

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



“FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS ELECTROMECÁNICAS DE LOS MOTORES DE ALTA EFICIENCIA.”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

JORGE ALBERTO BERNAL ESPINOZA

ASESOR: ING. VICTOR HUGO LANDA OROZCO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



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

U. N. A. M.
 FACULTAD DE ESTUDIOS
 SUPERIORES-CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
 EXAMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
 P R E S E N T E

AT'N: Q. Ma. del Carmen Garcia Mijares
 Jefa del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 26 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

" Funcionamiento y Características Electromecánicas de los Motores
 Trifásicos Alta Eficiencia "

que presenta El pasante: Jorge Alberto Bernal Espinoza
 con número de cuenta: 09203293-0 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

A T E N T A M E N T E.
 "POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
 Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 06 de Septiembre de 2006

PRESIDENTE	<u>Ing. Benjamín Contreras Santacruz</u>	
VOCAL	<u>Ing. Ma. De Lourdes Maldonado López</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Victor Hugo Landa Orozco</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Oscar Cervantes Torres</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Albino Arteaga Escamilla</u>	

AGRADECIMIENTOS

PAPÁ

Le agradezco el apoyo durante todos mis estudios, ya que sin esos sacrificios no se llega hasta aquí, gracias por darme las mejores armas para enfrentarme a la vida. No defraudare tanto apoyo y espero que pronto vea los frutos de su dedicación. Hoy ha logrado que su hijo sea un profesionista del cual puede estar orgulloso.

MAMÁ

Su comprensión y dedicación siempre estuvieron conmigo, eso me dio fuerza para seguir adelante y no detenerme ante nada, gracias por creer que lo lograría. Hoy puede decir que sus sacrificios valieron la pena, hoy tiene a un ingeniero como hijo.

ABUELITA.

Su cariño y apoyo es incalculable durante toda mi vida, nunca olvidare tan grande apoyo.

GIL, REBE, CHAMIN Y GABI

Hermanos gracias por compartir esos momentos a lo largo de toda mi vida, por que siempre aprendí de cada uno de ustedes.

A MI FAMILIA

Simón, Paty, Leti, Sergio, Norma, por que durante mi preparación en algún momento aportaron su granito de arena, mil gracias

A MIS AMIGOS

Mario, Freddy, y Marvin por que ustedes lograron que mi estancia en la FESC fuera divertida, gracias por apoyarme con sus consejos, regaños. Si ya no los veo siempre los recordaré.

PENSAMIENTOS

Cuando tratamos de ser mejor de lo que somos, todo a nuestro alrededor también se vuelve mejor. El mundo esta en manos de aquellos que tienen el coraje de soñar y de correr el riesgo de vivir sus sueños.

Lo que con trabajo se adquiere, mas se ama.

Aristóteles.

INDICE

Objetivos.....	XIV
Prólogo.....	XV
Introducción.....	XVII
Capítulo I. Nociones generales sobre los motores trifásicos alta eficiencia	
1.1 Conocimientos históricos sobre los motores de alta eficiencia.....	2
1.2 Desarrollo histórico en México.....	6
1.3 Destinación y campo de aplicación de los motores alta eficiencia.....	8
Capítulo II. Estructura de los motores trifásicos alta eficiencia	
2.1 Elementos que constituyen un motor alta eficiencia.....	17
2.2 Principio de funcionamiento de un motor alta eficiencia.....	22
2.3 Características de funcionamiento de principal interés en los motores alta eficiencia (Voltaje, corriente, par, potencia y velocidad).....	23
2.4 Corrientes y flujos en las máquinas de inducción.....	30
2.5 El circuito equivalente de un motor de inducción.....	34
2.6 El circuito Equivalente Aproximado con voltaje ajustable.....	37
2.7 El circuito equivalente definitivo.....	38
Capítulo III. Procesos electromagnéticos en los circuitos eléctricos de un motor trifásico alta eficiencia	
3.1 Características comunes.....	41
3.2 Bobinas ortogonales.....	45
3.3 Múltiples pares de polos.....	47
3.4 Par eléctrico y fuerzas magnetomotrices.....	49
3.5 El campo magnético rotatorio.....	54
3.6 La maquina trifásica.....	55
3.7 Ecuaciones de las tensiones del devanado estator y rotor (Fem.).....	58
3.8 Ecuación de la F.m.m.....	59
3.9 Diagrama de las tensiones y corrientes.....	60
Capítulo IV. Determinación analítica y gráfica de las características electromagnéticas de las máquinas de inducción	
4.1 Regímenes de funcionamiento.....	61
4.2 Corrientes en los devanados del rotor y estator.....	62
4.3 Momento electromagnético.....	66
4.4 Potencia Activa y Reactiva.....	67
4.5 Diagrama de círculo.....	69

Capítulo V. Arranque de los motores trifásicos

5.1 Arranque a tensión reducida a través de un autotransformador.....	84
5.2 Arranque de un motor asíncrono con rotor en jaula en jaula ardilla por conmutación estrella-triángulo.....	85
5.3 Arranque directo de motores asíncrono con rotor en jaula de ardilla.....	87
5.4 Arranque con resistencias en el estator.....	89
5.5 Arranque mediante resistencias en el rotor.....	89
5.6 Arranque por bobina.....	90
5.7 Arranque Wauchope.....	91
5.8 Arranque de motores asíncronos con rotor en jaula por dispositivos electrónicos.....	91
5.9 Puesta en marcha con rotor en corto circuito.....	93
5.10 Prueba con rotor bloqueado.....	93
5.11 Motores de inducción con rotor bobinado.....	94
5.12 Motor de inducción con propiedades de arranque mejoradas.....	94

Capítulo VI. Diseño y Fabricación

6.1 Mejoras en los diseños.....	100
6.2 Selección de motores eficientes.....	101
6.3 Aplicación de nuevos materiales.....	103
6.4 Automatización en la manufactura.....	103
6.5 Clasificación y recomendaciones para reducir pérdidas en los motores eléctricos.....	123
6.5.1 Pérdidas en los conductores.....	123
6.5.2 Pérdidas en los conductores del estator.....	124
6.5.3 Pérdidas en los conductores del rotor.....	125
6.5.4 Pérdidas en el núcleo magnético.....	125
6.5.5 Pérdidas por histéresis.....	125
6.5.6 Pérdidas por corrientes de Eddy.....	126
6.5.7 Pérdidas por ventilación y fricción.....	126
6.5.8 Pérdidas adicionales en la carga.....	126
6.5.9 Distribución de las pérdidas.....	127
6.6 Mejoras en los diseños de la mayoría de los motores de alta eficiencia.....	129
6.7 Rodamientos para cada aplicación.....	130

Capítulo VII. Factores externos que determinan la eficiencia de un motor trifásico alta eficiencia

7.1 Factores que afectan el comportamiento de un motor eléctrico.....	137
7.2 Variación de tensión de voltaje desbalanceado.....	137
7.3 Efecto de la variación de la frecuencia.....	139
7.4 Efecto de la carga.....	140
7.5 Efecto del factor de potencia.....	142
7.6 Ciclo de trabajo y arranques frecuentes.....	142

7.7 Efecto de la altura al nivel del mar.....	143
Capítulo VIII. La tecnología de los motores en la actualidad	
8.1 Clasificación de la eficiencia y normas correspondientes.....	145
8.2 Situación de la eficiencia nacional frente a la internacional.....	152
8.3 Situación actual de los equipos nacionales.....	156
8.4 Clasificación de rendimientos de equipos líderes en el mercado.....	158
Capítulo IX. Ahorro en el ramo industrial Mexicano (Conclusiones)	
9.1 Antecedentes.....	165
9.2 Ventajas de los motores de alta eficiencia.....	171
9.3 Resultados del programa FIDE.....	176
9.4 Comparación en el consumo y ahorro de energía entre motor estándar y alta eficiencia.....	179
9.5 Limitaciones de los motores alta eficiencia.....	185
Bibliografía.....	187

OBJETIVOS:

Analizar y determinar todas las variables que intervienen en la construcción y funcionamiento de los motores alta eficiencia.

Analizar la necesidad de ahorrar energía debido a las aplicaciones que tiene desde el punto de vista económico y de la conservación del medio ambiente.

Observar que al adquirir un motor de alta eficiencia y al utilizarlo en forma adecuada se amortiza la inversión efectuada en poco tiempo.

PRÓLOGO

El accionamiento de máquinas y equipamiento mecánico para motores eléctricos es un tema de gran importancia económica, particularmente en la industria. Se estima que un 70 a un 80% de la energía consumida por el conjunto de todas las industrias se transforma en energía mecánica por medio de motores eléctricos. Esto significa que considerando un rendimiento medio del orden del 80% del universo de los motores en aplicaciones industriales, cerca del 15% de la energía eléctrica industrial se convierte en pérdidas en los motores eléctricos.

La utilización de los motores en el sector industrial representa el mercado de ventas más grande de equipos industriales. En México se venden anualmente alrededor de 200 mil unidades de motores de corriente alterna en capacidades que van desde 1 a 200 cp. Precisamente en los accionamientos con este modelo de motores se encuentran importantes oportunidades de ahorro de energía debido al avance en el diseño y construcción de motores alta eficiencia que en los últimos años se ha venido dando en todos los países. Respecto al control, monitoreo y manufactura, también se han logrado avances importantes para todo tipo de aplicaciones en el ramo industrial.

Desde que surgió la computadora, sus aplicaciones han sido múltiples y variadas en los problemas que se plantean en la ingeniería eléctrica y particularmente en el diseño de los motores de alta eficiencia, de tal forma que el monitoreo de parámetros eléctricos que alimentan un motor, así como los de funcionamiento y principalmente las variables en el diseño como son: número de polos tamaño del rotor, estator, número de vueltas en la bobina, etc. En la actualidad es práctica común resolver estos problemas por computadora, así también el control en tiempo real y la tendencia es aumentar mas estos sistemas, por lo cual es necesario preparar cada vez un mayor número de ingenieros, en estas disciplinas.

El propósito de esta tesis es aportar herramientas en la consulta sobre la aplicación de los motores trifásicos alta eficiencia, lo cual se menciona en el Capítulo I, así también su desarrollo histórico en México.

En el Capítulo II y III se menciona estructura, los procesos y los elementos que constituyen un motor alta eficiencia, además en el Capítulo IV se puede ver el análisis gráfico de las características

electromagnéticas de este, lo cual ayuda a los que ya conocen el tema de motor eléctrico a comprender mejor su funcionamiento y como mejorarlo.

El arranque en un motor eléctrico, como se verá en el Capítulo V es de gran importancia incluso para ahorrar energía, así como para no dañar la instalación eléctrica donde este se encuentre.

El poder identificar el problema al que el ingeniero se enfrenta en la selección y aplicación de un motor eléctrico es de gran ayuda, en el Capítulo VI se determinan los tipos de pérdidas en los motores eléctricos, las recomendaciones para reducirlos, las mejoras en los diseños hasta el momento. También en el Capítulo VII se mencionan algunos factores externos que alteran su funcionamiento como son la frecuencia, el ciclo de trabajo, el voltaje etc.

Todo lo anterior ha venido cambiando constantemente la NOM correspondiente a motores eléctricos para que todos los que en sus manos este la ejecución de algún proyecto en el cual existan motores eléctricos tomen en cuenta la seguridad, el ahorro de energía y medio ambiente. En el Capítulo VIII se puede ver la situación de NOM frente a las internacionales las cuales como se verá es cada vez más corta la diferencia.

Como Capítulo final y para ver mas claro los beneficios de implementar un motor alta eficiencia y sustituir lo que en un tiempo se llamó estándar se tienen ejemplos de ahorro de energía en el ramo industrial, ventajas y los resultados de implementar programas de incentivos económicos en la compra de estos.

INTRODUCCIÓN.

El constante incremento de los costos de la energía eléctrica y las restricciones establecidas sobre la conservación del medio ambiente hicieron que en los países industrializados como Estados Unidos y algunos países Europeos se dictaran políticas y se aprobaran legislaciones respecto al uso de la energía. Considerando que de la energía total generada en el mundo, aproximadamente el 60% la consumen los motores eléctricos y que el motor eléctrico más usado es el asíncrono de jaula de ardilla, surgió entre las medidas más prometedoras para el ahorro de la energía, establecer el incremento obligatorio de la eficiencia de estos motores. Esta idea fue reforzada cuando un estudio realizado en 1990 por el Departamento de Energía de los Estados Unidos mostró que para el año 2010, la industria podría ahorrar 240 mil millones de Kwh anualmente reemplazando motores y accionamiento de eficiencia estándar, por otro que fueran solo de 2 a 6% más eficientes.

En los países subdesarrollados, este tipo de política energética ha demorado en establecerse y las cifras que se encuentran en cuanto al uso de motores más eficientes son notablemente inferiores a las de los países industrializados. Una de las razones es que en las prácticas tradicionales de compra no se evalúa el costo real de la energía, entre otras cosas, porque no se comprende la relación entre la eficiencia y los costos totales durante la vida útil del equipo. Así, los compradores se concentran con frecuencia en el bajo costo inicial. No se comprende suficientemente que los motores y acondicionamientos con mayor eficiencia, aunque son más caros inicialmente, gracias a los costos de operación más bajos, compensan la diferencia en un plazo normalmente apropiado. Otra razón es la poca información que tienen los ingenieros y técnicos respecto a los motores de alta eficiencia. Este desconocimiento da inseguridad en el momento de la aplicación y en algunos casos puede ocasionar inconvenientes en la operación de los motores. Es importante entonces conocer cuales son las características electromecánicas de los motores de alta eficiencia, sus ventajas y las limitaciones que pueden presentar en su aplicación.

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

El ahorro de energía comienza desde la selección apropiada de los motores. Siempre hay uno adecuado a las necesidades que se tienen, tanto en lo que respecta a su tipo por condiciones ambientales de operación, por condiciones de arranque o regulación de velocidad, así como por su tamaño o potencia.

Los mayores ahorros de energía eléctrica se obtienen cuando el motor y su carga operan a su máxima eficiencia.

En la actualidad los ahorros más significativos de energía se llevan a cabo en las industrias que utilizan motores de alta eficiencia. Al utilizar motores de alta eficiencia sobre los de eficiencia estándar, existe una inversión mayor en la compra de los primeros, Sin embargo, los motores de alta eficiencia consumen menos energía, lo cual reditúa en un ahorro de energía y posteriormente la inversión inicial será recuperada a corto plazo.

CAPÍTULO I

NOCIONES GENERALES SOBRE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE ALTA EFICIENCIA

1.1 Conocimientos históricos sobre los motores Alta Eficiencia

Desarrollo en el mundo

Aunque no existe una definición unificada mundialmente sobre lo que es un motor de alta eficiencia, una revisión histórica de su desarrollo nos permite tener una noción mas clara de este concepto.

Hasta el año 1960 los diseñadores y fabricantes de motores de inducción siguieron la tendencia de diseñar los motores con el objetivo de conseguir una alta eficiencia, a pesar de que en ese entonces los materiales no tenían un gran desarrollo el diseño electromagnético centrado en la eficiencia consiguió que se fabricarían motores de eficiencias aceptables.

El bajo costo de la energía eléctrica en aquella época hacia que la eficiencia no fuera un parámetro que incidiera en los costos de operación. Por eso durante el periodo de 1960 hasta 1975 los fabricantes cambiaron su tendencia y se centraron a diseñar motores para conseguir un costo mínimo, sobre todo en el rango de 1 a 250 HP. Con este objetivo se disminuyo la cantidad de material activo, y los materiales fueron seleccionados para cumplir mínimos requerimientos de eficiencia. En este contexto en 1977 NEMA recomendó marcar la placa de los motores trifásicos con una Eficiencia Nominal NEMA. La Tabla 1.1 muestra los rangos de eficiencia para motores trifásicos de Diseño NEMA B, aquí se define un valor mínimo para la eficiencia de cada nivel de eficiencia.

HP	Rango de eficiencia nominal	Eficiencia Nominal Promedio
5	78-85	82
10	81-88	85
25	85-90	88
50	88-92	90
75	89.5-92.5	91
100	90-93	91.5
150	91-93.5	92.5
200	91.5-94	93
250	91.5-94.5	93.5

Tabla 1.1 Eficiencia nominal para motores trifásicos diseño NEMA B

La crisis energética que ocurrió en la década del 70 hizo que los costos de la energía eléctrica empezaran a incrementarse a un ritmo de aproximadamente 12% anual. En este contexto los costos de operación de un motor por consumo de energía hicieron que la eficiencia sea un parámetro importante en la selección del motor. En este contexto en el año 1974 algunos fabricantes empezaron a usar métodos para diseñar motores con una eficiencia mayor que la exigida por la Norma NEMA. Así se diseñó una línea de motores de alta eficiencia con pérdidas 25% menores que el motor promedio diseño NEMA B, esto se llamo la primera generación de motores de alta eficiencia.

Luego del desarrollo de esta primera generación de motores de alta eficiencia, muchos fabricantes entraron en la tendencia de diseñar motores con el objeto de obtener una alta eficiencia, usando un diseño, materiales y procesos de fabricación mejorados. Cada fabricante identifico a su motor con un nombre, entre ellos tenemos:

Fabricante	Nombre del Motor
General Electric	Energy Saver
Realince Electric Co.	XE Energy Efficient
Baldor Electric Co.	Super E
Magnetek/ Louis Allis	Spartan High Efficient
US Electrical Motors	Corro- Duty Premium
Siemens	Premium Efficiency
Toshiba	Premium Efficiency

Tabla 1.2 Primera generación de motores trifásicos alta Eficiencia

En 1992 en Estados Unidos se expidió el documento Energy Policy Act of 1992 (EPACT'92). En cuanto a los motores el EPACT cubre motores de inducción de jaula de ardilla de 1 a 200 HP, de 2,4 y 6 polos y de propósito general diseños NEMA A y B. Las eficiencias mínimas exigidas por el EPACT esta escritas en la Tabla 12-10 de la Norma NEMA MG1.1997. La Tabla 1.1.3 muestra las eficiencias para algunas potencias extraídas de la Tabla 12-10.

HP	6 polos	4 polos	2 polos
5	87.5	87.5	87.5
10	89.5	89.5	89.5
25	91.7	92.4	91
50	93	93	92.4
75	93.6	94.1	93
100	94.1	94.5	93.6
150	95	95	94.5
200	95	95	95

Tabla 1.3 Eficiencia nominal mínima de motores trifásicos de inducción de alta eficiencia TEFC de acuerdo al EPACT.

El esquema Europeo para diseñar motores de eficiencia energética de baja tensión de C.A. esta en vigor desde 1999. Este esquema, que se ha establecido gracias a una cooperación entre CEMEP y la Comisión Europea, ha resultado ser un elemento importante de los esfuerzos europeos por mejorar la eficiencia energética y así reducir las emisiones de CO₂. Los sistemas impulsados por energía eléctrica son los responsables de la mayor parte del consumo de energía. Por lo tanto incrementar la eficiencia de los motores (que son un aparte de los sistemas impulsados por energía eléctrica) supone un importante ahorro de energía para Europa. Ahora diseñadores y utilizadores finales pueden decidir por si mismos sobre la base de una información fácil de interpretar, que los motores standard usados habitualmente pueden ser reemplazados con ventaja por los motores de alta eficiencia.

El resultado previsto de este esquema será:

- Una reducción del consumo de energía en Europa;
- Una reducción del costo para las empresas Europeas;
- Una reducción de las emisiones europeas de CO₂.

El sistema de clasificación de la eficiencia de los motores del nuevo Esquema informa a los usuarios de los motores eléctricos, de una manera sencilla y visible, de la importancia de la eficiencia energética de los motores eléctricos, haciendo mas racional la elección a considerar cuando se especifican o seleccionan motores.

Se parte de que:

- La placa de características del motor.
- Información detallada proporcionada por los catálogos de los fabricantes.

Existen tres niveles de eficiencia que se clasifican como EFF3, EFF2 y EFF1:

Se definen dos grupos de eficiencia según la potencia del motor y el número de polos.

De acuerdo con lo indicado en la placa de características del motor.

La eficiencia, expresada como porcentaje a plena y a $\frac{3}{4}$ de carga se especificará, junto con el tipo de motor en los catálogos del fabricante.

Los motores incluidos en este esquema se consideran totalmente cerrados con ventilación forzada (normalmente IP 54 o IP 55). Motor de inducción de jaula de Ardilla trifásico C.A., en la gama que va desde 1.1 a 90 kW, de 2 ó 4 polos, aptos para 400V, a 50 Hz, clase de servicio SI, en diseño estándar.(El diseño estándar puede interpretarse como de diseño , de acuerdo a la norma EN 60034-12 y EN 50347.

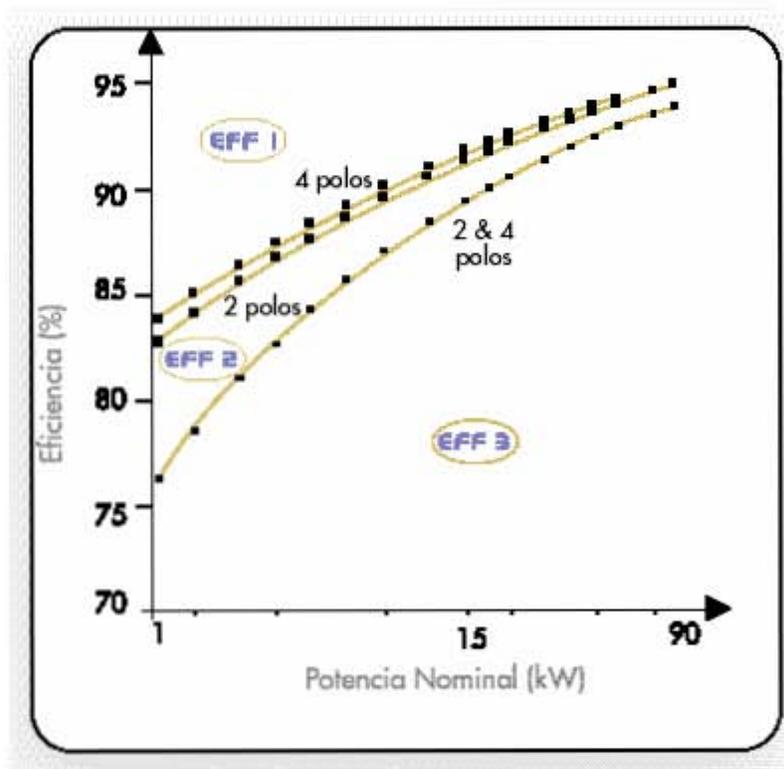


Figura 1.1 Niveles de eficiencia de motores eléctricos de 2 y 4 polos en Europa.

1.2 Desarrollo histórico en México

La participación del sector industrial en la demanda nacional de energía ha disminuido de 58% en 1965 a 51% en 1995. En 1995, la contribución de este sector en la demanda final de electricidad alcanzó el 55.8%. De acuerdo con un estudio realizado por el FIDE (FIDE, 1996), el 70% del consumo eléctrico en sector industrial se debió a motores, lo que representa el 39% del consumo final de energía eléctrica. El FIDE (1996) señala que, en 1994, 350 millones de motores fueron instalados en México: el 69% de ellos en el sector residencial, 14% en el industrial y 17% en los sectores comercial y de servicios. Al comparar el consumo eléctrico en el sector industrial por uso final y la distribución de los motores por sector y tarifa eléctrica, resulta claro que este estudio del FIDE no toma en cuenta el uso de motores en el sector agrícola. Además, la distribución de las tarifas no es coincidente. Por este motivo, ésta debió recalcularse. De acuerdo a este cálculo, los motores industriales representan el 10% del total de motores instalados.

Se asume que todos los motores de tres fases fueron instalados en el sector industrial, representando el 80% del total de motores de este sector. Los 28 millones de motores de tres fases instalados en la industria mexicana consumen cerca de 30,850 GWh/año (FIDE, 1996), lo que significa el 69.9% del consumo total de electricidad por motores, y el 27% del consumo nacional de electricidad.

Las ventas anuales de motores de tres fases en México es de aproximadamente 200,000, de éstos, el 3% (6,000) son de alta eficiencia. Únicamente cuatro empresas cubren alrededor del 85% del mercado nacional (ABB, Motores US, IEM (Industria Eléctrica Mexicana) y Siemens). El resto del mercado está formado por Baldor de México, Reliance and Engineering Company y General Electric. Magnatek, otro productor de motores de alta eficiencia, tiene una fábrica en México, pero toda su producción se exporta a Estados Unidos.

De acuerdo a lo anterior se crearon en México cuatro escenarios de penetración tecnológica suponiendo un crecimiento anual del 10% en las ventas de motores en el período de 1997 a 2010:

Escenario de máxima penetración: supone que el total de los motores vendidos durante este período serán de alta eficiencia. Bajo este supuesto, en el año 2010 casi el 20% de los motores instalados en 1994 serán de alta eficiencia.

- Escenario 1: Supone que las ventas de motores de alta eficiencia se incrementan a 29%. Este supuesto significa que para el año 2010, 3.8% de los motores instalados en 1994 serán de alta eficiencia.

