha aumentado su temperatura, esto indica que parte de la energía empleada se ha transformado en calor.

Si el motor eléctrico está construido principalmente por hierro (material magnético), cobre o aluminio (material conductor) y aislamientos, se tendrán las siguientes pérdidas:

- a) pérdidas del hierro o magnéticas,
- b) pérdidas del cobre o aluminio o eléctricas,
- c) pérdidas mecánicas (por las partes en movimiento).

Las pérdidas en los aislamientos (pérdidas dieléctricas) son tan pequeñas que se consideran insignificantes.

Finalmente, para el estudio del motor se consideran las siguientes pérdidas:

- Pérdidas mecánicas,
- Pérdidas magnéticas,
- Pérdidas eléctricas en los devanados,
- Pérdidas indeterminadas.

Cuando se emplea el término de potencia nominal del motor, se refiere a la potencia de salida útil que se puede disponer en forma continua. Esto representa el resultado final de la conversión de energía eléctrica en mecánica y sus unidades que se utilizan son las de potencia como son el watt o caballos de potencia.

1.4.2 Pérdidas mecánicas

Las pérdidas por fricción y ventilación o pérdidas mecánicas, representan la energía empleada por el motor para vencer la fricción en los cojinetes o rodamientos, y la fricción viscosa

de las partes móviles, especialmente en las aletas de ventilación contra el aire. Parte de esta energía perdida se convierte en calor, como el resto de las pérdidas. Puede suponerse que las pérdidas mecánicas se mantienen constantes desde la operación sin carga hasta la plena carga, lo cual es bastante razonable aunque no es absolutamente cierto; cualquier discrepancia puede incluirse en el renglón de pérdidas indeterminadas.

No existe un método sencillo que permita calcular las pérdidas mecánicas, las cuales deben ser determinadas en forma experimental, siguiendo un método aceptado.

1.4.3 Pérdidas magnéticas

Los motores eléctricos y particularmente el de inducción opera gracias a que genera en su devanado primario (estator) un campo magnético rotatorio que hace girar a su secundario (rotor). Para que el motor sea eficiente y de tamaño razonable, el campo magnético debe establecerse, concentrarse y dirigirse por medio de una estructura de acero magnético de alta calidad, tanto en el bobinado polar (estator) como en la armadura (rotor), con un espacio de aire o entrehierro mínimo entre ambos elementos. Cuando las moléculas del acero son magnetizadas primero en una dirección y luego en dirección opuesta por la corriente alterna aplicada, ocurre una pérdida de energía dentro del acero, lo cual se manifiesta en forma de calor y se denomina pérdida por histéresis. Esta pérdida aumenta con la densidad de flujo magnético (mayor corriente) o con la frecuencia del voltaje aplicado.

El campo magnético alterno induce también pequeñas tensiones en el bobinado y el núcleo de acero, lo cual genera corrientes que circulan al azar por esos elementos. Estas corrientes se denominan corrientes parásitas, y al actuar sobre la resistencia eléctrica del acero producen también una pérdida eléctrica de potencia que se manifiesta en forma de calor. El efecto de las corrientes parásitas se minimiza haciendo las partes magnéticas de tipo laminado, con laminaciones delgadas de acero aisladas entre sí, tanto en el campo como en la armadura. Las pérdidas por corrientes parásitas varían también con la densidad de flujo y con la frecuencia de alimentación, tal como ocurre con la pérdida por histéresis, estos dos conceptos se combinan

en el término pérdidas magnéticas. Las pérdidas magnéticas varían con la corriente de carga del motor, los cambios en la velocidad y otras condiciones de operación, y es difícil medirlas en condiciones dinámicas. Por tanto, el método aceptado para determinarlas consiste en medirlas en determinadas condiciones y suponer que son constantes para cualquier valor de la carga del motor. Las diferencias derivadas de esta suposición se consideran dentro del renglón de pérdidas indeterminadas.

1.4.4 Pérdidas eléctricas en los devanados

La tensión aplicada a un motor, origina una circulación de corriente por sus devanados. En un motor típico trifásico de inducción, la tensión se aplica directamente al devanado del estator y esto induce una corriente en el devanado del rotor. El devanado del rotor de un motor de tipo jaula de ardilla consiste en barras o conductores desnudos conectados sólidamente a un anillo conductor colocado en cada extremo del rotor. Este devanado carece de conexiones externas.

Las pérdidas en los devanados se denominan frecuentemente “pérdidas en el cobre”, lo cual no es estrictamente correcto, ya que en la actualidad muchos motores fraccionarios o integrales de baja potencia tienen devanados contruidos de alambre magneto de aluminio. Considerando lo anterior, la denominación más correcta es la de pérdidas eléctricas por efecto Joule ($I^2 R$), lo cual indica potencia convertida en calor por la resistencia de conductores de cobre o aluminio. Las pérdidas eléctricas totales son la suma de las pérdidas $I^2 R$ en el estator o primario y las pérdidas $I^2 R$ en el rotor o secundario.

Las pérdidas $I^2 R$ reales dependen no sólo de la corriente, sino también de las resistencias de los devanados en las condiciones de operación. La resistencia real efectiva de un devanado varía con la temperatura, carga, flujo magnético, efecto superficial de la C.A., distribución no uniforme de la corriente entre los conductores y otros factores similares. Aún para condiciones específicas es sumamente difícil determinar el valor exacto de la resistencia del devanado. La práctica normal prescribe por tanto hacer la medición del valor de resistencia con corriente

continúa a la temperatura de estabilización que alcancen los devanados con el motor operando a plena carga en un ambiente de 25°C.

El cálculo de la resistencia se corrige a esta temperatura. El error introducido al considerar esta suposición se compensa con otras pérdidas de pequeña cuantía que se quedan dentro de las pérdidas indeterminadas.

I.4.5 Pérdidas indeterminadas

Se ha mencionado que algunos tipos de pérdidas se consideran constantes en todo el intervalo de operación del motor, desde en vacío hasta plena carga, aun cuando se sabe que tales pérdidas en realidad varían ligeramente con la carga. Existen además otras pérdidas que no pueden ser calculadas. Por ejemplo, debido a la variación de flujo magnético con la carga, el efecto superficial de la C.A. y la configuración de los conductores, la corriente no se distribuye entre ellos en forma equitativa, y la densidad de corriente en cada conductor no es perfectamente uniforme. Además, al aumentar la corriente también se incrementa la temperatura y la resistencia de los conductores, con el consiguiente aumento de las pérdidas en ellos. Así mismo, al incrementarse el flujo magnético se elevan las pérdidas magnéticas. Todas estas pérdidas menores provenientes de fuentes conocidas o desconocidas se agrupan como pérdidas indeterminadas, que dependen de la carga del motor. Estas pérdidas se estiman por procedimientos normalizados de prueba y cálculos basados en tales procedimientos. La forma de evaluarlos puede conducir a pérdidas sustanciales en los valores de la eficiencia calculada.

I.4.6 Eficiencia

Para la rentabilidad del empleo de un motor eléctrico es importante conocer el valor de la eficiencia. La potencia total consumida por un motor comprende, la empleada para impulsar la carga y la que se pierde en el mismo motor.

La eficiencia de un motor es la relación de la potencia de salida (P.S.) útil entre la potencia de entrada (P.E.) en watts.

$$\text{Eficiencia en \%} = \frac{\text{PS}}{\text{PE}} \times 100 \quad \dots (I. 16)$$

siendo las pérdidas totales del motor.

$$\text{Pérdidas} = \text{P.E.} - \text{P.S.} \quad [\text{watts}] \quad \dots (I. 17)$$

Para motores de corriente alterna

$$\text{Eficiencia \%} = \frac{\text{C.P.} \times 746 \text{ (Watts)}}{\sqrt{3} \text{ V I Cos } \phi \text{ (Watts)}} \times 100 \quad \dots (I. 18)$$

Siendo:

- C.P. = Caballos de Potencia.
- V = Tensión de línea en volts.
- I = Corriente que demanda el motor en amperes.
- cos ϕ = Factor de Potencia.

Los motores eléctricos presentan una mayor eficiencia con relación a otros tipos de motores. Un motor que funciona con baja carga tiene mayor porcentaje de pérdida que otro igual que opera a plena capacidad, debido a que las pérdidas fijas son constantes, cualquiera que sea la carga. Considerando que un motor rara vez opera al 100 % de su potencia nominal, debe diseñarse para que su eficiencia sea razonablemente aceptable desde alrededor del 60 % hasta el 100 % de su capacidad nominal, de modo que en la mayor parte de los casos la máxima eficiencia estará localizada entre el 75 y 80 % como se puede observar en la figura I-13. La eficiencia es muy baja con carga reducida, en el caso extremo, como cuando el motor opera en vacío no desarrolla trabajo alguno y en cambio si toma cierta potencia de la línea, su eficiencia en esas condiciones es cero.

Para tener idea de los valores de eficiencia de un motor eléctrico, se tiene que cuando esta máquina opera a plena carga su eficiencia es para:

1 C.P.	es	de 75 %,
50 C.P.	es	de 88 a 90 %,
500 C.P.	es	de 92 a 94 %,
5000 C.P.	es	de 97 %.

Los motores lentos suelen tener una eficiencia más baja, de 2 a un 4 % menor que los de alta velocidad a la misma potencia.

Los motores eléctricos tienen la máxima eficiencia, cuando las pérdidas fijas son aproximadamente iguales a las pérdidas variables.

Aún cuando la definición de eficiencia sea sencilla, su determinación no es tan fácil.

En la figura I-14, se muestra un circuito eléctrico para determinar la eficiencia de un motor de inducción, en el circuito se indica el equipo de medición para determinar:

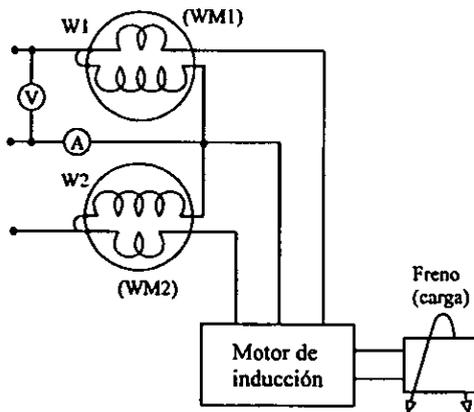
$$\text{Potencia de Entrada} = PE = W_1 + W_2 \quad (\text{watts}) \quad \dots (I. 19)$$

$$\text{Potencia Aparente} = S = \sqrt{3} VI \quad (\text{volts-amperes}) \quad \dots (I. 20)$$

$$\text{Factor de Potencia} = F.P. = \cos \phi = \frac{PE}{S} = \frac{W_1 + W_2}{\sqrt{3} VI} \quad \dots (I. 21)$$

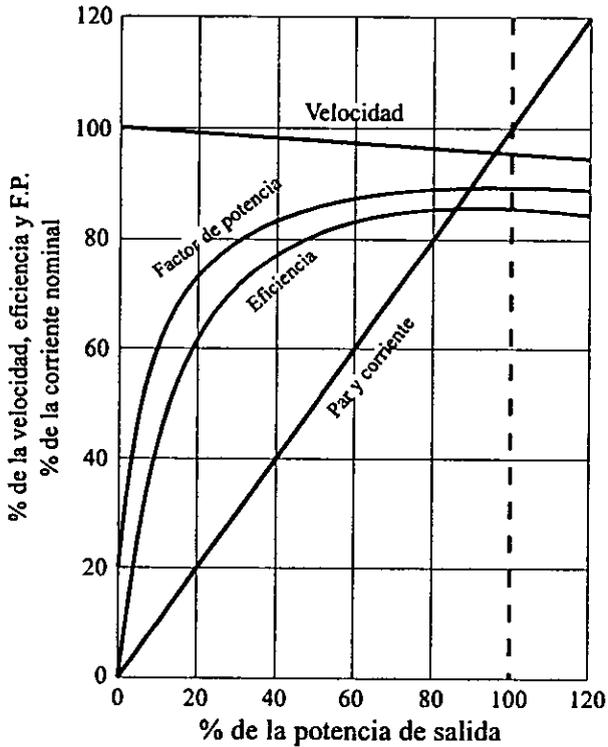
$$\text{Potencia de Salida} = PS = \frac{2\pi NT}{60} \quad (\text{watts}) \quad \dots (I. 22)$$

$$\text{Eficiencia}\% = \frac{PS}{PE} \times 100 \quad \dots (I. 16)$$



a) Circuito eléctrico para determinar la eficiencia de un motor

La determinación de los valores de eficiencia de los motores eléctricos es un problema donde los países difieren en los métodos para obtenerla, dando resultados ligeramente diferentes. De ahí que las normas de estas naciones recojan este problema y den instrucciones muy detalladas, sobre el particular, señalando las condiciones bajo las cuales deben ser realizadas las pruebas para la determinación experimental de la eficiencia.



b. Resultados típicos

Figura I.14: a) Circuito eléctrico para determinar la eficiencia de un motor,
b) Resultados típicos.

CAPITULO II

EL MOTOR DE INDUCCION TIPO JAULA DE ARDILLA DE ALTA EFICIENCIA

II.1 DISEÑO Y FABRICACIÓN

Desde hace varios años, se han venido realizando estudios, sobre todo en los países industrializados, a fin de encontrar mejores tecnologías para el ahorro de energía. De tales estudios han surgido una serie de productos, tales como motores de alta eficiencia, lámparas de bajo consumo, equipos de refrigeración optimizados, así también han surgido campañas de concientización, programas para el uso racional de la energía y normas para la fabricación de equipos eficientes.

Los consumidores más grandes de energía son los motores eléctricos, ya que requieren más de la mitad de la energía que se genera. Los motores son los que tienen mayores potenciales de ahorro entre 12 y 25 %. Los ahorros potenciales han sido y siguen siendo el centro de interés de los ahorradores de energía, que continúan buscando por muchos medios incrementar la eficiencia de los motores.

Cuando se diseña un motor y se requiere hacerlo de alta eficiencia, se debe recurrir a la optimización de los materiales y diseños, empleando algunas de las técnicas siguientes:

- Usar acero con mejores propiedades
- Laminaciones más delgadas
- Aumentar el calibre del conductor
- Mejorar el diseño de las ranuras
- Mejorar el sistema de aislamiento del rotor
- Mejorar el sistema de ventilación

Los procesos productivos están basados en su mayoría en la fuerza motriz que proporcionan los motores, de aquí la importancia de su estudio técnico-económico. Como otras tecnologías, la de motores continúa avanzando principalmente en las siguientes áreas:

- Diseños mejorados
- Nuevos materiales
- Manufactura automatizada
- Control de operación

Funcionalmente los motores han cambiado poco, ya que siguen diseñando de acuerdo a requerimientos de velocidad, potencia, par de arranque, etc., para las diferentes condiciones de operación, parámetros que en su mayoría están normalizados. Sin embargo desde el punto de vista energético, se busca continuamente la reducción del consumo o lo que es lo mismo el incremento de la eficiencia, parámetro que no está normalizado, ni es obligatorio.

Actualmente se fabrican motores con eficiencia "Estándar" y de "Alta Eficiencia"; las aplicaciones de unos u otros dependen básicamente de la carga a mover y del tiempo que permanecen en operación, ya que es donde se refleja el ahorro.

II.1.1 Mejoras en los diseños

- **El diseño electromagnético, se ha mejorado en las siguientes partes:**

- Optimización de la forma de las ranuras y dientes, así como la reducción del entrehierro, a fin de lograr menores concentraciones del flujo magnético en un lugar específico, evitando efectos de saturación y elevación de temperatura.
- Aumento en la longitud del paquete de laminaciones para reducir la reluctancia.
- Aumento en la sección transversal del conductor en las bobinas para reducir la resistencia óhmica.

Si se incrementa el área del conductor de cobre entre el 35 y 40%, las pérdidas I^2R se reducirán considerablemente. Para poder acomodar este incremento, el área de la ranura del estator se debe incrementar hasta un 50%. Para compensar el aumento en el tamaño de la ranura y la correspondiente del acero activo, el núcleo del motor debe aumentarse. Esto reduce la densidad de flujo y mejora el factor de potencia obteniéndose así algunos beneficios adicionales.

Otra fuente de pérdidas es causada por las corrientes entre las barras del rotor cuando éste presenta barras inclinadas. La práctica de barras inclinadas es normal en motores pequeños para reducir el ruido magnético y obtener un funcionamiento uniforme. Para reducir las pérdidas de

corrientes entre barras de las ranuras del rotor, se tratan las laminaciones con un aislamiento inorgánico a base de fosfato de zinc de alta temperatura, antes de fundir el rotor.

- **El diseño termodinámico que incluye el sistema de ventilación y los rodamientos, se ha mejorado mediante el uso de:**

- Aspas de ventilación unidireccional.
- Rodamientos magnéticos de muy baja fricción.
- Disipadores de calor más eficiente.

Los diseños de los motores se han optimizado principalmente con el uso de computadoras y han logrado aumentar algunos puntos de eficiencia dependiendo del fabricante.

Los programas de computadora para el diseño de motores se clasifican usualmente en:

- **Programas por síntesis**

Estos programas requieren como entrada las especificaciones de operación. El programa calcula las dimensiones del conjunto que producirán las características de operación especificadas, la metodología es la siguiente:

- Resolver las ecuaciones de operación en forma inversa. Si esto es posible, los requisitos de operación podrían darse como datos y evaluar las ecuaciones invertidas para obtener las dimensiones necesarias. Tal sistema de ecuaciones podría quedar indefinido al tener más dimensiones incógnitas que datos. Esto puede seleccionarse aligerándose requisitos del costo, dimensiones, peso o eficiencia.

- **Programas por comportamientos**

Para este tipo de programas, los datos de entrada se refieren a las dimensiones, construcción y materiales que serán empleados en el diseño del motor, de manera que el programa calcula su comportamiento final, obteniéndose los datos que proporcionan elementos de juicio para que el diseñador pueda seleccionar el prototipo óptimo.

Con los programas de diseño de motores asistido por computadora digital, se obtienen las siguientes ventajas:

- Tener mayor número de diseños para la selección óptima de acuerdo al criterio del diseñador.
- Precisión y rapidez en los cálculos evitando tiempos de diseño largos.
- Mantener una relación entre las especificaciones del diseño, los costos de los materiales y del proceso de manufactura para obtener un diseño óptimo.
- Crear investigación que sustente el desarrollo de nuevos modelos de cálculo más precisos que permitan la modelación del comportamiento del motor más cercano a la realidad.

• **Paquetes desarrollados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)**

En el IIE se cuenta con un Programa de Diseño de Motores de Inducción (PRODIMO), auxiliado por computadora, el cual fue creado para satisfacer la necesidad de desarrollar en México tecnologías de diseño, fabricación y prueba de motores asíncronos polifásicos.

A través del manual generado, "PRODIMO" describe el proceso completo del dimensionamiento electromagnético de partes, la evaluación del circuito magnético, el establecimiento y la resolución del circuito equivalente y la modelación del comportamiento final. El programa comprende el diseño del estator y los dos tipos de jaula de ardilla sencilla y doble en el rotor

La metodología de diseño implantada en la computadora consta de las siguientes partes:

- Datos para el diseño.
- Diseño del estator.
- Diseño del rotor.
- Análisis de la operación.
- Resultados del diseño.

El programa puede utilizar diferentes configuraciones geométricas tales como: ranura ovalada; trapezoidal con o sin caras paralelas, con fondo plano o redondeado.

II.1.2 Aplicación de nuevos materiales

En la misma dirección que las mejoras en los diseños, la aplicación de nuevos materiales busca la reducción de las pérdidas mediante el empleo de:

- Aceros eléctricos de mayor permeabilidad con bajas pérdidas (menores de 5 W/Kg) y de menor calibre.
- Imanes permanentes insertados en el paquete de laminación aumentando el volumen y la intensidad del campo magnético.
- Materiales plásticos para reducir el peso de las partes móviles como el ventilador.

La mayoría de los motores estándar, utilizan acero de bajo contenido de carbono en la construcción del núcleo del estator y rotor. Este acero tiene un valor típico de 6.6 W/Kg de pérdidas eléctricas y aproximadamente el mismo costo que el acero rolado en frío común. Para reducir las pérdidas de histéresis y de corrientes parásitas se emplea acero con alto grado de silicio, el cual tiene pérdidas eléctricas de 3.3 W/Kg pero cuesta aproximadamente 50% más que el acero al bajo carbono.

Para reducir aún más las pérdidas de histéresis y corrientes parásitas, el acero con alto grado de silicio es de calibre menor que el acero de bajo contenido de carbono. El espesor típico de aceros al silicio es de 0.457 mm (0.018") y el de acero al bajo carbono es de 0.559 mm (0.022"). Además el acero al silicio se le provee de un recubrimiento aislante superficial para ofrecer una alta resistencia entre las laminaciones limitando así el valor de las corrientes parásitas.

Para reducir las pérdidas por ventilación, es recomendable revisar el sistema de enfriamiento y el diseño de ventiladores, esto es con el objeto de utilizar mejores materiales y el uso de ventiladores más pequeños y ligeros, reduciendo así las pérdidas por ventilación.

II.1.3 Automatización de la manufactura

El empleo de las computadoras para el control de los procesos de corte y maquinado ha mejorado las precisiones de las piezas que se ensamblan logrando las siguientes ventajas:

- Reducción del entrehierro y por tanto las pérdidas.
- Cortes más uniformes en ranuras y dientes.
- Reducción de la fricción en los rodamientos.

Por otro lado la automatización de las pruebas de línea y pruebas finales mantienen los parámetros eléctricos, magnéticos y dimensionales dentro de rangos más estrechos, lográndose mayor uniformidad y calidad en el producto.