- Escenario 2. Supone que la participación de los motores de alta eficiencia en las ventas totales aumenta a 16%. Siguiendo estas consideraciones, en el año 2010 el 2.2% de los motores instalados en 1994 serán de alta eficiencia.
- Escenario 3: Supone que la participación de los motores de alta eficiencia en el total de ventas será de 22%. Esto quiere decir que el 3% de los motores instalados en 1994 serán de alta eficiencia.

El potencial de ahorro de energía depende del tamaño del motor, así como de su aplicación específica, el tiempo de uso y carga. Debido a la falta de información sobre estas especificaciones, se asumió que los motores de 5 hp operan pocas horas al día, y bajo un porcentaje bajo de la carga total, y que los motores con potencia superior a los 5 hp deben ser de alta eficiencia. Siguiendo estas consideraciones, se contempla la sustitución de motores de entre 5 y 125 hp de potencia. Se calculó que los ahorros de energía para estos motores debidos a cambios de tecnología serían de un 10%.

El potencial de ahorro de energía para el año 2010 debido a la penetración de motores de alta eficiencia considera que:

- El mercado potencial para motores de alta eficiencia en el sector industrial es del 80%.
- Los 28 millones de motores de tres fases en el sector industrial consumen 30,850 Gwh, casi el 70% del total de energía consumida por motores en este sector.
- Los motores de alta eficiencia representan el 10% de los ahorros de energía a comparación de los convencionales.

La estrategia global del Programa de Incentivos fue dirigida a eliminar las barreras comerciales de oferta y de demanda, así como de conocimiento por parte de los usuarios de tecnologías de alta eficiencia, inducir a una mayor participación de los fabricantes y distribuidores de estos equipos, para lograr un mercado sostenible y obtener una mayor oferta de motores de alta eficiencia.

La Comisión Nacional para el Ahorro de energía (CONAE) hizo pública, a través del Diario Oficial de la Federación (DOF), la Norma Oficial Mexicana (NOM-016-ENER-2002) de eficiencia energética para motores trifásicos, los cuales, según estimaciones, consumen el 60% de la electricidad en la industria, además de ser utilizados en el bombeo de agua, elevadores, sistemas de ventilación y aire acondicionado, entre otros usos.

Con esta disposición, dada a conocer el 13 de enero del 2003 y cuya aplicación se hizo obligatoria a partir del 13 de marzo de ese año, los motores eléctricos que se comercializaron en México, de los cuales en el 2003 se vendieron en México 180 mil unidades, tendrán las mismas eficiencias mínimas que se exigen a estos equipos en Estados Unidos y Canadá, lo que ubica al mercado de estos equipos en nuestro país en igualdad de condiciones con los líderes del mundo en esta materia.

Se estima que el país ahorrará, durante el presente año, 194 GWh en el consumo de energía, equivalentes a unos 200 millones de pesos, así como 68 MW en capacidad de generación evitada, equiparables a la capacidad instalada de la Unidad 1, de la Central de Ciclo Combinado Gómez Palacio del Estado de Durango.

La norma (NOM-016-ENER-2002) elimina los niveles de eficiencia estándar, establecidos en el ordenamiento anterior, y deja, como únicos, los de eficiencia alta, más acordes con las necesidades de competitividad y eficiencia de la industria nacional. Además, se amplía el campo de aplicación para incluir motores de mayor capacidad (hasta 373 kW equivalentes a 500 HP), como también los motores verticales.

Cabe señalar que esta NOM es resultado de un proceso de consulta y consenso de la CONAE con los diversos actores involucrados, principalmente fabricantes, importadores y comercializadores, quienes solicitaron su revisión, conscientes de la necesidad de mantenerla actualizada de acuerdo con el desarrollo tecnológico del país y del mundo.

La expedición de la norma responde a la necesidad de incrementar el ahorro de energía, la preservación de nuestros recursos energéticos y el cuidado del ambiente; además, se evitará que los usuarios adquieran aparatos de menor calidad y de excesivo consumo de electricidad, que pudieran llegar al mercado nacional.

La Secretaria de energía por conducto de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía publicó el 19 de mayo del 2005 la nueva NOM-014-ENER-2004 y entro en vigor el 19 de julio del 2005, esta norma actualiza a la anterior mencionada.

1.3 Destinación y campo de aplicación de los motores alta eficiencia.

Definición: Motor de alta eficiencia

Un motor eficiente es aquel que transforma prácticamente toda la energía eléctrica que consume en energía mecánica útil en la flecha del motor.

En México la utilización de motores de alta eficiencia ha sido limitada por la falta de información, sobre los beneficios que brindan este tipo de tecnologías, su costo inicial y la falta de oferta de los equipos.

El desarrollo industrial y tecnológico de la vida moderna ha motivado una necesidad de energía mecánica para operar los diversos equipos no solamente industriales, sino también de servicios públicos y domésticos.

Exceptuando los diversos tipos de vehículos automotores que requieren gran maniobrabilidad y autonomía, se podría afirmar sin temor a equivocarse que en la casi totalidad de las necesidades restantes, la energía mecánica se obtiene a partir de los motores eléctricos.

Entre los motores eléctricos, los de mayor aplicación en la industria son los trifásicos de inducción, en especial los de jaula de ardilla, es por eso que la destinación y aplicación de los motores de alta eficiencia es sugerida en todas las áreas industriales.

En forma común solo se recuerda a los motores eléctricos cuando fallan o cuando se necesita adquirir uno nuevo para alguna instalación.

En este último caso, los distribuidores de equipos ofrecen diferentes niveles de precios iniciales, siendo este factor determinante para la selección y compra de estos equipos.

El resultado ha sido, motores de alta eficiencia y por lo tanto una reducción de los costos de operación por el ahorro del consumo de energía eléctrica y de la demanda máxima.

Asimismo, si se tienen operando motores eléctricos muy antiguos, con varias reparaciones, sobrecargados o sobredimensionados, es muy posible que estos equipos trabajen con una eficiencia muy por debajo de la óptima, por lo que se recomienda analizar la posibilidad de sustituirlos por motores de alta eficiencia que se ajusten a las necesidades de la empresa.

Las fallas en los motores eléctricos, muchas veces son por daños severos y es necesario su rebobinado o su sustitución, si bien es posible reparar un motor, se ha demostrado que su eficiencia se reduce de 1.5 % a 2.5 % cada vez que el motor sea rebobinado.

Los motores de alta eficiencia se deben utilizar en:

- En instalaciones nuevas.
- Cuando se realicen modificaciones mayores en procesos existentes.
- Para sustituir motores que han fallado
- En motores estándar que operan sobrecargados o con baja carga.
- En la adquisición de equipos nuevos como: compresores, sistemas de bombeo, etc.

- Cuando el motor opera a una carga constante y muy cerca del punto de operación nominal.
- Cuando se usan para reemplazar a motores sobredimensionados.
- Cuando se aplican conjuntamente con variadores electrónicos de frecuencia (Variable Frequency Drives) para accionar bombas y ventiladores, pueden lograr ahorros de hasta más del 50% de la energía.
- Como parte de un Programa de Uso eficiente de la Energía Eléctrica en instalaciones nuevas.

El hecho de que se tenga una eficiencia mayor significa que se disminuye los costos de operación del motor y se puede recuperar la inversión adicional en un tiempo razonable, sobre todo si se opera a una carga cercana a la potencia nominal. Tomando en cuenta que en un año el costo de la energía es aproximadamente seis veces el costo de compra del motor.

Los motores de alta eficiencia poseen generalmente un menor deslizamiento (mayor velocidad de operación) que los motores de eficiencia estándar, debido a los cambios que se producen en los parámetros del motor. La mayor velocidad puede ser ventajosa en muchos casos, pues mejora la ventilación.

Los motores de alta eficiencia son normalmente más robustos y mejor construidos que los motores estándar, lo que traduce en menores gastos en mantenimiento y mayor tiempo de vida.

Motores eléctricos su clasificación tipo jaula de ardilla según NEMA:

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

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

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

Cuando se desarrolló por primera vez el rotor de doble jaula de ardilla se creó tal variedad y adaptabilidad en el diseño de rotores para motores de inducción que ha llevado a diversas características de curva deslizamiento - par. Al dar la proporción correcta al devanado de doble jaula de ardilla, los fabricantes han desarrollado numerosas variaciones del diseño del rotor de vaciado o normal único. Estas variaciones tienen por consecuencia pares de arranque mayores o menores que el diseño normal y también menores corrientes de arranque.

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

Clase NEMA	Par de arranque (# de veces el nominal)	Corriente de Arranque	Regulación de Velocidad (%)	Nombre de clase Del motor
A	1.5-1.75	5-7	2-4	Normal
B	1.4-1.6	4.5-5	3.5	De propósito general
C	2-2.5	3.5-5	4-5	De doble jaula alto par
D	2.5-3.0	3-8	5-8 , 8-13	De alto par alta resistencia
F	1.25	2-4	mayor de 5	De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque.

Tabla 1.2.1 Características de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación en letras NEMA.

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

Motores de inducción de jaula de ardilla clase A

El motor clase A es un motor de jaula de ardilla normal o estándar fabricado para uso a velocidad constante. Tiene grandes áreas de ranuras para una muy buena disipación de calor, y barras con ranuras onduladas en el motor. Durante el periodo de arranque, la densidad de corriente es alta cerca de la superficie del rotor; durante el periodo de la marcha, la densidad se distribuye con uniformidad. Esta diferencia origina algo de alta resistencia y baja reactancia de arranque, con lo cual se tiene un par de arranque entre 1.5 y 1.75 veces el nominal (a plena carga). El par de arranque es relativamente alto y la baja resistencia del rotor produce una aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal. Tiene la

mejor regulación de velocidad pero su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal normal, por lo cual no se recomienda arrancarlo en línea.

Motores de inducción de jaula de ardilla clase B

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

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

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

Motores de inducción de jaula de ardilla clase C

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

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

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

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

Motores de inducción de jaula de ardilla clase D

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

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

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

Motores de inducción de jaula de ardilla de clase F

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

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

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

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

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

También se hizo notar que la hermeticidad de la máquina afecta a su capacidad. Una máquina con una armazón totalmente abierta con un ventilador interno en su eje, permite un fácil paso de aire succionado y arrojado. Esta caja origina una temperatura final de trabajo en los devanados, menor en comparación que la de una máquina totalmente cerrada que evita el intercambio de aire con el exterior. Esto da como resultado que existe una clasificación de los motores por el tipo de carcasa.

Tipos de envoltentes o carcazas.

La NEMA reconoce los siguientes:

Carcasa a prueba de agua. Envoltente totalmente cerrada para impedir que entre agua aplicada en forma de un chorro o manguera, al recipiente de aceite y con medios de drenar agua al interior. El medio para esto último puede ser una válvula de retención o un agujero machuelado en la parte más inferior del armazón, para conectar un tipo de drenado.

Carcasa a prueba de ignición de polvos. Envoltente totalmente cerrada diseñada y fabricada para evitar que entren cantidades de polvo que puedan encender o afectar desempeño o capacidad.

Carcasa a prueba de explosión. Envoltente totalmente cerrada diseñada y construida para resistir una explosión de un determinado gas o vapor que pueda estar dentro de un motor, y también para evitar la ignición de determinado gas o vapor que lo rodee, debido a chispas o llamaradas en su interior.

Carcasa totalmente cerrada. Envoltente que evita el intercambio de aire entre el interior y el exterior de ella pero que no es lo suficientemente cerrada para poderla considerar hermética al aire.

Carcasa protegida al temporal. Envoltente abierta cuyos conductos de ventilación están diseñados para reducir al mínimo la entrada de lluvia o nieve y partículas suspendidas en el aire, y el acceso de estas en las partes eléctricas.

Carcasa protegida. Envoltente abierta en la cual todas las aberturas conducen directamente a partes vivas o giratorias, exceptuando los ejes lisos del motor, tienen tamaño limitado mediante el diseño de partes estructurales o parrillas coladeras o metal desplegado etc. Para evitar el contacto accidental con las parte vivas.

Carcaza a prueba de salpicaduras. Envolvente abierta en la que las aberturas de ventilación están fabricadas de tal modo que si caen partículas de sólidos o gotas de líquidos a cualquier ángulo no mayor de 100° con la vertical no puedan entrar en forma directa o por choque de flujo por una superficie horizontal o inclinada hacia adentro.

Carcaza a prueba de goteo. Envolvente abierta en que las aberturas de ventilación se construye de tal modo que si caen partículas sólidas o gotas de líquido a cualquier ángulo no mayor de 15° con la vertical no pueda entrar ya sea en forma directa o por choque y flujo por una superficie horizontal o inclinada hacia adentro.

Carcaza abierta. Envolvente que tiene agujeros de ventilación que permiten el flujo de aire externo de enfriamiento sobre y alrededor de los devanados de la máquina.

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

Selección de velocidades nominales de motores de inducción de jaula de ardilla o de rotor devanado.

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

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

Por estas razones se suele dotar de cajas de engranes o embrague a los motores de inducción de jaula de ardilla para permitir velocidades de eje de cerca sobre 3600 r.p.m. y por debajo de 200 r.p.m. En

muchos usos o aplicaciones comerciales particularmente en capacidades de menor potencia, la caja de engranes o de embrague va incorporada en la caja del motor, formando unidad integral con este.

CAPÍTULO II

ESTRUCTURA DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE ALTA EFICIENCIA

2.1 Elementos que constituyen un motor de alta eficiencia

El rotor más sencillo y de mayor aplicación en los motores de inducción, es el que se denomina de “jaula de ardilla “.El rotor jaula de ardilla está formado por un núcleo de hierro laminado con ranuraciones longitudinales alrededor de su periferia y barras sólidas de cobre o aluminio alojadas firmemente en las ranuras del núcleo del rotor.

En ambos extremos del rotor se encuentran unos anillos de corto circuito que van soldados o sujetos a las barras formando una estructura sólida. Puesto que las barras en corto circuito tienen una resistencia mucho menor que la del núcleo de hierro no es necesario que se les aisle en forma especial del núcleo. En algunos rotores, las barras y los anillos de los extremos se funden en una estructura integral alojada en el núcleo.

Los elementos de corto circuito, en realidad son vueltas en corto circuito que llevan elevadas corrientes inducidas en ellas por el flujo del campo del estator.

En comparación con el complicado devanado del rotor devanado, o con la armadura de un motor de C.D. el rotor jaula de ardilla es relativamente simple; es fácil de fabricar y generalmente trabaja sin ocasionar problemas de servicio.

En un motor de inducción jaula de ardilla, la periferia del rotor está separada del estator por medio de un pequeño espacio llamado entrehierro. La magnitud de este espacio es tan pequeña como lo permitan los requerimientos mecánicos, asegurando así que al efectuarse la inducción electromagnética ésta sea lo más fuerte posible. A continuación se mostrará en la figura 2.1 un motor trifásico cerrado de alta eficiencia en esta figura se observa el armado de este, además del acoplo entre el estator y el rotor.

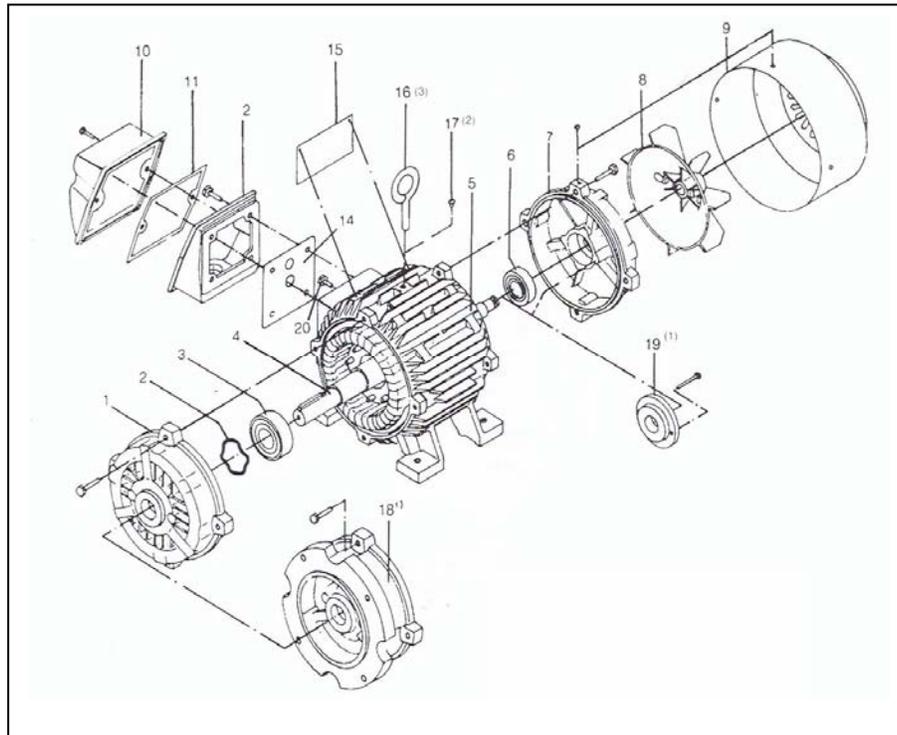


Figura 2.1.1 lista de partes de un motor trifásico alta eficiencia.

Lista de partes para motores trifásicos cerrados de alta eficiencia.

- ❑ Escudo soporte de rodamiento, lado accionamiento (“A”).
- ❑ Arandela de presión.
- ❑ Rodamiento de bolas lado (“A”).
- ❑ Eje con paquete rotor y cuña espiga.
- ❑ Carcasa con paquete estator bobinado.
- ❑ Rodamiento de bolas lado (“B”).
- ❑ Escudo soporte de rodamiento, lado ventilador (“B”).
- ❑ Ventilador plástico.
- ❑ Capuchón de lámina.
- ❑ Tapa caja de conexiones.
- ❑ Empaque tapa –base caja de conexiones.
- ❑ Base caja de conexiones.
- ❑ Empaque base caja de conexión -carcasa.
- ❑ Placa de características.
- ❑ Cáncamo.
- ❑ Tapón de para rosca cáncamo.

- ❑ Escudo soporte de rodamiento, con brida “C” o “D”.
- ❑ Tapa balero interior lado ventilador (“B”).
- ❑ Tornillo de tierra.

Motor trifásico alta eficiencia

Un motor consta básicamente de dos partes:

Un estator: es la parte fija del motor solidaria a la carcasa. Consiste en una estructura hueca formada por láminas de hierro donde se alojan las bobinas que inducirán un campo magnético dentro del motor. Ver figura 2.1.2

Un rotor: es la parte móvil (giratoria) del motor. Consiste en un cilindro también formado por láminas de hierro, el cual gira en forma concéntrica dentro del estator. En el rotor se alojan las bobinas donde se generarán las fuerzas que lo moverán. Ver figura 2.1.3

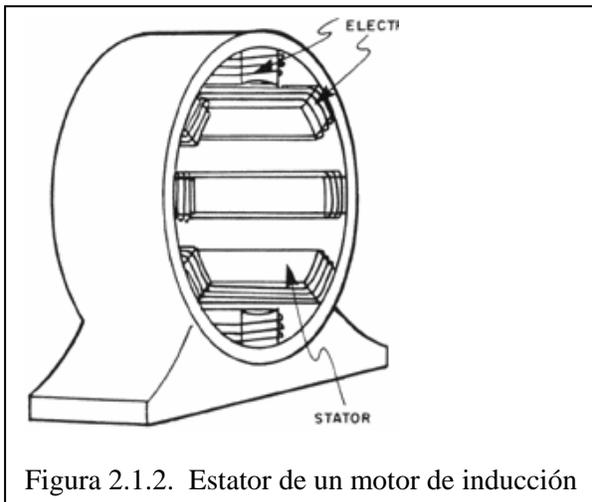


Figura 2.1.2. Estator de un motor de inducción



Figura 2.1.3. Rotor de un motor de inducción.

Existen dos tipos de motores de inducción trifásicos:

- ✓ De jaula de ardilla
- ✓ De rotor bobinado

Para entender el funcionamiento de estos motores analizaremos el motor de jaula de ardilla. El motor de jaula de ardilla debe su nombre a la forma que tiene el rotor:

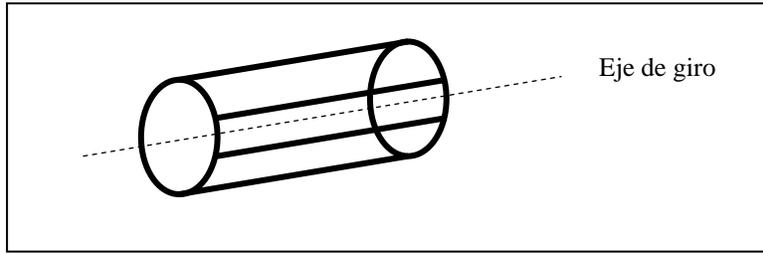


Figura 2.1.4. Rotor de un motor de jaula de ardilla.

Está formado por dos aros de cobre los cuales se encuentran unidos (cortocircuitados) por varias barras de cobre.

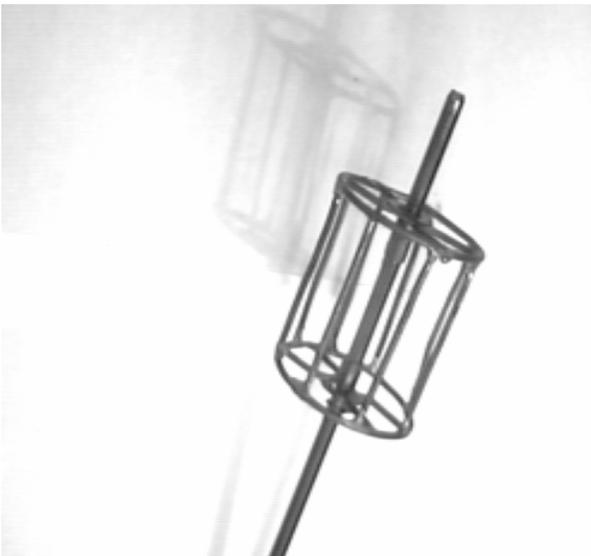


Figura 2.1.5. Rotor de un motor de jaula de ardilla.



Figura 2.1.6. Estator de un motor de jaula de ardilla.

El estator está formado por tres bobinas, las cuales pueden estar conectadas en estrella o en triángulo. La forma en que se distribuyen dichas bobinas en el núcleo del estator determina la forma del campo magnético dentro del motor. La distribución de los bobinados se hace de tal forma que el campo magnético dentro del motor tenga una dependencia sinusoidal con la posición. La expresión de dicho campo magnético es de la forma:

$$B = B_o \cos(\omega_s t + \theta) \dots\dots\dots (2.1.1)$$

donde:

ω_s ; se denomina velocidad sincrónica del motor.

θ ; es una coordenada angular en el estator

Esto significa que si se observa en un instante dado t_0 el campo magnético inducido dentro del motor (por las corrientes que circulan por las bobinas del estator) se observa que éste se distribuye sinusoidalmente en todo el rango de θ (2π). Por otra parte, si se ahora se hace variar el tiempo, vemos que esta forma de onda sinusoidal se desplaza en el tiempo. Se tendrá entonces lo que se denomina un **campo magnético giratorio** dentro del motor que se desplaza a velocidad angular ω_s .

El campo magnético generado por las bobinas del estator atraviesa la jaula de ardilla. Como el campo varía (ya que es giratorio) genera una variación de flujo dentro de cada circuito de la jaula. La variación de flujo induce en cada circuito una tensión (Ley de Faraday). A su vez ésta produce circulación de corriente por las barras de la jaula. Se tiene entonces conductores por los que circula corriente sometidos a un campo magnético. Entonces se generan fuerzas en las barras de la jaula que son las que producen el par que la mueven.

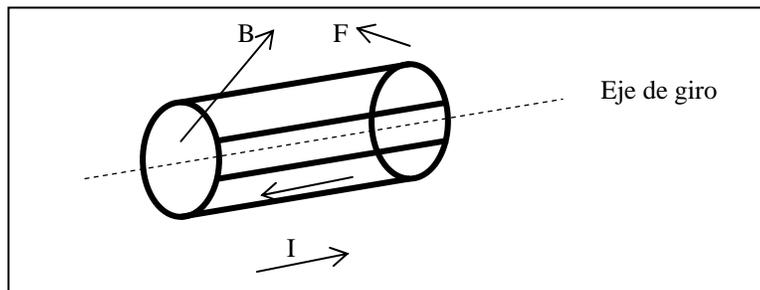


Figura 2.1.7. Corrientes y fuerzas inducidas en la jaula.

El rotor intenta seguir en su movimiento al campo magnético B girando a velocidad ω . La velocidad de giro ω solo es igual a ω_s cuando el motor está en vacío, es decir, sin carga en el eje (no realiza par). A medida que cargamos el motor, o sea, a medida que se le exige más par en el eje, el motor disminuirá su velocidad girando entonces a una velocidad angular $\omega \neq \omega_s$.

El devanado trifásico.

Características del devanado trifásico:

- ❑ Las tres fases tienen igual número de vueltas.
- ❑ Ejes magnéticos desplazados 120° eléctricos.
- ❑ Corrientes desfasadas en 120° .

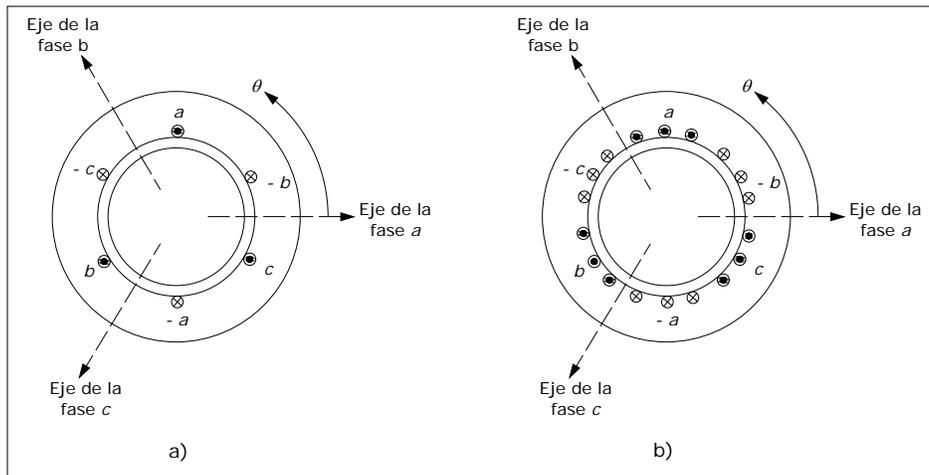


Figura 2.1.8. Devanado de estator trifásico con dos polos con; a) 1 bobina por fase; b) 3 Bobina por fase.

Construcción de un devanado trifásico.

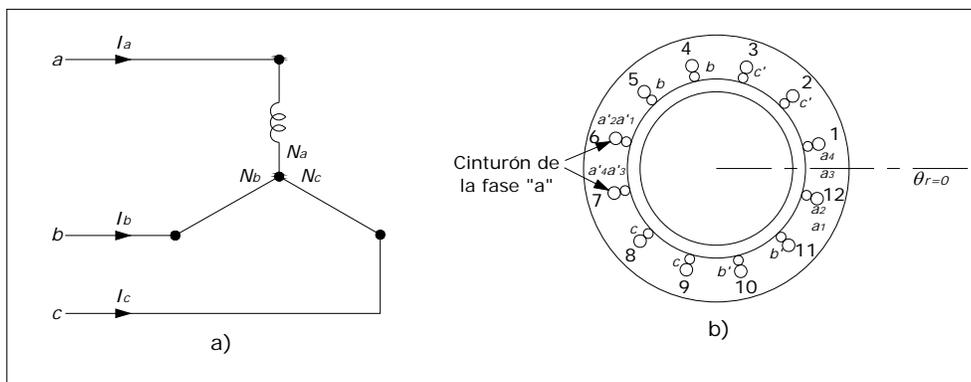


Figura 2.1.9. Devanado trifásico de dos polos doble capa; a) conexión externa; b) ranura de estator.

2.2 Principio de funcionamiento de un motor alta eficiencia

Cuando se aplica potencia al estator de un motor de inducción, se establece un campo magnético. Cuando este campo comienza a girar, sus líneas de flujo cortan las barras de corto circuito que están alrededor de la superficie del rotor jaula de ardilla y generan voltajes en ellas por inducción electromagnética. Puesto que estas barras están en corto circuito con una resistencia muy baja, los voltajes inducidos en ellas producen elevadas corrientes que circulan por dichas barras del colector. Las corrientes circulantes del rotor producen a su vez sus propios campos magnéticos

intensos. Estos campos producen sus propios polos magnéticos que son atraídos por el campo giratorio del estator, por lo tanto, el rotor gira con el campo principal.

El par de arranque del motor de inducción jaula de ardilla es bajo debido a que en reposo el rotor tiene una reactancia inductiva (X_L) relativamente grande con respecto a su resistencia aproximadamente de 90° en relación al voltaje del rotor, por lo tanto, se puede decir que el factor de potencia del circuito es bajo.

Lo expresado anteriormente significa que el motor es ineficiente como carga y que no puede tomar de la fuente de alimentación una potencia realmente útil para su operación, pero a pesar de esta ineficiencia, se desarrolla un par y el rotor comienza a girar.

Conforme comienza a girar, la diferencia en la velocidad entre el rotor y el campo rotatorio (deslizamiento), va de un máximo del 100% a un valor intermedio aproximadamente del 50%. Conforme el deslizamiento se va reduciendo, la frecuencia de los voltajes inducidos en el rotor va en disminución, ya que el campo giratorio corta los conductores a una velocidad menor y esto a su vez hace que se reduzca la reactancia inductiva general del circuito, y por lo tanto, el factor de potencia comienza a aumentar. Este mejoramiento se refleja en forma de un incremento en el par y un aumento subsecuente en la velocidad.

Cuando el deslizamiento baja a un valor comprendido entre 2 y el 10%, la velocidad del motor se estabiliza. Esta estabilización ocurre debido a que el par del motor disminuye por disminuir los voltajes y corrientes inducidas en el rotor, ya que por el pequeño deslizamiento, las barras del rotor cortan poco flujo del campo giratorio del estator.

2.3 Características de funcionamiento de principal interés en los motores alta eficiencia (Voltaje, corriente, par, potencia y velocidad.)

Si se le aplica al estator un sistema trifásico de voltajes, por sus devanados circula un sistema trifásico de corrientes, estas corrientes producen un campo magnético B_s , que gira en sentido contrahorario. La velocidad de rotación de este campo magnético esta dado por:

$$n_{\text{sin c}} = \frac{120 \cdot f_e}{P} \dots\dots\dots (2.3.1)$$

donde f_e es la frecuencia del sistema de alimentación en Hz y P es el número de polos de la máquina. Este campo magnético alcanza las barras del rotor e induce voltajes en ellas.

En la figura 2.3.1 se muestra el sistema de corrientes trifásicas a partir de una conexión en estrella en el estator.

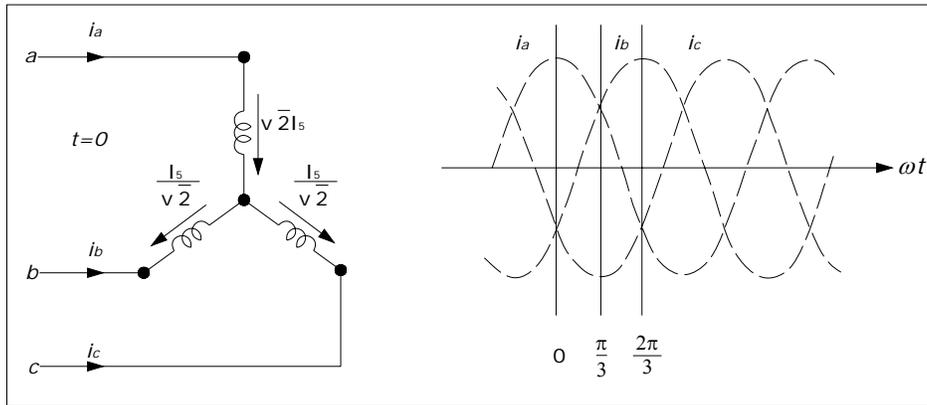


Figura 2.3.1 devanado trifásico y corrientes trifásicas en un motor.

El voltaje inducido en las barras de un rotor determinado, está dado por la ecuación:

$$e_{ind} = (v \times B) * I \dots\dots\dots (2.3.2)$$

Donde;

v = velocidad relativa de las barras del rotor con respecto al campo magnético.

B = densidad de flujo magnético en el estator.

I = longitud de una barra del rotor.

El movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético del estator es el que produce el voltaje inducido en las barras del rotor. En la parte superior del rotor, la velocidad relativa de sus barras con respecto al campo magnético es hacia la derecha de manera que el voltaje inducido en ellas está orientado hacia afuera del plano de la página, mientras que en las barras situadas en la parte inferior, el voltaje inducido tiene sentido contrahorario. Sucediendo otro tanto con las correspondientes corrientes del rotor. Sin embargo, como en conjunto el rotor es inductivo, el valor pico de dicha corriente está atrasado con respecto al valor pico del voltaje. La corriente del rotor produce entonces un campo magnético B_R en el mismo. Finalmente, el par producido en la máquina está dado por:

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S \dots\dots\dots (2.3.3)$$

Este par es de sentido contrahorario; por lo tanto, el rotor se acelera en esa dirección. Sin embargo, la velocidad del motor tiene un límite finito. Si el rotor del motor de inducción llegara a girar a la velocidad sincrónica, sus barras estarían estacionarias con respecto al campo magnético y entonces no se induciría voltaje. Si e_{ind} fuera igual a 0, no existiría corriente en el rotor y por lo tanto, tampoco habría campo magnético. Sin campo magnético en el rotor el par producido sería cero y por la fricción, el rotor se frenaría. Entonces, un motor de inducción puede girar a velocidades cercanas a la sincrónica pero nunca alcanzará exactamente la velocidad sincrónica. En la figura 2.3.2 se observa el devanado trifásico, así como la velocidad angular del campo giratorio.

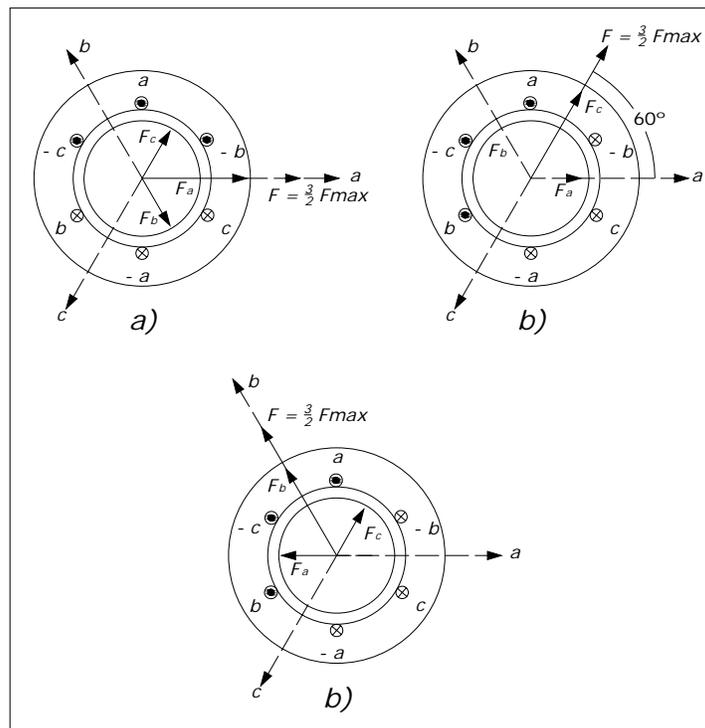


Figura 2.3.2 Campo giratorio producido por el devanado trifásico.

a) $\omega t = 0$; b) $\omega t = \pi/3$ y c) $\omega t = 2\pi/3$

Concepto de deslizamiento del rotor.

El voltaje inducido en una barra del rotor de un motor de inducción depende de la velocidad relativa del rotor con respecto al campo magnético. Puesto que el comportamiento del motor de inducción depende de los voltajes y las corrientes del rotor, resulta más lógico hablar de esta velocidad relativa. Para definirla se usan comúnmente dos términos. Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

$$n_{desliz} = n_{sinc} - n_m \dots\dots\dots(2.3.4)$$

Donde;

n_{desliz} = velocidad de deslizamiento de la máquina.

n_{sinc} = velocidad de campo magnético.

n_m = velocidad mecánica del eje del rotor.

El otro término que se utiliza para describir el movimiento relativo es el deslizamiento relativo, que corresponde a la velocidad relativa expresada en por unidad o en porcentaje, es decir, el deslizamiento se define como:

$$s = \frac{n_{desliz}}{n_{sinc}} (x100\%) \dots\dots\dots(2.3.5)$$

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (x100\%) \dots\dots\dots(2.3.6)$$

Esta ecuación también se puede expresar en términos de la velocidad angular ω (radianes por segundo) como;

$$s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} (x100\%) \dots\dots\dots(2.3.7)$$

Se puede ver que, si el rotor gira a velocidad sincrónica, $s = 0$, y si el rotor está quieto, $s = 1$. Todas las velocidades normales del motor están comprendidas entre estos dos límites.

Frecuencia eléctrica en el rotor.

Un motor de inducción trabaja con base en voltajes inducidos en el rotor y por esta razón, en algunas oportunidades se le ha llamado transformador giratorio. Lo mismo que un transformador, El primario (estator) induce un voltaje en el secundario (rotor), pero a diferencia del

transformador, la frecuencia en el secundario no es necesariamente la frecuencia que hay en el primario.

Si se bloquea el rotor del motor de tal manera que no se pueda mover, entonces su frecuencia será igual a la del estator. En otro caso, si el rotor gira a la velocidad sincrónica, su frecuencia será cero.

Por lo cual la relación quedará de la siguiente manera:

$$f_r = s f_e \dots\dots\dots(2.3.8)$$

Características par-velocidad del motor de inducción

Es posible deducir una expresión general del par producido en función de la velocidad, partiendo del circuito equivalente y del diagrama de flujo de potencia. El par producido por un motor de inducción está dado por:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad Y \quad = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}} \dots\dots\dots(2.3.9)$$

Esta última ecuación es especialmente útil, ya que para una frecuencia y un número de polos determinados, la velocidad sincrónica es una constante. Si ω_{sinc} es constante, basta conocer la potencia del entrehierro para obtener el par producido por el motor.

La potencia del entrehierro es la que se transfiere del circuito del estator al circuito del rotor y es igual a la potencia que se disipa en la resistencia R_2/s .

Curva par- velocidad del motor de inducción.

Las características par velocidad del motor de inducción dibujada en la figura 2.3.3 proporcionan información sobre las características de un motor de inducción trifásico.

El par producido por un motor de inducción a velocidad sincrónica es cero. Este hecho ha sido discutido anteriormente.

La curva par-velocidad es prácticamente entre vacío y plena carga. En este rango, la resistencia del rotor es mucho mayor que su reactancia, y por lo tanto, la corriente del rotor, el campo magnético del rotor y el par producido crecen linealmente al aumentar el deslizamiento.

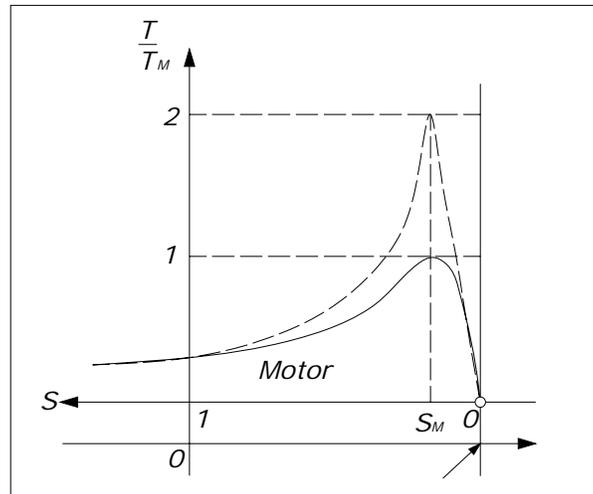


Figura 2.3.3 Deducción de la característica torque velocidad de un motor de inducción trifásico.

Existe un par máximo posible que el motor no puede sobre pasar. Este par se denomina Par máximo desarrollado o par de desenganche y es dos veces el par nominal a plena carga del motor Inducción en cuanto su par nominal, par de arranque y par máximo.. En la figura 2.3.4 se observa el comportamiento de un motor de típico.

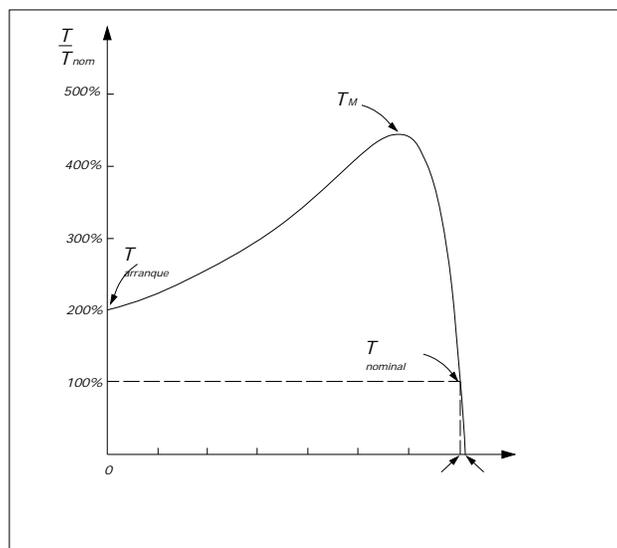


Figura 2.3.4 Característica torque-velocidad de un motor de inducción típico.

El par de arranque del motor es ligeramente mayor que su par de plena carga, así el motor debe arrancar arrastrando cualquier carga, hasta la nominal.

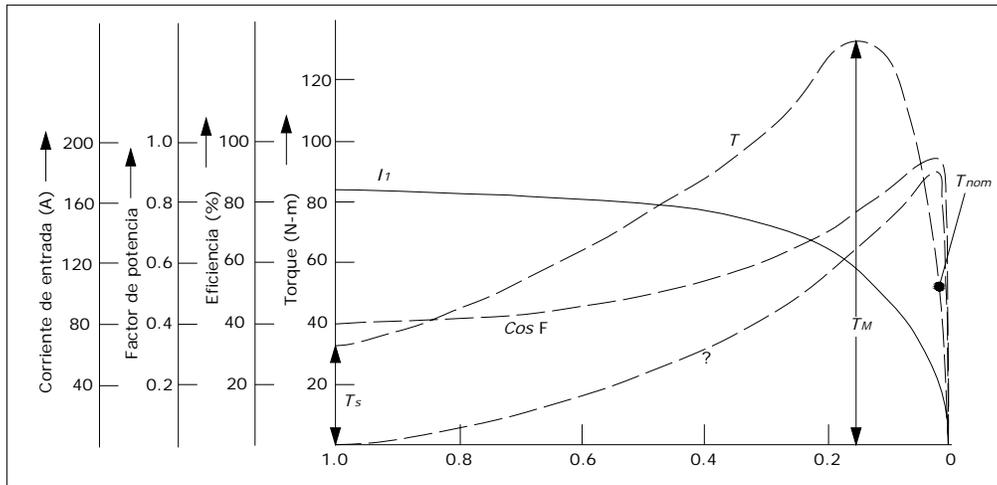


Figura 2.3.5 Comportamiento de las variables eléctricas en un motor de inducción.

Para un deslizamiento dado, el par varia con el cuadrado del voltaje aplicado. Este hecho es utilizado para controlar la velocidad del motor como se describirá más adelante. La figura 2.3.5 muestra las variables eléctricas que intervienen en el funcionamiento del motor de inducción trifásico. Además en la figura 2.3.6 se observa la zona de trabajo estable de una máquina de inducción.

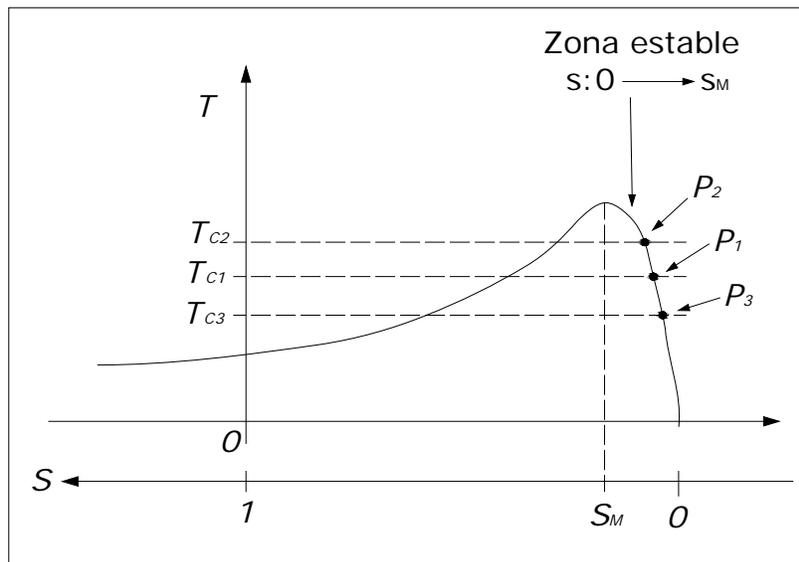


Figura 2.3.6 Zona de de trabajo estable en un máquina de inducción.

Si el rotor de un motor de inducción se hace girar a una velocidad superior a la velocidad sincrónica, se invierte la dirección del par desarrollado y la máquina funciona como generador, convirtiendo potencia mecánica en potencia eléctrica.

Si el rotor gira en dirección contraria a la del campo magnético, el par producido hará que la máquina se detenga rápidamente y comience luego a girar en dirección contraria. Puesto que para invertir el sentido de rotación del campo magnético, basta intercambiar dos fases del estator, este hecho se utiliza como una forma de frenado rápido en un motor de inducción, se llama intercambio de fase. En la figura 2.3.7 se observa el comportamiento del torque velocidad como motor, generador y freno.

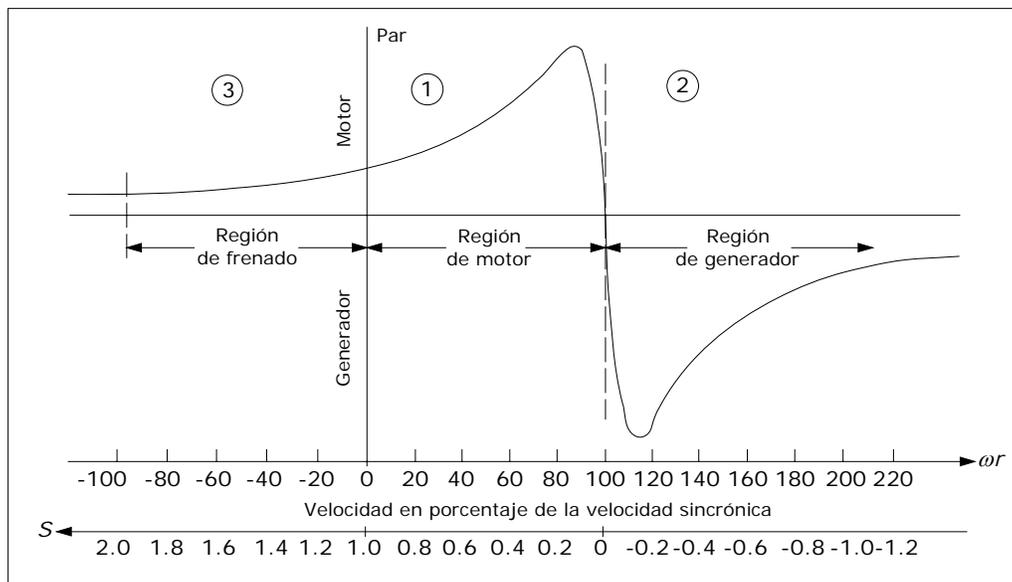


Figura 2.3.7 Característica torque velocidad como motor, generador y freno.

2.4 Corriente y flujos en las máquinas de inducción

Par y potencia en motores de inducción.

Un motor de inducción se puede describir, básicamente, como un transformador giratorio. Su entrada es un sistema trifásico de voltajes y corrientes. Para un transformador ordinario la salida es potencia eléctrica a través del devanado secundario. El devanado secundario de un motor (rotor) está en cortocircuito, de manera que no existe potencia eléctrica a la salida de un motor de

inducción. Su salida en cambio es mecánica. La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida se ilustra a continuación en la figura 2.4.1

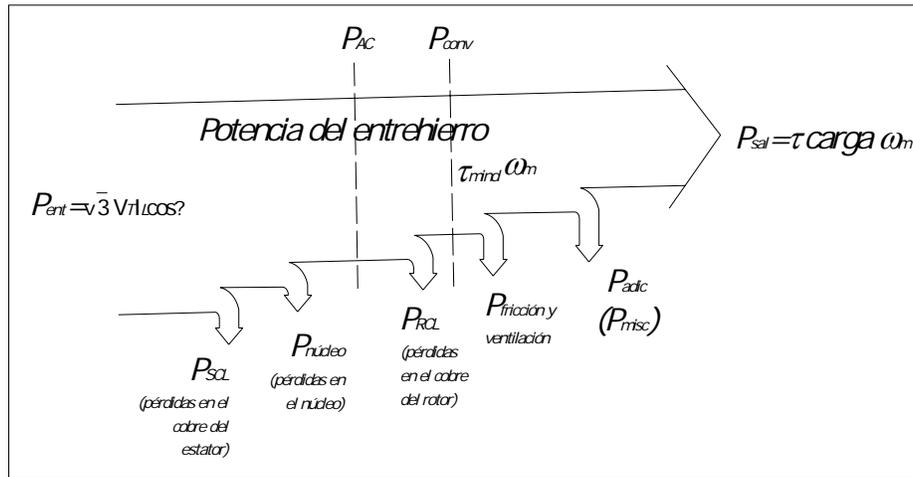


Figura 2.4.1 Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción.