II.1.4 Ahorros de energía por innovaciones tecnológicas

Las innovaciones en los motores para ahorrar se han desarrollado en tres tendencias y a diferentes plazos:

Innovaciones en el interior del motor:

- A. Empleo de acero de mejores características magnéticas, disminuyendo las pérdidas en el núcleo e indeterminadas.
- B. Empleo de imanes permanentes insertados en el rotor, eliminando las pérdidas por efecto Joule (I^2R) en el rotor.
- C. Cambio de ventilador normal por unidireccional, disminuyendo las pérdidas por ventilación.
- D. Optimización del diseño y proceso de fabricación.

Se estima que la eficiencia podría aumentar entre 2 y 3 %.

Mejoras en el exterior del motor:

- A. Optimización de la relación motor/carga, es decir mejoras en la selección, en la operación y el mantenimiento, por medio de una mayor información al usuario a través de los catálogos de comercialización.

Con lo cual se reduciría la demanda en un 16 % por este concepto.

Mejoras en el uso:

- A. Mayor calidad en el suministro eléctrico, manteniendo el nivel y la forma de la tensión para motores con carga constante.
- B. Uso de controladores de velocidad para motores con carga variable.

Representa un ahorro del 68.3 % de la demanda por este concepto.

II.2 Clasificación y recomendación para reducir pérdidas en los motores

El método más obvio para reducir las pérdidas de un motor es el de hacerlo más eficiente. Los motores que se fabrican actualmente son conocidos como motores de eficiencia estándar, sin embargo, han desarrollado motores que producen el mismo trabajo y que consumen menos energía, dichos motores son conocidos como motores "alta eficiencia" o "eficientes en energía". La mayor diferencia con respecto a los motores estándares son diseños depurados y realizados por computadoras, materia prima novedosa y de primera calidad y procesos de fabricación más cuidadosos y estrictos.

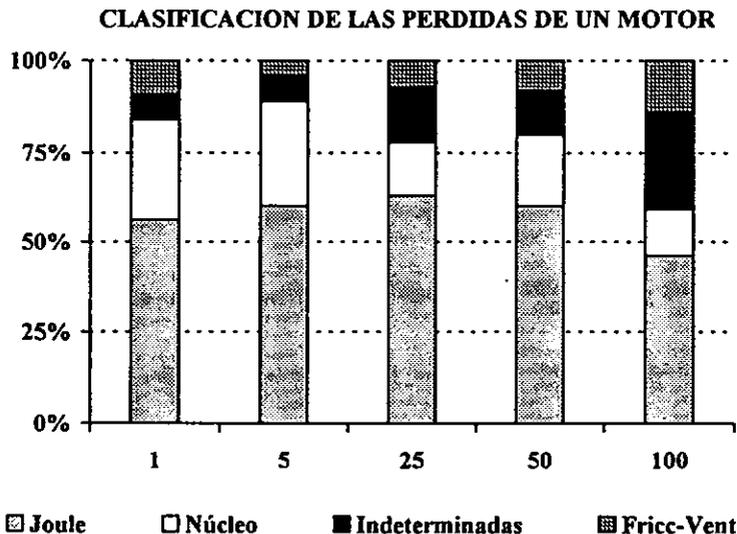
Sin embargo, no son necesarias todas estas características para elevar la eficiencia de los motores, ya que con cambios muy específicos como el del acero que se utiliza en la manufactura del núcleo magnético puede traer importantes ahorros.

A continuación se muestran modificaciones que se pueden realizar al núcleo magnético para disminuir las pérdidas del motor y los impactos que trae a la eficiencia, la tabla II.1 muestra

la clasificación de las pérdidas y su porcentaje que toman del total para un motor en cada rango de capacidades incluidas en el proyecto, así como una gráfica interpretativa de estos datos.

Tabla II.1.- Porcentaje de participación en las pérdidas totales.

PERDIDAS [Watts]	CAPACIDAD [HP]									
	1		5		25		50		100	
	(W)	(%)	(W)	(%)	(W)	(%)	(W)	(%)	(W)	(%)
$I^2 R$	179	56	560	60	1756	63	2487	60	3188	46
Núcleo	90	28	270	29	418	15	829	20	901	13
Indetermin.	22	7	65	7	418	15	497	12	1871	27
Fric., vent.	29	9	38	4	195	7	331	8	970	14
Total	320	100	933	100	2787	100	4144	100	6930	100
Potencia de entrada	1066		4663		21437		41444		81530	
Eficiencia del motor		70.0		80.0		87.0		90		91.5



II.2.1 Reducción de las pérdidas en los devanados.

Las pérdidas en los devanados son pérdidas que se producen por el efecto Joule ($I^2 R$) que resulta del paso de corriente a través de aquellos, y representa entre el 55 y el 60% de las pérdidas totales. Es obvio que varían con el cuadrado de la corriente que circula por las bobinas del estator y por los conductores del rotor, y con la resistencia de ambos devanados. La corriente consumida depende básicamente de la carga, por lo que no puede reducirse de manera sustancial; sin embargo, con una disminución del factor de potencia es posible reducirla un poco.

Los motores de inducción, tienen el inconveniente de que aún en óptimas condiciones, consumen potencia reactiva (KVAR) por lo que son una de las causas principales del bajo factor de potencia en las instalaciones industriales.

El factor de potencia es indicativo de la eficiencia con que se esta utilizando la energía eléctrica para producir un trabajo útil. Se puede definir como el por ciento de la relación de la potencia activa (KW) y la potencia aparente (KVA).

$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{KW}}{\text{KVA}} \times 100 \quad \dots \text{(II. 1)}$$

Un bajo factor de potencia significa energía desperdiciada y afecta a la adecuada utilización del sistema eléctrico. Por esta razón en las tarifas eléctricas, se ofrece una reducción en las facturas de electricidad en instalaciones con un factor de potencia mayor de 90% y también se imponen cuotas a manera de multas si el factor de potencia es menor que la cifra señalada.

Ya que los motores de inducción son una de las causas principales del bajo factor de potencia se pueden tomar las siguientes medidas con respecto a éstos para corregirlo:

- Selección justa del tipo, potencia y velocidad de los motores que se instalan.
- Empleo de motores trifásicos en lugar de monofásicos.
- Aumento de la carga de los motores a su potencia nominal.
- Evitar el trabajo prolongado en vacío de los motores.

Corregir el factor de potencia en una instalación es un buen negocio, no sólo porque se evitarán los cargos en la facturación que esto origina sino porque los equipos operan más eficientemente, reduciendo los costos por consumo de energía.

En el estator, es posible incrementar el número y el calibre de los conductores a fin de reducir la resistencia. En años recientes, en muchos motores estándar con capacidad hasta de 20 o 30 hp, se ha utilizado alambre magneto de aluminio en el devanado del estator. Sin embargo, al incrementarse el área transversal y el número de los conductores de aluminio tendrían que aumentar las dimensiones del devanado. Esto es indeseable porque eleva tanto el costo del motor como los requisitos de espacio para su instalación. Por tal motivo, en los motores de alta eficiencia se utiliza exclusivamente alambre magneto de cobre a fin de obtener un mínimo de resistencia en el menor espacio.

Las pérdidas en los rotores de jaula de ardilla también pueden reducirse incrementando la sección de los conductores. La mayor parte de los rotores de máquinas de tamaño medio tienen las barras que forman la jaula fundidas integralmente con los aros de extremo y las aletas o aspas de ventilación. Si se incrementa el tamaño de las ranuras se obtienen barras de aluminio de mayor sección. Cabe señalar que tanto la sección de las ranuras como su forma son muy importantes en el proceso de diseño de un motor. Al aumentar la sección de los conductores se reducen las pérdidas eléctricas por efecto Joule (I^2R) del rotor.

Si se reduce el entrehierro entre el estator y el rotor la densidad de flujo magnético (empleando núcleos de acero de mejor calidad), es posible reducir el campo magnético requerido, lo cual a su vez disminuye las necesidades de corriente para producir dicho campo, con lo que disminuye la componente reactiva de la corriente total del motor. Al reducir la componente reactiva se elimina una parte de las pérdidas eléctricas y se mejora el factor de potencia.

En un motor de alta eficiencia de diseño típico se utiliza aproximadamente un 20% más de cobre y un 15% más de aluminio que en un motor de potencia equivalente de diseño normal.

II.2.2 Reducción de las pérdidas en el núcleo.

Las pérdidas magnéticas en el núcleo constan de dos componentes: pérdida por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas. Estas pérdidas representan entre el 20 y el 25% de las pérdidas totales. La primera puede reducirse utilizando acero al silicio en vez de acero al carbono para fabricar las laminaciones del rotor y del estator. Para una densidad de flujo y un espesor determinados, la pérdida por histéresis está en función de la clase de acero.

La pérdida por corrientes parásitas puede reducirse haciendo las laminaciones de acero más delgadas y bien aisladas, considerando un acero al silicio de grado medio, al pasar del calibre 24 al 26 es posible reducir la pérdida por corrientes parásitas en un 15%, y utilizando el calibre 29 dicha reducción es casi del 20%.

Las modificaciones para reducir pérdidas en el núcleo consisten en las siguientes mejoras:

- La utilización de aceros en el núcleo con mejores características magnéticas de acuerdo a limitantes de potencia del motor.
- Utilización de aceros en la laminación con menores espesores.
- Incrementar el paquete de laminación para reducir la densidad del flujo magnético de acuerdo a limitantes de espacio interior en los armazones.

Los impactos en las pérdidas del motor de las dos primeras mejoras se pueden resumir en la tabla II.2, donde se muestra la comparación de diferentes aceros nacionales e internacionales que son utilizados en la manufactura de núcleos de motores eléctricos, las clasificaciones son de acuerdo al tipo de acero y el calibre (espesor) que tiene, en ellas se puede ver los desarrollos que el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha realizado en nuevos tipos de acero que pueden sustituir las importaciones con buenos resultados

Tabla II.2.- Comparación de las pérdidas máximas del núcleo magnético de acero Calibres 24 (0.64mm), 26 (0.47mm) y 29 (0.36mm).

Tipo de acero	Fabricante	1.5 tesla y 60 Hz					
		Calibre-24		Calibre-26		Calibre-29	
		W/Kg	(%) de C-1010	W/Kg	(%) de C-1010	W/Kg	(%) de C-1010
Carbón C-1010	Producción Nacional	10.80	---	7.90	0.7315	---	---
Carbón (IIE)		8.36	0.7741	---	---	---	---
Silicio M-43 (IIE)		5.96	0.5519	---	---	---	---
Silicio M-43	Acero Importado de E. U. A.	5.95	0.5509	5.07	0.4684	---	---
Silicio M-36		5.29	0.4898	4.52	0.4185	4.19	0.3880
Silicio M-22		4.80	0.4444	4.07	0.3796	3.70	0.3426
Silicio M-43	Acero de Brasil	6.00	0.5555	5.19	0.4806	---	---
Silicio M-36		5.40	0.5000	4.66	0.4315	4.20	0.3889

A partir de los datos de las características de los motores estándares de la tabla II.1, se realizo un análisis por el cambio de acero y sus impactos en la eficiencia, la tabla II.3 y II.4 muestra estos impactos cambiando el acero del convencional al carbón C-1010 por acero al silicio M-36, calibre 24 y 29, cabe mencionar que esta mejora no requiere cambios en el diseño del motor.

PERD.	CAPACIDAD (HP)									
	1		5		25		50		100	
	S/M	C/M	S/M	C/M	S/M	C/M	S/M	C/M	S/M	C/M
I ² R	179	179	560	560	1756	1756	2487	2487	3188	3188
Núcleo	90	44	270	132	418	205	829	406	901	441
Indeter.	22	11	65	32	418	205	497	243	1871	946
F-V	29	29	38	38	195	195	331	331	970	970
Total	320	263	933	762	2787	2361	4144	3467	6930	5515
Pot ent (KW)	1.07	1.01	4.66	4.49	21.44	21.01	41.44	40.77	81.53	80.1
Efic. motor	70.0	73.9	80.0	83.0	87.0	88.8	90.0	91.5	91.5	93.1
Inc. de Efic.	3.93		3.04		1.76		1.50		1.62	

Nota.- S/M → Sin Mejora; C/M → Con Mejora; Inc. de Efic. → Incremento de eficiencia

Tabla II.3.- Mejoras en la eficiencia por cambio de acero del núcleo (Acero al Silicio M-36, Calibre-24 vs. Acero al Carbón C-1010), las pérdidas en watts.

PERD.	CAPACIDAD (HP)									
	1		5		25		50		100	
	S/M	C/M	S/M	C/M	S/M	C/M	S/M	C/M	S/M	C/M
I ² R	179	179	560	560	1756	1756	2487	2487	3188	3188
Núcleo	90	32	270	113	418	145	829	347	901	377
Indeter.	22	8	65	27	418	145	497	208	1871	783
F-V	29	29	38	38	195	195	331	331	970	970
Total	320	248	933	738	2787	2241	4144	3373	6930	5318
Pot ent (KW)	1.07	0.99	4.66	4.47	21.44	20.89	41.44	40.67	81.53	79.9
Efic. motor	70.0	75.1	80.0	83.5	87.0	89.3	90.0	91.7	91.5	93.3
Inc. de Efic.	5.05		3.48		2.27		1.71		1.85	

Nota.- S/M → Sin Mejora; C/M → Con Mejora; Inc. de Efic. → Incremento de eficiencia

Tabla II.4.- Mejoras en la eficiencia por cambio de acero del núcleo (Acero al Silicio M-36, Calibre-29 vs. Acero al Carbón C-1010), las pérdidas en watts.

La variación de la clase de acero no puede realizarse indiscriminadamente ya que se pueden provocar alteraciones en el desempeño del motor, al utilizar un tipo inadecuado de acero con mayores pérdidas puede acortar la vida de los aislantes del motor, por tanto existe guías de selección del tipo de acero de acuerdo a la potencia nominal del motor, mostrada en la tabla II.5.

Como se puede observar los cambios son mayores para motores de menor capacidad, esto es debido a que los motores entre mayor es su capacidad, el diseño por si mismo se vuelve más eficiente, debido a un mejor aprovechamiento del espacio interior y aumenta la relación capacidad - eficiencia.

Tabla II.5.- Clasificación del acero al silicio para motores alta eficiencia de acuerdo a la potencia nominal.

Potencia nominal (HP)	Designación del acero
1 a 10	M-45, M-43
10 a 100	M-36, M-22
100 a 1000	M-22, M-19
mayores de 1000	M-15

Tanto las pérdidas por histéresis como las pérdidas por corrientes parásitas pueden abatirse incrementando el tamaño del núcleo, ya que para un flujo magnético total dado, un flujo más alto significa una menor densidad de flujo debido al incremento de área transversal. Al aumentar el diámetro del núcleo aumenta el área, pero esto haría necesario pasar a una armazón de mayor altura de eje; por consiguiente, la mayor área se obtiene alargando el núcleo, lo cual no afecta al tamaño de la armazón. Una menor densidad de flujo trae como consecuencia un decremento en la corriente magnetizante, una mejora en el factor de potencia y una pequeña reducción en las pérdidas I^2R .

En un motor típico de alta eficiencia se utilizan laminaciones delgadas de acero al silicio con aproximadamente un 35% más de acero en el núcleo que en un motor normal de la misma potencia.

II.2.3 Reducción de las pérdidas mecánicas y de las indeterminadas

Las **pérdidas mecánicas** son las que resultan de la **fricción y ventilación** dentro del motor, y representan sólo del 5 al 8% del total. La fricción o rozamiento es básicamente la de los **rodamientos**, y es posible obtener una ligera mejora empleando rodamientos de alta calidad y baja fricción.

La reducción en el entrehierro o espacio entre estator y rotor obliga de cualquier forma a utilizar rodamientos de alta calidad a fin de mantener las estrechas tolerancias que se requieren. Las pérdidas por ventilación son ocasionadas por la fricción viscosa del aire contra las partes giratorias, y del aire enfriante corta las aletas de los ventiladores internos.

Pueden obtenerse pequeñas mejoras optimizando el diseño de las aletas y de las trayectorias de circulación del aire de enfriamiento. La posible mejora en eficiencia es pequeña, pero el incremento del costo derivado del uso de rodamientos de alta calidad y de un sistema de enfriamiento optimizado es también pequeño. Por tanto, en los motores de alta eficiencia se incorporan invariablemente estas mejoras.

El término **pérdidas indeterminadas** engloba las pérdidas ocasionadas por el flujo local o disperso producido por corrientes en el motor, variaciones en las pérdidas debidas a la carga, que por comodidad se consideran constantes, pérdidas resultantes de la distribución no uniforme de la corriente en los conductores del estator y rotor, y otras causas similares. Estas pérdidas representan el 11 y 14% del total. A parte de tener extremo cuidado al diseñar las ranuras del rotor y del estator, nada más puede hacerse para reducir éstas pérdidas en forma específica, pero las mejoras realizadas en el motor para reducir las pérdidas en el devanado y en el núcleo, así como la corriente total del motor, también contribuyen a reducir tales pérdidas. El cuidado con que se fabriquen y manejen las laminaciones ayuda también a ese fin. Un motor de alta eficiencia bien diseñado tendrá inherentemente un bajo porcentaje de pérdidas indeterminadas.

Por tener menos pérdidas, los motores de alta eficiencia, funcionan a temperaturas más bajas. En algunos casos se emplean carcasas de aluminio, lo cual reduce aún más la temperatura y el peso del motor.

La menor temperatura de operación se traduce en mayor vida útil del motor, ya que la duración de los aislamientos se acorta a medida que aumenta dicha temperatura. Conforme a una regla empírica, el tiempo de vida de los aislamientos se duplica por cada 10 °C que se abata la temperatura de operación.

La menor temperatura de operación debe asimismo coadyuvar a una lubricación más eficaz y a incrementar el tiempo de vida útil de los rodamientos.

II.3 Efecto de la eficiencia de un motor de inducción tipo jaula de ardilla de alta eficiencia en el ahorro de energía

Los motores de alta eficiencia están diseñados para ahorrar costos de operación durante su vida útil. Como estos motores tienen mayor precio que los de diseño común, es necesario justificar la inversión por medio de un análisis comparativo. La evaluación suele basarse en datos fácilmente disponibles, ya que no sería económico realizar un análisis profundo cada vez

que se tomara una decisión de compra. La evaluación se funda en información proporcionada por el fabricante de los motores y en ciertas suposiciones relativas a las condiciones de operación del equipo.

Suponiendo que el análisis indica que la mejor opción es un motor de alta eficiencia, ¿cómo podría determinarse que tal decisión es correcta? La única prueba realmente eficaz sería un ensayo en condiciones de operación que indicara si el motor funciona como se esperaba y si ahorra energía según se calculó.

La eficiencia y factor de potencia de un motor de alta eficiencia se obtienen de las publicaciones del fabricante. La eficiencia nominal representa el comportamiento promedio en una gran población de motores del mismo diseño.

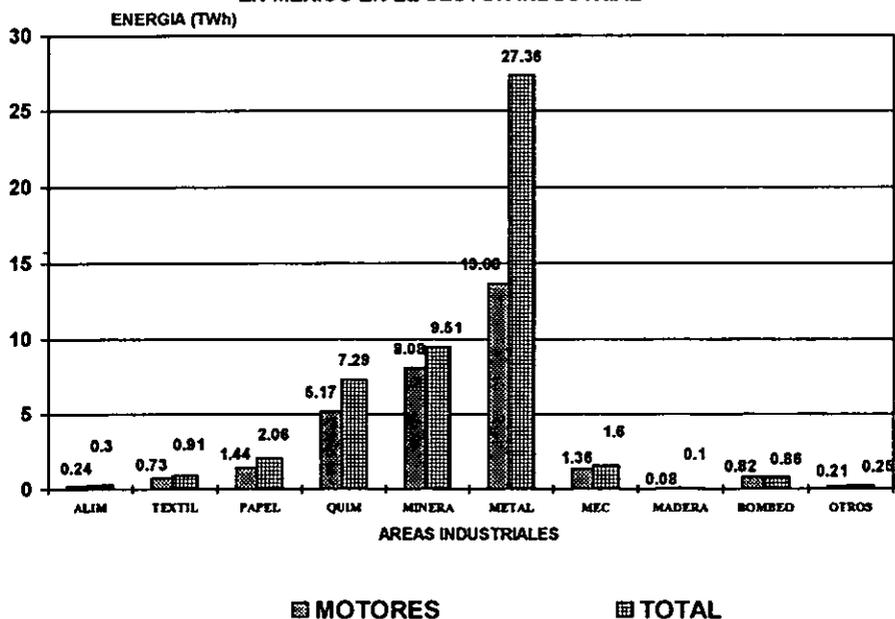
El siguiente paso para efectuar un análisis comparativo es evaluar la eficiencia de otro motor de tipo común equivalente, tal vez uno que ya esté instalado y operando. Determinar la eficiencia de este motor no es tarea fácil, y puede optarse por tomar el valor buscado de una tabla de valores que represente el promedio "en la industria". Una vez que se dispone de datos de operación y precios, tanto de motores de alta eficiencia como de motores estándar, para evaluar la mejor compra es necesario estimar el tiempo de operación y el costo de la energía. Estas variables son funciones de la aplicación y de los datos proporcionados por el usuario.

La energía eléctrica consumida en México en 1989 fue de 105 TWh, el sector industrial demandó cerca del 47.9% de este total es decir más de 50.3 TWh, de esta energía alrededor del 63.2% fue utilizada por motores eléctricos es decir 31.8 TWh y a través de una encuesta del sector industrial se encontraron los siguientes usos:

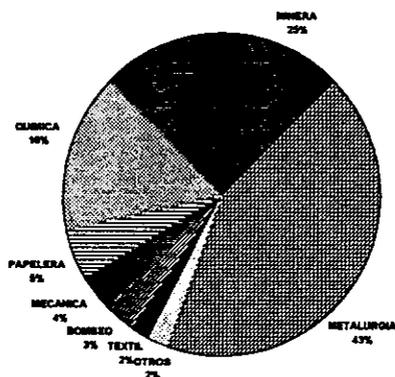
Tabla II.6.- Consumo de energía eléctrica en el sector industrial en México, por áreas, así como la energía consumida por los motores eléctricos.