La potencia P_{ent} que entra a un motor de inducción lo hace en forma de voltajes y corrientes trifásicas. Las primeras pérdidas que se encuentran en una máquina son las pérdidas $I^2 R$ en los devanados del estator (las pérdidas en el cobre del estator, P_{SCL}). En seguida, alguna cantidad de potencia se pierde por los ciclos de histéresis y las corrientes parásitas en el estator ($P_{núcleo}$). La potencia que queda en ese punto, se transfiere al rotor de la máquina a través del entrehierro entre estator y rotor. Esta potencia se llama potencia del entrehierro de la máquina P_{AG} . Parte de la potencia transferida al rotor se pierde como $I^2 R$ (pérdidas en el cobre del rotor P_{RCL}) y el resto se invierte en potencia mecánica (P_{CONV}). Finalmente se presentan las pérdidas por fricción y ventilación P_{FZV} y las pérdidas adicionales P_{misc} . La potencia restante es la potencia de salida del motor P_{SAL} .

A mayores velocidades de un motor de inducción son mayores sus pérdidas por fricción, por ventilación y las adicionales. De otra manera, si la velocidad es muy alta (N_{sinc}), las pérdidas en el núcleo son menores. Por eso es que en algunos casos estas tres categorías de pérdidas se toman en grupo y se llaman pérdidas rotacionales. A menudo estas pérdidas rotacionales se consideran constantes e independientes de la velocidad ya que, tomadas independiente, sus variaciones en función de la velocidad son en sentido opuesto.

La corriente de entrada de una fase del motor de inducción, se puede calcular dividiendo el voltaje aplicado por la impedancia equivalente total:

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \dots\dots\dots(2.4.1)$$

Donde:

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_c - jB_M + 1(R_2 + jX_2)} \dots\dots\dots(2.4.2)$$

Ahora se pueden calcular las pérdidas en el cobre del estator, las pérdidas en el núcleo, las pérdidas en el cobre del rotor. Las pérdidas totales en el cobre de las tres fases del estator están dadas por:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \dots\dots\dots(2.4.3)$$

Las pérdidas en el núcleo están dadas por

$$P_{NÚCLEO} = 3E_1^2 G_C = \frac{3E_1^2}{R_C} \dots\dots\dots(2.4.4)$$

Entonces se puede encontrar la potencia en el entrehierro, que es

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{NÚCLEO} \dots\dots\dots(2.4.5)$$

Observe ahora cuidadosamente el circuito equivalente del rotor de la figura 2.4.2 El único elemento del circuito donde se puede disipar la potencia del entrehierro es la resistencia R_2/S por lo tanto, la potencia del entrehierro también se puede expresar como:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} \dots\dots\dots(2.4.6)$$

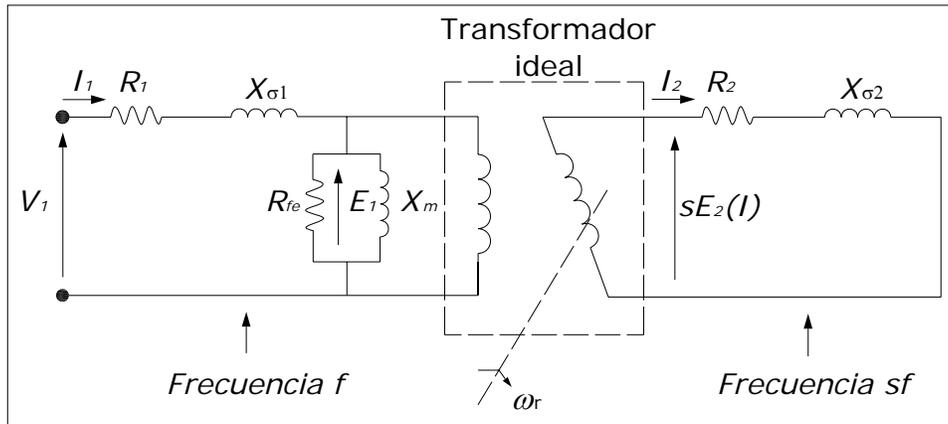


Figura 2.4.2. Circuito equivalente del motor de inducción.

El valor real de las pérdidas resistivas en el circuito del rotor está dado por la ecuación:

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_R \dots\dots\dots(2.4.7)$$

Después de haber restado de la potencia de entrada al motor las pérdidas en el cobre del estator, las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en el cobre del rotor, la potencia eléctrica restante se convierte en potencia mecánica. Esta potencia, comúnmente llamada potencia desarrollada, está dada por:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \dots\dots\dots(2.4.8)$$

Finalmente, si se conocen las pérdidas por fricción y ventilación, se puede conocer la potencia de salida.

$$P_{SAL} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \dots\dots\dots(2.4.9)$$

Se define como **par producido** en la máquina el valor del par generado por la potencia eléctrica que se convierte en potencia mecánica. Este par es diferente del par disponible en el eje del motor y la diferencia es igual al par que causan la ventilación y la fricción de la máquina. El par producido está dado por la ecuación.

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \dots\dots\dots(2.4.10)$$

2.5 El circuito equivalente del motor de inducción

En la siguiente figura 2.4.2 se muestra el circuito equivalente por fase de un transformador que representa la operación de un motor de inducción.

Como en cualquier transformador, existe una resistencia y una autoinductancia en el devanado primario (estator) que deben representarse en el circuito equivalente de la máquina, la resistencia del estator se llamará R_1 y su reactancia se llamará X_1 . Estas dos componentes aparecen a la derecha de la entrada en el modelo de la máquina.

Nuevamente, como en cualquier transformador con un núcleo de hierro, el flujo en la máquina está relacionado con la integral del voltaje aplicado E_1 . La curva del flujo en función de la fuerza magnetomotriz (curva de magnetización) de la máquina se representa como sigue, comparada con la curva similar de un transformador de potencia. Se observa que la pendiente de la curva correspondiente al motor de inducción es mucho menos inclinada que la de un buen transformador. Esto se debe a la existencia del entrehierro en el motor de inducción que hace aumentar demasiado la reluctancia de la trayectoria del flujo total con lo cual se debilita el acoplamiento entre los devanados primario y secundario. En el aumento de la reluctancia a causa del entrehierro se necesita una mayor corriente de magnetización para obtener un determinado nivel de flujo. Entonces, en el circuito equivalente, la reactancia de magnetización X_m tendrá un valor mucho menor (o la susceptancia B_m tendrá un valor mucho mayor) que el correspondiente a un transformador ordinario.

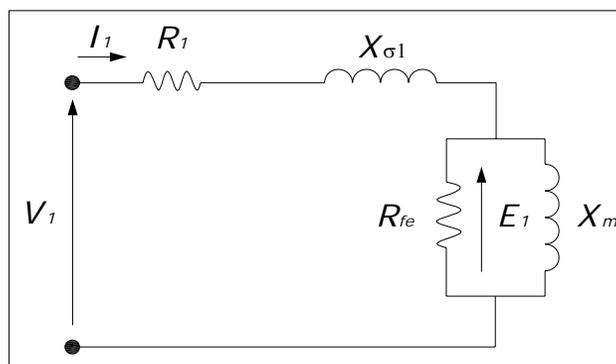


Figura 2.5.1 Circuito equivalente, la importancia de la reactancia X_M

El voltaje interno E_1 del primario (estator) está acoplado con el voltaje interno E_R secundario (rotor), por un transformador ideal con una relación a_{ef} entre espiras efectivas, es claro que esta relación de transformación efectiva a_{ef} se puede determinar finalmente para un motor de rotor devanado, pues básicamente es la relación entre el número de conductores por fase en el estator

y el número de conductores por fase en el rotor modificados ambos por sus correspondientes factores de paso y de distribución .Es mucho más fácil definir con exactitud a_{ef} en el caso de motor con rotor de jaula de ardilla, ya que en él no hay devanados perfectamente definidos. De todas maneras existe una relación para el motor.

El voltaje E_R inducido en el rotor produce un flujo de corriente en el circuito del rotor (secundario) de la máquina, el cual se encuentra en cortocircuito.

La impedancia del primario y la corriente de magnetización del circuito equivalente de un motor de inducción son muy similares a los valores correspondientes del modelo de circuito equivalente de un transformador.

La diferencia fundamental entre los circuitos equivalentes de un motor de inducción y de un transformador, se debe a los efectos que la frecuencia variable del rotor produce en el voltaje inducido E_R y en la impedancia R_R y jX_R del rotor.

Modelo del circuito del rotor.

Cuando se aplica un voltaje a los devanados del estator de un motor de inducción, se induce un voltaje en los devanados del rotor de la máquina. En general a mayor velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético del estator, mayor será el voltaje resultante en el rotor. La mayor velocidad relativa ocurre cuando el rotor está quieto, condición que se conoce como rotor frenado o rotor bloqueado. Si el voltaje inducido en el rotor en esta condición se denomina E_{RO} , entonces el voltaje inducido a un deslizamiento cualquiera está dado por la ecuación:

$$E_{RO} = sE_{RO} \dots\dots\dots(2.5.1)$$

Este voltaje se induce en el circuito del rotor que contiene resistencia y reactancia. La resistencia del rotor es de magnitud constante (excepto por el efecto pelicular) e independiente del deslizamiento, mientras que la reactancia si se ve afectada, de manera compleja por el deslizamiento.

La reactancia de un motor de inducción depende de la reactancia propia del rotor, de la frecuencia del voltaje y la corriente que existan en él. Con una inductancia del rotor igual a L_R , la reactancia estará dada por:

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_R L_R \dots\dots\dots(2.5.2)$$

Como $f_r = sf_e$ de manera que;

$$X_R = 2\pi f_r L_R$$

$$= S(2\pi f_e L_R)$$

$$= SX_{RO}$$

Donde X_{RO} es la reactancia del rotor bloqueado.

La corriente en el mismo se puede encontrar así

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$

$$I_R = \frac{sE_{RO}}{R_R + jsX_{RO}}$$

$$I_R = \frac{E_{RO}}{R_R/s + jX_{RO}} \dots\dots\dots(2.5.3)$$

Lo anterior indica que todos los efectos debidos a la velocidad variable del rotor se pueden simular mediante una impedancia variable alimentada con una fuente de potencia de voltaje constante E_{RO} . Desde este punto de vista, la impedancia equivalente del rotor es:

$$Z_{Req} = \frac{R_{RO}}{s} + jX_{RO} \dots\dots\dots(2.5.4)$$

El circuito equivalente con esta convención tiene un voltaje constante de E_{RO} voltios y una impedancia equivalente Z_{Req} que contiene todos los efectos del deslizamiento variable del rotor.

2.6 Circuito equivalente aproximado con voltaje ajustable

Los errores en las relaciones basadas en el circuito equivalente pueden reducirse a una pequeña cantidad reduciendo el valor actual de voltaje aplicado como se muestra.

En el circuito equivalente, el voltaje en terminales se expresa por:

$$V = E_2 + I_1 Z_1 \dots\dots\dots (2.6.1)$$

y dado que $I = I_2 + I_M$

La ecuación se puede volver a escribir en forma

$$\begin{aligned} V &= E_2 + Z_1(I_2 + I_M) = E_2 + I_2 Z_1 + I_M Z_1 \\ &= (Z_1 + Z_2)I_2 + Z_1 I_M \\ I_M &= \frac{E_2}{Z_M} \end{aligned}$$

y tenemos

$$V = (Z_1 + Z_2)I_2 + \frac{Z_1}{Z_M} * E_2 \dots\dots\dots (2.6.2)$$

Dado que la componente reactiva en ambas impedancias Z_1 y Z_M son varias veces más grandes que las componentes resistivas en los motores de inducción convencionales.

$$\frac{Z_1}{Z_M} \cong \frac{X_1}{X_M} \dots\dots\dots (2.6.3)$$

Adicionalmente, E_2 es solamente un poco menor y cercana en fase con V en el rango normal de giro de tal manera que la ecuación puede reducirse a:

$$\begin{aligned}
 V &\cong (Z_1 + Z_2)I_2 + \frac{X_1}{X_M} * V \\
 V' &= V \left(1 - \frac{X_1}{X_M} \right) \\
 &= \left(R_1 + \frac{R_2}{s} + j(X_1 + X_2) \right) I_2 \dots\dots\dots (2.6.4)
 \end{aligned}$$

El fasor de potencia de entrada al motor se toma como mVI_1 en vez de $mV'I_1$ debido a que V es el voltaje actual aplicado al embobinado del estator. El valor ajustado de V' se usa solamente para un valor más realista de los valores I_1 e I_2 .

2.7 Circuito equivalente definitivo.

Para establecer el circuito equivalente definitivo, por fase, de un motor de inducción es necesario referir la parte del modelo del rotor al nivel de voltaje del circuito del estator.

Una vez que esto se haya efectuado, el modelo quedará completo. El modelo del circuito del rotor que debe ser referido al lado del estator es el de la figura 2.6.1, cuya impedancia contiene todos los efectos de las variaciones de velocidad.

En un transformador ordinario los voltajes, corrientes e impedancia del lado del secundario se pueden referir al lado del primario por medio de la relación de espiras del transformador.

$$\begin{aligned}
 V_p &= V's = aVs \\
 I_p &= I's = Is/a \\
 Z's &= a^2 Zs \dots\dots\dots(2.6.5)
 \end{aligned}$$

Donde las variables con el indicativo de prima corresponden a los valores reflejados de voltaje, corriente e impedancia.

Para el circuito del motor de inducción se puede hacer exactamente lo mismo que a los transformadores. Si la relación de espiras efectivas en un motor es de a_{ef} , entonces el voltaje referido del rotor es:

$$E_2 = E'_R = a_{ef} E_{R0} \dots\dots\dots(2.6.6)$$

y la corriente del rotor se convierte en;

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}}$$

Impedancia del rotor se convierte en

$$Z_2 = a_{ef}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \dots\dots\dots(2.6.7)$$

se toman las siguientes definiciones:

$$\begin{aligned} R_2 &= a_{ef}^2 R_R \\ X_2 &= a_{ef}^2 X_{R0} \end{aligned} \dots\dots\dots(2.6.8)$$

entonces el circuito equivalente definitivo, por fase, de un motor de inducción es el que sigue.

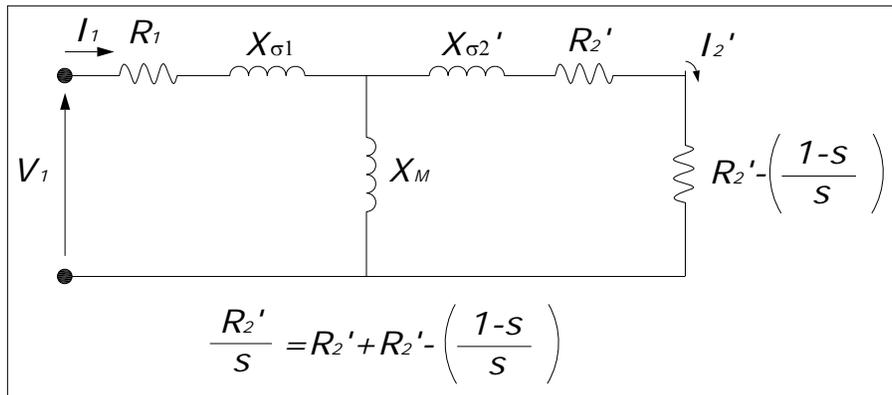


Figura 2.6.1 Circuito equivalente definitivo.

Se puede observar que a deslizamientos muy bajos el valor de la resistencia es mayor que la reactancia R_R/s , de tal manera que al predominar la componente resistiva la corriente varía linealmente con el deslizamiento. A deslizamientos altos X_{R0} es mucho más grande que R_R/s y la corriente del rotor tiende a valor de estado estacionario a medida que el deslizamiento se hace muy grande.

Para un motor con rotor de jaula de ardilla es muy difícil, sino imposible, determinar directamente la resistencia del rotor R_R , la reactancia del rotor con rotor bloqueado X_{R0} y la relación de espiras efectivas a_{ef} . Sin embargo, por fortuna es posible efectuar medidas que den

directamente valores reflejados de resistencias R_2 y reactancia X_2 , aunque no se conozcan por separado las magnitudes de R_R , X_{R0} , y a_{ef} .

CAPÍTULO III

PROCESOS

ELECTROMAGNÉTICOS

EN LOS CIRCUITOS

ELÉCTRICOS DE UN

MOTOR TRIFÁSICO ALTA

EFICIENCIA

ANTECEDENTES

Las máquinas eléctricas se han desarrollado en un frenético proceso evolutivo que comienza a mediados del siglo XIX y que aun continúa en la actualidad. Innumerables patentes de conocidos inventores tales como Edison y Tesla entre muchos otros, realizaron contribuciones significativas que lograron eficacia y eficiencia en la conversión electromecánica de energía. Después de todo este proceso las máquinas convencionales presentan características comunes que permiten generalizar la descripción matemática de su comportamiento.

3.1 Características comunes

Las máquinas eléctricas rotativas convencionales, presentan generalmente las siguientes características comunes:

1. Poseen un eje mecánico a través del cual se realiza el intercambio de energía.
2. Tienen una pieza estática o inmóvil denominada estator.
3. Disponen de una pieza móvil denominada rotor en el caso particular de las máquinas cilíndricas.
4. Generalmente son cilíndricas.
5. El flujo en el entrehierro de la máquina es periódico.

Al estudiar el conductor en presencia de un campo magnético, resulta conveniente para obtener la mayor fuerza eléctrica posible, que el conductor, su velocidad de desplazamiento y el campo magnético se encuentren perpendiculares entre sí. Además, de esta forma la fuerza electromotriz y aparece disponible en el sentido del conductor como se puede observar en la figura 3.1.1.

La mayor parte de las máquinas eléctricas convencionales son cilíndricas, por que en esta geometría se obtiene una disposición de todos los conductores en la cual, la velocidad, el campo magnético y los conductores son perpendiculares entre sí. En la figura 3.1.2 se muestra un diagrama de este tipo de configuración. En la superficie de revolución o manto del cilindro, se encuentran los conductores dispuestos en forma axial y simétrica. La simetría evita vibraciones

en la máquina, pero además es necesario que la corriente se distribuya uniformemente por todos los conductores.

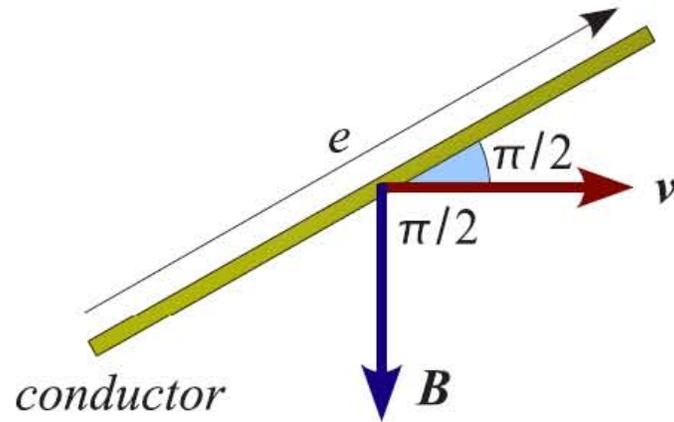


Figura 3.1.1. Conductor en condiciones óptimas de operación.

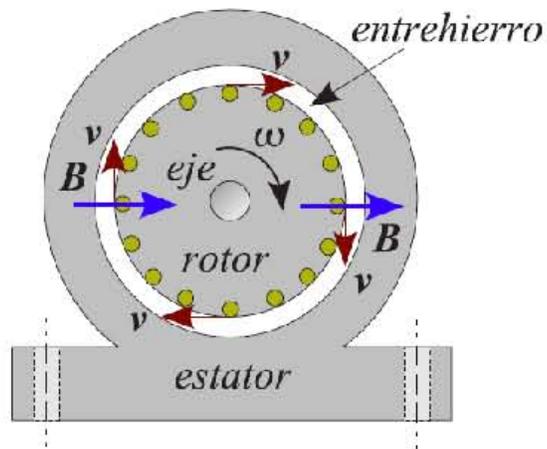


Figura 3.1.2: Configuración cilíndrica de los conductores en una máquina.

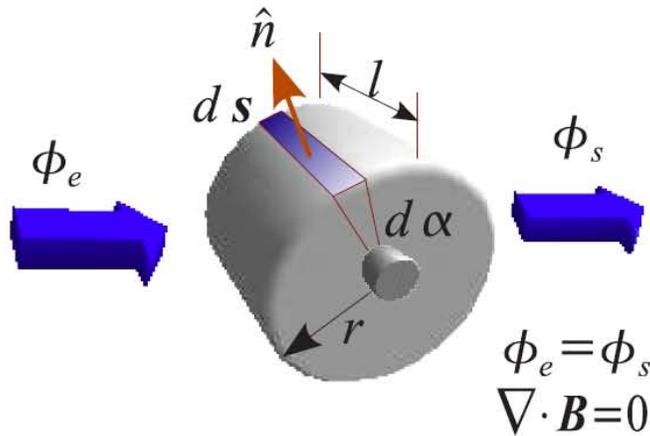


Figura 3.1.3: Flujo entrando y saliendo de un cilindro.

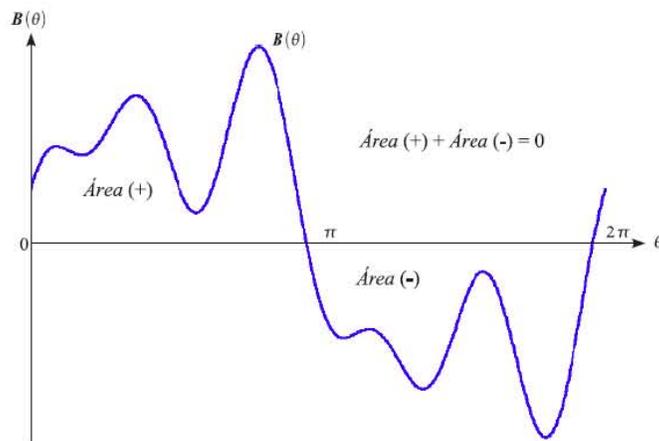


Figura 3.1.4: Distribución de la densidad de campo B en un cilindro.

En una máquina cilíndrica, se garantiza la periodicidad del flujo por que la divergencia de la densidad de campo magnético es nula $-\nabla \cdot B = 0$ En otras palabras, todo el flujo que penetra la superficie cilíndrica sale de ella como se ilustra en la figura 3.1.3.

Ahora bien:

$$\phi = \int_0^{2\pi} d\phi \dots\dots\dots(3.1.1)$$

donde:

$$d\phi = B \cdot ds \dots\dots\dots (3.1.2)$$

De la figura 3.3 se puede deducir que:

$$ds = r \cdot l \cdot \hat{n} d\theta \dots\dots\dots(3.1.3)$$

Y sustituyendo 3.1.3 en 3.1.2

$$d\phi = B \cdot \hat{n} \cdot r \cdot l \cdot d\theta \dots\dots\dots (3.1.4)$$

Como todo el flujo que penetra en el cilindro es igual al que sale de él:

$$\int_0^{2\pi} d\phi = 0 \Rightarrow \int_0^{2\pi} B \cdot ds = 0 \dots\dots\dots (3.1.5)$$

A partir de la ecuación 3.1.5 se determina que el diferencial de flujo en un período de revolución del cilindro es cero. Por lo tanto, la distribución del campo magnético B en función del ángulo, es periódica y existe alternancia en el signo del campo. Por otra parte se determina a partir de la expresión 3.1.5, que para anular la integral en un período completo, las áreas positiva y negativa de la función densidad del campo magnético B en función del ángulo tienen que ser iguales, tal como se observa en la figura 3.1.4. Como la distribución de la densidad de campo B, en función del ángulo es periódica, se puede descomponer en series de Fourier espaciales. En la figura 3.1.5 se ha representado la primera armónica o componente fundamental del campo, suponiendo que éste presenta simetría impar. Para calcular el valor de la densidad de campo correspondiente a la primera armónica en el punto \pm de la figura 3.1.5, se tiene:

$$B_1(\delta) = B_{1\max} \cdot \cos \delta \dots\dots\dots (3.1.6)$$

Donde B_{1max} es la amplitud del campo B_1 en la figura 3.2.1, se ha representado la distribución del campo alrededor del cilindro.

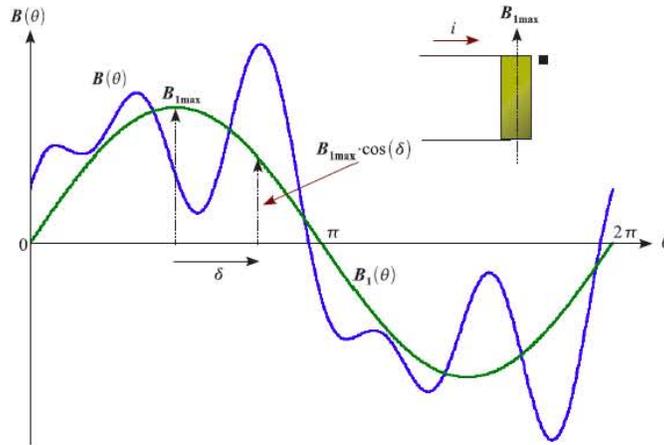


Figura 3.1.5: Primera armónica de la densidad de campo B.