Area Industrial	Consumo del sector Ind. (TWh)	(%) de consumo del sector Ind.	(%) de consumo de mot. en el área	Consumo de motores en el área (TWh)	(%) de consumo de mot. en el sector
Alimentos	0.30	0.6	80	0.24	0.8
Textil	0.91	1.8	80	0.73	2.3
Papelera	2.06	4.1	70	1.44	4.5
Química	7.39	14.7	70	5.17	16.3
Mínera	9.51	18.9	85	8.08	25.4
Metalmúrgica	27.36	54.4	50	13.68	43.0
Metal-Mecánica	1.60	3.1	85	1.36	4.2
Maderera	0.10	0.2	80	0.08	0.2
Bombeo	0.86	1.7	95	0.82	2.6
Otros	0.25	0.5	85	0.21	0.7
TOTAL	50.30	100.0		31.80	100.0

ESTIMACION DEL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA EN MEXICO EN EL SECTOR INDUSTRIAL



ESTIMACION DEL PORCENTAJE DE ENERGIA ELECTRICA CONSUMIDA POR EL SECTOR INDUSTRIAL EN MEXICO



En México el consumo de energía de motores en el área metalúrgica es alto con cerca del 43% de la energía total consumida por motores eléctricos, seguida por las áreas minera y química con un porcentaje de participación de 25.4 y 16.3 % respectivamente, estas 3 áreas absorben alrededor del 85 % de la energía total suministrada a motores industriales siendo las mejores candidatas desde el punto de vista eficiencia para reemplazar sus motores de la línea estándar por la línea alta eficiencia.

II.3.1 Factores que afectan al comportamiento de un motor

Desde un punto de vista simplificado, un motor se utiliza para convertir energía eléctrica en energía mecánica de rotación. En el laboratorio se evalúan los distintos diseños de motores en cuanto a su eficacia a través de la observación de algunos parámetros clave en condiciones ideales de la fuente de alimentación.

Al instalar un motor en su lugar definitivo de trabajo, se le somete a un medio circundante distinto al del laboratorio, por lo cual se afecta su comportamiento.

La fuente de alimentación de un motor de corriente alterna afecta también en forma directa el funcionamiento de la máquina, ya que las variaciones de voltaje, frecuencia y carga influyen en el factor de potencia y la eficiencia.

II.3.1.1 Variación de tensión y voltaje desbalanceado

La eficiencia de un motor que opera a carga plena no se altera en forma notable con ligeras variaciones de tensión ya que las pérdidas por el efecto Joule en el estator y el rotor tienden a moverse en dirección opuesta a las pérdidas magnéticas, lo cual hace que el efecto neto sea pequeño. En cambio si la carga es menor, las variaciones de tensión se traducirán en un decremento significativo de la eficiencia.

Los motores de alta eficiencia son más tolerantes a las variaciones de tensión, gracias a su diseño y construcción.

Como la corriente de magnetización aumenta con el voltaje, el factor de potencia de un motor de inducción se reduce cuando se eleva la tensión por encima del voltaje nominal.

A menor voltaje generalmente mejora el factor de potencia. La reducción de la eficiencia del motor debido a la aplicación de un voltaje alto o bajo a sus terminales puede corregirse por métodos de ingeniería establecidos. La acción más simple consistiría en ajustar las derivaciones del transformador apropiado.

La mayor parte de los problemas por bajo voltaje se deben a una caída excesiva en las líneas de alimentación del motor. Si la carga varía considerablemente en el transcurso del día, podría justificarse el uso de un cambiador automático de derivaciones.

El voltaje desbalanceado produce una corriente de flujo magnético de secuencia negativa que ocasiona una corriente desbalanceada, cuyo valor es más grande que el de aquella que circularía en condiciones de tensión en equilibrio. El nivel de desequilibrio en la corriente de

carga plena será generalmente del orden de 6 a 10 veces el valor del desequilibrio del voltaje, y se incrementará a medida que se reduzca la carga.

El porcentaje de desequilibrio (fase a fase) se expresa por medio de la relación:

$$100 \times \frac{\text{desviación respecto valor medio de voltaje}}{\text{voltaje promedio}}$$

La eficiencia del motor se reduce en forma notable a medida que aumenta el desequilibrio como se puede observar en la figura II.1, un desequilibrio del 4 % se traducirá en un aumento en las pérdidas de aproximadamente un 25%, con el consiguiente incremento en la elevación de la temperatura de operación del motor.

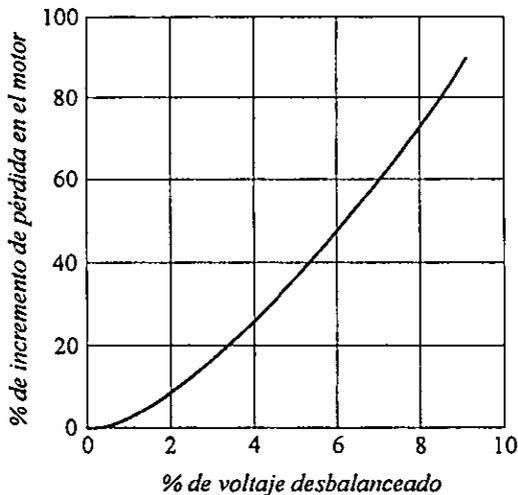


Figura II.1 Incremento de las pérdidas con el voltaje desbalanceado.

En la fase que conduce la corriente más intensa, el porcentaje en que aumenta la temperatura es aproximadamente proporcional a dos veces el cuadrado del porcentaje de desequilibrio del porcentaje. Tal desequilibrio provoca vibraciones electromecánicas, que originan fallas en los rodamientos. Por lo que es necesario instalar una protección contra este problema, para lo cual suelen ser adecuados los relevadores de sobrecarga.

II.3.1.2 Efectos de la variación de frecuencia

Varias de las características de los motores de C. A. se ven afectadas directamente por las variaciones de frecuencia. A continuación se mencionarán los efectos de la reducción y aumento de la frecuencia.

Para la reducción de frecuencia se tiene:

1. La velocidad del motor se reduce en forma proporcional a la reducción de la frecuencia.
2. El flujo y, por tanto, la densidad del mismo en el circuito magnético del motor, se incrementan, por ser inversamente proporcional a la frecuencia.
3. La corriente magnetizante debe aumentar al incrementarse el flujo.
4. El par que debe desarrollar el motor es más alto debido a la reducción de velocidad.
5. Se incrementa el par de arranque del motor.
6. Se eleva asimismo el valor del par máximo.
7. El factor de potencia desciende en la mayor parte de los casos.
8. Normalmente, también la eficiencia tiende a disminuir.
9. La temperatura de operación se eleva por un incremento en las pérdidas acompañado al mismo tiempo de un descenso en la capacidad de enfriamiento del sistema de ventilación.
10. Aumenta el ruido de origen magnético en el motor debido al mayor nivel de saturación

Por lo que se refiere a los efectos del aumento de la frecuencia, aparecen los siguientes:

1. Un aumento en la velocidad de operación.
2. Reducción en el flujo y en la densidad del mismo resultante en las diversas secciones del circuito magnético.
3. Menor corriente magnetizante.
4. La mayor velocidad hace que se reduzca el par que debe desarrollar el motor para dar la misma potencia.
5. El par de arranque disminuye en la práctica en proporción directamente inversa al cuadrado de la relación de frecuencia.
6. El par máximo que puede desarrollar el motor disminuye también en la misma proporción.

7. El factor de potencia tiende a mejorar ligeramente.
8. La eficiencia tiende también a incrementarse.
9. La elevación de temperatura normalmente se reduce como consecuencia de menores pérdidas y una mayor eficacia del sistema de ventilación.
10. Se reduce el ruido de origen magnético.

II.3.1.3 Efecto de la carga

Pocos motores operan a su carga nominal, por lo que la eficiencia, el factor de potencia y la corriente de placa no son aplicables, toda vez que estos valores se suelen suponer en condiciones de “carga plena” o “nominal”. Generalmente los fabricantes ponen a disposición de los usuarios hojas de datos a varios puntos de carga. en la figura II.2 se ilustra la forma en que varían la eficiencia y el factor de potencia con la carga en un motor típico.

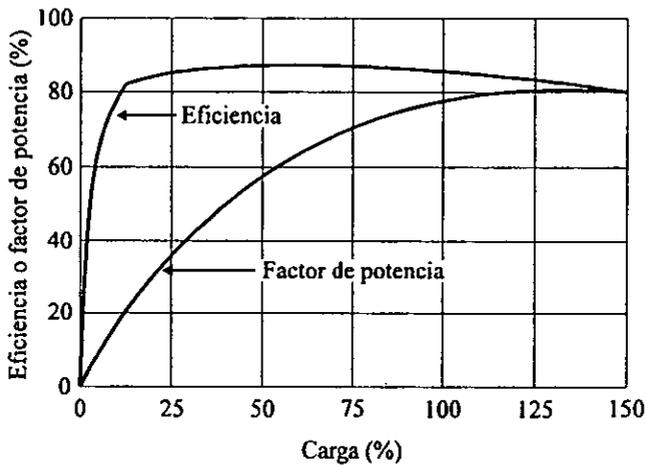


Figura II.2. Características de un motor estándar típico.

Así al evaluar los ahorros potenciales que podrían obtenerse con diferentes diseños de motores, es mejor basarse en los valores de eficiencia y factor de potencia que corresponden a la carga real en cuestión. Por ejemplo, supóngase una aplicación en una bomba que requiere un motor de 40 C.P. y 4 polos. La eficiencia de un motor estándar es de 89.3% y la de un motor de

alta eficiencia de 92% ambos a carga plena. En operación continua, el ahorro de energía será de 8550 Kw/h por año. Sin embargo, en la realidad el motor opera a $\frac{1}{4}$ de carga y las eficiencias respectivas a este valor de carga son de 88 y 92.4 %. Con estos valores el ahorro alcanza los 14145 Kw/h anuales. De esto se desprende la influencia que tiene la carga del motor en el ahorro de energía.

II.3.1.4 Efecto del factor de potencia

Es conveniente volver a mencionar que un bajo factor de potencia incrementa el costo de la energía si la compañía que suministra tiene una cláusula al respecto. Los capacitores para corregir el factor de potencia pueden elevarlo y reducir o eliminar la penalización por este concepto.

Los capacitores suministran la potencia reactiva requerida por el motor, la cual no interviene en la lectura del wathorimetro o del medidor de demanda. Por consiguiente, aún cuando podría haber un ligero decremento en las pérdidas I^2R en los conductores de alimentación como resultado de eliminar la corriente reactiva por medio de capacitores adyacentes a los motores, debe hacerse hincapié en el hecho de que los capacitores no reducen en forma alguna las pérdidas del motor. Aunque los capacitores mejoran el factor de potencia del sistema de alimentación de las máquinas, el factor de potencia de ésta permanece sin cambio, ya que para el motor es completamente indiferente recibir la potencia reactiva del sistema o de un banco de capacitores instalada cerca del motor

II.3.1.5 Ciclo de trabajo y arranques frecuentes

Esta es otra consideración relacionada con la carga, ya que en el ciclo intervienen cargas cuyo valor es función del tiempo. Por lo general, el ciclo de trabajo es repetitivo y puede representarse por medio de una gráfica en la que la abscisa es el tiempo.

Si el ciclo de trabajo requiere que el motor se detenga durante una parte del ciclo, entonces podría presentarse un problema de sobrecalentamiento. La corriente de arranque genera energía térmica (pérdidas) proporcional al cuadrado de la intensidad y, por otro lado, la capacidad del motor de disipar el calor a través de su sistema de ventilación es proporcional al cuadrado de la velocidad.

Los motores que se usan en este tipo de aplicaciones no experimentan carga constante por lo que su eficiencia varía de forma continua. Es posible evaluar aproximadamente la carga promedio y la eficiencia promedio, pero debe recordarse que un motor que opera en vacío no desarrolla trabajo útil y sin embargo, puede estar tomando el 30 % de los KVA a plena carga.

El efecto de calentamiento en un motor depende de la intensidad de corriente de arranque. Cuando más tiempo se necesita para acelerar la carga hasta su velocidad nominal de funcionamiento, más calor se producirá en el motor. El tiempo total de arranque depende principalmente del tipo de carga o máquina que se debe acelerar.

El momento de inercia se llama comúnmente efecto volante (WK^2 o EV) y se evalúa como el peso del objeto multiplicado por el radio de giro al cuadrado (WK^2). Una bomba centrífuga que arranca con la válvula de descarga cerrada es un ejemplo de carga que se puede acelerar con rapidez. Por otro lado, los grandes ventiladores suelen ser de elevada inercia, y el tiempo de arranque puede llegar a ser de unos 20 segundos.

El aire frío opone mayor resistencia al movimiento que el aire caliente, de modo que los ventiladores para los sistemas de calefacción, ventiladores y acondicionamiento de aire son el tipo de carga cuyos ciclos de funcionamiento deben establecerse con el cuidado requerido.

Aparte del calentamiento ocasionado por el tiempo necesario para llegar a la velocidad nominal, los motores deben transmitir la potencia necesaria para hacer girar la carga y disipar las pérdidas.

Los motores son dispositivos de conversión de energía; consumen potencia eléctrica y desarrollan potencia mecánica y calor. La energía que se transmite durante la aceleración, desde el motor parado hasta la velocidad máxima con par de carga nulo, es igual a la energía cinética de la masa en rotación a dicha velocidad máxima e independiente del tiempo de arranque. Por ello, existen factores que intervienen en la determinación de los arranques permisibles por hora.

Cuando se efectúa el arranque de un motor, la temperatura se eleva muy rápidamente en los devanados del estator y rotor. Ocurre muy poca transferencia de calor desde los devanados hasta el núcleo de acero circundante. Además los ventiladores impulsados por el eje del motor son poco eficaces hasta que el motor adquiere su velocidad nominal.

Como resultado, si se realizan arranques frecuentes, la temperatura excederá los límites térmicos de los devanados del estator y rotor. Por lo cual es recomendable las disminuciones de estos arranques frecuentes y se pueden emplear arrancadores especiales para ahorrar energía como son los variadores de frecuencia.

Los ahorros de energía que se logren deben ponderarse contra la posible reducción en la vida útil del motor, ya que muchas veces, la duración efectiva de un motor es determinada no solo por el número total de horas que ha trabajado, sino también por el número de arranques que ha tenido.

II.3.1.6 Ahorro de energía en el mantenimiento

Hay otros factores ambientales que afectan la eficiencia. Aún cuando son más difíciles de medir, su efecto sobre el comportamiento del motor puede ser determinante. En general tales factores caen en la categoría de las condiciones de mantenimiento. Una conservación deficiente acorta la vida del motor, y se traduce en una falla prematura debida a sobrecalentamiento.

Los cojinetes y aislamiento son en especial susceptibles al calor excesivo. El calor es energía térmica generada, por lo que debe minimizarse esta pérdida.

Existen además ciertas anomalías comunes que tienen un efecto adverso en el comportamiento del motor, como desalineamiento mecánico, lubricación deficiente, aplicación inadecuada para la transmisión con bandas V, y temperatura ambiente y ventilación inapropiadas.

Otro problema es el efecto producido o reembobinado de un motor que se le quemó el devanado. El proceso que se utiliza para extraer el devanado, es someterlo a fuego directo, esto puede ocasionar un incremento en las pérdidas del hierro y alterar las características del núcleo magnético, si la temperatura es excesiva, es decir a los 400 °C (750 °F), pueden degradarse las propiedades magnéticas y la resistencia interlaminar, lo cual daría por resultado un motor con eficiencia más baja después del reembobinado. Por lo que es recomendable reproducir el funcionamiento original a partir de un núcleo que tenga las mismas características que cuando la máquina fue construida originalmente.

II.3.1.7 Efecto de la altura sobre el nivel del mar

Cuando se instala un motor a una altura mayor de 1000 mts. sobre el nivel del mar, la densidad del aire se reduce considerablemente, lo cual se acompaña de una disminución de su capacidad de enfriamiento y, por tanto, de una mayor elevación de temperatura del propio aire de enfriamiento y de las diversas partes que configuran al motor.

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

La selección de la carcasa también es importante, las hay disponibles y normalizadas para casi cualquier clase de situación.

II.4 Ventajas de los motores de alta eficiencia

La utilización de los motores eléctricos en el sector industrial representa el mercado de ventas más grande de equipos industriales. En México, la venta de motores de corriente alterna polifásicos son alrededor de 250 mil unidades al año. Dentro de las perspectivas del consumo de energía, son éstos los que influyen poderosamente como el principal consumidor de energía eléctrica en este sector con lo que respecta a los sectores de servicios públicos y agropecuarios. Más de 45 millones de motores son utilizados en la actualidad, por lo que existe un potencial considerable de ahorro de energía en los sistemas de fuerza al utilizarse motores de alta eficiencia.

Se entiende por motores de alta eficiencia, aquellos que han sido optimizados en el diseño y en la manufactura y que han aumentado su rendimiento de 2 a 8% más de los motores estándar gracias a la utilización de las mejores propiedades y dimensiones de los materiales, así como la aplicación de una tecnología avanzada en la manufactura, esto ha ocasionado que el motor de alta eficiencia tenga un costo mayor que el motor convencional. Sin embargo, es necesario destacar que el costo de operación se reduce considerablemente por concepto de consumo de energía, llegándose a recuperar la diferencia excesiva del costo en algunas ocasiones, en menos de un año, todo depende del tipo de servicio o el número de horas de utilización y el porcentaje de su eficiencia.

Estos motores al operar con menos pérdidas de potencia, con menos temperaturas, permiten tener: mayor vida útil, mayor versatilidad, menor costo de mantenimiento y de ser más productivos.

Por ser de interés para los usuarios, para reducir sus costos por concepto de consumo de energía eléctrica, a continuación se exponen las principales ventajas técnicas y económicas que se obtienen de la aplicación de los motores eléctricos de alta eficiencia.

II.4.1 Mayor rendimiento y menor costo de operación

Los motores de alta eficiencia presenta mayor rendimiento que cualquier línea de motores diseñada o construida hasta ahora. Hay quienes se preguntan si estas máquinas no significan realmente que la industria ha dado marcha atrás y adoptado las normas previas correspondientes a las armazones tipo U y las prácticas de diseño prevalecientes en ese entonces.

En realidad no hay comparación entre los motores de eficiencia normal construidos con armazones U o T y los motores de alta eficiencia. Por ejemplo, al considerar el historial de los valores de eficiencia de los motores de 7.5 C.P., cuatro polos (1800 r.p.m.) y construcción totalmente cerrada con ventilación exterior (TEFC, totally enclosed, fan cooled), se observa que un motor de estas características tenía en 1944 una eficiencia del 84.5%, un motor equivalente en armazón U tenía en 1955 una eficiencia de 87%, uno de eficiencia normal en armazón T tenía en 1965 el 84% de eficiencia, y uno de armazón T pero de lata eficiencia alcanzaba en 1981 un rendimiento del 91%.

Menor costo de operación. El costo inicial de un motor depende de su potencia, velocidad, construcción cerrada o abierta, voltaje nominal, mientras que su costo de operación varía según la tarifa aplicable, el tiempo de operación la carga y la eficiencia.

Por ejemplo, para un motor de eficiencia normal de 7.5 C.P., 1800 r.p.m., de construcción abierta a prueba de goteo (drip-proof) que opere en forma continua según una tasa de energía de 0.139 \$/KWh (0.05 dólares/KWh) el costo de operación sería más de trece veces el costo inicial, lo que representa una proporción considerable. Por otra parte, el sobreprecio de un motor de lata eficiencia es del orden del 22%, considerando un ahorro de energía del 4%, lo cual da por resultado una recuperación de la inversión en 0.42 de año, o sea 5 meses.

II.4.2 Menores cargos por demanda máxima y menos pérdidas en vacío

Las compañías que suministran la energía eléctrica, suelen aplicar una carga en función de la demanda máxima registrada durante el periodo precedente de 12 meses. Cada motor que opere durante los picos de demanda de 15 o 30 minutos contribuirá a aumentar dicho cargo. Un solo motor de alta eficiencia de 100 C.P., puede reducir 2.9 KW el valor de la demanda máxima, lo cual considerando un cargo por demanda máxima de \$45.60 KW (5.70 dólares/KW), representaría un cargo mensual de \$132.24 (16.53 dólares), o sea \$1586.64 (198.33 dólares) anuales.

Sobre las pérdidas en vacío, se tiene que algunos motores se utilizan para cargas variables o están sujetos a un ciclo de trabajo que incluye periodos de operación sin carga. Un motor de alta eficiencia permite ahorrar energía aun en esas condiciones, ya que su más eficiente diseño se traduce en pérdidas en vacío que son significativamente menores que las de un motor normal.

II.4.3 Menor capacidad en los dispositivos para corregir el factor de potencia y menores pérdidas en los ramales de alimentación.

Los motores de alta eficiencia tienen además mejor factor de potencia que los de diseño normal. Esto significa que se requiere menos capacidad en KVA reactivos para lograr un factor de potencia aceptable. Los ahorros son proporcionalmente mayores en el caso de motores pequeños.

Por lo que se refiere a las pérdidas en los ramales de alimentación, la corriente de plena carga de un motor de alta eficiencia es menor que la de uno común, lo cual se traduce en ahorro extra por ser menores las pérdidas en la línea de alimentación. En un sistema en el que se admita una caída máxima de 3%, las pérdidas en los alimentadores o en los circuitos derivados se reducen en 120W si se sustituye un motor de tipo común de 50 C.P. por otro de alta eficiencia. Si además se emplean capacitores para corrección de factor de potencia, las pérdidas podrían reducirse en otros 180W.

II.4.4 Los ahorros se incrementan con el tiempo, además de reducir la carga para el acondicionamiento de aire local

El ahorro logrado con el uso de motores de alta eficiencia es directamente proporcional al costo de la energía. Según los pronósticos, dicho costo se elevará con mayor rapidez que casi todos los demás costos, lo cual significa que la valía de un motor de alta eficiencia se incrementará cada vez más que aumenten las tarifas de energía eléctrica.

Al realizar la conversión de energía eléctrica a energía mecánica, un motor convierte también la energía eléctrica en energía térmica. Si el motor opera en un medio en el que existe climatización o acondicionamiento de aire, por ejemplo en una planta textil, las pérdidas del motor significan un carga extra para el sistema climatizador.

Algunos usuarios estiman que el ahorro extra que se obtiene por este concepto con un motor de alta eficiencia es del 25%.

II.4.5 Eficiencia nominal de la placa

Existen numerosos productos que ofrecen a los usuarios como la solución ideal al problema del costo creciente de la energía. Si bien los ahorros potenciales que se ofrecen son cuantiosos, los hechos son un tanto vagos. Desde luego, este no es el caso en lo que respecta al motor de alta eficiencia.

La asociación Norteamericana de Fabricantes de Equipos Eléctricos (National Electrical Manufacturers Association - NEMA) ha establecido la norma MG1-12-53 b, que sienta los lineamientos para marcar en la placa de datos del motor la eficiencia de éste. La norma está basada en el concepto probabilístico de la distribución normal (campana de Gauss), el cual indica que una vez establecido el valor normal de eficiencia para un diseño particular, la mitad de los motores quedarán por debajo de este valor, y la otra mitad por encima. Esta norma, que es aplicable a motores trifásicos integrales de tipo jaula de ardilla a una sola velocidad, en diseño A

y B y en potencias de 1 a 125 C.P. establece que la eficiencia nominal a plena carga es la que debe estar marcada en la placa de datos del motor. En esta norma se consideran las variaciones en materiales, procesos de fabricación, pruebas y otras variables que afectan el valor de la eficiencia entre un motor y otro, incluso cuando sean del mismo diseño. La eficiencia a plena carga para un grupo numeroso de motores de un mismo diseño no es un valor único, sino más bien un intervalo de valores de eficiencia. Esta nueva norma indica los valores nominal y mínimo de eficiencia que pueden esperarse de un motor de determinado diseño o de un grupo de motores.

Cualquier motor de alta eficiencia que satisfaga las normas NEMA tendrá estampado en su placa el valor de su eficiencia nominal. Algunos fabricantes especifican también el valor mínimo garantizado para la eficiencia.

II.4.6 Protección, control y operación más silenciosa con menor calentamiento

Como los motores de alta eficiencia están basados en un procedimiento convencional de diseño y cumplen las normas NEMA, su aplicación puede realizarse empleando protecciones normalizadas por la NEMA contra sobrecarga, circuito corto, operación en una fase, inversión de fases y bloqueo. Asimismo, estos motores emplean el mismo control que un motor común cuando la aplicación implica inversión de la marcha, frenado por inversión, levantamiento de cargas, frecuencia variable y otras condiciones.

Una ventaja más de los motores de alta eficiencia es que, al generar menores pérdidas (calor), su operación conlleva a un menor calentamiento, lo cual, a su vez, requiere menos disipación de calor, normalmente proporcionada por un ventilador incorporado en el diseño totalmente cerrado (TEFC).

Al usar un ventilador más pequeño o más eficiente, el motor produce menos ruido.

II.4.7 Mayor vida útil del aislamiento y de los rodamientos

Los motores alta eficiencia operan con elevaciones de temperatura inferiores a la permisible para la clase 130 (B), y muchos operan incluso por debajo de la elevación correspondiente a la clase 105 (A). Como estos motores están fabricados con sistemas de aislamientos clase 130 (B) o clase 155 (F), su temperatura de operación estará por lo menos 20 °C por debajo de la usual. Dado que en teoría la vida del aislamiento se duplica por cada 10 °C que se reduzca la temperatura, la duración del aislamiento de un motor de alta eficiencia será hasta cuatro veces la de un motor normal.

Una causa común de falla de un rodamiento (o balero) es la falta de lubricante. Cuanto mayor sea la duración de la grasa, menor será el riesgo de que falle un cojinete de rodamiento. Dado que el tiempo de vida de la grasa es afectado directamente por la temperatura de operación del motor, un motor de alta eficiencia ofrece mayor confiabilidad en su sistema de rodamientos.

La duración del lubricante puede estimarse en términos de la temperatura del rodamiento. El aumento de dicha temperatura en un motor totalmente cerrado con ventilación exterior (TEFC) es aproximadamente el 0.50 al 0.66 de la elevación correspondiente al devanado del estator, por lo cual un motor de alta eficiencia alarga un 200 % la vida útil del lubricante con respecto a la duración en un motor común. Este incremento en la vida del lubricante contribuye, sin lugar a dudas, a una mayor confiabilidad de los rodamientos y del motor mismo, y a un abono por mayor espaciamiento del mantenimiento de engrase y renovación de rodamientos.

II.4.8 Menor esfuerzo térmico durante el arranque y mayor capacidad de disipación térmica en condiciones de bloqueo

Estos motores están sujetos a menores esfuerzos térmicos durante la puesta en marcha y presenta menores sobreelevaciones (o picos) de temperatura cuando se somete a condiciones anormales de operación durante lapsos breves.

La rapidez de calentamiento de un motor de alta eficiencia es mucho menor que la propia de un motor de eficiencia estándar, lo cual se traduce en menores temperaturas totales. Un motor de alta eficiencia alcanza una temperatura pico 30 °C menor que la que alcanza un motor común después de haber operado dos veces el protector o relevador de sobrecarga y de que el motor arranque en frío. Si el motor arranca en caliente, la diferencia en temperatura alcanzada será del 51% después de una sola operación del protector de sobrecarga. Dado que los cambios bruscos en la temperatura de operación, junto con el deterioro natural de los aislamientos, son una causa frecuente de las fallas en los motores, el motor más eficiente será también el de mayor confiabilidad.

La menor elevación de temperatura y la más baja rapidez de calentamiento de los motores de alta eficiencia les da mayor capacidad para disipar el calor generado en condiciones de rotor bloqueado, lo cual significa que están mejor protegidos contra fallas ocasionadas por operar en una sola fase.

II.4.9 Mayores factores de servicio y más adecuados para los sistemas de administración de energía

Con objeto de mejorar la eficiencia, el diseñador recurre a menudo a un mayor uso de material activo electromagnético, lo cual conlleva la ventaja extra de mayor capacidad de sobrecarga, el valor normal en la industria para el factor de servicio es 1.0 (cero sobrecarga) para motores (TEFC) y 1.15 (15% de sobrecarga) para motores abiertos a prueba de goteo.

Todos los motores de alta eficiencia, ya sean de construcción cerrada o abierta, tienen factores de servicio de 1.15, y algunos diseños tienen márgenes térmicos que permitirán una sobrecarga del 30% y hasta del 40%. Sin embargo, no es recomendable que un motor de alta eficiencia funcione en forma continua a valores altos de factor de servicio, ya que la eficiencia se reduciría y podrían inducirse fallas en los rodamientos y hasta rotura del eje (o flecha).

Los motores de alta eficiencia sufren menor grado los esfuerzos provocados por los arranques repetidos que prescriben los sistemas de administración de energía. Algunas aplicaciones, particularmente en ventiladores de gran tamaño y en algunos tipos de compresores, tienen un intenso ciclo de arranque por la inercia que es necesario acelerar hasta la velocidad de plena carga. Un motor de alta eficiencia soporta mucho mejor estas condiciones de arranque que uno de diseño normal.

MOTOR DE ALTA EFICIENCIA

VENTILADOR:

Diseño aerodinámico, bajas pérdidas de fricción, ligero.

MAS COBRE: Más y mejor cobre para reducir la resistencia a la corriente y reducir pérdidas por flujo de corriente.

MAYOR AREA DE LAMINACION:

Con esto se reduce la dispersión del campo.

ARMAZON DE FIERRO FUNDIDO:

Resistente a la corrosión, excelente disipación, acabado preciso para mejorar transferencia de calor.

ACERO AL SILICIO:

Reduce las corrientes parásitas, reduce pérdidas del campo magnético.

ENTREHERRO MAS ESTRECHO:

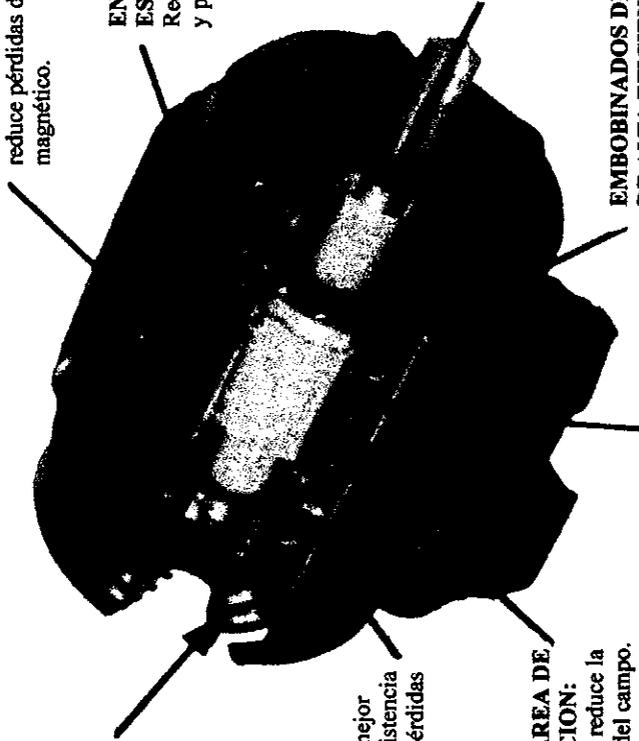
Reduce las pérdidas magnéticas y por fricción al aire con el rotor.

BALEROS ANTIFRICCIÓN:

Bajo calentamiento, bajo ruido, pocas pérdidas por fricción.

EMBOBINADOS DE COBRE DE ALTA EFICIENCIA:

Resistentes a la humedad, hasta 200°C, aislamientos entre fases, correcto atado de cabezas hasta eliminar cualquier vibración.



CAPITULO III

LA TECNOLOGIA DE LOS MOTORES EN LA ACTUALIDAD

III.1 Clasificación de rendimientos de equipos nacionales

La necesidad de ahorrar energía, ha estado creciendo desde hace más de una década y media, la cual ha marcado una clara tendencia hacia el mejoramiento de la eficiencia de los motores. El mejoramiento de la eficiencia se ha logrado principalmente por la aplicación de normas, regulaciones y tarifas de la energía que han impactado el diseño, la manufactura y en la operación de los motores, así como en los costos asociados.

Como cualquier máquina de amplio uso en la industria, el comercio y los servicios, los motores, se fabrican en una gran variedad de arcos, modelos y tamaños, así como en diferentes calidades y precios. Naturalmente también existe una gran competencia por el mercado, y por lo tanto surgen los líderes tecnológicos y comerciales, objetivo del presente capítulo.

De acuerdo con el estudio "Perfil Tecnológico de Manufacturas Eléctricas Sección Motores Eléctricos" elaborado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas en el año 1982, el nivel tecnológico de la fabricación nacional se encontraba por debajo de sus equivalentes en líderes tecnológicos, por ejemplo: Estados Unidos, Japón, Canadá, Alemania, etc.; aquella ocasión se establecía un 3% de diferencia en eficiencia de los motores, con unos precios entre 30 y 200% por encima del de los líderes. Esta información puede transferirse a tiempos actuales en lo que concierne a eficiencia, porque en algunas fabricas la materia prima, el herramental y la tecnología y el diseño continúan teniendo las mismas características generales que 1982 y lotes aislados de fabricación nacional que utilizaron una mejor calidad de acero tuvieron una mayor eficiencia que el promedio nacional, también se observan datos que estimaban una tasa de crecimiento anual del sector del 12%, sin embargo, en un documento editado por la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas (CANAME) en 1990 indicó que la tasa de crecimiento real de los 5 años anteriores a su publicación fue únicamente del 2%.

Otro dato importante dado por la CANAME, dice que México exporta motores en su mayoría a E. U. A. con un pequeño porcentaje hacia centro y Sudamérica con excepción de Brasil y Argentina; dichos motores de exportación tienen características muy similares a los del mercado nacional con excepción de los motores para 50 Hz, además, argumentan que el diseño

de los motores que se utilizan en México han sido reforzados como consecuencia de las variaciones de voltaje en nuestra red de distribución eléctrica.

Los datos en la Tabla III.1 hacen referencia a la única línea de motores que se producía y que se sigue produciendo en el ámbito nacional: la línea estándar, estos datos sobre eficiencia son comparables con los encontrados en documentos de 1980, en motores estadounidenses, sin embargo, las constantes innovaciones, por parte de los fabricantes, han elevado la eficiencia de los motores estándar de ese tiempo a la fecha en promedio entre ½ punto porcentual hasta 3, con respecto a la línea Alta Eficiencia, las diferencias son más grandes con valores de 5.3 a 8.1 puntos porcentuales, para el rango establecido para el proyecto. A continuación se muestra las eficiencias de motores nacionales en 1982.

Tabla III.1 Eficiencia de los motores nacionales en 1982.

POTENCIA	EMPRESA					
	GENERAL ELECTRIC	IEM	REMSA	Fairbanks	Koblenz	Motores US
1	66.0	78.0	77.0	73.0	60.0	81.7
1½	73.0	82.0	78.5	77.0	60.0	83.2
2	75.0	83.0	81.5	81.0		83.8
3	75.0	85.0	78.5	84.5		82.0
5	77.0	88.0	83.0	87.0		82.7
7½	80.0	84.0	86.0	87.5		85.2
10	82.0	86.0	87.0	88.1		86.1
15	83.0	90.0	86.5	88.5		88.8
20	85.0	87.0	86.5	89.0		89.2
25	*	87.0	88.5	88.5		88.6
30	*	87.0	90.0	88.9		89.1
40	*	85.0	88.5	91.0		89.6
50	*	86.0	91.0	90.0		91.7
60	*	87.0	90.2	91.5		89.7
75		86.0	90.0	91.5		90.0
100		89.0	90.2	91.5		90.5
125		92.0	90.2	90.5		91.1

* Se produjeron motores en estas capacidades pero no se proporcionó el dato.

La figura III.1 muestra desde un punto de vista económico que los principales productos vendidos por los miembros agrupados en CANAME son los motores integrales y los motores fraccionarios, ahora bien, los motores fraccionarios al tener un precio inferior al de los integrales, el número de unidades vendidas es mayor para los motores fraccionarios que para los integrales, sin embargo, por la capacidad y por el tiempo de operación impactan más al consumo de energía los motores integrales y en especial con una capacidad comprendida entre 1 a 125 CP.

FIGURA 3.1
CLASIFICACION DE LOS MOTORES FABRICADOS
POR
LA SECCION 1

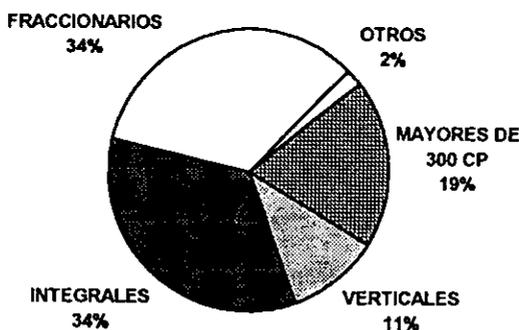
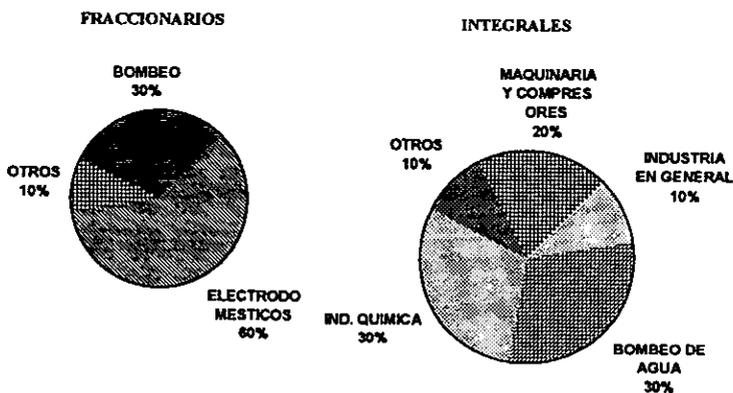


FIGURA 3.2.
PRINCIPALES DEMANDANTES DE MOTORES
EN MEXICO



En la figura 3.2 se observa como las cargas variables en su mayoría bombeo de fluidos agrupan a gran parte del uso de motores, pudiéndose atacar el diseño de mejores dispositivos de acción mecánica, sean ventiladores o turbinas y otra alternativa potencial será el ajustar el motor a la carga a través de controles de velocidad variables con el fin de elevar la eficiencia del sistema.

III.1.1 Situación actual de los equipos nacionales

Existen 5 fabricantes principales de motores en el país. El mercado esta cubierto con los siguientes porcentajes:

ASEA	10.1 %
CONFAD	17.5 %
IEM	21.5 %
REMSA	6.0 %
SIEMENS	18.2 %
OTROS	26.7 %

Estos porcentajes representan la capacidad de fabricación de todos los tipos de motores, lo cual es un indicador de la capacidad de fabricación de motores integrales que tiene cada empresa.

El control de calidad en la materia prima se aplica parcialmente debido a que no cuentan con los laboratorios suficientes. En lo que se refiere al producto, sólo IEM tiene la capacidad de probar todo el rango (1 -125 C.P.).

Desde el punto de vista de innovaciones tecnológicas han desarrollado muy pocas: CONFAD fabricó un prototipo de 7.5 CP con un mejor acero (AHMSA), que se calienta 10°C menos que su equivalente estándar.

De acuerdo a los procesos de fabricación observados, se analizó que los fabricantes pueden mejorar la eficiencia aumentando la calidad y cantidad del acero eléctrico y cobre, también, podrían ahorrar tiempo en el diseño y la fabricación de los prototipos si utilizaran los paquetes de cómputo disponibles.

III.1.1.1 Industrias CONFAD

Este fabricante cubre el 17.5% de las ventas totales de motores en el mercado nacional durante el año de 1989. Se estima que la tercera parte son motores integrales con un volumen de ventas de 6.6 millones de dólares.

CONFAD tiene dos plantas de fabricación de motores, una en Cerro Gordo Edo. de México y otra en Monterrey N.L. juntas fabrican alrededor de 500,000 motores anuales de los cuales 24,000 son de tipo integral hasta 60 CP y en producción especial hasta 125 CP, sin embargo, la mayor parte de su producción está dirigido hacia los motores fraccionarios para electrodomésticos.

— Materias Primas

Las materias primas básicas para los motores que fabrica el equipo CONFAD son:

- Conductores de cobre
- Acero para laminación

Los conductores de cobre los obtienen directamente de su propia planta procesadora de alambre magneto solo cuando la demanda es mayor, consiguen el complemento con fabricantes externos. En lo que se refiere al acero eléctrico usan el que se produce en HYLSA, pero podría usar otro acero mejor como el de AHMSA o de importación dependiendo de la disponibilidad y del precio.

El resto de las materias primas como son: rodamientos, aislamientos y componentes electromecánicas las consiguen con proveedores nacionales.

— **Proceso de fabricación**

El proceso de fabricación de los motores es convencional con intervención manual relativamente alta. Para producir la laminación usan troqueladoras de avance automático con herramienta de carburo de tungsteno, tienen un horno de tipo túnel para tratamiento térmico especial de alta temperatura los paquetes de laminación. Tienen varias bobinadoras que alimentan las líneas de ensamble y están adaptados para producir 24,000 motores integrales anualmente.

— **Control de calidad**

A lo largo de todo el proceso realizan controles de calidad a los componentes y finalmente al producto. Verifican dimensiones de las piezas, continuidad de las bobinas, aislamiento entre vueltas y funcionamiento general. Las materias primas como el alambre magneto tiene muy buen control de calidad, ya que cuentan con un laboratorio muy completo sobre todo para la realización de pruebas bajo normas NOM y NEMA. El acero eléctrico lo verifican parcialmente, ya que no controlan al nivel de pérdidas del material que reciben.

Para las pruebas de los productos terminados cuentan con un laboratorio con capacidad de hasta 3 CP bajo normas NOM, NEMA, IEEE, IEC. Como se puede observar con esa capacidad sólo cubren una pequeña parte de su rango de producción.

— **Innovaciones tecnológicas**

Los responsables técnicos de la fabricación de los motores, están dispuestos a producir motores de alta eficiencia con la condición de que el mercado esté asegurado. Calculan que aumentarían sus costos entre 20 y 25% respecto a los motores estándar y tendrían que aumentar los precios de ventas entre 40 y 50%.

De la observación de sus procesos y de las posibilidades de inversión inmediata, sólo podrían mejorar la eficiencia aumentando la cantidad y la calidad de material, es decir paquetes de laminación más largos o con mejor acero eléctrico, así como mayor sección de las bobinas. Por otro lado se podrían apoyar en el uso de los paquetes de diseño disponible para ahorrar tiempos en la fabricación de prototipos.

En los últimos meses fabricaron un prototipo de 7.5 CP con acero de AHMSA con buenos resultados, ya que presentó una temperatura 10°C menos que el acero normal y actualmente está en proceso de caracterización en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

III.1.1.2 Industrias IEM

Es el mayor fabricante de motores, ya que según las estadísticas de la CANAME cubrió el 21.5% del mercado nacional con un volumen de ventas de 24.5 millones de dólares. La participación en el mercado de motores integrales fue del 25% con un volumen de ventas de 10.1 millones de dólares al año.