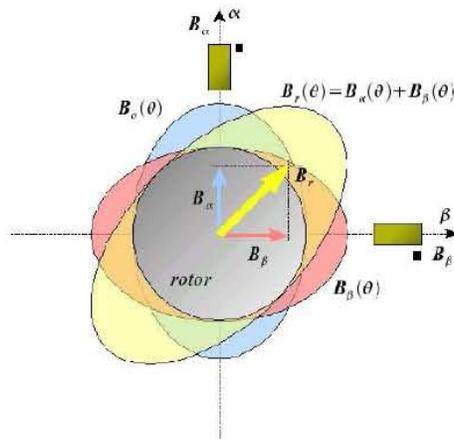


Figura 3.1.6: Distribución espacial del campo en el cilindro.

3.2 Bobinas ortogonales

Cualquier distribución sinusoidal en el espacio de la densidad de campo, puede ser obtenida a partir de la suma vectorial de dos componentes ortogonales tales como B_α y B_β de la figura 3.1.6. Dado que B_1 es sinusoidal, la distribución de los campos B_α y B_β también deben ser sinusoidales. En las máquinas eléctricas convencionales se distribuyen los conductores en la periferia de la máquina para que al inyectar las corrientes i_α e i_β que se muestran en la figura, la configuración espacial del flujo en la periferia del cilindro resulte aproximadamente sinusoidal. En esta figura se han representado dos bobinas colineales con los ejes α y β respectivamente cuyo eje

magnético coincide con la amplitud de la distribución espacial del campo. Cuando por cualquiera de las bobinas circula corriente, se produce un campo en toda la periferia de la máquina, cuya amplitud se encuentra orientada según su respectivo eje.

En general B_α , es un vector que representa la magnitud y dirección de la primera armónica del campo en el cilindro según el eje α . B_β , es el vector que representa la amplitud y dirección de la primera armónica del campo según el eje β . Por lo tanto:

$$B_{1\max} = B_\alpha + B_\beta \dots\dots\dots (3.2.1)$$

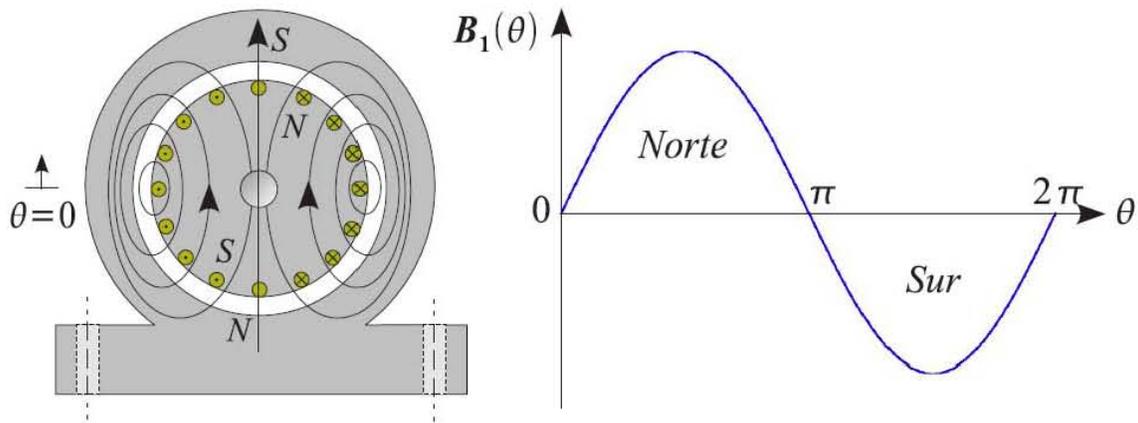


Figura 3.2.1: Polo norte y sur de un cilindro.

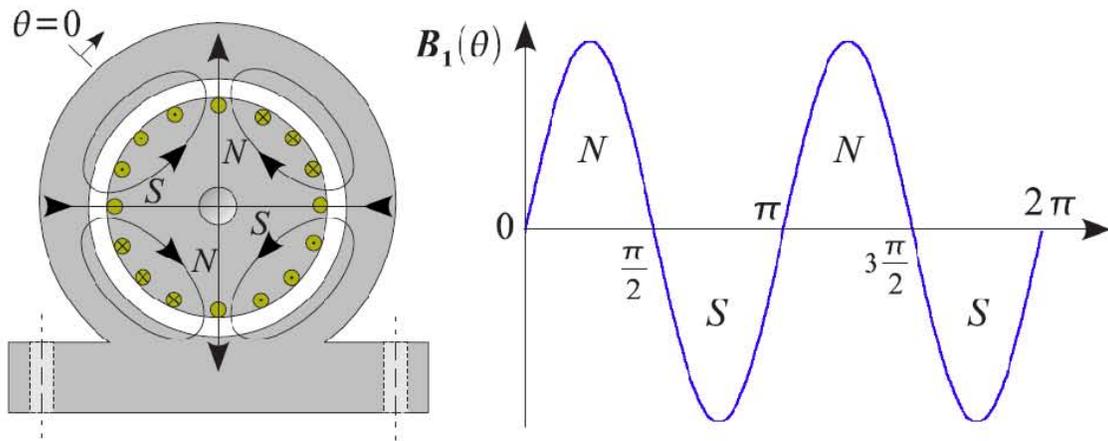


Figura 3.2.2: Cilindro con dos pares de polos.

Tanto B_α como B_β tienen un solo grado de libertad, es decir, solamente puede variar en magnitud o signo, pero no en dirección. Las dos componentes poseen el mismo período espacial y se encuentran en cuadratura, según la posición relativa de los devanados. Para obtener cualquier valor de B_α o B_β , es suficiente con ajustar las corrientes i_α e i_β . Estas consideraciones son válidas tanto para el rotor como para el estator de las máquinas eléctricas rotativas.

3.3 Múltiples pares de polos

Cuando se analiza la distribución del flujo en la máquina, se observa que en una zona de los 2π radianes, el campo es positivo - el flujo sale de la superficie - y en el resto del cilindro, es negativo - el flujo penetra en la superficie del cilindro -. La zona del cilindro en el cual hay salida del flujo se define como polo norte y la región por la cual penetra el flujo a la superficie se define como polo sur.

En la figura 3.2.1 se ilustra el polo norte y sur de un cilindro elemental excitado por dos conductores.

Las máquinas eléctricas pueden ser diseñadas de tal manera que en el desarrollo de 2π radianes existan varios polos norte y varios polos sur. En la figura 3.2.2 se muestra un ejemplo de un cilindro en el cual existen dos polos norte y dos polos sur alternados entre si. Esta situación corresponde a una máquina con dos pares de polos, pero se puede repetir con cualquier cantidad de pares de polos. Como en las máquinas eléctricas cada par de polos se repite exactamente igual, es suficiente analizar el primer par de polos y extender los resultados obtenidos a la totalidad de la máquina. En una máquina con múltiples pares de polos se definen ángulos eléctricos y mecánicos. Los ángulos mecánicos o ángulos físicos son los que se han utilizado en todo el análisis y son ángulos reales. Para definir los ángulos eléctricos se acota un paso polar de la máquina, es decir la zona comprendida por un par de polos y se define este ángulo mecánico como 2π radianes eléctricos. En la figura 3.3.1, se ilustra este concepto con una máquina de tres pares de polos. Entre 0 y $\frac{2\pi}{3}$ radianes mecánicos se definen 2π radianes eléctricos.

Si se define como p el número de pares de polos de la máquina, entonces:

$$\theta_{eléctrico} = p \cdot \theta_{mecánico} \dots\dots\dots (3.3.1)$$

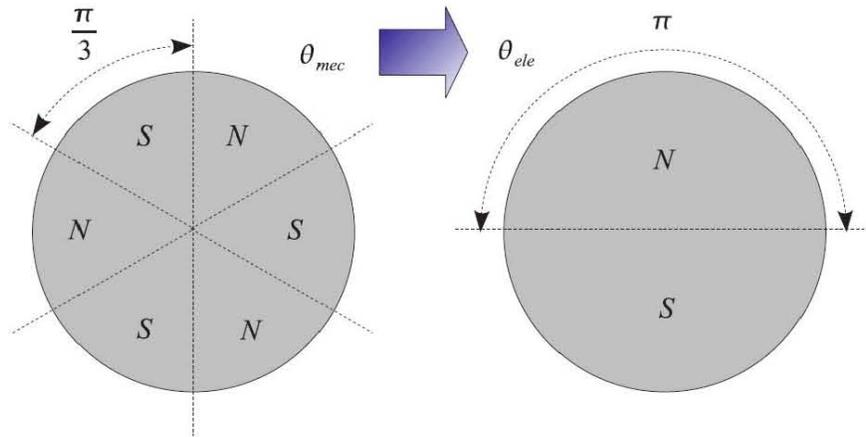


Figura 3.3.1: Definición de ángulos eléctricos y mecánicos.

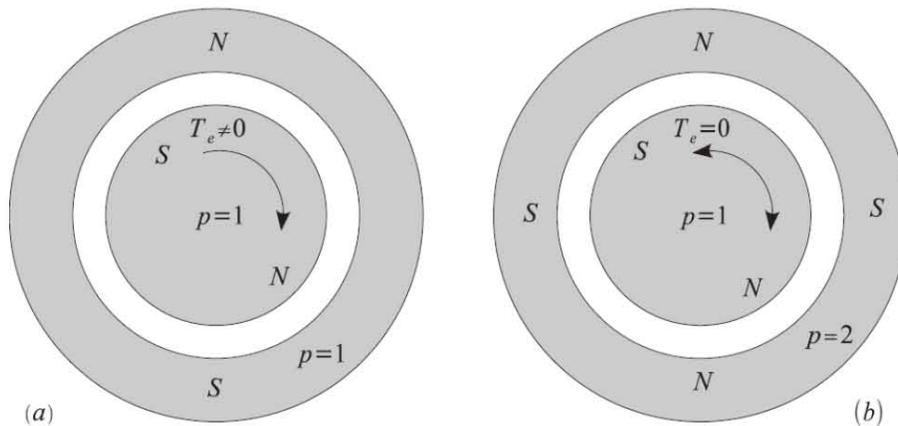


Figura 3.3.2: Máquina con iguales (a) y diferentes (b) números de pares de polos en el rotor y en el estator.

Mediante la ecuación 3.3.1 se puede estudiar la configuración y operación de una parte de la máquina, recordando que en el resto se repite el proceso tantas veces como número de pares de polos p tenga el convertidor. Para calcular el par, es necesario recordar que cada uno de los elementos de repetición produce un par idéntico, por lo tanto, el par en el eje mecánico de la máquina real se calcula como:

$$T_{total} = p \cdot T_{eléctrico} \dots\dots\dots (3.3.2)$$

El rotor y el estator de una máquina deben tener siempre el mismo número de pares de polos, porque en caso contrario no es posible producir par promedio neto diferente de cero. En la figura 3.3.2 se muestra un ejemplo de esta situación. En la máquina (a) los polos norte y sur intentan alinearse, para reducir al mínimo posible la longitud de los enlaces de flujo y, por lo tanto, la energía almacenada en el campo. En la máquina (b) se producen pares iguales y opuestos, y por esta razón el par total sobre el eje es nulo.

3.4 Par eléctrico y fuerzas magnetomotrices

En la figura 3.4.1 se representa el diagrama de una máquina eléctrica cilíndrica con un estator y un rotor. En el estator y rotor, se producen las fuerzas magnetomotrices F_e y F_r respectivamente,

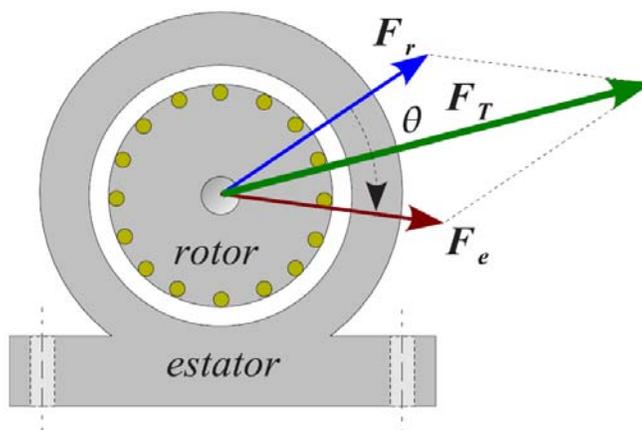


Figura 3.4.1: Par eléctrico a partir de las fuerzas magnetomotrices.

cuya amplitud y dirección se representa vectorialmente en la figura. Estas fuerzas magnetomotrices se encuentran separadas en un ángulo θ una de la otra. La suma de las fuerzas magnetomotriz del rotor y del estator produce la fuerza magnetomotriz resultante en el entrehierro de la máquina F_T . Para calcular el par eléctrico de una máquina en función de las fuerzas electromotrices, se determina la coenergía en el campo y luego se deriva con respecto a la posición angular θ :

$$T_e = \frac{\partial W_c'(F, \theta)}{\partial \theta} \dots\dots\dots (3.4.1)$$

de la figura 3.4.1 se deduce:

$$F_t^2 = F_r^2 + F_e^2 + 2F_r F_e \cos \theta \dots\dots\dots(3.4.2)$$

Si la permeabilidad del material magnético es muy grande, es decir μ_r tiende a infinito, toda la energía está concentrada en el entrehierro y la coenergía se puede calcular de la siguiente forma:

$$W'_c = 2\pi r \delta l \left\langle \frac{1}{2} H \cdot B \right\rangle \dots\dots\dots (3.4.3)$$

Donde:

- r es el radio medio del entrehierro (m).
- δ es el espesor del entrehierro (m).
- l es la longitud activa de la máquina (m).

Como la densidad de campo magnético B en el entrehierro es igual a $\mu_0 H$:

$$W'_c = 2\pi r \delta l \left\langle \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \right\rangle \dots\dots\dots (3.4.4)$$

La primera armónica de la densidad de campo magnético H es sinusoidal y su valor promedio es:

$$\langle H^2 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (H_{\max} \text{sen} \theta)^2 d\theta = \frac{1}{2} H_{\max}^2 \dots\dots\dots (3.4.5)$$

Sustituyendo 3.4.4 en 3.4.3:

$$W'_c = 2\pi r \delta l \frac{1}{2} H_{\max}^2 \dots\dots\dots (3.4.6)$$

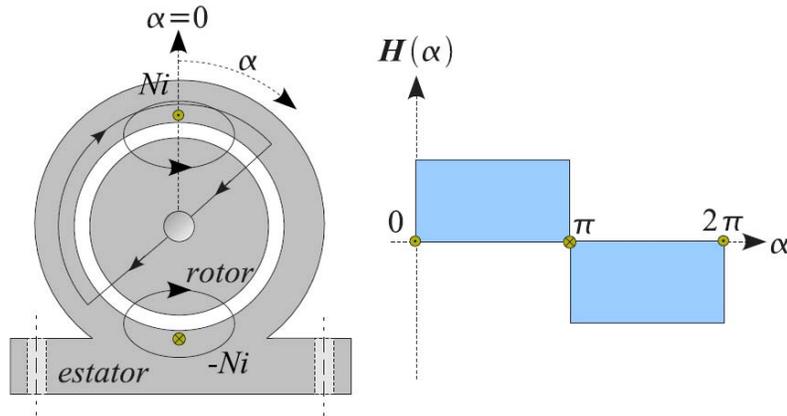


Figura 3.4.2: Fuerzas magnetomotrices e intensidades de campo magnético.

En la ecuación 3.4.6, es necesario expresar la amplitud de la intensidad de campo magnético de primera armónica en función de las fuerzas magnetomotrices. En la figura 3.4.3, se representa una máquina con un devanado en el estator. Como la permeabilidad del hierro es infinita toda la fuerza magnetomotriz se utiliza para que el flujo cruce el entrehierro. Aplicando la ley de Ampere a esta máquina, se tiene:

$$F = NI = \oint H \cdot dl = \int H_{aire} \cdot dl_{aire} + \int H_{hierro} \cdot dl_{hierro} \dots\dots\dots (3.4.7)$$

El segundo término integral es cero ya que:

$$H_{hierro} = \frac{B}{\mu_0 \mu_{hierro}} = 0 \dots\dots\dots (3.4.8)$$

Sustituyendo 3.4.8 en 3.4.7:

$$F = NI = \oint H \cdot dl = \int H_{aire} \cdot dl_{aire}$$

En la figura 3.4.2 también se representa la distribución de la intensidad del campo magnético en función de la posición θ de la trayectoria de Ampere. De esta forma se obtiene:

$$F = NI = \oint H \cdot dl = \int H_{aire} \cdot dl_{aire} = 2\delta \cdot H_{aire} \dots\dots\dots (3.4.9)$$

Despejando de la ecuación 3.4.9 la intensidad de campo magnético en función de la fuerza electromotriz:

$$H = \frac{F}{2\delta} \dots\dots\dots (3.4.10)$$

Sustituyendo la ecuación 3.4.10 en la ecuación 3.4.6 se obtiene:

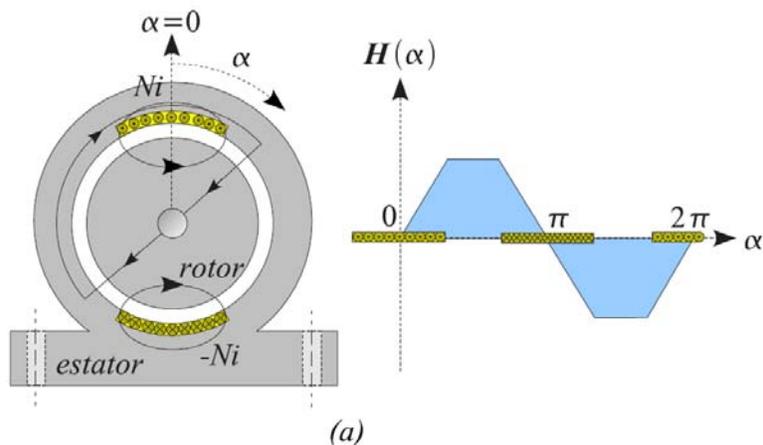
$$W'_c = \frac{\pi l \mu_0}{8\delta} F^2 \dots\dots\dots (3.4.11)$$

Reemplazando la ecuación 3.4.2 en 3.4.11:

$$W'_c = \frac{\pi l \mu_0}{8\delta} (F_r^2 + F_e^2 + 2F_r F_e \cos \theta) \dots\dots\dots (3.4.12)$$

Para calcular el par eléctrico en función de las fuerzas magnetomotrices se utiliza la ecuación:

$$T_e = \frac{\partial W'_c(F, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\pi l \mu_0}{4\delta} F_r F_e \text{sen} \theta \dots\dots\dots (3.4.13)$$



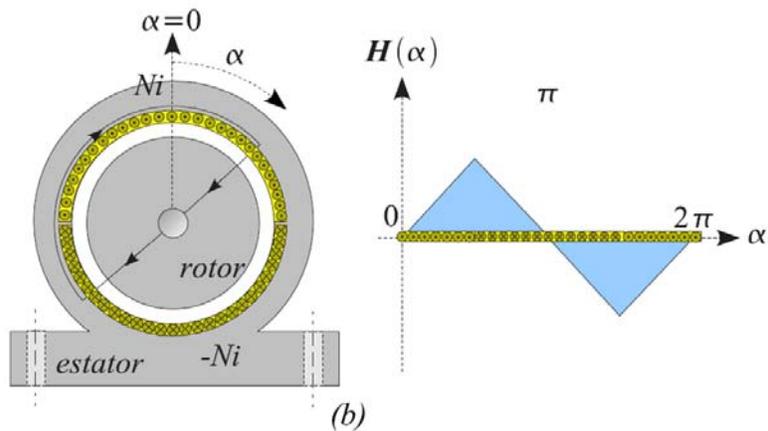


Figura 3.4.3: Diferentes distribuciones de conductores y campos en las máquinas.

Mediante la ecuación 3.4.13 se puede calcular el par eléctrico en función de las fuerzas magnetomotrices de la máquina. La fuerza magnetomotriz depende de las corrientes y del número de vueltas de las bobinas. Si se conocen las dimensiones de la máquina, las corrientes y el número de conductores de cada bobina, es posible utilizar la ecuación 3.4.13 para determinar el par. Si la distribución de las corrientes en la máquina no es puntual, se puede utilizar la misma técnica para calcular la intensidad de campo magnético H pero se tiene en cuenta que:

$$\oint H \cdot dI = \iint J \cdot ds \dots\dots\dots (3.4.14)$$

En la figura 3.4.3 se muestran dos distribuciones diferentes de los conductores en la superficie de una máquina así como su respectiva distribución de intensidades de campo magnético H . Cuando el entrehierro es constante la densidad de campo magnético B posee la misma distribución que la intensidad de campo magnético H .

3.5 El campo magnético rotatorio

Cuando se analizaron las bases de la máquina eléctrica generalizada, se utilizaron dos grados de libertad para la representación del campo magnético, uno dado por la bobina α y el otro por la bobina β . Mediante este esquema se puede determinar el campo en cualquier punto del plano.

En la figura 3.5.1 se muestran dos corrientes i_α e i_β que pueden ser inyectadas en las bobinas α y β de la máquina.

En el instante inicial $t = 0$ la corriente i_α vale cero e i_β es $-I$, por lo tanto el campo resultante apunta en la dirección negativa del eje β . Cuando el tiempo se incrementa y llega al instante, la

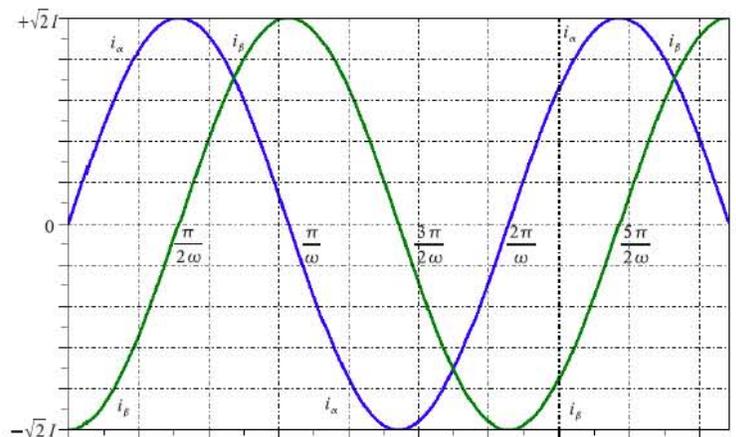


Figura 3.5.1: Corrientes inyectadas en la máquina generalizada.

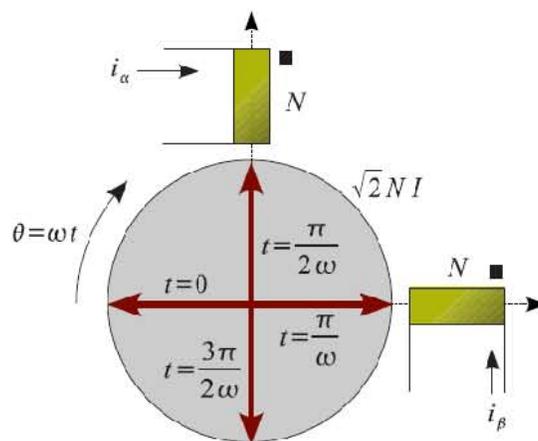


Figura 3.5.2: Campo magnético rotatorio.

corriente i_β se anula, mientras que la corriente i_α es $+I$, el campo en estas condiciones apunta en la dirección positiva del eje α . En el instante $\frac{\pi}{3}$ el flujo se orientará según la dirección positiva del eje β , ya que la corriente i_β tiene como valor $+I$ y la corriente i_α es cero. Para el instante de tiempo $\frac{2\pi}{3}$, la corriente i_α es cero, la corriente i_β vale $-I$ y el vector del campo apunta nuevamente en la dirección negativa del eje β , repitiéndose de esta forma las condiciones iniciales. En la figura 3.5.2 se representa la situación anterior.

El análisis anterior señala las corrientes que varían en el tiempo, producen un campo magnético que gira en el espacio. Aun cuando los campos de cada eje tienen igual amplitud, el desfase en el tiempo y en el espacio origina un campo magnético rotatorio. La frecuencia de giro del campo magnético en el espacio es igual a la frecuencia de variación de las corrientes en el tiempo.

Si la bobina α no es idéntica a la bobina β , o las corrientes inyectadas a la máquina en cada eje difieren en amplitud, el campo no es circular sino elíptico. Los campos elípticos también son considerados campos magnéticos rotatorios o rotantes. Las máquinas trifásicas también funcionan mediante el principio del campo magnético rotatorio.