— Materias primas

Las materias primas básicas para la fabricación de motores que utiliza IEM, son las convencionales, es decir alambre magneto y acero eléctrico.

El alambre magneto lo obtiene de la empresa CONDUMEX que es el mismo grupo industrial. El acero eléctrico es de importación, pero podría usar acero de AHMSA dependiendo de la disponibilidad y del precio.

El resto de materiales y componentes que conforman los motores (rodamientos, aislamientos y componentes electromecánicos), los consiguen con proveedores nacionales.

— Procesos de fabricación

El proceso de fabricación es convencional para motores estándar. Cuentan con troqueladores de avance automático (troquelador progresivo) con herramental de carburo de tungsteno.

Usan un horno convencional para recocido de los paquetes de laminación. Cuentan con varias bobinadoras para alimentar las líneas de ensamble y prueba.

— **Innovaciones tecnológicas**

Los diseños de base son de tecnología WESTINGHOUSE, que han adaptado a las condiciones de los usuarios y a los materiales nacionales. Cada modificación o adaptación importante sobre el diseño de base es probada en un laboratorio y consiste de la realización de las siguientes pruebas:

- Temperatura.
- Rotor bloqueado.
- Saturación en vacío.
- Curva par-velocidad.
- Verificación de parámetros de operación (corriente, potencia, velocidad, factor de potencia y eficiencia).

A nivel innovaciones sólo han mejorado el diseño del ventilador.

III.1.1.3 Industria ABB

Es el 4° fabricante de motores en México, ya que de acuerdo a las estadísticas de la CANAME obtuvo el 10.1% del volumen de ventas en 1989, es decir, 11.5 millones de dólares.

— **Materias primas**

Los motores que fabrica ABB a nivel nacional, tienen como mayor característica el uso de aluminio en la construcción del rotor y carcasa, por las siguientes ventajas:

- Menor peso que los motores de fundición de hierro.
- Misma resistencia al impacto que el hierro nodular.
- La aleación ligera es resistente a la corrosión.

El alambre para los devanados del estator tiene doble capa de aislante. El acero es de grado eléctrico al carbón, pudiendo usar el acero de AHMSA.

— **Control de calidad**

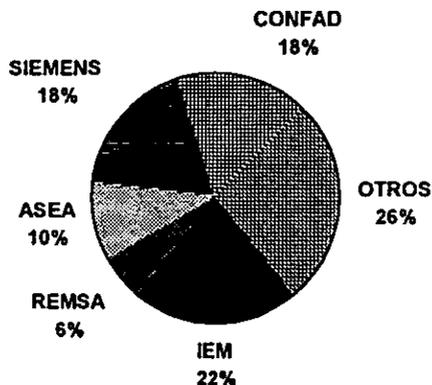
Los motores de ABB son diseñados para cumplir con las recomendaciones de NEMA a la vez que son compatibles con las normas IEC.

— **Innovaciones tecnológicas**

La tecnología utilizada es de la empresa sueco-suiza Asea-Brown-Boveri, al igual que las otras empresas, en ABB se han adaptado a las condiciones de los usuarios y a los materiales nacionales.

Figura 3.3

**PARTICIPACION EN LAS VENTAS TOTALES DEL SECTOR
MOTORES DE LA CANAME**



El número de empresas asociadas a la CANAME es aproximadamente de 19 y no todas ellas se dedican a la fabricación de motores de inducción con una capacidad de $\frac{1}{4}$ a 125 CP, pero en términos generales se tienen los siguientes de la tabla III.2.

Tabla III.2 a) Relación de fabricantes asociados a la CANAME.

FABRICANTES NACIONALES	MOTORES C. A.			
	MONOFASICOS		TRIFASICOS	
	FRACCIONAL	INTEGRAL	FRACCIONAL	INTEGRAL
ABB MOTORES S. A.			*	*
INDUSTRIAS IEM S.A. DE C.V.	*	*	*	*
ISLO S.A. DE C.V.	*	*	*	*
KOBLENZ ELÉCTRICA S.A.	*		*	*
LUMISISTEMAS S.A. DE C.V.			*	*
MAN. FAIRBANKS MORSE S.A.			*	*
MOTORES McMILLAN S.A.	*	*	*	*
MOTORES US DE MÉXICO S.A.	*	*	*	*
OPERADORA CONFAD S.A.	*	*	*	*
RELIANCE DE MÉXICO S.A.	*	*	*	*
SIEMENS S.A. DE C.V.	*	*	*	*

Esta tabla muestra que solo 11 empresas afiliadas a CANAME fabrican motores dentro del rango considerado (de ¼ a 125 CP) y como se indicó en el resumen únicamente 5 tienen el grueso de las ventas totales del sector que durante el año de 1989 fueron de 114 millones de dólares.

Tabla III.2 b) Relación de materiales utilizados por los fabricantes nacionales.

MATERIALES	FABRICANTES				
	ASEA	CONFAD	IEM	REMSA	SIEMENS
ACERO DE LAMINACIÓN	MAGNÉTICO ASIA	MAGNÉTICO AISI 1048	AL SILICIO M-43	MAGNÉTICO AISI 1008	*
COBRE DE DEVANADOS	*	ELECTROLITICO 99.9%	ELECTROLITICO 99.9%	ELECTROLITICO RME-048, RME-200, RME-935, RME-096	*
RODAMIENTO	De bolas y rodillo	*	ANTIFRICCION	ANTIFRICCION SKF O FAG	*
ALUMINIO	*	*	*	ASTM 356, REMSA 46024	*

Los datos con asteriscos muestran ausencia de información, que no fue dada por los fabricantes, existen algunos puntos relevantes de esta tabla como es que las empresas más grandes (IEM y CONFAD) consiguen el cobre de alguna empresa perteneciente al mismo grupo industrial, mientras los demás tienen que comprarlo directamente con algún productor ajeno que en ningún momento se mencionó. Las normas que cumplen los fabricantes son importantes para determinar las características de sus productos, a continuación se presentan las normas que cumplen algunos fabricantes nacionales.

Tabla III.3 Normas aplicadas por los fabricantes nacionales para los motores

NORMAS	FABRICANTES				
	ASEA	CONFAD	IEM	REMSA	SIEMENS
NORMA APLICADA	NEMA, IEC, NOM	NEMA MG-1, IEC, NOM-J-75, IEEE 112	NEMA MG-1, ANSI-IEEE 112, NOM-J-75	NEMA MG-1, ANSI-IEEE 112, NOM-J-75, PEMEX	*

Los fabricantes proporcionaron esta lista de normas cuyos usos cubren varios aspectos, por ejemplo, dimensionamiento, caracterización de parámetros de operación, pero es importante hacer notar que las normas IEEE 112 y 114 son las usadas para cuantificar la eficiencia.

III.2 Clasificación de rendimientos de equipos en líderes tecnológicos

La tecnología mundial sobre todo en los países más avanzados ha desarrollado nuevas líneas de motores más eficientes, estos motores se han venido construyendo después de la gran pérdida de energía en la utilización de motores estándar y en algunos casos bajo el auspicio e incentivos gubernamentales.

Los líderes mundiales se encuentran divididos en tres grandes bloques que son:

- Bloque norteamericano: Baldor, General Electric, Reliance y Emerson.
- Bloque asiático: Toshiba y Hitachi.
- Bloque europeo: Siemens, ABB y AEG.

Algunos de estos fabricantes como es el caso de Reliance comenzaron la labor de etiquetado de eficiencia en el año de 1977 y mantienen desde entonces planes continuos para el mejoramiento de la eficiencia.

Las eficiencias alcanzadas por los fabricantes anteriormente mencionados para las líneas de motores estándar y alta eficiencia en el año de 1989 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla III.4 Eficiencia energética de las líneas estándar y alta eficiencia en E.U.A.

Fabricante	LINEA ESTANDAR				LINEA ALTA EFICIENCIA			
	10	25	100	125	10	25	100	125
BALDOR	87.5	88.5	91.6	93.3	91.7	94.1	95.0	---
G. ELECTRIC	85.5	89.5	91.7	94.1	91.0	93.6	95.4	95.8
MARATHON	87.5	90.2	92.4	95.0	91.7	93.6	95.8	95.0
RELIANCE	86.2	87.9	90.8	93.2	90.2	93.0	95.4	96.2
SIEMENS / EUA	86.5	86.5	92.4	94.5	90.2	93.0	95.0	95.8
U.S. MOTORS	88.5	91.0	92.5	93.6	91.0	93.0	95.0	96.2
TOSHIBA / EUA	87.2	89.8	93.0	94.0	91.8	93.5	95.0	96.0

De acuerdo a su propia experiencia estos fabricantes consideran que las mejoras en la eficiencia son debidas a los siguientes aspectos:

- Uso de acero de menor calibre.
- Agregado de más acero en el núcleo.
- Uso de mayor cantidad de cobre (longitudinal y transversal) en el estator.
- Utilización de mejores barras conductoras del rotor.
- Uso de ventiladores mejorados.
- Mejores diseños y procedimientos más estrictos de control de calidad.

La modificación en los materiales y diseños de motores estándares se comienza alrededor de 1976 cuando la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) introduce el procedimiento de etiquetado de eficiencia y creando nuevas líneas de motores que son "Alta Eficiencia" o "Premium".

En ese instante los fabricantes comienzan a diseñar y construir motores en los cuales se reducen las pérdidas, comercializando dos hasta tres líneas de motores, la concientización del usuario ha sido otro factor determinante en el creciente uso de motores de líneas más eficientes y el mercado de las nuevas líneas más eficientes ganan día a día más terreno y así tenemos los siguientes datos:

- General Electric (E.U.A.): Los motores de la línea "Alta Eficiencia" representan el 35% de las ventas para motores de mas de 5 CP.
- Reliance: Más del 50% de la venta de unidades en motores mayores de 10-20% en motores fraccionarios.
- Sienes/E.U.A.: Alrededor del 20% de ventas económicas.
- U.S. Motor: Sobre una tercera parte de las ventas por unidades.

Para 1989 los principales fabricantes de motores de línea "Alta Eficiencia" eran: Baldor, General Electric, Magnetek Century, Marathon, Reliance, Siemens, U.S. Motors, Toshiba.

La tabla III.5 contiene información más completa sobre la eficiencia de motores "Alta Eficiencia" en Estados Unidos y es mostrada a continuación, la base de comparación son motores de 4 polos, totalmente cerrados, 230/460 Volts.

Tabla III.5 Eficiencia de los motores y los promedios de los motores líderes:

Cap. (CP)	FABRICANTE							
	Baldor	G. E.	Marathon	Reliance	Teco	Siemens	Toshiba	US Motors
1	85.5	84.0	84.0	84.0	86.5	81.5	83.7	86.2
1.5	87.5	84.0	84.0	85.5	86.5	85.5	84.9	86.4
2	86.5	84.0	84.0	86.5	86.5	82.5	85.1	86.6
3	89.5	89.5	88.5	88.5	88.5	88.5	87.0	89.4
5	90.2	90.2	88.5	89.0	89.5	88.5	88.5	89.3
7.5	91.0	91.7	91.7	90.6	91.7	90.2	91.0	91.0
10	91.7	91.7	91.7	90.7	91.7	90.2	91.0	91.3

15	92.4	92.4	92.4	93.0	92.4	92.4	92.4	92.6
20	93.0	93.0	93.0	93.1	93.0	92.4	93.0	93.4
25	94.1	93.6	93.6	93.6	93.0	93.0	93.6	93.4
30	94.1	93.6	94.1	93.6	93.6	93.6	93.6	93.9
40	94.5	94.1	94.5	94.2	94.1	93.6	94.1	93.7
50	95.0	94.1	94.5	94.5	94.1	94.1	94.1	94.0
60	95.0	95.0	95.4	95.0	94.5	94.5	95.0	94.7
75	95.0	95.4	95.4	95.0	94.5	95.0	95.0	95.3
100	95.0	95.4	95.8	94.5	95.0	94.1	95.4	95.4
125	95.0	95.4	96.2	95.8	94.9	95.0	95.8	----
150	95.0	95.8	96.2	96.2	95.1	95.0	95.8	----
200	94.5	95.8	95.0	96.2	96.0	95.4	96.2	----

Como se observa los niveles de eficiencia de los motores alta eficiencia en Estados Unidos se encuentran por arriba de los valores que esta proponiendo el presidente de ese país para 1998 a través de una revisión a al National Energy Security Act (NAESA); por su parte, los motores mexicanos de fabricación estándar publicados en 1982 y proporcionados por los fabricantes en 1992 están por debajo de los de 1998. El promedio de eficiencia de los motores alta eficiencia de los fabricantes norteamericanos indican grandes potenciales para el ahorro de energía.

CAPITULO IV

AHORRO EN EL RAMO INDUSTRIAL

IV.1 Comparación y beneficio en el consumo y ahorro de energía eléctrica de un motor de inducción estándar respecto a un motor de inducción de alta eficiencia en la rama industrial.

Es recomendable conocer que el costo de operación de un motor suele ser varias veces mayor que el costo inicial. Un motor eléctrico de 20 C.P. con una eficiencia normal promedio de 88% tiene un precio inicial aproximado de \$3,600.00 y demanda alrededor de 17 KW de potencia. Si este motor opera dos turnos diarios, o sea 80 horas por semana durante 50 semanas, es decir, 4000 horas al año, su consumo anual de energía será de 68,000 KWh, a un precio de \$0.26 Kilowatt-hora, la energía necesaria para operar el motor costaría \$17,632.70 anuales; es decir, más de 4 veces el precio inicial del motor. Únicamente el costo de las pérdidas es de un 12%, sería de \$2,116.00 al año, por lo cual en 2 años el costo de las pérdidas excederá el precio del motor nuevo (ver tabla IV.1 costo de operación). Un motor de alta eficiencia que tuviera sólo un 8% de pérdidas representaría un ahorro de \$766.70 anuales con un precio inicial de \$4,500.00, o sea \$900.00 (un 25%) más alto. Este motor recuperaría en un año 4 meses de servicio, el costo extra que representa su adquisición, lo que no es algo excepcional. Normalmente el periodo de recuperación para motores de alta eficiencia es de uno a dos años, después de los cual el ahorro acumulado de energía sigue aumentando durante el tiempo de vida efectiva del motor.

<i>Base de comparación</i>	<i>Motor estándar</i>	<i>Motor de alta eficiencia</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Comentarios</i>
Precio de compra	3600	4500	900	25% mayor
Eficiencia	88%	92%	4%	4.5% mayor
Perdidas	12%	8%	4%	1/3 menor
Costo anual de la energía	17 632.70	16 866.00	766.70	4.3% menor
Costo anual de las pérdidas	2 116.00	1 349.30	766.70	36.2% menor
Costo de la energía durante 20 años	352 654.00	337 320.00	15 334.00	3 veces el costo del motor A. E.
Costo de las pérdidas durante 20 años	42 320.00	26 986.00	15 334.00	15 veces el costo de la diferencia

Tabla IV.1 Comparación de costos de motores en pesos.

Motor de inducción de 20 C.P., 480V

Costo de la energía: \$0.26 KWh.

Tiempo de operación: 400 horas (2 turnos/día, 50 semanales/año)

$$\text{Costo anual de la energía:} = \frac{0.746\text{Kw} / \text{CP}}{\text{Efic. (\%)} \times 0.01} \times \$0.26 / \text{KWh} \times 4000\text{hrs.}$$

$$\text{Costo anual de las pérdidas} = \text{Costo anual de la energía} \times 0.01 \times \text{pérdidas (\%)}$$

En un año cuatro meses se recupera la diferencia del precio.

En la tabla de costo de operación donde se comparan los motores, se puede apreciar este análisis. En este ejemplo elemental entre el costo inicial y el costo de operación de un motor a fin de estimar el tiempo requerido para recuperar el costo extra de un motor de alta eficiencia. Generalmente bastaría con este sencillo cálculo para justificar la adquisición de un motor de tal tipo. En ocasiones podría ser conveniente en utilizar un procedimiento contable más completo para realizar un verdadero análisis económico que permita comparar varias opciones. Los ahorros anuales en el caso de un motor de inducción típico variarían con el ciclo de trabajo y las tarifas eléctricas. El costo real de la energía no es solamente el cargo por cada KWh, sino deben incluirse los cargos por demanda máxima, cargos extras por combustibles, penalización por bajo factor de potencia y otros gravámenes incluidos en la facturación de la compañía de suministro.

Las variaciones y equilibrios de voltajes, así como las condiciones de carga, afectan la eficiencia y el comportamiento de todos los motores. Tales factores constituyen la influencia externa más significativa a la que se enfrenta el diseño intrínseco de un motor. Los motores de diseño distinto, como los normales y los de alta eficiencia, reaccionan en forma diferente a los estímulos externos y los diseños comunes lo hacen en forma similar.

Se han hecho estudios sobre el particular y puede afirmarse que las variaciones en las condiciones externas afectan negativamente en mayor grado a los motores estándar que a los motores de alta eficiencia. Los tres casos de aplicaciones que se muestran enseguida son ejemplos típicos que apoyan esta tendencia.

Los casos contienen resultados de pruebas realizados con wathorímetros en el lugar de trabajo y en condiciones reales de operación. Para este ensayo, en el circuito del motor sometido a prueba se intercaló un wathorímetro dotado de un medidor de tiempo transcurrido, y se pidió a la compañía suministradora que tomaran las lecturas.

El objetivo de revisar estos casos es mostrar la diferencia que existe en el funcionamiento comparando datos reales y datos calculados (o esperados).

A menos que se indique otra cosa, en los tres casos la capacidad del motor de alta eficiencia (motor B) que sustituyo al motor normal (motor A) era igual a la capacidad de éste.

IV.1.1 Aplicación a un compresor de tornillo de una planta química.

Este ejemplo se aplica a una planta industrial donde se tienen las condiciones que se indican.

- **Variación de voltaje.**

La tensión aplicada es un 3% mayor que el valor nominal. Como el motor B está diseñado para más baja saturación que el motor A, el incremento de voltaje reduce la corriente de línea y eleva la eficiencia del motor B. En cambio, el motor A reacciona en sentido opuesto (ver tabla del ejemplo).

- **Desequilibrio del voltaje.**

El valor de menos de 1% da por resultado una baja de eficiencia en ambos motores, y no es posible precisar si afecta más a uno o a otro.

- **Variación de la carga.**

La aplicación implica un ciclo de trabajo que requiere que el motor opere sin carga durante una parte de dicho ciclo. Las pérdidas sin carga del motor A son considerablemente mayores que las del motor B.

Por esta causa, la energía absorbida durante la marcha en vacío es un factor significativo para explicar la diferencia en las lecturas registradas en los wathorímetros.

TABLA DEL EJEMPLO DE UNA PLANTA QUÍMICA

Aplicación	Compresor tipo tornillo	
Tipo de motor	100 CP, 1800 rpm, abierto a prueba de goteo, 404T.	
Tiempo de operación	3000 horas/año	
Costo de energía en pesos	\$ 0.32	
Parámetros de operación	Motor A	Motor B
Corriente nominal (plena carga) publicada	120 A	118 A
Voltaje nominal publicado	460 V	460 V
Corriente medida de prueba (plena carga)	130 A	112 A
Voltaje medido de prueba (plena carga)	474 V	474 V
Datos calculados	Motor A	Motor B
Eficiencia publicada	91.6 %	93.1 %
Ahorro anual en pesos	-----	\$ 1256.00
Datos de prueba	Motor A	Motor B
Kilowatts-hora netos	7183	6241
Horas netas	121.0	130.9
Consumo de energía por hora (KWh)	59.4	47.7
Ahorro anual en pesos	-----	\$ 11232.00

IV.1.2 Aplicación en acabados de hilados de una fábrica textil.

En esta fábrica las condiciones con que opera son las que señalan:

- **Variaciones de voltaje.**

El voltaje aplicado está un 4% por encima del nominal, en el caso del motor B, y un 9% en el caso del motor A. Un análisis de las curvas de saturación a plena carga de cada motor revela que ambos motores operan muy por abajo del recodo de la curva a su voltaje nominal. Sin embargo, a 600 volts el motor A experimenta una reducción en la eficiencia, mientras el motor B experimenta una mejora (ver tabla del ejemplo).

- **Desequilibrio de voltaje.**

Ambos motores fueron sometidos al mismo voltaje desequilibrado en menos de 1%, lo cual no afectó mayormente el consumo de energía.

- **Variación de carga.**

La máquina impulsada trabajó en idénticas condiciones de carga en ambos motores; es decir con una variación desde los 3/4 hasta 1/2 de la nominal.

A la tensión nominal, ambos motores experimentaron el mismo deterioro en su eficiencia de 1 a 1.5%, pero en vista del sobrevoltaje aplicado, el motor A experimentó una caída de eficiencia de un 3% a media carga, con lo cual se incrementó su consumo medio de energía durante el ciclo de trabajo.

TABLA DEL EJEMPLO DE UNA FÁBRICA TEXTIL

Aplicación	Acabado de hilados	
Tipo de motor	15 CP, 1800 rpm, 254T.	
Tiempo de operación	6000 horas/año	
Costo de energía en pesos	\$ 0.32	
Parámetros de operación	Motor A	Motor B
Corriente nominal (plena carga) publicada	17.0 A	14.8 A
Voltaje nominal publicado	550 V	575 V
Corriente medida de prueba (plena carga)	14.2 A	13.0 A
Voltaje medido de prueba (plena carga)	600 V	600 V
Datos calculados	Motor A	Motor B
Eficiencia publicada	86.7 %	89.8 %
Ahorro anual en pesos	-----	\$ 856.00
Datos de prueba	Motor A	Motor B
Kilowatts-hora netos	10.1	7.7
Ahorro anual en pesos	-----	\$ 4608.00

IV.1.3 Aplicación a una bomba de una planta petroquímica.

Las condiciones de operación de esta planta son:

- **Variación de voltaje.**

La tensión aplicada es 2.6% inferior a la nominal. En esta aplicación tal voltaje mejora la eficiencia de ambos motores en virtud de que su carga es muy baja. El voltaje bajo tiende a reducir la intensidad de la corriente, lo cual a su vez aminora las pérdidas por la carga I^2R de los motores (ver tabla ejemplo).

- **Desequilibrio de voltaje.**

Su valor puede considerarse despreciable.

- **Variación de la carga.**

El motor A fue instalado como parte del equipo original y, en vista de solo tomaba el 60% de su corriente nominal, se decidió que debía probarse con el tamaño inmediato inferior correspondiente a 5 C.P.

En realidad, como se descubrió después, un motor 3 C.P. hubiera sido tal vez una mejor elección para las cargas aplicadas a la bomba. Con el motor sobredimensionado, gran parte de la energía estaba representada por la componente reactiva, que no aporta trabajo útil. El ahorro de energía se obtuvo principalmente al dimensionar el motor más cerca del valor de la carga.

Observando en los datos anteriores de las tres aplicaciones, concluimos que el ahorro de energía obtenido en las instalaciones reales a menudo está por encima de los valores esperados de los cálculos por medio de los datos nominales. Hubo algunos otros casos en los que la aplicación de motores de alta eficiencia no dio por resultado el ahorro esperado. La razón más probable es que el motor normal tenía en realidad mayor eficiencia que el valor supuesto, o que el motor de alta eficiencia tenía menor rendimiento. Sin embargo, en la mayor parte de las pruebas realizadas los ahorros obtenidos fueron mayores que los calculados originalmente.

Los casos anteriores también ponen de relieve algunas variables que se presentan en aplicaciones reales y que influyen en el funcionamiento de todos los motores. Las variaciones en el voltaje aplicado y en la carga impulsada ocasionarán que el motor opere en forma subóptima. Estas variables se encuentran bajo el control directo de los ingenieros de aplicación y del personal de planta. El control de dichos factores permite al usuario alcanzar los máximos beneficios que el diseño mejorado de los motores de alta eficiencia pone a su alcance.

TABLA DEL EJEMPLO DE LA PLANTA PETROQUÍMICA

Aplicación	Bomba	
Tipo de motor	7.5 CP, 1800 rpm TEFC, 213T.	
Tiempo de operación	7800 horas/año	
Costo de energía en pesos	\$ 0.32	
Parámetros de operación	Motor A	Motor B
Corriente nominal (plena carga) publicada	11.2 A	6.1 A
Voltaje nominal publicado	460 V	460 V
Corriente medida de prueba (plena carga)	6.8 A	4.2 A
Voltaje medido de prueba (plena carga)	447 V	447 V
Datos calculados	Motor A	Motor B
Eficiencia publicada	82.7 %	87.0 %
Ahorro anual en pesos	-----	\$ 560.00
Datos de prueba	Motor A	Motor B
Kilowatts-hora netos	3.23	2.74
Ahorro anual en pesos	-----	\$ 1223.04

* En sustitución del motor B de 5 C.P.

** La operación del motor A se cálculo con base en el punto de carga correspondiente a 5 CP de la curva de funcionamiento del diseño de 7.5 C.P.

IV.2 Aplicación de motores de alta eficiencia en bombas de pozo profundo.

El Fideicomiso de Apoyo al Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (FIDE), que es un organismo creado para apoyar acciones que induzcan y fomenten el ahorro de energía, ha publicado una serie de proyectos que se han realizado, mismos que han demostrado ahorro de

energía en motores eléctricos conjuntamente con el equipo que éstos impulsan; dado la experiencia obtenida y para apoyar todas estas acciones que nos benefician, nos permitimos tomar algunos ejemplos sobre la aplicación de estos equipos que a continuación se exponen:

- **Antecedentes:**

El agua que se requiere para el proceso se obtiene de pozos con ayuda de motobombas. Estas trabajan bajo un programa de uso para ahorrarse mantenimiento, sin embargo, desde el punto de vista de consumo de energía puede utilizarse en horas que beneficien su costo por consumo de energía y sin causar perjuicio por esto al equipo.

- **Área:**

Servicios de una empresa.

- **Equipo:**

Bombas de pozo profundo.

- **Descripción del potencial de ahorro:**

Optimización del uso de las motobombas.

- **Acción:**

No utilizar las motobombas durante el horario de demanda de punta (de 18:00 a 22:00 horas).

- **Descripción de la acción:**

Existen dos motobombas de agua para pozo profundo que tienen como valor nominal 200 C.P. cada una, éstas no tienen un horario óptimo de utilización. También la planta cuenta con tanques de almacenamiento de agua. Si se tiene la precaución de llenar los tanques antes de las seis de la tarde (18:00 horas) el agua almacenada alcanza para cubrir la demanda de la planta; a las diez de la noche (22:00 horas) se pueden volver a encender las bombas y llenar los tanques de almacenamiento, evitando con esto parte del pago de la demanda máxima en horas de demanda de punta y la diferencia entre el costo de KWh a hora de demanda base y demanda de punta.

- **Beneficios:**

Al realizar la acción antes descrita, se disminuirá la demanda de energía eléctrica sobre todo en horas pico con los consecuentes beneficios.

- a) Ahorro energético:
58 376 KWh/año en demanda de punta.
4 865 KWh/mes en demanda base.
- b) Ahorro económico:
\$ 97 584.00 al año.
\$ 8 132.00 al mes.
- c) Porcentaje de ahorro con relación con relación a la factura:
Factura mensual = \$859 199.20
Ahorro mensual = \$ 8 132.00
Ahorro mensual = 0.946%
- d) Porcentaje de ahorro con relación al consumo total de energía eléctrica:
Costo total mensual = 4 985 216 KW
Demanda máxima = 7 632 KW
Ahorro mensual = 203 KW
Ahorro = 2.66%
- e) Inversión:
No hay inversión.
- f) Tiempo de recuperación de la inversión:
Inmediato.

IV.3 Aplicación en motobombas de una torre de enfriamiento

- **Antecedentes:**

Con objeto de mantener a una temperatura adecuada el agua que se utiliza del proceso, se usa una torre de enfriamiento que consta de dos secciones y que para su funcionamiento requiere de dos motobombas de 300 C.P. y dos ventiladores de 125 C.P.

- **Área:**

Servicios - torres de enfriamiento de una empresa.

- **Equipo:**

Torres de enfriamiento.

- **Descripción de potencial de ahorro:**

Existen dos torres de enfriamiento, una grande de dos secciones que generalmente se usa y una pequeña la puede sustituir a una sección de las grande.

- **Acción:**

Detener el uso de una sección de la torre de enfriamiento grande y utiliza la torre pequeña.

- **Descripción de la acción:**

La torre de enfriamiento grande consta de dos motobombas de 300 C.P. cada una con sus respectivos ventiladores de 125 C.P. Se tiene también una torre de enfriamiento más pequeña que utiliza una motobomba de 200 C.P. y un ventilador de 50 C.P. , esta última torre puede sustituir a una de las selecciones de la torre grande, ya que se ha visto que el enfriamiento que se logra es suficiente para el proceso según se constató con el personal de la planta.

- **Beneficios:**

Al realizar la acción antes descrita, se optimiza la demanda de energía con los consecuentes ahorros energéticos y económicos que a continuación se describen.

a) **Ahorro energético:**

1 109 916 KWh/año

92 493 KWh/año

b) **Ahorro económico**

\$ 166 343 000.00 al año

\$ 13 861 888.00 al mes

c) **Porcentaje de ahorro con relación a la factura:**

Facturación mensual = \$ 859 199 198.00

Ahorro mensual = \$ 13 861 888.00

Ahorro = 1.613%

d) **Porcentaje de ahorro con relación al consumo**

total de energía eléctrica:

Consumo total mensual = 4 985 216 KWh

Ahorro mensual = 92 493 KWh

Ahorro = 1.85%

- e) Inversión
No requiere
- f) Tiempo de recuperación de inversión:
Inmediato.

IV.4 Aplicaciones de motores en el área de producción en una empresa.

- **Antecedentes:**

Materia que procesa actualmente:

Soya y eventualmente cártamo y girasol.

Productos elaborados:

Aceite crudo, lodo de lecitina y pasta para forraje.

Subproductos aprovechables:

Cascarilla.

- **Área:**

Toda la planta de una empresa.

- **Equipo:**

Todos los motores de los equipos de producción

- **Descripción de potencial del ahorro:**

Se identificó que el 58%, aproximadamente de los motores de la planta están sobredimensionados con factores de carga bajos, provocando exceso de demanda de energía

Sustituyendo los motores sobredimensionados por motores, de la misma planta, con la capacidad adecuada se obtendrá un ahorro de energía de 83.23 KVAR y de 66.75 KW promedio del mes.

- **Acción:**

Sustituir los motores con bajo factor de carga por motores de capacidad adecuada de la misma planta en cascada y sólo adquirir algunos motores de baja potencia.

- **Descripción de la acción:**

Se tomaron las capacidades (C. P.), corrientes de placa (nominales) y corrientes a plena carga. Con estos datos y mediante un programa de cómputo especialmente dimensionado de cada

motor se cálculo el factor de carga; la capacidad del motor sustituto adecuado para la carga que esta alimentando; la potencia suministrada al motor actual; la potencia que se suministraría al sustituto; el porcentaje de ahorro que esto representa; los Kwh's de ahorro de esta acción aportaría; el factor de potencia del motor sustituido, los Kvar's de ahorro que esto representa. De igual forma, se calcularon los beneficios económicos por ahorro en demanda factúrales/mes, ahorro por disminución de consumo en KWh's/mes y la suma de ahorro total por cada motor por mes y por año.

El ahorro que representa acción es realmente importante, tomando en cuenta, además que no se está considerando el ahorro por las pérdidas en los alimentadores y en reposición de capacitadores.

• **Beneficios:**

1. Ahorro por demanda facturable.
2. Ahorro por consumo en las diferentes tarifas.
3. Ahorro por reducción de uso de capacitores.
4. Ahorro por el aumento del factor de potencia.

a) Ahorro energético:

Tomando como ejemplo el motor No.23.

$$\text{Cap.} = 15 \text{ C.P.} \quad I_{\text{nom.}} = 19.5 \text{ A} \quad I_{\text{real}} = 7.5 \text{ A}$$

$$\text{Pérdidas} = 4.30\text{Kw} \quad \text{F.P.} = 0.79 \quad \text{Pot.reac.} = 3.3\text{Kvar}$$

Se propone cambiarlo por un motor de :

$$\text{Cap.} = 5 \text{ C.P.} \quad I_{\text{nom.}} = 5.0 \quad I_{\text{real}} = 7.5 \text{ A}$$

$$\text{Pérdidas} = 3.54\text{KW} \quad \text{F.P.} = 0.87 \quad \text{Pot.reac.} = 2.5 \text{ KVAR}$$

$$\text{Ahorro en potencia reactiva} = 3.3 - 2.5 = 0.8 \text{ KVAR}$$

$$\text{Ahorro en potencia real} = 4.30 - 3.54 = 0.76 \text{ KW}$$

Analizando todos los motores y sumando los ahorros:

$$\text{Ahorro por potencia eléctrica demandada} = 66.75 \text{ KW}$$

$$\text{Ahorro por potencia reactiva demandada} = 83.23 \text{ KVAR}$$

b) Bonificación por factor de potencia:

$$\text{Demanda máxima} = 493 \text{ KW}$$

$$\text{Factor de potencia actual} = 91.69 \%$$

Facturación promedio mensual = \$35 705 476.00

Bonificación por F.P. actual

$$(1/4) \times (1 - 90/91.69) \times 100 = 0.46 \%$$

KVAR ahorrados = 83.23 KVAR

$$\text{KVAR1} = 493 \times [\text{tang.} (\text{Cos}^{-1} (0.9196))] = 214.60 \text{ KVAR}$$

$$\text{KVAR2} = 214.60 - 83.23 = 131.37 \text{ KVAR}$$

$$\text{F.V. corregido} = \cos [\text{arc.tang.}(131.37 / 493)] * = 96.63\%$$

Bonificación por F.P. corregido superior a 0.90%:

$$(1/4) \times (1 - 90/96.63) \times 100 = 1.64\%$$

$$\text{Diferencia de bonificaciones} = 1.64\% - 0.46\% = 1.18\%$$

$$\text{Ahorro por mes} = 0.0118 \times \$ 35 705 476.00 = \$421 325.0/\text{mes}$$

c) Ahorro económico:

Cargo por KW de demanda máxima medida = \$24 240.00 (junio - octubre)

$$= \$23 086.00 \text{ (noviembre - mayo)}$$

Cargo por KWh de energía consumida = \$ 142.44 (junio - octubre)

$$= \$135.65 \text{ (noviembre - mayo)}$$

KW de ahorro = 66.75

Ahorro por demanda facturable = 66.75 x 24 240.00 = \$ 1 618 020.00 (junio - octubre)

$$= 66.75 \times 23086.00 = \$ 1 540 990.50 \text{ (nov.- mayo)}$$

Ahorro mensual por consumo = 66.75x 24x30x142.44 = \$ 6 845 666.00 (junio- octubre)

$$= 66.75 \times 24 \times 30 \times 135.65$$

$$= \$ 6 519 339.00 \text{ (noviembre - mayo)}$$

Ahorro por KVAR = \$ 1 135 262.00

Ahorro (junio - octubre) = \$ 1 618 020 + \$ 1 135 262 = \$ 959 8948.00/mes.

Ahorro (noviembre - mayo) = \$1540990+ \$ 6519339+ \$ 1 135 262 = \$ 9 195 591.00/mes.

Ahorro anual = (5 x 9598948) + (7 x 9195591) =

$$= \$ 49794749 + \$ 64369137 = \$ 1 141 638 77.00$$

Bonificación por factor de potencia:

$$\text{Ahorro anual} = \$ 421325.00 \times 12 = \$ 5 055 900.00/\text{año.}$$

Ahorro anual por esta acción:

$$\$114163877 + \$5055900 = \$119219777.00/\text{año}$$

= \$ 9934981.00/mes.

d) Porcentaje de ahorro con relación al consumo total:

Consumo promedio en KWh/mes = 203 944

Ahorro por consumo mensual = $66.75 \times 24 \times 30 = 48\,060$ KW.

Porcentaje de ahorro = $(48\,060 \text{ Kwh} / 203\,944 \text{ Kwh}) \times 100 = 23.56\%$ por mes

e) Inversión:

Mano de obra del personal de la planta.

f) Tiempo de recuperación:

No requiere.

CAPITULO V

EL CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES DE
INDUCCION TIPO JAULA DE ARDILLA PARA EL
AHORRO DE ENERGIA ELECTRICA

V.1 Antecedentes.

Como ya se mencionó, la mayor parte de la electricidad la consumen los motores, por lo que es recomendable buscar alternativas para el ahorro de electricidad en estas máquinas; destacándose que una de las alternativas viables para lograr tal objetivo, es la utilización de los variadores de frecuencia en la operación de los motores de C. A.

La velocidad variable es una necesidad que se generaliza en la industria y en el transporte. Es en efecto, la solución que permite el control de un proceso o de un sistema con el gasto mínimo de energía y de materia prima.

En este sentido, el control de los motores eléctricos con velocidad variable ha aportado a los procesos industriales enormes ventajas, aumentando sus posibilidades y prestaciones, facilitando su automatización, reduciendo su mantenimiento y consumo de energía y aumentando su nivel de disponibilidad.

Actualmente son posibles numerosas soluciones para los accionamientos con motores de C.A. a velocidad variable. Para pequeñas y medianas potencias, el motor de corriente alterna y particularmente el motor tipo jaula de ardilla, alimentado por un variador de frecuencia, responde a las necesidades.

V.2 Regulación de Velocidad

A primera vista, los términos de "control de velocidad" y "regulación de velocidad" parecen equivalentes; sin embargo, control de velocidad: es un ajuste que obtiene el operador por medio de un sistema externo al motor, mientras que la regulación de velocidad: se define como el cambio de velocidad de un motor debido a sus características intrínsecas cuando se modifica su temperatura de operación o la carga aplicada a la máquina.

La regulación puede expresarse como un porcentaje de la caída de velocidad entre la marcha sin carga y a plena carga, o como porcentaje de decrecimiento de la velocidad a plena carga con el motor frío y su temperatura normal de operación.

Debe recordarse que las características intrínsecas que ocasionan el cambio de velocidad del motor están relacionadas principalmente con la resistencia óhmica de los devanados, y con el efecto de la carga aplicada y de temperatura sobre el flujo magnético producido.

En los motores de inducción, el margen de velocidad desde el funcionamiento en vacío o sin carga hasta la nominal es relativamente pequeño. Por consiguiente, la máquina es un motor de velocidad sensiblemente constante. Sin embargo, a causa de la simplicidad del motor de inducción y de sus aplicaciones especiales, se han ideado varios procedimientos para conseguir que su velocidad sea ajustable.

Los principios en que se basa la regulación de velocidad están relacionados con los ajustes de las tensiones del estator y del rotor, el cambio de polos y la variación de frecuencia. Los métodos de regulación de velocidad son continuación de los métodos de arranque, pero se pueden enumerar adecuadamente como sigue:

- 1.-) Frecuencia de suministro o alimentación
- 2.-) Cambio de polos
- 3.-) Variación de tensión de alimentación
- 4.-) Inyección de tensión en el rotor
- 5.-) Resistencia en el rotor
- 6.-) Acoplamiento en cascada
- 7.-) Motores de colector
- 8.-) Sistemas de tiristores

Los primeros siete métodos se clasifican como convencionales. Los sistemas de tiristores, ofrecen otros métodos de regulación de velocidad, pero sus fundamentos o principios generales siguen siendo los convencionales.

V.3 Variadores de frecuencia.

Los variadores de frecuencia que utiliza la electrónica, emplean elementos semiconductores para convertir las frecuencias fijas estándar y fuentes de energía de voltaje determinado a salidas de frecuencias y tensiones variables para controlar motores estándar de corriente alterna a velocidades variables controladas.

En principio el control de velocidad para la variación de frecuencia ajustable se basa en la fórmula:

$$N_S = \frac{120f}{P}$$

siendo:

N_S = velocidad síncrona en revoluciones por minuto.

f = frecuencia en hertz o ciclos/segundo.

P = número de polos.

El número de polos se determina por diseño de fabricante. La fórmula indica que al variar la frecuencia la velocidad varía proporcionalmente.

El suministro de voltaje desde un variador de velocidad puede realizarse a frecuencias que van desde 0 Hz, hasta 120 Hz o más; por lo tanto, la velocidad del motor es variable en la misma proporción en que cambio la frecuencia; así, el motor puede girar lento o muy rápido, según la frecuencia suministrada por el variador de velocidad. Al mismo tiempo, el voltaje también es variable en la misma proporción que la frecuencia, para asegurar que la relación voltaje/frecuencia se mantenga con el mismo valor en todo el rango de velocidades, mientras no pase de 60 hz. Esto se hace porque el par que proporciona el motor está, por diseño, determinado por esta relación. Así, un motor de 460 volts tendrá una relación de voltaje/frecuencia de 7.6. Si manejamos este mismo motor a una frecuencia de 30 hz, tendremos que suministrarle un voltaje de 230 volts para mantener la misma relación y el mismo par. Cualquier cambio en esta relación puede afectar el par, la temperatura, la velocidad o el ruido que produce el mismo

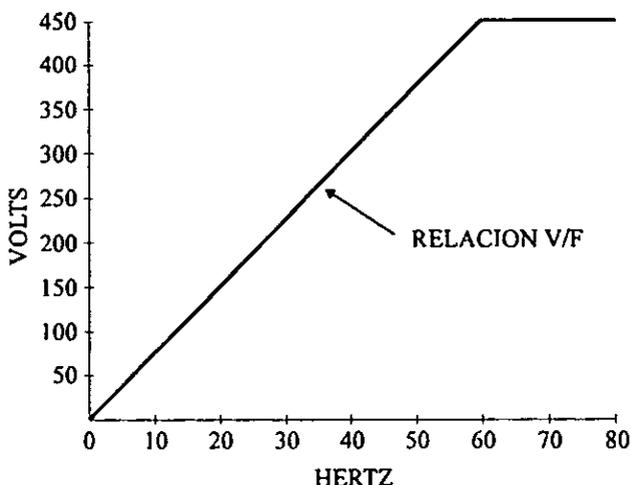


Figura V.1 RELACION VOLTAJE/FRECUENCIA

V.3.1 Teoría del variador de velocidad

El variador de velocidad es conocido con diferentes nombres: convertidor de frecuencia variable, inversores, etc., siendo su nombre correcto el de convertidor de frecuencia variable, pues incorpora el término de frecuencia que lo diferencia de los demás variadores de velocidad, que utilizan métodos mecánicos, de corriente directa, etc. Por otro lado, el término inversor sólo se refiere a uno de los pasos del variador de velocidad.

La manera como un variador de velocidad convierte el voltaje y frecuencia constante en voltaje y frecuencia variable, se basa en un proceso de 2 pasos principales. Primero, la corriente alterna es rectificadada y convertida a voltaje de corriente continua, después la invierte y vuelve a entregar corriente alterna pero con diferente frecuencia y voltaje.

Los sistemas de control de frecuencia ajustable tienen un inversor interpuesto entre la fuente de alimentación de la planta y el motor.

La parte rectificadora convierte el voltaje de C.A. en voltaje de C.D. por medio de un puente de diodos o rectificadores controlados de silicio (SCR's por sus siglas en inglés) que permiten el paso de corriente en un sólo sentido.