3.6. La máquina trifásica

La máquina trifásica dispone de tres devanados repartidos simétricamente en la periferia del cilindro. En la figura 3.6.1 se representa la configuración esquemática de este tipo de máquinas así como las tres corrientes que se han inyectado en las bobinas a, b, y c. En la figura se representan las corrientes a, b, c y las fuerzas magnetomotrices que estas corrientes producen en el tiempo inicial ($t = 0$) como fasores. En el instante inicial las corrientes que circulan por las tres bobinas son:

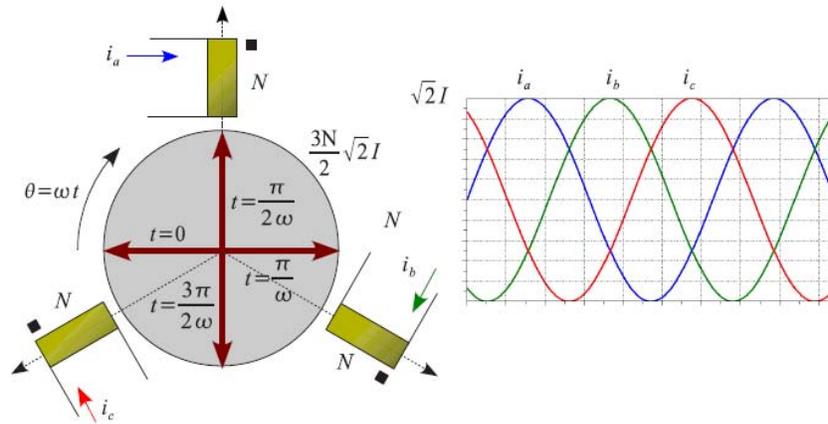


Figura 3.6.1: Corrientes y fuerzas magnetomotrices de la máquina trifásica.

$$i_a(0) = I_{\max}$$

$$i_b(0) = -\frac{1}{2} I_{\max}$$

$$i_c(0) = -\frac{1}{2} I_{\max} \dots\dots\dots (3.6.1)$$

Podemos demostrar que el campo magnético originado por las corrientes de la figura 3.6.1 es rotatorio, se expresan estas corrientes como:

$$i_a(t) = I \cos(\omega t - \alpha)$$

$$i_b(t) = I \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_c(t) = I \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \dots\dots\dots (3.6.2)$$

Si θ es la dirección de un punto cualquiera en el entrehierro medido a partir del eje magnético de la bobina a, se obtiene:

$$F(\theta, t) = Ni_a \cos \theta + Ni_b \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) + Ni_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \dots\dots\dots(3.6.3)$$

Sustituyendo las expresiones 3.6.2 en la ecuación 3.6.3 se obtiene:

$$F(\theta, t) = NI \left\{ \cos(\omega t - \alpha) \cdot \cos \theta + \dots \dots \dots \right. \\ \dots + \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \dots \dots \dots \\ \left. \dots + \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} \dots\dots\dots (3.6.4)$$

Aplicando las propiedades trigonométricas para el producto de cosenos se obtiene

$$F(\theta, t) = \frac{NI}{2} \left\{ \cos(\omega t - \alpha + \theta) + \cos(\omega t - \alpha - \theta) + \dots \dots \dots \right. \\ \dots + \cos\left(\omega t - \alpha + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos(\omega t - \alpha - \theta) + \dots \dots \dots \\ \left. \dots + \cos\left(\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos(\omega t - \alpha - \theta) \right\} \dots\dots\dots (3.6.5)$$

En la ecuación anterior los términos primero, tercero y quinto de la sumatoria se cosenos suman cero, por lo que el desfase entre ellos es de $\frac{2\pi}{3}$ con esta consideración se obtiene:

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} NI \cos(\omega t - \alpha - \theta) \dots\dots\dots (3.6.6)$$

Esta expresión permite determinar la fuerza magnetomotriz en el espacio y en el tiempo. Si se fija la posición, es decir, el ángulo θ es constante, la ecuación 3.6.6 determina que en esa posición la fuerza magnetomotriz varía sinusoidalmente en el tiempo. Si se congela el tiempo en un instante determinado, la expresión 3.6.6 determina una distribución sinusoidal de la fuerza magnetomotriz en el espacio. La ecuación 3.6.6 demuestra que en una máquina eléctrica trifásica, alimentada por

tres corrientes balanceadas y desfasadas $\frac{2\pi}{3}$ en el tiempo produce un campo magnético rotatorio similar al producido por dos devanados ortogonales a los cuales se les inyecten corrientes sinusoidales desfasadas $\frac{\pi}{2}$.

3.7 Ecuaciones de las tensiones del devanado del estator y rotor (Fem.)

Si Φ_M = La componente fundamental del flujo del entrehierro o flujo mutuo y E_2 = Los volts por fase del estator inducidos por el flujo del entrehierro, E_R = Los volts inducidos por el flujo del entrehierro en cada fase del embobinado del rotor con el rotor en el punto de reposo θ .

$$E_2 = \frac{4.44fk_{w_1}N_{ph1}\phi_M}{a_1} \dots\dots\dots(3.7.1)$$

y

$$E_r = \frac{4.44fk_{w_2}N_{ph2}\phi_M}{a_2} \dots\dots\dots(3.7.2)$$

Donde N_{ph1} y N_{ph2} son el número de vueltas en los embobinados del estator y del rotor y a_1 y a_2 son el número correspondiente de las trayectorias de la corriente. También k_{w2} y k_{w1} son factores de pendiente y holgura respectivamente. La relación de transformación es:

$$b = \frac{E_2}{E_r} = \frac{k_{w1}N_{ph1}a_2}{k_{w2}N_{ph2}a_1} \dots\dots\dots(3.7.3)$$

Si los anillos deslizantes del rotor están conectados a tres resistencias iguales como se muestra en la figura 3.8.1(a), y se evita que el rotor gire, entonces la operación es la de un transformador trifásico. Con el rotor en el punto de reposo el flujo gira con una velocidad sincrónica relativa tanto al estator y al rotor. Consecuentemente, la frecuencia de la Fem inducida del rotor es la misma que la frecuencia del estator en el punto de reposo.

3.8 Ecuación de la F. m. m.

La figura 3.8.1 muestra un toroide con la forma de cilindro hueco con un embobinado uniformemente distribuido de N vueltas que conduce una corriente prácticamente constante de i amperes.

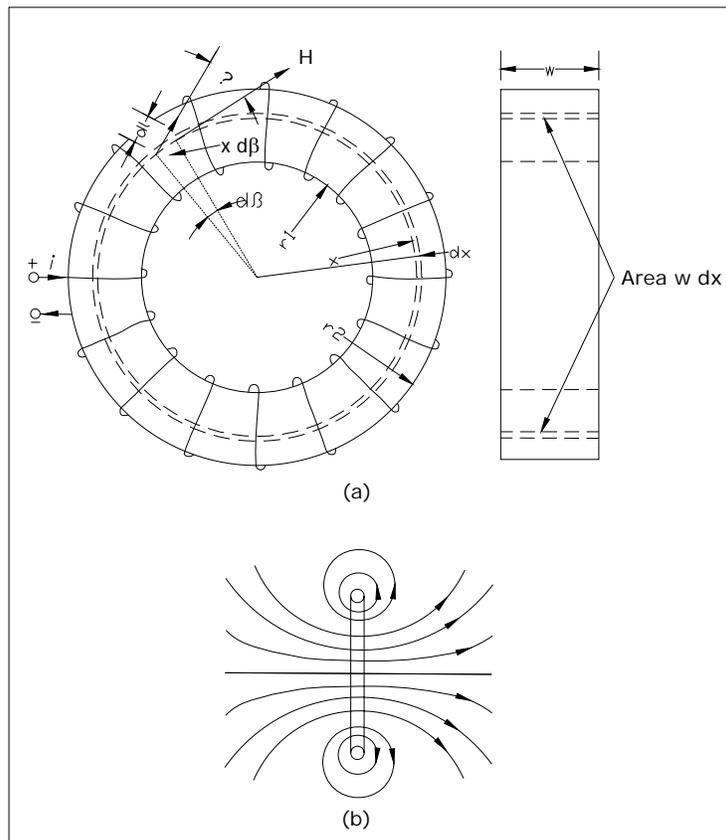


Figura 3.8.1 (a) Toroide con un embobinado que conduce corriente. (b) Líneas de flujo magnético de un anillo de corriente rectangular.

Si el número de vueltas N es grande, las líneas de flujo magnético producidas por la corriente son círculos concéntricos confinados al toroide. Esto es evidente de la dirección de las líneas de flujo a través del plano de un anillo rectangular que conduce corriente, como se ilustra en la figura 3.8.1 (b). Cuando se aplica la ley de los circuitos de Ampere a la trayectoria circular del radio x , y espesor dx en la figura 3.8.1(a), la fuerza magnetomotriz o F_{mm} es:

$$\mathcal{F} = \oint \mathbf{H} * d\mathbf{l} = Ni \text{ (ampere vueltas)} \dots \dots \dots (3.8.1)$$

3.9 Diagrama de las tensiones y corrientes

Los circuitos equivalentes representan una fase y se aplican a los motores de inducción polifásica con rotores jaula de ardilla, así como a los motores de inducción polifásica de rotores devanados, ya que todas las cantidades están referidas al enbobinado del estator. El diagrama de fasores para el motor de inducción polifásica, debido a sus características de motor, es el mismo que el de transformador. El siguiente diagrama de fasores se basa en el circuito equivalente. Este diagrama se presenta en la figura 3.9.1.

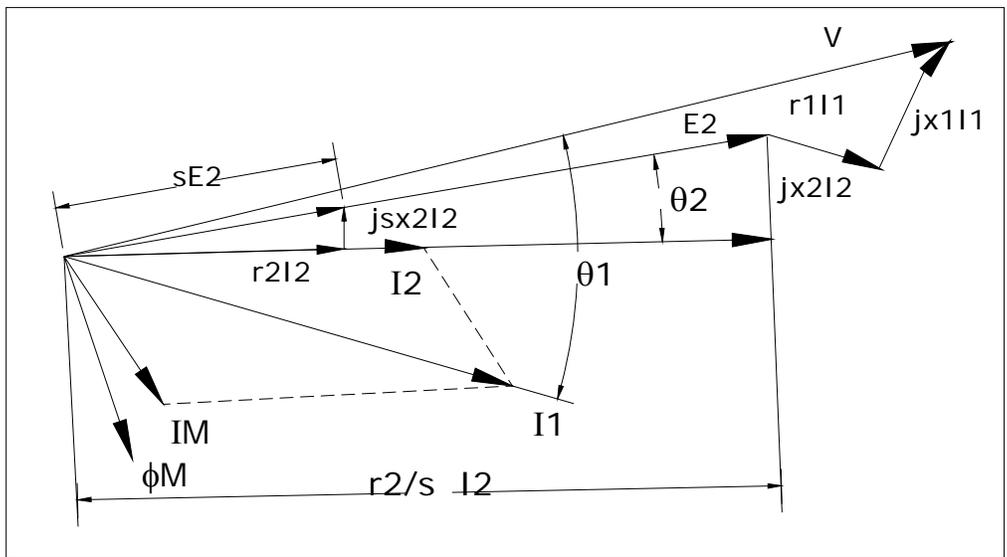


Figura 3.9.1 Diagrama de fasores para el motor de inducción polifásico

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN ANALÍTICA Y GRÁFICA DE LAS CARACTERÍSTICAS ELECTROMAGNÉTICAS DE LAS MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

4.1 Regímenes de funcionamiento

Ecuaciones de funcionamiento del motor.

Considerando, según la figura 4.1.1, un inductor con tres devanados numerados 1, 2, 3, de p pares de polos, recorridos por corrientes trifásicas de pulsación ω y un rotor que gira a la velocidad ω_r . Definamos de nuevo el deslizamiento g de tal forma que:

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad \text{de donde} \quad \omega_r = (1 - g) \frac{\omega}{p} \dots\dots\dots (4.1.1)$$

Siendo $\omega_s = \omega/p$ la velocidad de sincronismo.

El rotor posee tres devanados con p pares de polos que se designaran por a, b, c y el eje de la fase a forma con la fase 1 del estator el ángulo $(1 - g) \omega_t / p$, a condición de que se haya elegido oportunamente el origen de tiempos.

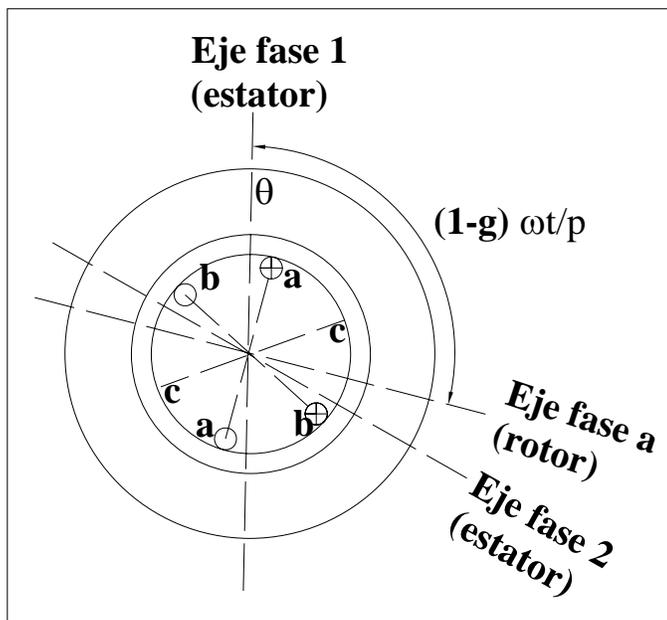


Figura 4.1.1 Inductor con tres devanados.

4.2 Corrientes en los devanados del rotor y estator

Precisemos que llamamos ζ_s la inductancia propia de uno de los devanados del estator, ξ_s la inductancia mutua entre dos de estos devanados, de tal forma que la autoinductancia cíclica del estator es:

$$L_s = \zeta_s - \xi_s \dots\dots\dots (4.2.2)$$

De igual forma se pueden definir para el rotor las cantidades L_r , ζ_r , ξ_r , tales que:

$$L_r = \zeta_r - \xi_r \dots\dots\dots (4.2.3)$$

La corriente i_1 en la fase 1 del estator es tal que:

$$i_1 = I_m \cos(\omega t - \varphi) \dots\dots\dots (4.2.4)$$

La inducción debida a esta corriente en el entrehierro es este caso de la forma:

$$b_s = 3K I_m/2 \cos(\omega t - \varphi - p\theta) \dots\dots\dots(4.2.5)$$

El campo giratorio correspondiente gira a la velocidad ω con relación al estator y a la velocidad $\omega_s - \omega_r$ respecto al rotor (siendo $\omega_s - \omega_r = g\omega/p$) por lo tanto induce en las tres fases a, b y c del rotor, fuerza electromotrices trifásicas equilibradas directas de pulsación $g\omega$, y estas crean, en los devanados del rotor, tres corrientes i_a , i_b , i_c , trifásicas equilibradas directas de pulsación $g\omega$. Sea:

$$i_a = i_m \cos(g\omega t - \psi) \dots\dots\dots(4.2.6)$$

Estas corrientes engendran, en el entrehierro, un campo giratorio b_r , de amplitud $3ki_m/2$ girando, con relación al rotor, a la velocidad $g\omega/p$ en el orden de las fases a, b y c. con relación al estator,

su velocidad es igual a la suma de su velocidad respecto al rotor y de la velocidad del rotor respecto al estator, o sea ω/p .

Como además el eje del campo pasa por el eje de la fase “a” cuando la corriente de esta es máxima, podemos escribir:

$$b_r = 3K i_m/2 \cos(\omega t - \psi - p\theta) \dots\dots\dots(4.2.7)$$

El flujo de inducción b_s a través de la fase 1 del estator, es el flujo de inducción cíclica, por consiguiente el flujo de $b_r = 3K i_m/2 \cos (\omega t - \psi - p\theta)$ a través del devanado 1 es tal que:

$$\phi_{1s} = L_s I_m/2 \cos(\omega t - \phi) \dots\dots\dots(4.2.8)$$

De ello deducimos que el flujo de inducción $b_r = 3K i_m/2 \cos (\omega t - \psi - p\theta)$ a través del mismo devanado es:

$$\phi_{1r} = L_s k/K i_m \cos(\omega t - \psi) \dots\dots\dots(4.2.9)$$

ya que b_s y b_r solo difieren uno del otro en su amplitud y fase.

De la misma forma, el flujo giratorio $b_r = 3K i_m/2 \cos (\omega t - \psi - p\theta)$ a través de la fase “a” del secundario puede estar expresado en función de la autoinducción cíclica L_r de éste:

$$\phi_{ar} = L_r i_m \cos(g\omega t - \psi) \dots\dots\dots(4.2.10)$$

de ello se deduce que el flujo, a través del mismo devanado, del campo giratorio

$$b_s = 3K I_m/2 \cos(\omega t - \phi - p\theta) \dots\dots\dots(4.2.11)$$

que no difiere del anterior mas que por la amplitud y la fase, debe ser:

$$\phi_{as} = L_r K/k I_m \cos(g\omega t - \phi) \dots \dots \dots (4.2.12)$$

Estas consideraciones permiten escribir las ecuaciones de funcionamiento de los devanados del rotor y estator. Si, en efecto, los devanados del rotor están en cortocircuito y si $I_1 i_1$ y $I_2 i_2$ son respectivamente los flujos a través de las fases 1 del estator y “a” del rotor que no pasan por el entrehierro (fugas), se tiene:

$$v(t) = \left[R + (l_1 + L_s) \frac{d}{dt} \right] l_m \cos(\omega t - \phi) + L_s \frac{k}{K} \frac{d}{dt} [i_m \cos(\omega t - \psi)] \dots \dots (4.2.13)$$

$$0 = \left[r_2 + (l_2 + L_r) \frac{d}{dt} \right] l_m \cos(g\omega t - \psi) + L_r \frac{k}{K} \frac{d}{dt} [i_m \cos(g\omega t - \phi)] \dots \dots (4.2.14)$$

Siendo R y r_2 las resistencias respectivas de una fase del estator y del rotor.

Puede representarse $\cos(\omega t - \phi)$ por $\frac{e^{j(\omega t - \phi)}}{\sqrt{2}}$ y $\cos(g\omega t - \phi)$ por $\frac{e^{j(g\omega t - \phi)}}{\sqrt{2}}$

y poner : $\bar{I}_1 = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\omega t - \phi)}$ $\bar{I}_a = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\omega t - \psi)}$ (4.2.15)

$\frac{d}{dt} [l_m \cos(g\omega t - \psi)]$ estará entonces representada por

$$jg\omega \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\omega t - \psi)} = jg\omega \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\omega t - \psi)} e^{-j(1-g)\omega t} = jg\omega \bar{I}_1 e^{-j(1-g)\omega t} \dots \dots \dots (4.2.16)$$

$i_m \cos(g\omega t - \psi)$ Estará representada por:

$$\frac{i_m}{\sqrt{2}} e^{j(\omega t - \psi)} = \bar{I}_2 e^{-j(1-g)\omega t}, \dots \dots \dots (4.2.17)$$

y $\frac{d}{dt} [i_m \cos(\omega t - \psi)]$ por $jg\omega \frac{i_m}{\sqrt{2}} e^{j(g\omega t - \psi)}$,

Que puede escribirse: $\bar{I}_2 e^{-j(1-g)\omega t}$; de donde las ecuaciones de funcionamiento cuando se representa $v(t)$ por \bar{V} :

$$\bar{V} = [R + j(l_1 + L_s)\omega] \bar{I}_1 + jL_s\omega \frac{k}{K} \bar{I}_2, \dots\dots\dots (4.2.18)$$

$$0 = e^{-j(1-g)\omega t} \left\{ [r_2 + jg\omega(l_2' + L_r)] \bar{I}_2 + jg\omega L_r \frac{K}{k} \bar{I}_1 \right\} \dots\dots\dots (4.2.19)$$

Se puede poner $\bar{I}_2 = \frac{k}{K} \bar{I}_2'$ y multiplicar todos los términos de la segunda ecuación por $\frac{L_s k}{L_r K g}$ lo

que da, luego de haber puesto $\frac{L_s}{L_r} (r_2 + jg\omega l_2') = R_2 + jg\omega l_2$:

$$\bar{V} = (R_1 + j\omega l_1) \bar{I}_1 + j\omega L_s (\bar{I}_1 + \bar{I}_2),$$

$$0 = \left(\frac{R_2}{g} + j\omega l_2 \right) \bar{I}_2 + j\omega L_s (\bar{I}_1 + \bar{I}_2). \dots\dots\dots (4.2.20)$$

Se observa que el término $\frac{r_2 i_m^2}{2}$ representa las perdidas por el efecto Joule en una fase del secundario. De ello resulta que $R_2 I_2^2$ represente la misma magnitud. En efecto:

$$R_2 I_2^2 = \frac{L_s}{L_r} \left(\frac{k}{K} \right)^2 r_2 I_2'^2; \dots\dots\dots (4.2.21)$$

Ahora bien $L_r K/k$ y $L_s k/K$, aparecen como la inductancia mutua entre una fase del estator y una fase del rotor, por lo tanto, son iguales. Esto supone:

$$R_2 I_2^2 = r_2 I_2'^2; \dots\dots\dots (4.2.22)$$

4.3 Momento electromagnético

Cálculo del momento

Considerando nuevamente el esquema equivalente de la figura 4.1.1, para un determinado valor de g , podemos calcular los valores de $I_1, I_2, R_1 I_1^2$. La potencia total suministrada al motor, igual a

$3\left(R_1 I_1^2 + \frac{R_2}{g} I_2^2\right)$ es proporcional a la ordenada del punto P_g en el diagrama de admitancia.

Sabemos que $R_1 I_1^2$ y $R_2 I_2^2$ son pérdidas por el efecto joule por fase respectivamente en el estator y en el rotor. La diferencia entre la potencia suministrada al motor y las pérdidas producidas, representa la potencia transformada en potencia mecánica. Esta última es, por lo tanto igual a

$3R_2 I_2^2 \left(\frac{1}{g} - 1\right)$. Si Γ es el momento respecto al eje y ω/p la velocidad de sincronismo, la

velocidad del eje es entonces $\frac{\omega}{p}(1 - g)$ y la potencia eléctrica transformada en potencia mecánica

es en este caso:

$$3R_2 I_2^2 \left(\frac{1}{g} - 1\right) = \Gamma \frac{\omega}{p} (1 - g) \dots\dots\dots(4.3.1)$$

de donde $\Gamma = 3p \frac{R_2 I_2^2}{g\omega}$

Por lo tanto, puede concebirse la transmisión de energía en el motor, como sigue. La red suministra la potencia $3 V I_1 \cos \phi$; de esta potencia, una parte, $3R_1 I_1^2$ se pierde por el efecto joule en el estator, mientras que el resto, $\frac{3R_2}{g} I_2^2$, se transmite al rotor. La potencia perdida por el efecto joule en el rotor es igual a g veces esta cantidad y la potencia útil P_u en el eje tendrá por valor:

$$P_U = (1 - g)\Gamma \frac{\omega}{p} = \frac{3R_2 I_2^2}{g} (1 - g) \dots \dots \dots (4.3.2)$$

El momento Γ aparece como el cociente entre dos magnitudes: la potencia transmitida al rotor y la velocidad de sincronismo. En efecto, es proporcional a la potencia transmitida al rotor, es decir, es la diferencia entre una magnitud proporcional a la ordenada de P_g y una magnitud proporcional a $|OP_g|^2$. Según la teoría general, que hemos admitido como conocida, resulta que es proporcional a la distancia del punto P_g a una recta llamada “recta de los momentos”. Siendo el momento necesariamente nulo $g=0$ y $g = \infty$, la recta de los momentos está definida por los puntos P_0 y P_∞ .

4.4 Potencia Activa y Reactiva

Una corriente alterna de frecuencia constante expresada por $i = \sqrt{2}I \sin \omega t$ induce una Fem en un circuito que tiene una inductancia constante de L henries de

$$e = L \frac{di}{dt} = \sqrt{2}LI \cos \omega t \dots \dots \dots (4.4.1)$$

$$= \sqrt{2}XI \cos \omega t$$

Donde I es el valor rms de la corriente y $X = \omega L$ la reactancia inductiva en ohms. El valor rms del voltaje inducido es:

$$E = XI \dots \dots \dots (4.4.2)$$

Y cuando en la ecuación anterior se sustituye, tenemos;

$$e = \sqrt{2}E \cos \omega t \dots \dots \dots (4.4.3)$$

La corriente y el voltaje expresado por las ecuaciones anteriores son senoidales del mismo periodo o de la misma frecuencia, con la onda de corriente atrasada respecto a la onda de voltaje por 90°.

Debido a que la potencia real en circuitos de c-a, bajo condiciones estables a frecuencia constante, es el promedio de la potencia instantánea tomada sobre uno o más medios ciclos, la potencia real asociada con las ondas de corriente y voltaje anteriormente mencionadas es cero, es decir,

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e i d(\omega t) = 0 \dots\dots\dots (4.4.4)$$

También se expresa la potencia real como;

$$P = EI \cos \theta \dots\dots\dots (4.4.5)$$

Donde θ es el ángulo entre la corriente I y el voltaje E. En un circuito puramente inductivo, $\theta=90^\circ$ y la potencia real es cero.