Una vez que se tiene la C.D. ésta se filtra y suaviza a través de capacitores para uniformarla lo más posible y poder entregar a la parte inversora un voltaje en C.D. lineal que facilita la generación de frecuencia variable.

El inversor convierte el voltaje de C.D. en C.A. por medio de rectificadores controlados de silicio también conocidos como tiristores o transistores de potencia, conectados directamente a la línea de C.D. y controlados por microprocesadores pero esta vez con una frecuencia y voltaje variable.

Un variador estático de frecuencia consiste de:

- 1.) Sección de rectificación (convierte de C.A. a C.C.)
- 2.) Sección inversora (convierte de C.D. a C.A.)
- 3.) Sección de oscilador (determina la frecuencia a la cual opera el rectificador controlado de silicio -SCR)
- 4.) Sección lógica (determina la secuencia a la que opera el SCR)
- 5.) Sección de regulador volts/ciclo (ajusta la salida de potencia manteniendo automática la misma relación de salida de voltaje a frecuencia para todas las velocidades)

Las ventajas al usar variadores de frecuencia se pueden lograr principalmente en sistemas de control de bombas, teniendo:

- Alta eficiencia con todas las velocidades de operación de la bomba, lo que da como resultado costos de operación reducidos debido a los ahorros de energía.
- Selección de un motor simplificado, ya que no requiere un devanado especial o un chasis de determinado tamaño.
- No requiere mantenimiento preventivo, ya que el inversor asegura el máximo tiempo en la línea y, por consecuencia una *alta confiabilidad*.

- El motor se protege por la limitación apropiada de corrientes de los dispositivos electrónicos.

La reducción en costos es parte fundamental de un plan de conservación de energía que se basa en la administración de la misma. Con la energía que se vuelve más escasa y costosa, el problema no va a desaparecer, a menos que la cooperación entre empleados y la administración proporcionen toda clase de medios para ahorrar energía y eliminar el desperdicio en su consumo.

V.4 Tipos de variadores de frecuencia.

Existen varios tipos de variadores de frecuencia, sin embargo, los que más se conocen por su aplicación amplia en el control de velocidad de motores de inducción, son los convertidores o inversores VVI (voltaje de entrada variable) y PWM (modulación de ancho de pulsos) son los más aplicablemente empleados como controles de lazo abierto en aplicaciones de ahorro de energía. Ya que el CSI (fuente de entrada de corriente) no es capaz de operar en lazo abierto con una máquina de inducción porque la fuerte dependencia de voltaje del inversor y la carga del motor (y la inestabilidad mecánica inherente) hace que los sistemas CSI deban ser empleados en algunas formas de lazo de control cerrado.

Las aplicaciones típicas de controladores de VVI y PWM en el ahorro de energía son: control de lazo abierto, excepto para un regulador de voltaje del bus de corriente directa en sistemas VVI un control de límite de corriente y en algunos casos circuitos compensatorios para mejoramiento dinámico.

Es importante enfatizar que esa comparación de los tres tipos de sistemas son propiedades ideales e inherentes de cada sistema, considerándola una ventaja del mismo, a pesar de que en otros sistemas pueda funcionar igualmente bien mediante una forma de control. En este sentido la necesidad de un lazo de control cerrado para el CSI es una desventaja comparado con los sistemas VVI y PWM.

V. 5 Aspectos a considerar en el ahorro de energía

La época en que se producían grandes volúmenes de energía, tomando el máximo disponible de la red, para luego disminuirlo a los requisitos del proceso, desperdiciando de esta manera parte de la energía; no sólo es un caso de despilfarro, sino que significa, reducir el potencial competitivo, puesto que, aquellas plantas que trabajan de esta manera aumentan el precio de los servicios o productos, multiplicándose por el mismo factor con el que están desperdiciando la energía.

Existe un tipo específico de dispositivo predestinado para reaccionar apropiadamente a los requisitos variables del proceso, esto es: el variador de frecuencia.

Sólo con este dispositivo es posible abatir el problema del excesivo dimensionamiento de la instalación que se da comúnmente por razones de seguridad. En caso de que el dimensionamiento ha sido efectuado correctamente, esto sólo afectará la inversión inicial y no los costos de operación subsiguientes.

Con relación a los variadores de frecuencia contribuirá de manera positiva, adaptando su propio consumo de energía, a los requerimientos del proceso.

Otro aspecto del ahorro de energía con variadores de frecuencia es el dimensionamiento de los transformadores y la distribución de potencia.

Por ejemplo: un motor de inducción tipo jaula de ardilla, durante el arranque consume de 5 a 7 veces la corriente nominal (según el motor), y esto durante todo el periodo de arranque, para reducir la caída de voltaje que resulta en el suministro de energía a un nivel tolerable, tanto las líneas como los transformadores, se dimensionan demasiado grande. Durante el arranque, el devanado del estator consume enorme cantidad de energía; esto no ocurre cuando se tienen variadores de frecuencia. Varios sistemas de accionamiento de este tipo sólo consumen la energía efectiva. Por tanto, los transformadores y los cables pueden dimensionarse para que cubran las cargas de operación efectivamente requeridas. Los motores alimentados así como las

transmisiones mecánicas están sujetas a un desgaste considerablemente menor, abatiéndose al mismo tiempo los costos de mantenimiento y de los paros imprevistos.

V.6 Aplicaciones industriales.

Para poder distinguir que procesos pueden ser optimizados desde el punto de vista del consumo de energía, primero se debe conocer la naturaleza de los mismos; es decir, se debe determinar el tipo y clase de carga que el proceso va a exigir del motor y éste del accionamiento.

Los tipos de carga se dividen en:

- Cargas de par constante
- Cargas de par variable
- Cargas de potencia constante

El comportamiento de dichas cargas se bosqueja a continuación:

Las tres clases de cargas son:

- 1.) Cargas constantes
- 2.) Cargas súbitas de impacto
- 3.) Cargas cíclicas

Una vez comprendido este concepto, se presenta a continuación las aplicaciones más comunes, con su descripción, tipo y clase.

Analizando las aplicaciones anteriores se puede concluir lo siguiente:

- Las cargas de **par constante** es la carga que demanda del motor un par constante en el rango de velocidad; ejemplos de este tipo de cargas son: elevadores, bandas transportadoras, maquinaria textil, impresoras, bombas de desplazamiento positivo y de émbolo, extrusoras, mezcladoras, compresores de émbolo, etc.; y representan el 80 % de los motores instalados.

En este tipo de carga, el motivo principal para la aplicación de los variadores de velocidad es la optimización del proceso y rara vez hay ahorros de energía, a menos que se cumplan estas dos condiciones: que la potencia demandada sea menor a la nominal y que se realice a velocidades menores.

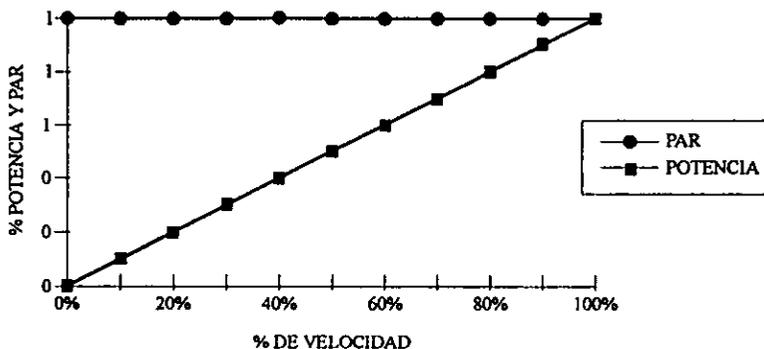


Figura V.2 PAR CONSTANTE

- Las cargas de **par variables**, es el tipo de carga donde las necesidades de par disminuyen conforme lo hace la velocidad del motor, y por consiguiente los de la carga también disminuyen. Este tipo de carga se encuentra comúnmente en aplicaciones de flujo variable como bombas y ventiladores. Ejemplos de ello son los ventiladores y bombas centrífugas, agitadores y compresores axiales; y el variador de velocidad ofrece grandes oportunidades de ahorro pues sus requerimientos de potencia disminuyen considerablemente conforme la velocidad es menor.

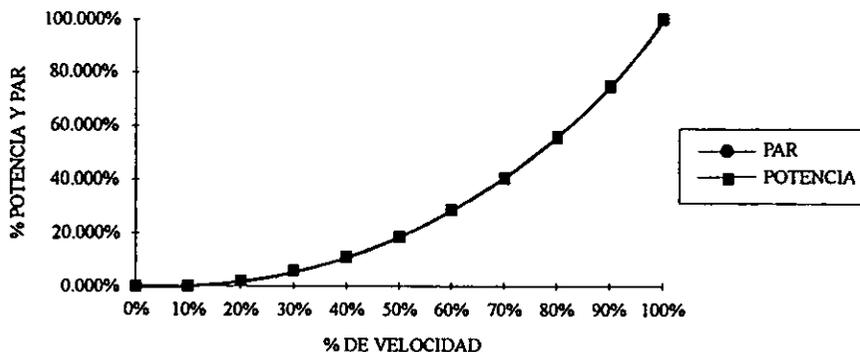


Figura V.3 PAR VARIABLE

- De las cargas de **potencia constante**, es el tipo de carga, donde no importa la velocidad a la que esté girando el motor, pues siempre estará demandando la potencia máxima, pues así lo exige la carga. Estas cargas se encuentran básicamente en máquinas herramientas, bobinadoras, dobladoras, troqueladoras, bombas centrífugas de alta inercia; en estas cargas difícilmente podremos obtener ahorros de energía, debido a que el proceso exige el máximo de la potencia.

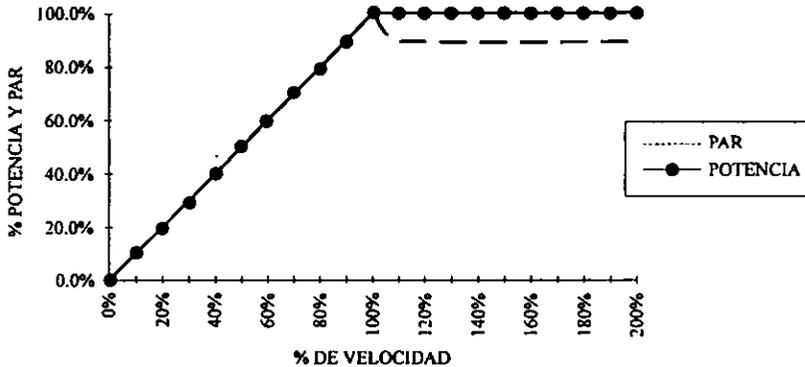


Figura V.4 POTENCIA CONSTANTE

Basándose en lo anterior se desprende que en los casos 1 y 2 hay posibilidades de ahorrar energía.

V.6.1 Ahorro de energía en aplicaciones de par variable.

Este tipo de aplicación es la más extendida; tan sólo en los Estados Unidos representa más del 70 % de las aplicaciones de los convertidores de frecuencia, la razón principal se debe a los ahorros considerables que de energía se obtienen.

Actualmente en nuestro país, este campo de aplicación, aún no ha sido explotado como se debería, las razones principales podrían ser: la desinformación y más comúnmente la idea de que utilizar variadores o convertidores de frecuencia, más que una inversión, se ve como un gasto; sin detenerse a pensar en los beneficios que se podrían obtener.

En la aplicación de este sistema, se han tenido las siguientes observaciones.

La comparación correcta de los costos totales es de vital importancia cuando se considera el tipo de inversión. El estudio a fondo debe considerar además, el costo de compra del material, los costos subsiguientes de operación con o sin estos dispositivos, para ello se recomienda solicitar un cálculo específico de la utilidad de la inversión.

Evitar que la energía se desperdicie, no sólo significa gastar menos dinero a causa del menor consumo de la misma, sino que igualmente quiere decir menos desgaste de los componentes mecánicos, lo que a su vez resulta menos gastos de mantenimiento.

Las aplicaciones por excelencia para los variadores de frecuencia son los ventiladores, las bombas y las bandas transportadoras largas.

El empleo de los variadores de frecuencia, ofrece la singular combinación de ahorrar energía reduciendo los costos de operación. La inversión requerida goza de tiempo de recuperación extraordinariamente corto.

Desde el punto de vista de protección del medio ambiente, este último punto gana importancia a diario, tan es así, que además de reducir el consumo de energía primaria en las centrales eléctricas se reduce el ruido durante la operación de los motores, comparados con los que no tienen este dispositivo.

V.6.2 Ahorro de energía en aplicaciones de par constante.

Como ya se mencionó anteriormente, existe la posibilidad de ahorrar energía durante el arranque y operación de los motores eléctricos. Esta posibilidad está abierta siempre y cuando no se trabaje en los límites de su máxima capacidad especificada.

A continuación se presenta un ejemplo ilustrado de una banda transportadora de material para la fabricación de cemento.

Las bandas siempre se diseñan para transportar la máxima capacidad.

Lo mismo vale para la potencia del motor de la banda y el diseño de la misma. Sin embargo, las experiencias obtenidas en varias fábricas de cemento muestran que en la mayoría de los casos las bandas:

- Generalmente no trabajan con la capacidad nominal, o sea que van medio cargadas.
- A veces hasta marchan sin carga, por que no las alimentan regularmente.

V.7 Estudio técnico - económico.

Para el estudio técnico - económico de los variadores o convertidores de frecuencia, se explicará el ejemplo de una bomba de pozo profundo de una planta industrial; la bomba es de tipo centrífuga impulsada por un motor tipo jaula de ardilla de 100 hp a 460 volts.

Anteriormente está bomba operaba a velocidad plena, para suministrar el agua requerida para los servicios de la planta durante las 24 horas del día de los 365 días del año.

Los parámetros de operación en la red del agua eran:

$$\text{Presión} = 100 \text{ Kg/cm}^2 ; \text{Flujo} = 60000 \text{ m}^3/\text{mes.}$$

Estos valores indicaban que el sistema hidráulico estaba sobredimensionado en capacidad y que representaba un gasto de agua innecesario que se tiraba en diversas formas y que por consecuencia se estaba desperdiciando también energía eléctrica.

Se realizaron los estudios de demanda reales y se llegó a la conclusión que unas adecuaciones en las tuberías podría reducir las pérdidas por fricción y con un sistema de velocidad variable se podría entregar en la red una presión máxima de 5 Kg/cm^2 y reducir el flujo consumido mensualmente a un valor mínimo estimado en $25\ 000 \text{ m}^3/\text{mes.}$

Se estableció que la presión de trabajo del sistema se fijará en 4 Kg/cm^2 , para lo cual se diseñó un sistema de control del hidráulico de lazo cerrado compuesto por:

1. Un controlador de presión.
2. Un variador de frecuencia.
3. Un transductor de presión a corriente
4. La bomba original del sistema y su motor impulsor.

Los datos de los componentes más importantes del sistema del bombeo son:

MOTOR

Marca	IEM
Voltaje	220/440 Volts
R.P.M.	1772
H.P.	100
Amps. a F.S.	260/130
Clave	KVA a R.B. E
Ciclo de Operación	24 Hrs
Aislamiento clase	B
Temperatura máxima en cobre	130 °C
Armazón	444T
Diseño NEMA	B
Conexión	Delta
Eficiencia	95 %
Modelo	030116905
No. serie	1811010

BOMBA

Tipo centrífuga vertical de etapas múltiples

Marca	JHONSON
Modelo	10 DC
Serie	JPM 3954

No. Pasos	11
Marca cabezal	COOK 39P
Capacidad	Q = 3m ³ /min.
Carga	H = 4.93 Kg/cm ²

VARIADOR DE FRECUENCIA

Marca	ALLEN/BRADLEY
Modelo	1336
Voltaje	460 VCA
No fases	3
Frecuencia de entrada	60 Hz
Frecuencia de salida	0 - 120 Hz
Tipo	PWM
Potencia	100 H.P.

TRANSDUCTOR DE PRESION

Marca	SOR; Rango de presión 0 - 7 Kg/cm ²
Modelo	EPS II
Voltaje de alimentación	127 VCA
Salida	4 - 20 miliamperes

CONTROLADOR DE PRESION

Controlador tipo	PID
Marca	TAYLOR SERIE 500
Salida	4 - 20 miliamperes
Alimentación	127 VCA

Consumo de potencia a velocidad constante

Para demostrar el ahorro de energía se procede a calcular los consumos de potencia a velocidad plena del motor de la bomba. La bomba operaba a velocidad plena las 24 horas del día,

los 365 del año, para suministrar agua a la planta, por lo tanto, la potencia consumida se obtiene, para un año de la siguiente manera:

$$KW = (H.P. \times 0.746) / \eta = (100 \times 0.746) / 0.95 = 78.52 \text{ Kw}$$

donde:

H.P. = Caballos de potencia

η = Eficiencia

El consumo de energía eléctrica por el motor durante un año es:

$$\text{Consumo anual} = 78.52 \text{ KW} \times 8760 \text{ hrs.} = 687\,835 \text{ Kwh/año}$$

Potencia consumida a velocidad variable

Para estimar la potencia consumida con el método de la velocidad variable, utilizando el variador de velocidad, se siguen los siguientes pasos:

1. Determinar el porcentaje de tiempo a los que el equipo de bombeo trabaja a diferentes velocidades.

% velocidad	% tiempo	horas/año
100	2	175.2
90	40	3504.0
80	30	2628.0
70	20	1752.0
60	8	700.8
		8760.0

2. Estimar el porcentaje de potencia demandado por el motor a esos porcentajes de velocidad, de la ley de afinidad.

Se calcula para cada % de velocidad y se tiene:

% velocidad	% de potencia
100	100.0
90	72.9
80	51.2
70	34.3
60	21.6

3. Ahora se puede calcular los KW demandados por el motor para % de velocidad (KW salida del controlador)

$$\text{KW} = \% \text{ de H.P.} \times 0.746$$

% velocidad	% HP	KW motor
100	100.0	74.60
90	72.9	54.38
80	51.2	38.19
70	34.3	25.58
60	21.6	16.11

4. De lo anterior se puede calcular los KW de entrada al controlador, para esto se consideran los factores de ajuste dados por los fabricantes en las tablas de par variable.

$$\text{KW de entrada al controlador} = (\text{KW motor} / \text{factor de ajuste})$$

% velocidad	factor de ajuste	KW motor	KW de Entrada
100	0.940	74.60	79.36
90	0.929	54.38	58.53
80	0.910	38.19	41.96
70	0.884	25.58	28.93
60	0.847	16.11	19.02

5. Ahora se puede calcular los KWh/año de consumo para cada punto de operación de la tabla 1 y 4.

$$\text{KWh/año} = (\text{KW entrada}) \times (\text{No. horas/año})$$

% velocidad	KW de entrada	No hrs/año	KWh/año
100	79.36	175.2	13 904
90	58.53	3504.0	205 089
80	41.96	2628.0	110 271
70	28.93	1752.0	50 685
60	19.02	700.8	13 329
TOTAL			<u>393 278</u>

6. Se calcula la diferencia en KWh/año del consumo de velocidad constante y velocidad variable. La diferencia es el ahorro en KWh/año.

$$\text{Ahorro en KWh/año} = (\text{KWh/año Vel. constante}) - (\text{KWh/año Vel. variable})$$

$$\text{Ahorro en KWh/año} = 687\,835 - 393\,278 = 294\,557 \text{ KWh/año.}$$

Ahorro económico.

El tiempo en que se llevó a cabo este caso no se tenían las modificaciones que se tienen actualmente, en las tarifas eléctricas y en la moneda nacional.

La tarifa que se utilizó para este caso fue la THM (tarifa horaria media) aplicada a la zona donde se encuentra el equipo, tenía un precio base de \$134.00 por KWh, el cual se considera para facilidad de cálculo.

$$\text{Costo de la diferencia} = 294\,557 \times 134.00 = \$39'470,6380.00$$

Tiempo de la recuperación

$$\text{Costo del variador de frecuencia} = \$53'088,000.00$$

$$\text{Costo de instrumento de presión} = \$3'792,000.00$$

$$\text{Costo de las instalaciones} = \underline{\$4'282,000.00}$$

$$\text{Total} \dots\dots\dots = \$61'162,000.00$$

$$\text{Tiempo de recuperación (TR)} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorro}} \dots\dots(V.6)$$

$$\text{T.R.} = \frac{61'162,000.00}{39'470,000.00} = 1.5 \text{ años}$$

>

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES Y BENEFICIOS

VI.1 Demanda de energía eléctrica.

El consumo de electricidad ésta en constante aumento, principalmente en el sector residencial, comercial y público, esto se debe al incremento de población que se tiene en el país, como sucedió en los últimos 25 años que se duplicó y que requiere de servicios, lo que hace que aumente la demanda de energía eléctrica, además de los otros sectores que también tienden a incrementarse, como se puede observar en el cuadro siguiente que se titula Demanda de Energía Eléctrica.

De acuerdo a los datos estadísticos de Comisión Federal de Electricidad hasta el 31 de diciembre de 1993, el consumo bruto de energía fue de 126 106 GWh y en los 4 sectores fué de 101 277 GWh; con una tasa de crecimiento de 4.30 %. Energía que demandaba 19.6 millones de usuarios localizados en 70 195 poblaciones. Las entidades federativas de mayor consumo son: Distrito Federal, el Estado de , Nuevo León y Jalisco, que es donde se encuentran los mayores núcleos de población y el 66% de la industria nacional registrada; sectores que demandan la mayor cantidad de energía eléctrica.

Las industrias que demandaron la mayor cantidad de electricidad en ese año fueron: La Siderurgia el 9.6%, la Minera 8.3%, la Química 7.9% y la Cementera con el 6.3%.

DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GWh (PETACALORIAS)				
SECTOR	1990	1991	1992	1993
Industrial	53 354 (45.929)	52 181 (44.875)	52 831 (45.435)	54 163 (46.580)
Residencial Comercial y Publico	31 258 (26.882)	35 284 (30.345)	38 194 (32.847)	40 251 (34.616)
Agropecuario	6 707 (5.768)	6 497 (5.588)	5 672 (4.877)	5 920 (5.091)
Transporte	804 (0.674)	806 (0.693)	873 (0.751)	943 (0.811)

VI.2 Capacidad instalada.

Como consecuencia del incremento de la demanda de energía eléctrica la capacidad instalada también está creciendo y el 31 de diciembre de 1993, se registro una tasa de crecimiento en la producción del 4.0%, con una capacidad efectiva instalada de energía eléctrica de 29 204 MW, la energía bruta producida fue de 126 566 GWh en 158 centrales eléctricas con un total de 551 unidades de generación con casi 50 000 Km. de líneas de transmisión en la red troncal (se incluyen las de C.F.E. y las de L. y F.C. y sus cables de 230 KV).

Es necesario aclarar que en la cantidad anterior en lo que se refiere a la energía bruta producida no se incluyen los productores externos o autoprodutores que aportan 572 GWh y la importaciones que son 909 GWh.

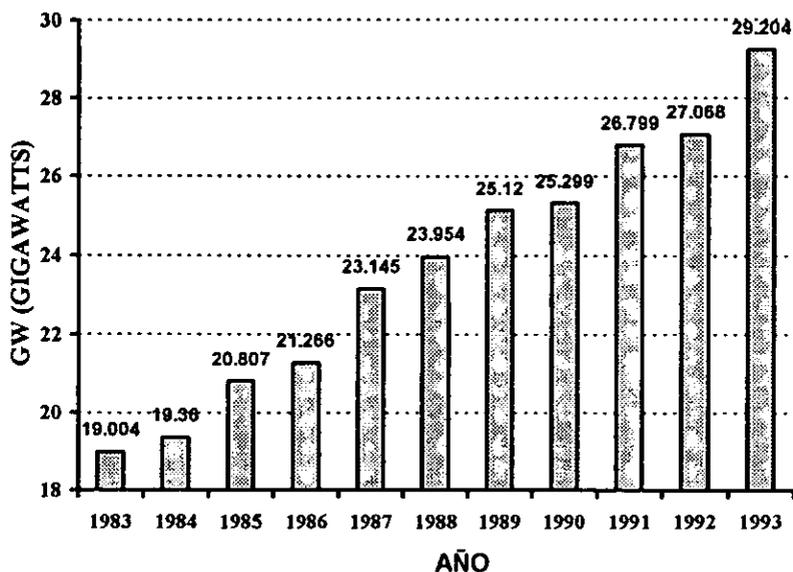
Por otro lado, el país exporta energía eléctrica a Estados Unidos y Belice que es un total de 2 015 GWh.

La capacidad instalada y el crecimiento, se muestran en el cuadro y la gráfica siguientes:

**CAPACIDAD INSTALADA DE ENERGÍA
ELÉCTRICA DE 1983 A 1993 EN MW.**

AÑO	POBLACIÓN (MILL. DE HABITANTES)	CAPACIDAD INSTALADA
1983	70.586	19 004
1984	71.934	19 360
1985	73.337	20 807
1986	74.797	21 266
1987	76.316	23 145
1988	77.896	23 954
1989	79.539	25 120
1990	81.250	25 299
1991	83.029	26 799
1992	84.881	27 068
1993	86.807	29 204

CRECIMIENTO DE LA CAPACIDAD INSTALADA DE ENERGIA ELECTRICA EN LOS ULTIMOS 10 AÑOS



GW (GIGAWATTS) = 1000 MW

VI.3 Efectos de la conversión de energía.

Durante el proceso de conversión de cualquier clase de energía a electricidad, hay una cantidad que no se utiliza y por esa razón se le denomina pérdida de energía. Por ejemplo, en el territorio nacional se tienen distintas centrales eléctricas que se le suministran 315.912 petacalorías y después de la conversión se obtienen 108.847 petacalorías, teniendo una pérdida de energía de 207.065 petacalorías, teniendo una pérdida de energía de 207.065 petacalorías. Esta energía que se pierde en el proceso de conversión, afecta el medio ambiente. La obtención de la electricidad que utilizamos tiene su origen principalmente de los hidrocarburos, de la energía hidráulica, del carbón, de la energía geotérmica y de la nuclear; todas ellas, de una forma u otra son contaminantes, pero la más crítica son las que utilizan los hidrocarburos, carbón y energía

nuclear. Estas centrales de energía son las que producen la mayor parte de la electricidad y son las que más contaminan.

La contaminación se inicia desde la extracción del petróleo, carbón y uranio, por excavación o perforación que afecta la calidad de los suelos y acrecienta los conflictos al cambiar el uso. Aunado a lo anterior, el tipo de equipos para la obtención de energía así como las condiciones del ambiente, asociado con la extracción, procesamiento, transporte y conversión de los combustibles, también aumentan los riesgos y daños a la salud y al ambiente. Así como son: la del aire, la del agua, la térmica, la del ruido y la del suelo.

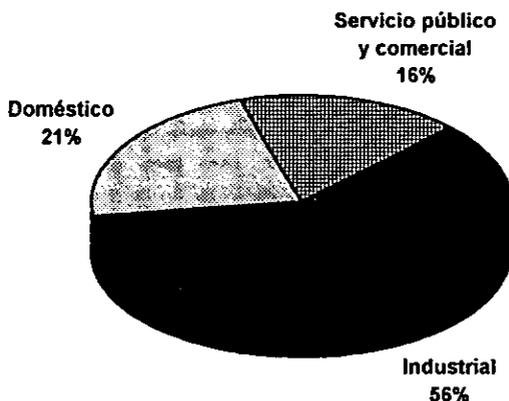
Los distintos efectos que produce la contaminación cualquiera que sea su origen traen como consecuencia fuertes pérdidas económicas, además de que destruye todos los aspectos de la armonía ambiental por la explotación tecnológica e irracional que se tiene en los equipos de conversión de energía debido a la baja eficiencia que resulta al transformar un tipo de energía a electricidad. De lo anterior se desprende que, por lo menos se debe cuidar el uso de los recursos no renovables que son los que más contaminan el ambiente y los que más se utilizan en el país.

VI.4 Conclusiones sobre la energía.

1. Para desarrollar cualquier actividad se requiere de la energía.
2. El aumento del consumo de energía se debe a dos factores: el incremento de la población y el mayor grado de desarrollo de la misma.
3. La economía mundial se basa principalmente en los hidrocarburos y nuestro país depende de un 90% de ellos; siendo éstos los mayores contaminasteis.
4. Las pérdidas de energía son en promedio de un 70 a 80% de toda la energía que se procesa.
5. De toda la energía primaria que se utiliza en el mundo, el 29% se destina a la producción de electricidad. En México se destina el 15%.
6. Los sectores que consumen la mayor parte de energía en el país son: energético, transporte e industrial. Mismos donde se encuentran las mayores pérdidas.

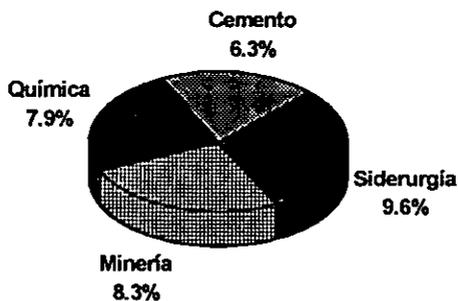
7. Las pérdidas de energía en la conversión, transmisión, subtransmisión y distribución eléctrica en , ascienden a 367 349 GWh.
8. La energía que con el tiempo se incrementa más su uso, es la eléctrica, por sus características de: confiabilidad, rendimiento, facilidad de transporte, regularse y dividirse al infinito, además de ser limpia.
9. Los sectores donde más electricidad se consumen se indican en la siguiente gráfica:

SECTORES QUE MAS CONSUMEN ELECTRICIDAD



10. Las industrias que consumen la mayor parte de le energía eléctrica se indican en la siguiente gráfica:

INDUSTRIA QUE CONSUMEN LA MAYOR PARTE DE LA ENERGIA



VI.5 Conclusiones sobre motores eléctricos.

1. La mayor parte del trabajo que se desarrolla en los sectores productivos, lo realizan los motores.
2. En las actividades económicas, las cargas que más electricidad consumen son los motores eléctricos.
3. Los motores eléctricos son preferidos por una serie de ventajas que tienen, entre las que destacan: es el medio más sencillo y económico para producir fuerza motriz, mayor amplitud en la gama de potencia, son más eficientes, suavidad en el funcionamiento y diversidad de característica.
4. Dentro de las cargas eléctricas, donde se tiene el mayor potencial u oportunidades para ahorrar energía, es en los motores.
5. Por el tipo de corriente que utilizan, existen motores de C.C. y de C.A., los más utilizados son los de C.A.
6. Dentro del universo de los motores eléctricos, los que más se usan son los de inducción tipo jaula de ardilla.
7. El ahorro de energía en los motores eléctricos se puede obtener, desde su diseño, manufactura, selección, operación y mantenimiento.
8. Otra técnica para el ahorro de energía en los motores eléctricos de C.A., es empleando variadores de frecuencia en aplicaciones de par variable y de par constante.

VI.6 Posibilidades de ahorro de energía.

- Reducir y evitar inútiles.
- Mejorar las condiciones generales de los procesos de generación de energía.
- Mejorar el grado de eficiencia en la generación de energía.
- Desarrollo de nuevas técnicas de proceso.
- Desarrollo de procesos de movimientos circulatorios (por ejemplo el proceso Carnot).

VI.7 Recomendaciones para el ahorro de energía en motores eléctricos.

- Adoptar motores de inercia reducida en aquellos accionamientos que realizan un número elevado de arranques.
- Adecuar los motores a la potencia necesaria, de tal forma que trabajen en puntos cercanos al máximo rendimiento o eficiencia.
- Instalar arrancadores o limitadores de corriente de arranque.
- Seleccionar adecuadamente el motor de acuerdo a su ciclo de trabajo.
- Emplear motores de dos velocidades para variar el caudal de una bomba o ventilador, cuando se dan solamente dos regiones de funcionamiento.
- Emplear motores de alta eficiencia.
- Sustituir motores monofásicos de C.A. por motores trifásicos.
- Sustituir motores asíncronos antiguos por motores modernos normalizados.
- Vigilar la operación de los motores trifásicos, procurando que el desequilibrio de tensión no sea mayor al 1% entre sus fases.
- Alimentar el motor impulsor de bombas o ventilador que deben suministrar caudales variables, mediante variadores de frecuencia.
- Evitar el arranque de motores simultáneamente.
- Sustituir, para potencia superior de 100 KW, los motores actuales por otros más adecuados, en los casos de accionamiento a velocidad variable.
- Evaluar técnica y económicamente la viabilidad de los rectificadores o inversores que funcionan en recuperación de energía con la red.
- Compensar la energía reactiva demandada por los motores de C.A. más importante o con mayor número de horas de funcionamiento.
- Reparar el embobinado del motor en talleres autorizados por los fabricantes, con el propósito de no variar sus características de operación que disminuyan su eficiencia.
- Inspeccionar periódicamente la instalación eléctrica del motor y su arrancador, con el propósito de revisar el apriete de sus conexiones a tierra, así como la alineación de la carga y la cimentación.
- Dar un mantenimiento adecuado, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

VI.8 Beneficios del ahorro de energía en motores eléctricos.

Al reducir las pérdidas de potencia en los motores eléctricos, éstos operan con mayor eficiencia, lográndose el ahorro de energía y obteniéndose los siguientes beneficios:

- **PARA EL MEDIO AMBIENTE.** Al reducir el consumo de energía y mejorar la tecnología de conversión y utilización, se van a reducir considerablemente los problemas ambientales en términos generales (lluvia ácida, reducción del incremento de temperatura, contaminación atmosférica, desforestación, desertificación, ruido, etc.) y entonces se va a disfrutar verdaderamente los beneficios que se obtienen de la ciencia y la tecnología, dejando a nuestros hijos un medio ambiente limpio, equilibrado y libre de problemas ecológicos.

- **PARA LA NACIÓN.** Se contribuye a mejorar la balanza de pagos, puesto que en cierta medida estamos importando energía; se alargaría la vida de los recursos energéticos no renovables como son: el petróleo, el gas natural, el carbón y el uranio; se mejoraría la utilización del parque nacional de generación, transformación, distribución y consumo de energía eléctrica; reduciendo los riesgos en la continuidad del servicio, se incrementaría la productividad de la economía.

- **PARA EL SECTOR ELÉCTRICO.** Se obtendría: flexibilidad para atender la demanda, una disminución en las inversiones y/o liberaría recursos hacia otras áreas prioritarias dentro o fuera del sector, reducción en los costos de producción y suministro, evita insuficiencia en el suministro de energía eléctrica.

- **PARA LOS CENTROS DE INVESTIGACIÓN.** Oportunidad de desarrollar nuevos proyectos de investigación sobre el campo de ahorro y uso eficiente de la energía; ampliar su infraestructura en sus talleres y laboratorios para la realización de pruebas de investigación; enriquecer su acervo de conocimientos en el campo citado; trabajar más estrechamente con el sector productivo, lográndose una verdadera vinculación entre ambos sectores; tener mayores ingresos como consecuencia de los trabajos realizados al sector de la producción.

- **PARA LA INDUSTRIA Y EL COMERCIO.** En lo que corresponde a este ramo se obtienen: más empleo al buscar la optimización en el equipo que utiliza la industria en lo que a consumo de electricidad se refiere, fabricación de equipos eléctricos más eficientes, mayor competitividad a nivel nacional e internacional, un incremento en las ventas del equipo eléctrico, una base de una cultura de eficiencia energética y posibilidad de un mayor desarrollo.

- **PARA LOS USUARIOS.** Reducción en el costo de operación de su equipo eléctrico, mayor durabilidad, operación silenciosa de algunos de sus equipos y mayor versatilidad de sus motores eléctricos. Los beneficios anteriores ofrecen al usuario productos más confiables y muestran una mayor retribución de la inversión.

- **PARA LOS PROFESIONISTAS.** Dado que la cultura del ahorro de energía en nuestro país es relativamente reciente, existen pocos profesionistas que se dedican a esta actividad y aquellos que se conocen tiene las ventajas siguientes: mayor oportunidad de empleo, posibilidad de formar su propio negocio, oportunidad de difundir la cultura de las nuevas técnicas que se aplican en el ahorro y uso racional de la energía en los motores eléctricos.

CONCLUSIONES

Los procesos productivos están basados en su mayoría en la fuerza motriz que proporcionan los motores, de aquí la importancia de su estudio técnico-económico. Como otras tecnologías, la de motores continua avanzando, principalmente en la mejora de sus diseños, en nuevos materiales, utilizando manufactura automatizada y aplicando controles para su operación.

Funcionalmente los motores han cambiado poco, ya que se siguen diseñando de acuerdo a requerimientos de velocidad, potencia, arranque, etc., para las diferentes condiciones de operación, parámetros que en su mayoría están normalizados. Sin embargo, desde el punto de vista energético, se busca continuamente la reducción del consumo o lo que es lo mismo el incremento de la eficiencia, parámetro que no está normalizado, ni es obligatorio.

Actualmente se fabrican motores de "eficiencia estándar" y de "alta eficiencia", las aplicaciones de unos u otros dependen básicamente de la carga a mover y del tiempo que permanecen en operación, ya que es donde se refleja el ahorro. Las innovaciones en los motores para ahorrar energía se han desarrollado en tres tendencias:

Innovaciones en el interior del motor: utilizando acero de mejores características magnéticas, disminuyendo las pérdidas en el núcleo e indeterminadas y el empleo de imanes permanentes insertados en el motor, eliminando las pérdidas por efecto Joule en el rotor, cambio de ventilador normal por unidireccional, disminuyendo las pérdidas por ventilación y una optimización del diseño y proceso de fabricación; la eficiencia aumenta entre 2 y 3%.

Innovaciones en el exterior del motor: optimización de la relación motor-carga, es decir, mejoras en la selección, en la operación y el mantenimiento, dando mayor información al usuario a través de los catálogos de comercialización con lo cual se reduce la demanda en un 16% por este concepto.

Mejoras en el uso: mayor calidad en el suministro eléctrico, manteniendo el nivel y la forma de la tensión para motores con carga constante, uso de controles de velocidad para motores con carga variable, esto representa un ahorro del 68.3% de la demanda por este concepto.

Es recomendable conocer que el costo de operación de un motor suele ser varias veces mayor que el costo inicial. Normalmente el periodo de recuperación para motores de alta eficiencia es de uno a dos años, después de lo cual el ahorro acumulado de energía sigue aumentando durante el tiempo de vida efectiva del motor.

En ocasiones es conveniente utilizar un procedimiento contable más completo para realizar un verdadero análisis económico que permita comparar varias opciones. Los ahorros anuales en el caso de un motor de inducción típico, variarían con el ciclo de trabajo y las tarifas eléctricas. El costo real de la energía no es solamente el cargo por cada KWh, sino debe incluirse los cargos por demanda máxima, cargos extras por combustibles, penalización por bajo factor de potencia y otros gravámenes incluidos en la facturación de la compañía de suministro.

Las variaciones y equilibrios de voltaje, así como las condiciones de carga, afectan la eficiencia y el comportamiento de todos los motores. Estos factores son la causa externa más significativa a la que se enfrenta el diseño del motor.

De los estudios realizados se puede afirmar que las variaciones en las causas externas afectarán negativamente en gran cantidad a los motores de eficiencia estándar que a los motores de alta eficiencia.

Otro método utilizable en esta investigación para el ahorro de energía y que se utiliza en conjunto con el motor de inducción es el variador de frecuencia.

La velocidad variable es una necesidad que se realiza en la industria y en el transporte. Es la solución que permite el control de un proceso o de un sistema con el gasto mínimo de energía y de materia prima.

El control de los motores eléctricos con velocidad variable ha aportado a los procesos industriales enormes ventajas, aumentando sus posibilidades y prestaciones, facilitando su

automatización, reduciendo su mantenimiento y consumo de energía y aumentando su nivel de disponibilidad.

Actualmente son posibles numerosas soluciones para los accionamientos con motores de C.A. a velocidad variable. Para pequeñas y medianas potencias, el motor de corriente alterna y particularmente el motor tipo jaula de ardilla, alimentado por un variador de frecuencia, respondió a las necesidades buscadas.

Con este dispositivo se logró abatir el problema del excesivo dimensionamiento de la instalación, que se da comúnmente por razones de seguridad. En caso de que el dimensionamiento haya sido efectuado correctamente, sólo afectará la inversión inicial y no los costos de operación.

Con relación a los variadores de frecuencia, contribuirá de manera positiva, adaptando su propio consumo de energía, a los requerimientos del proceso. Con los variadores de frecuencia, se reduce la dimensión de los transformados y la distribución de potencia, que conlleva a un ahorro de energía.

BIBLIOGRAFIA

- AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.
VARGAS Prudente, Pablo. ESIME, México 1994. Primera Edición
- BIBLIOTECA PRACTICA DE MOTORES ELÉCTRICOS
LAWRIE, R. J. Ed. Editorial Océano / Centrum.
- CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y TRANSFORMADORES
E. E. STAFF M. I. T. Ed. Reverté S. C. A.
- CONTROL DE MAQUINAS ELÉCTRICAS
KOSOW, Irving L. Ed. Reverté S.A.
- conversiones de ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA
GOURISHANKAR, Vembú Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A.
- conversiones ELECTROMECAÁNICAS
POLOUJADOFF, M. Ed. MARCOMBO S.A.
- CURSO DE AHORRO DE ENERGÍA EN MOTORES ELÉCTRICOS
VARGAS Prudente, Pablo. ATPAE, 1996.
- CURSO MODERNO DE MAQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS.
TOMO III. Máquinas de Corriente Alterna Asíncronas
CORTES Cherta, M. Ed. Editores Técnicos Asociados S.A.
- DISEÑO DE APARATOS ELÉCTRICOS.
KULMANN, John K. Ed. Cia. Editorial Continental S.A. de C.V.

- ESTUDIO PARA LA FORMULACIÓN DE NORMAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN MOTORES ELÉCTRICOS. VOLUMEN I y II.
Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) División de Sistemas Eléctricos.

- FOLLETOS INFORMATIVOS SOBRE EL AHORRO DE ENERGÍA
FIDE, México 1996.

- MANUAL DE EQUIPO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO. Conservación y Aplicaciones.
COYNE ELECTRICAL SCHOOL Ed. Unión Tipográfica Hispanoamericana S.A. de C.V.

- MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA
LIWISCHITZ-GARIK Michel. Ed. Cia. Editorial Continental S.A. de C.V.

- MAQUINAS ELÉCTRICAS Y TRANSFORMADORES
KOSOW, Irving L. Ed. Pretice Hall, Segunda Edición.

- MAQUINAS ELÉCTRICAS, Transformadores y Controles.
GRINGRICH, Harold W. Ed. Pretice Hall.

- MAQUINAS ELÉCTRICAS.
THALER, George J. Ed. LIMUSA

- MAQUINAS ELECTROMECAÑICAS Y ELECTROMAGNÉTICAS
MATCH Leander, W. Ed. Representaciones y Servicios de Ingenieria S.A.

- MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA
PUCHOL Vivas, J. M. Ed. LIMUSA

- MOTORES ELÉCTRICOS

FERRER, Ricardo.

Ed. JUAN BRUGER EDITOR.

- MOTORES ELÉCTRICOS INDUSTRIALES Y DISPOSITIVOS DE CONTROL

BARTHO, F. T.

Ed. URMO

- MOTORES ELÉCTRICOS, Variación de Velocidad.

ROLDAN Vilora, José.

Ed. Paraninfo S.A.