Sin embargo, se dice que un circuito inductivo consume potencia reactiva que se expresa:

$$Q = EI \sin \theta \dots\dots\dots(4.4.6)$$

Donde θ es el ángulo con que la corriente I esta atrasada respecto al voltaje E. Circuitos magnéticos excitados por corriente alterna consumen potencia reactiva, la potencia reactiva puede por lo tanto considerarse como requerida para la producción del flujo magnético. Por el otro lado, la corriente en circuitos capacitivos está adelantada con respecto al voltaje, causando que θ sea negativo, de donde se sigue que circuitos capacitivos generan potencia reactiva. Los capacitores se usan frecuentemente en sistemas de potencia industriales para proporcionar la potencia reactiva, un arreglo que también se conoce como corrección del factor de potencia.

4.5 Diagrama de círculo

El circuito equivalente de la máquina de inducción es una herramienta eficaz y eficiente para la evaluación de su comportamiento en cualquier punto de operación. Hoy en día se disponen de calculadoras y computadores de gran capacidad, potentes y rápidos que facilitan la aplicación de este modelo en el análisis práctico y profesional de la máquina de inducción. Sin embargo, hace algunos años estas herramientas no estaban disponibles, o su costo no justificaba su aplicación en cálculos rutinarios. Por este motivo se desarrolló el método del diagrama de círculo, como herramienta de cálculo geométrico. Los lugares geométricos reducen el número de operaciones aritméticas con variables complejas y permiten visualizar en un sólo gráfico gran cantidad de información sobre el comportamiento de la máquina de inducción en todo su rango operativo. Actualmente se han eliminado completamente las dificultades de cálculo que existían en el pasado y podría parecer innecesario el uso del diagrama de círculo. Sin embargo, la posibilidad de visualizar en el mismo gráfico, todas las corrientes posibles, sus correspondientes deslizamientos, pares y potencias, ofrece a esta herramienta un respetable interés para incrementar la comprensión del modelo de la máquina y relaciones causa-efecto existente entre las diferentes variables.

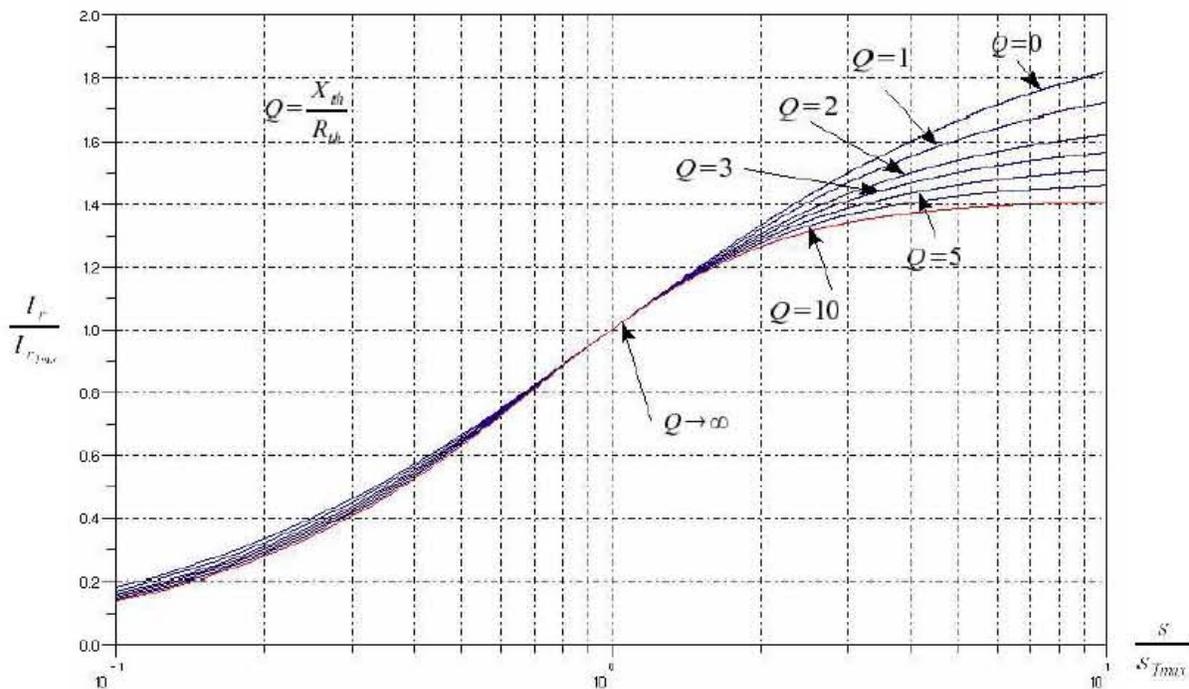


Figura 4.5.1. Corriente normalizada del rotor de la máquina de inducción.

El diagrama de círculo permite el análisis cuantitativo del comportamiento de la máquina de inducción interpretando racionalmente sus principales características y como estas son afectadas por variaciones en los parámetros o en la fuente de alimentación. El diagrama de círculo de la máquina de inducción es el lugar geométrico del fasor corriente del estator I_e , utilizando como parámetro el deslizamiento s . En estricta teoría, el lugar geométrico de las corrientes del estator no es un círculo exacto, aun cuando la diferencia con esta figura es muy reducida en la práctica. Por otra parte, el lugar geométrico de la corriente del rotor I_r representa un círculo matemáticamente preciso cuando se representa en el plano este fasor para todos los posibles deslizamientos de la máquina de inducción.

A partir del equivalente de Thèvenin desarrollado en la figura 4.5.2, se obtiene la corriente del rotor I_r como:

$$I_r = \frac{V_{th}}{Z_{th} + \frac{R_r}{s}} = \frac{V_{th}}{Z_{th} + \frac{R_r}{s} + jX_{th}} = \frac{V_{th}}{|Z(s) \angle \phi_r(s)|} = \frac{V_{th}}{X_{th}} \text{sen}(\phi_r(s)) \angle -\phi_r(s) \dots \dots \dots (4.5.1)$$

La expresión 4.5.1 se expresa en coordenadas de la siguiente forma:

$$I_r = I_{r\text{Re}} + jI_{r\text{Im}} = \frac{V_{th}}{X_{th}} [\text{sen}(\phi_r(s))\text{cos}(\phi_r(s)) - j\text{sen}^2(\phi_r(s))] \dots \dots \dots (4.5.2)$$

Multiplicando la corriente I_r por su conjugada se obtiene:

$$|I_r|^2 = I_{r\text{Re}}^2 + I_{r\text{Im}}^2 = \frac{V_{th}^2}{X_{th}^2} \text{sen}^2(\phi_r(s)) \dots \dots \dots (4.5.3)$$

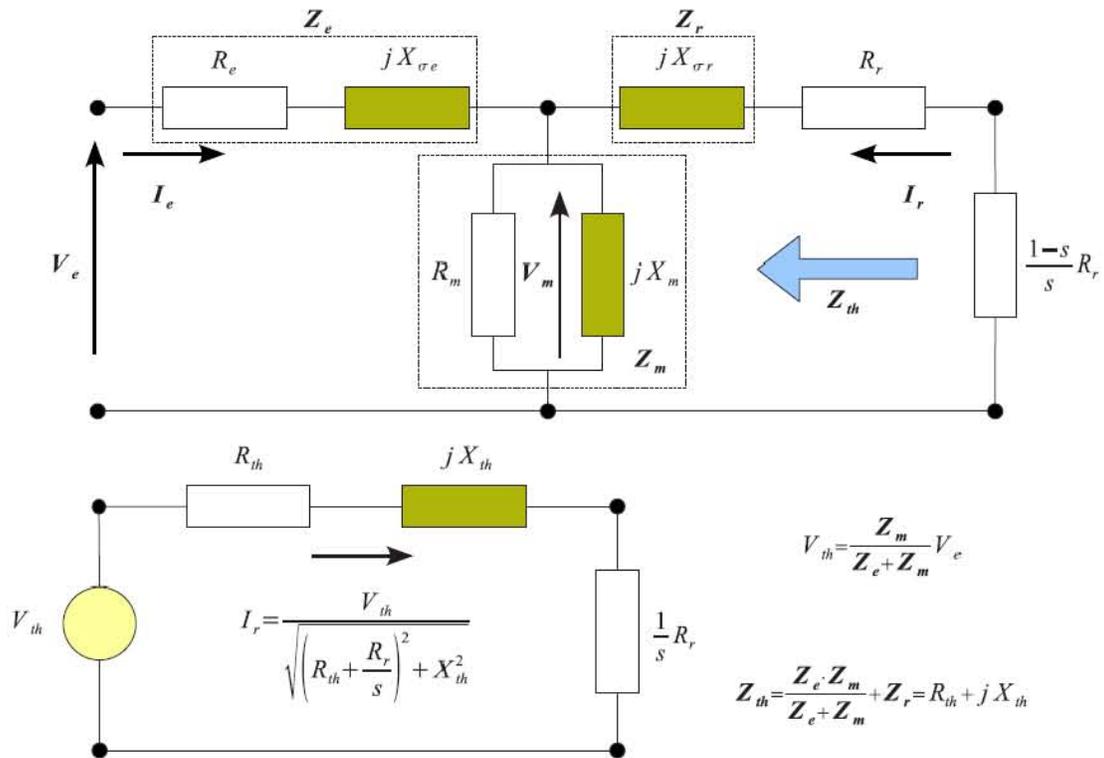


Figura 4.5.2: Equivalente de Thèvenin de la máquina de inducción visto desde el rotor.

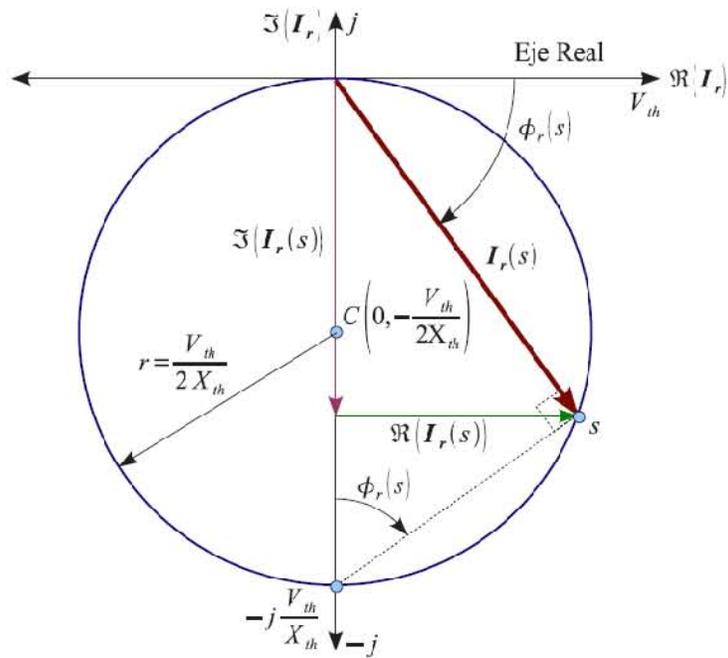


Figura 4.5.3: Lugar geométrico de la corriente del rotor.

En el origen de coordenadas de este diagrama, el deslizamiento de la máquina de inducción corresponde a la condición de vacío $s = 0$. Para este deslizamiento el modelo de carga resistiva que representa la potencia transferida al eje, tiende a infinito y la corriente que circula por el rotor es cero.

El punto diametralmente opuesto al de vacío en la figura 6.19 corresponde a la máxima corriente del rotor. La máxima corriente se obtiene cuando la máquina opera en un deslizamiento para el cual la parte resistiva de la impedancia es cero. En esta condición la impedancia es igual a la reactancia de Thèvenin X_{th} :

$$Z(I_{r \max}) = R_{th} + \frac{R_r}{s} + jX_{th} = jX_{th} \Rightarrow sI_{r \max} = \frac{R_r}{R_{th}} \dots\dots\dots(4.5.4)$$

En el deslizamiento correspondiente al rotor bloqueado $s = 1$, la reactancia de Thèvenin es mayor que la suma de la resistencia de Thèvenin y la resistencia de la carga. En este deslizamiento, la corriente del rotor referida al estator es en magnitud muy parecida a la corriente máxima y su ángulo también es cercano, pero inferior a 90° . Para los deslizamientos positivos, el fasor corriente en la figura 6.19 debe estar en el cuarto cuadrante del diagrama. En este cuadrante las potencias activas y reactivas consumidas por la máquina son positivas.

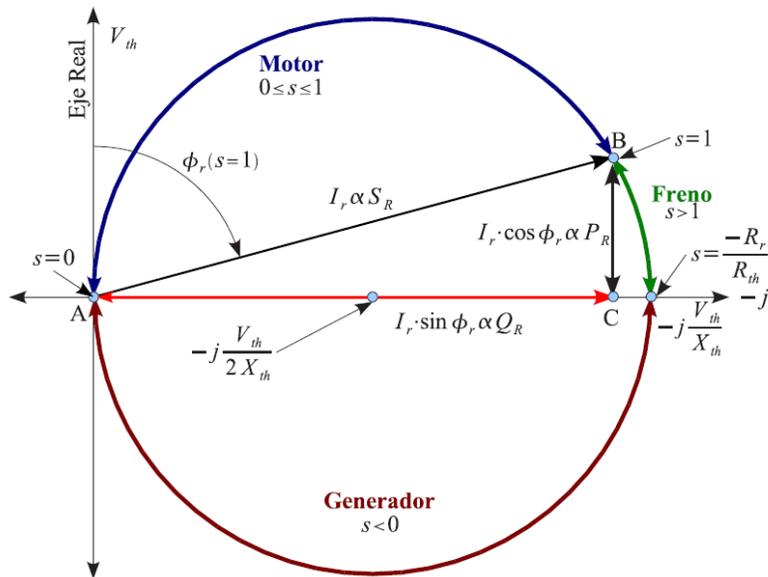


Figura 4.5.4: Representación de las potencias activas, reactivas y aparentes en el diagrama de círculo.

En el tercer cuadrante, la potencia reactiva es negativa, pero la potencia activa es positiva. Todos los puntos de operación del lugar geométrico de la corriente del rotor consumen potencia reactiva inductiva. Esto se debe a la necesidad de alimentar desde el estator las fuerzas magnetomotrices de la máquina.

La potencia activa o reactiva en el diagrama de círculo se puede determinar trazando un segmento paralelo al eje real o imaginario respectivamente. Estos segmentos nacen en el corte con los ejes coordenados ortogonales y finalizan en el punto de operación deseado. Estos segmentos son proporcionales a cada una de las potencias activa o reactiva, y la constante de proporcionalidad que permite el cálculo cuantitativo es el valor de la tensión de Thèvenin. La potencia aparente, por otra parte, es proporcional al módulo de la corriente del rotor referido al estator. De acuerdo con los puntos *A*, *B* y *C* definidos en la figura 4.5.4, las potencias aparente, activa y reactiva, para un punto cualquiera del círculo se obtienen de la siguiente forma:

$$S_R = \sqrt{3}V_{th}I_r = \sqrt{3}V_{th} \cdot \overline{AB} \cdot \alpha \cdot \overline{AB} \quad \dots\dots\dots (4.5.5)$$

$$P_R = \sqrt{3}V_{th}I_r \cos \phi_r = \sqrt{3}V_{th} \cdot \overline{BC} \cdot \alpha \cdot \overline{BC} \quad \dots\dots\dots (4.5.6)$$

$$Q_R = \sqrt{3}V_{th}I_r \text{sen} \phi_r = \sqrt{3}V_{th} \cdot \overline{AC} \cdot \alpha \cdot \overline{AC} \quad \dots\dots\dots (4.5.7)$$

Las expresiones 4.5.5, 4.5.6 y 4.5.7 permiten calcular la potencia activa P_R , reactiva Q_R o aparente S_R de cualquier punto de operación de la máquina de inducción, midiendo la longitud de los segmentos correspondiente \overline{AB} , \overline{BC} ó \overline{AC} .

El segmento \overline{BC} de la figura 4.5.4 es proporcional a la potencia que entra a la máquina para el deslizamiento de rotor bloqueado $s = 1$. En esta condición de operación, toda la potencia que atraviesa el entrehierro se disipa en la resistencia del rotor R_r y en la resistencia de Thèvenin R_{th} . En cualquier otro punto de operación, el segmento es proporcional a la suma de las potencias disipadas en la resistencia de Thèvenin R_{th} , en la resistencia del rotor R_r y en la resistencia equivalente de la carga $\frac{1-s}{s} R_r$. De este análisis se pueden obtener las siguientes expresiones:

$$P_{Rr} = 3I_r^2 R_r \quad \dots\dots\dots (4.5.8)$$

$$P_{th} = 3I_r^2 R_{th} \quad \dots\dots\dots (4.5.9)$$

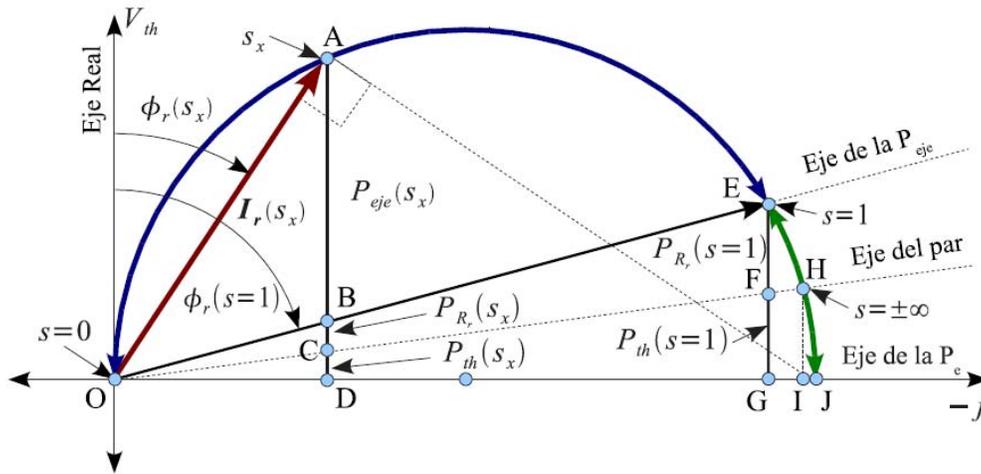


Figura 4.5.5: Balance de potencias en el diagrama de círculo.

$$p_{eje} = 3I_r^2 R_r \frac{1-s}{s} \dots\dots\dots (4.5.10)$$

De las expresiones 4.5.8, 4.5.9, y 4.5.10 se puede deducir las siguientes expresiones:

$$\frac{P_{Rr}}{P_{th}} = \frac{R_r}{R_{th}} \dots\dots\dots (4.5.11)$$

$$\frac{P_{eje}}{P_{th}} = \frac{R_r(1-s)}{s} \dots\dots\dots(4.5.12)$$

$$\frac{P_{eje}}{P_{rr}} = \frac{1-s}{s} \dots\dots\dots (4.5.13)$$

Las relaciones anteriores indican que las potencias se encuentran entre sí en la misma proporción que las resistencias donde disipan. Estas pérdidas pueden ser representadas en el diagrama de círculo. Para este fin es necesario determinar el punto correspondiente al deslizamiento infinito $s = \pm\infty$. En este punto, toda la potencia se disipa en la resistencia de Thèvenin. Con el rotor bloqueado $s = 1$, la potencia se reparte entre la resistencia del rotor y la resistencia de Thèvenin en la proporción de estas resistencias, según se demuestra en la ecuación 4.5.11

De la semejanza de los triángulos $\Delta \overline{OBC}$ y $\Delta \overline{OEG}$ en la figura 6.21 se establecen las siguientes proporciones:

$$\frac{\overline{BD}}{\overline{EG}} = \frac{\overline{OD}}{\overline{OG}} = \frac{\overline{OA}}{\overline{OE}} \cdot \frac{\text{sen}(\phi_r(s_x))}{\text{sen}(\phi_r(s=1))} \dots\dots\dots (4.5.14)$$

$$\overline{OA} = \overline{OJ} \cdot \text{sen}(\phi_r(s_x)) \dots\dots\dots (4.5.15)$$

$$\overline{OE} = \overline{OJ} \cdot \text{sen}(\phi_r(s=1)) \dots\dots\dots (4.5.16)$$

Sustituyendo las relaciones 4.5.15 y 4.5.16 en la proporción 4.5.14, reemplazando cada segmento que representa una corriente en el diagrama por su correspondiente valor, y multiplicando el numerador y el denominador por la resistencia de Thèvenin más la resistencia del rotor $R_{th} + R_r$, se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{\overline{BD}}{\overline{EG}} = \left(\frac{\overline{OA}}{\overline{OE}} \right)^2 = \frac{I_r^2(s_x) \cdot (R_{th} + R_r)}{I_r^2(s=1) \cdot (R_{th} + R_r)} = \frac{P_{th+R_r}(s_x)}{P_{th+R_r}(s=1)} \dots\dots\dots (4.5.17)$$

Mediante la expresión 4.5.17 se demuestra que la proporción entre los segmentos \overline{BD} y \overline{EG} del diagrama de círculo es igual a la relación entre las potencias de pérdidas en los conductores de la máquina en las dos condiciones de operación indicadas. En la condición de rotor bloqueado, toda la potencia se consume en pérdidas en la resistencia de Thèvenin y en la resistencia del rotor.

En cualquier otro deslizamiento, el segmento \overline{BD} es proporcional a estas mismas pérdidas. De igual forma se demuestra que el segmento \overline{CD} es proporcional a las pérdidas en la resistencia de Thèvenin. La proporcionalidad de los diferentes segmentos del diagrama de círculo para un deslizamiento determinado es:

- \overline{AD} a la potencia de entrada P_e
- \overline{CD} a las pérdidas en R_{th}
- \overline{BC} a las perdidas en R_r
- \overline{BD} a las perdidas totales P_{ptot} .
- \overline{AB} a la potencia en el eje P_{eje} .
- \overline{AC} a la potencia $\frac{P_{Rr}}{s}$ y al par eléctrico T_e .

La recta que pasa por el origen de coordenadas y por el punto $s = 1$ se denomina eje de la potencia mecánica, debido a que cualquier segmento paralelo al eje real, con un extremo en un punto de operación localizado sobre el círculo y su otro extremo sobre este eje, es proporcional a la potencia en el eje de la máquina. De igual forma, la recta que pasa por el origen de coordenadas y por el punto correspondiente a deslizamiento $s = \pm\infty$ se denomina eje del par eléctrico. Para determinar el deslizamiento de un punto del diagrama de círculo es posible utilizar diferentes metodologías. La forma más simple puede ser despejar el deslizamiento de la expresión 6.105:

$$s_x = \frac{P_{Rr}(s_x)}{P_{eje}(s_x) + P_{Rr}(s_x)} = \frac{\overline{BC}}{\overline{AB} + \overline{BC}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}} \dots\dots\dots (4.5.18)$$

Este método tiene dos inconvenientes, por una parte la dificultad práctica para medir deslizamientos cercanos a cero, y por otra el procedimiento es poco gráfico debido a que requiere operaciones aritméticas para determinar el deslizamiento s_x en cada punto de operación. Un método práctico para resolver estos problemas consiste en trazar la recta del deslizamiento. Este método se fundamenta en trazar en el diagrama de círculo, una recta paralela al eje del par o eje del deslizamiento infinito $s = \pm\infty$. Esta recta se traza a una distancia arbitraria de este eje, pero con la condición de que el eje de la potencia mecánica $s = 1$ la corte en un punto dentro del área de trabajo. Esta construcción se muestra en la figura 4.5.6 La proporción entre el segmento \overline{AB} y \overline{AJ} determina el deslizamiento del punto de operación considerado. Si al segmento se le asigna un valor unitario, automáticamente el segmento indica el valor del deslizamiento. Para demostrar esta aseveración se utiliza la semejanza existente entre los triángulos $\Delta \overline{ACE}$ y $\Delta \overline{OAB}$ de la figura 4.5.6. Estos triángulos son semejantes, y por este motivo:

$$\frac{\overline{CE}}{\overline{EO}} = \frac{\overline{OA}}{\overline{AB}} \dots\dots\dots (4.5.19)$$

Los triángulos $\Delta \overline{ODE}$ y $\Delta \overline{OAJ}$ también son semejantes, y se puede establecer la siguiente proporción:

obtiene el par o la potencia mecánica máxima, es necesario encontrar las rectas tangentes al círculo y paralelas a los ejes de par o potencia respectivamente. En la figura 6.23 se presenta el procedimiento de cálculo gráfico para la determinación de estos puntos.

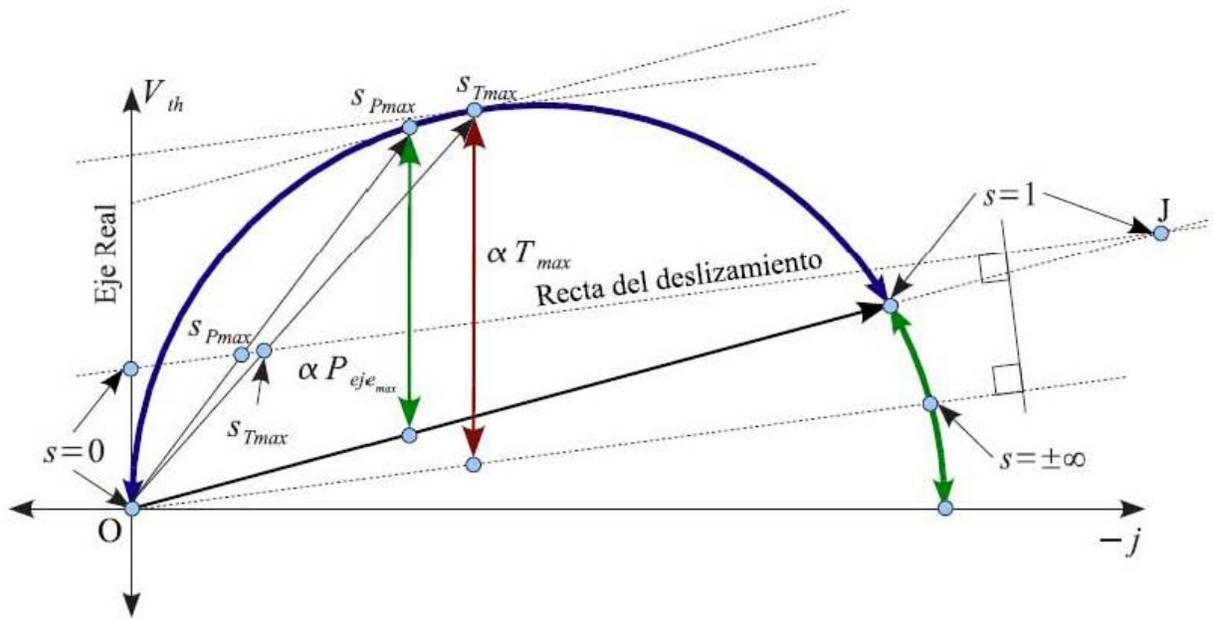


Figura 4.5.7: Determinación de los puntos de par máximo y potencia máxima con el diagrama de círculo.

El diagrama de círculo contiene toda la información referente a los modos de operación como motor, generador y freno. La idea fundamental que permite utilizar la información del diagrama de círculo en todo el rango de deslizamiento, consiste en que además de medir la longitud de los segmentos, se debe interpretar su signo. Si un segmento representa potencia eléctrica de entrada y está por debajo del eje imaginario, esta potencia es negativa y la máquina entrega potencia eléctrica a la red. Si al determinar un deslizamiento, el punto aparece a la izquierda del origen, es una indicación de que la máquina opera con deslizamiento negativo. En la figura 4.5.4 se han indicado las zonas de operación en el diagrama de círculo.

El diagrama de círculo obtenido representa solamente el lugar geométrico de las corrientes del rotor. Esta corriente suministra una gran cantidad de información sobre la operación de la máquina pero no es accesible para ser medida directamente. La máquina se alimenta por el estator, y esta corriente es la que el usuario puede medir. Para obtener el lugar geométrico de la

corriente del estator $I_e(s)$ es necesario sumar a la corriente del rotor $I_r(s)$, la corriente de magnetización $I_m(s)$. Este lugar geométrico es un círculo aproximado, debido a que aun cuando la corriente de magnetización depende del deslizamiento, es prácticamente constante para un rango muy amplio de deslizamientos. De esta forma se puede utilizar para la construcción del diagrama de círculo completo un circuito equivalente en el cual la corriente del rotor se modela mediante el equivalente de Thèvenin que se ha venido utilizando, pero que en paralelo con la tensión de Thèvenin se añade la rama de magnetización.

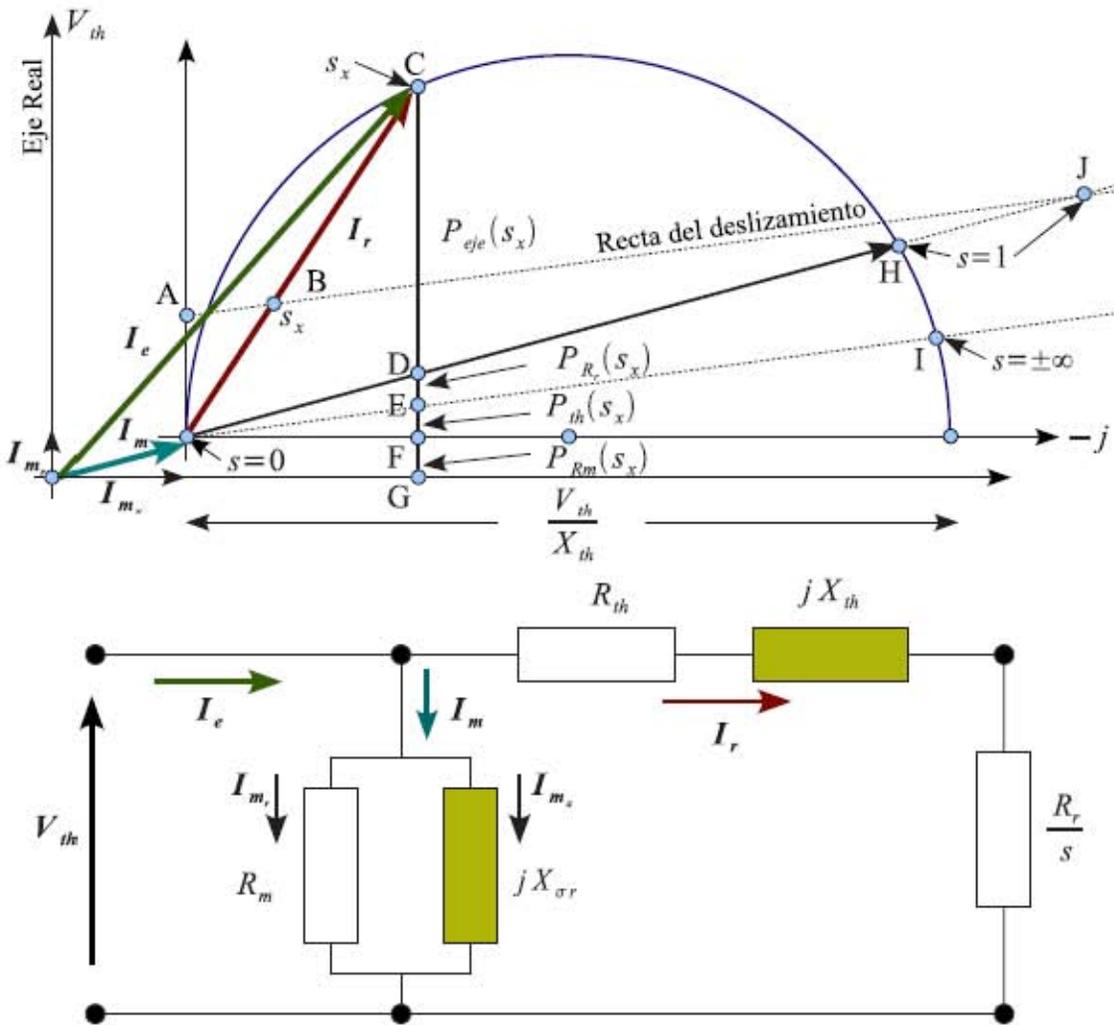


Figura 4.5.8: Diagrama de círculo de la corriente del estator y su modelo equivalente.

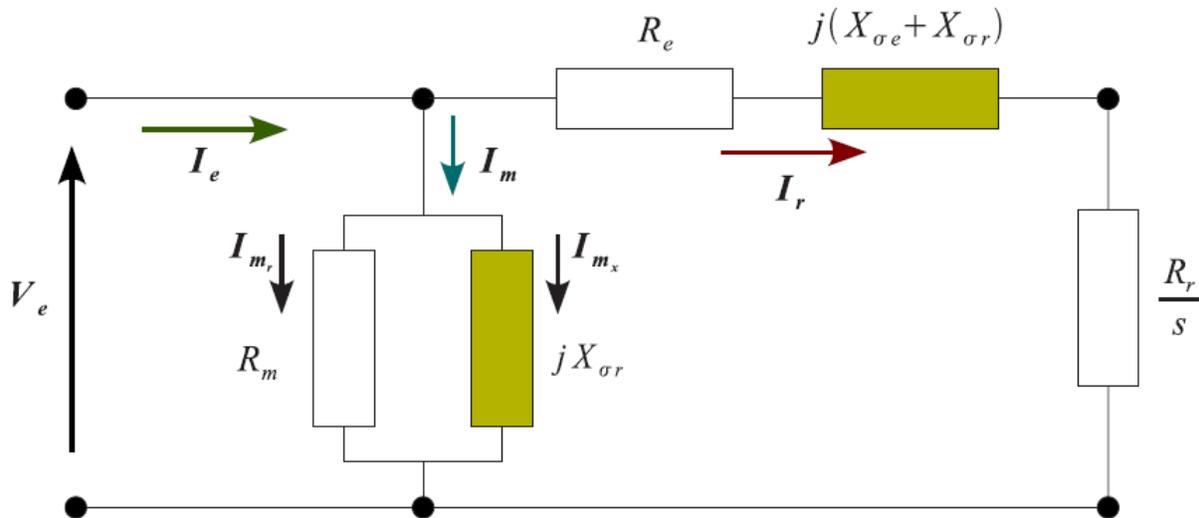


Figura 4.5.9: Circuito de Thèvenin aproximado de la máquina de inducción.

En la figura 4.5.8 se muestra este circuito y el diagrama de círculo que se obtiene cuando se suman la corriente de magnetización y la corriente del rotor. En esta figura el segmento \overline{FG} representa las pérdidas en el hierro de la máquina. Es necesario recordar que los equivalentes de Thèvenin no son conservativos en potencia porque la potencia no es una característica lineal del circuito. Por esta razón la resistencia de Thèvenin no incluye la información sobre las pérdidas en el hierro. Este circuito tiene un comportamiento similar al del modelo clásico en lo que respecta a las potencias. Cuando se coloca la rama de magnetización delante de la resistencia y reactancia de dispersión del estator se obtiene un circuito equivalente aproximado, semejante al circuito de Thèvenin presentado en la figura 4.5.8. Este circuito se puede determinar de una forma más simple y los resultados obtenidos con él no difieren significativamente del modelo clásico de la máquina. El circuito aproximado, simplifica el cálculo de la tensión e impedancia de Thèvenin. En su lugar se utiliza directamente la tensión de alimentación, y la resistencia y reactancia de dispersión de la máquina. En la figura 4.5.9 se ha representado el circuito de Thèvenin aproximado de la máquina.

En la figura 4.5.10 se presenta una comparación entre los lugares geométricos de la corriente del estator utilizando el circuito de Thèvenin, el circuito de Thèvenin aproximado y el modelo clásico de la máquina de inducción. Es necesario recordar que en el modelo clásico la corriente del estator no es un círculo exacto, pero se aproxima muy estrechamente para casi todos los deslizamientos.

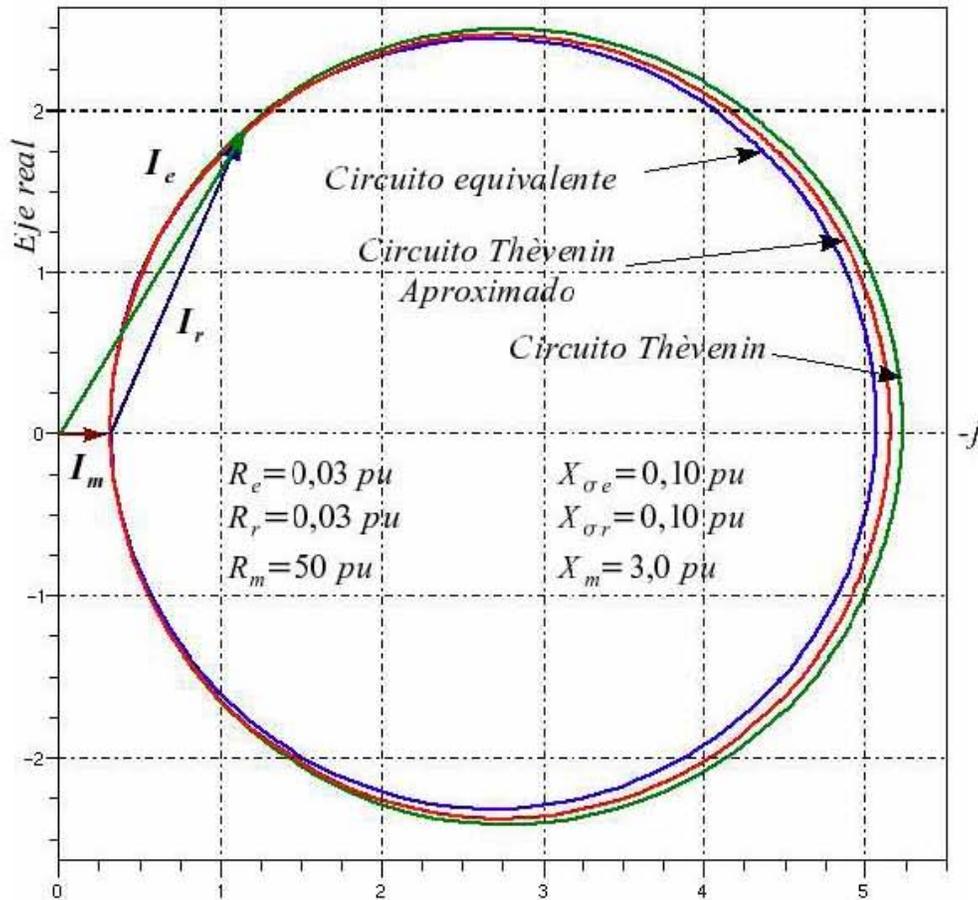


Figura 4.5.10: Comparación entre los diagramas de círculo utilizando el circuito Thèvenin, el circuito de Thèvenin aproximado y el circuito equivalente completo.

En esta figura se observa que para deslizamientos cercanos al punto nominal, la correspondencia entre los dos circuitos es prácticamente perfecta. Sin embargo, cuando los deslizamientos son grandes, los errores se acrecientan. Esto se debe a que a valores del deslizamiento grandes, la corriente resulta ser varias veces su valor nominal y produce caídas importantes en las reactancias de dispersión. Por esta razón, la tensión en la rama magnetizante es menor y la corriente de magnetización también es más pequeña. El circuito equivalente reducido por Thèvenin considera que la tensión V_{th} alimenta a la rama de magnetización para todos los deslizamientos, y por esta razón este modelo determina corrientes ligeramente mayores que el circuito clásico. La diferencia entre estos diagramas no excede en la práctica la mitad de la corriente de vacío de la máquina, debido a que la reactancias de dispersión del estator y rotor son aproximadamente iguales. Con estas corrientes circulando por las bobinas del estator y rotor de la máquina, la tensión en la rama

de magnetización se deprime aproximadamente a la mitad, y la corriente de magnetización por esta razón se reduce en la misma proporción.

La construcción del diagrama de círculo completo de la máquina de inducción se puede realizar a partir del conocimiento de los parámetros del circuito equivalente, o mediante ensayos sobre la máquina en diferentes condiciones de operación. Geométrica y analíticamente, un círculo está definido por la posición de su centro y la longitud de su radio. También se puede trazar un círculo a partir de tres puntos localizados sobre el círculo, en este caso es suficiente con trazar las bisectrices entre dos cualquiera de estos puntos, y la intersección de estas bisectrices es el centro del círculo. El radio se obtiene midiendo la distancia desde el centro del círculo a uno cualquiera de los tres puntos iniciales. Otra posibilidad para trazar un círculo, consiste en conocer dos puntos del círculo y una recta que pase a través de un diámetro del círculo.

Para trazar el diagrama de círculo de la máquina de inducción a partir del circuito equivalente, se puede utilizar el siguiente procedimiento:

1. Se traza un círculo de diámetro $\frac{V_{th}}{X_{th}}$ se escoge una escala de corriente que permita que el círculo pueda ser representado en las dimensiones del papel disponible.
2. Se calcula el factor de potencia de la corriente del rotor para la condición de rotor bloqueado $\cos(\phi(s=1))$. Se traza con este ángulo el eje de la potencia mecánica. Es conveniente medir este ángulo mediante relaciones triangulares y no con transportadores que producen errores de medida importantes.
3. Dividiendo el segmento comprendido entre el punto del diagrama $s = 1$, paralelo al eje real y que finaliza en el eje imaginario, en la proporción existente entre la resistencia de Thèvenin R_{th} y la resistencia del rotor R_r , se traza el eje del par eléctrico uniendo este punto con el origen de coordenadas.
4. Se traza la recta del deslizamiento paralela al eje del par eléctrico, de tal forma que intercepte al eje de la potencia mecánica dentro de la hoja de papel. Posteriormente se calibra esta recta dividiéndola en tantas partes iguales como sea necesario.
5. Se suma al diagrama anterior la corriente de magnetización I_m , determinando de esta forma el lugar geométrico de las corrientes del estator I_e .

- Una vez realizados todos los pasos anteriores, se pueden calcular el par eléctrico, la potencia de entrada, el rendimiento y la corriente para cada uno de los posibles puntos de operación de la máquina. La escala de potencia se obtiene multiplicando la escala de corriente por $\sqrt{3}V_{th}$.

La escala de par se determina dividiendo la escala de potencia, entre la velocidad sincrónica de la máquina. El otro método para trazar el diagrama de círculo, consiste en representar en el papel tres puntos conocidos del diagrama. Estos tres puntos pueden ser cualquiera de los infinitos puntos posibles. Es muy frecuente disponer del punto correspondiente a la condición vacío $s = 0$, el punto de operación nominal $s = s_n$ el punto de arranque o de rotor bloqueado $s = 1$. En la práctica, si uno de los puntos corresponde a la condición de operación en vacío, con sólo otro punto se puede trazar el círculo. Esto se debe al hecho de que el diámetro del círculo correspondiente al deslizamiento de la condición de vacío es paralelo al eje imaginario. Como se conoce este punto, con otro punto cualquiera se puede determinar el centro del círculo. En la figura 4.5.11 se presenta una construcción geométrica con estas características.

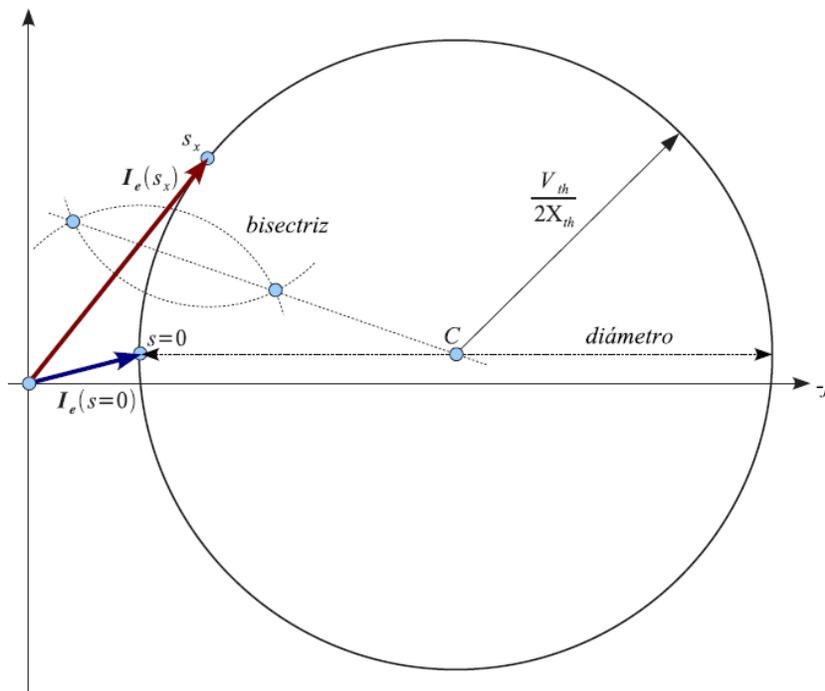


Figura 4.5.11: Construcción del diagrama de círculo a partir del punto de vacío y otro punto de operación.

CAPÍTULO V

ARRANQUE DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS

Introducción.

Debido a su relativamente bajo valor de reactancia de dispersión, los motores de inducción de jaula de ardilla de diseño A, toman una alta corriente de arranque que puede dar lugar a una carga excesiva en el circuito de alimentación del motor. En tales instalaciones, el par de arranque requerido es usualmente bajo y la corriente de arranque se disminuye reduciendo el voltaje abajo de lo normal durante el arranque. A medida que el motor alcanza la velocidad nominal, se aplica el voltaje nominal. El método más común del arranque con voltaje reducido usa un autotransformador, algunas veces llamado un “compensador de arranque”, que generalmente tiene derivaciones de voltaje a 65 y 80% para motores hasta de 50 hp y 50, 65 y 80 por ciento para motores más grandes.

5.1 Arranque a tensión reducida a través de un autotransformador

Usualmente se selecciona la derivación del voltaje más baja que permite que el motor se acelere. El autotransformador puede ser trifásico con un embobinado para cada fase o puede ser un transformador trifásico con delta abierto como se muestra en la figura 5.1.1. La corriente tomada de la línea en el arranque y el par de arranque son ambos aproximadamente inversos al cuadrado de la relación del autotransformador. Dado que un autotransformador se energiza solamente durante el breve periodo de arranque, no está diseñado para una operación continua y es por lo tanto de un correspondiente valor físico pequeño.

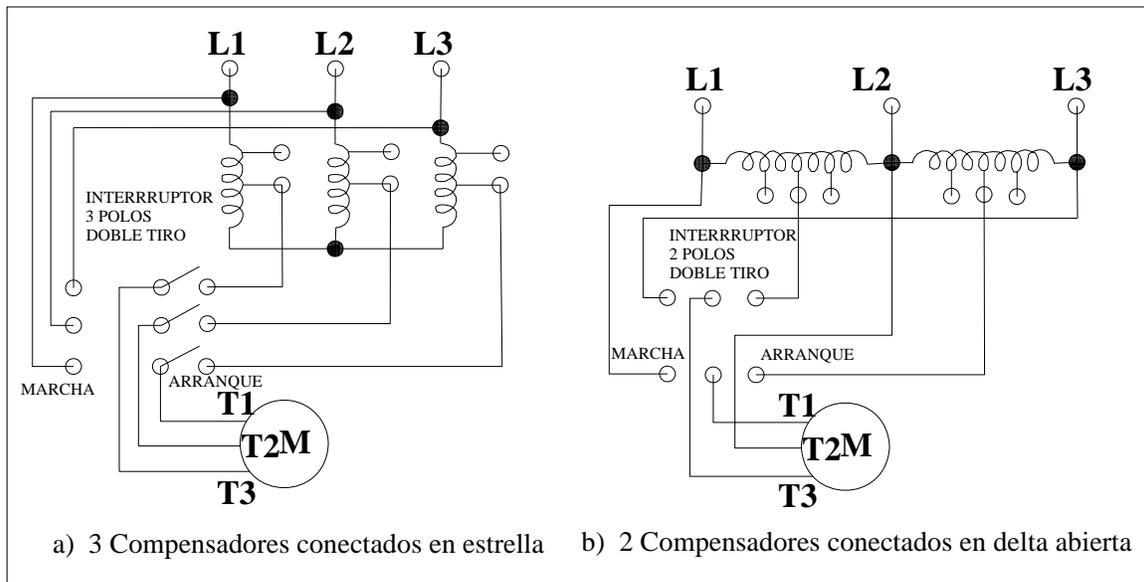


Figura 5.1.1 Arranque a tensión reducida a través de un autotransformador

La transferencia del motor desde el autotransformador hasta la línea está acompañada por un corriente pico de una duración de unos pocos ciclos que puede ser tan alta o más alta que la corriente normal de arranque a pleno voltaje. Al desconectar el motor del autotransformador, el flujo en el motor se disminuye hasta cero, ya que se sostiene por la corriente transitoria del rotor. Adicionalmente, el motor disminuye su velocidad para que el voltaje inducido en el embobinado del estator por la corriente del rotor sea menor que el voltaje de línea y no quede fuera de fase con el voltaje de línea al cerrarse nuevamente. Esta corriente pico puede producir un par momentáneo suficiente para dañar el eje o el acoplador. Sin embargo se tienen muchas instalaciones en donde los efectos de la corriente pico pueden tolerarse. En otras una impedancia de transición entre el autotransformador y la línea mantiene una corriente al estator durante la transferencia.

5.2 Arranque de motores asincrónicos con rotor en jaula por conmutación estrella-triángulo

El arranque estrella-triángulo es el procedimiento más empleado para el arranque a tensión reducida debido a que su construcción es simple, su precio es reducido y tiene una buena confiabilidad. Ver figura 5.2.1 El procedimiento para reducir la tensión en el arranque

consiste en conmutar las conexiones de los arrollamientos en los motores trifásicos previstos para trabajar conectados en triángulo en la red de 3 x 380 V.

Los bobinados inicialmente se conectan en estrella, o sea que reciben la tensión de fase de 220 V, y luego se conectan en triángulo a la tensión de línea de 380 V; es decir que la tensión durante el arranque se reduce 1,73 veces.

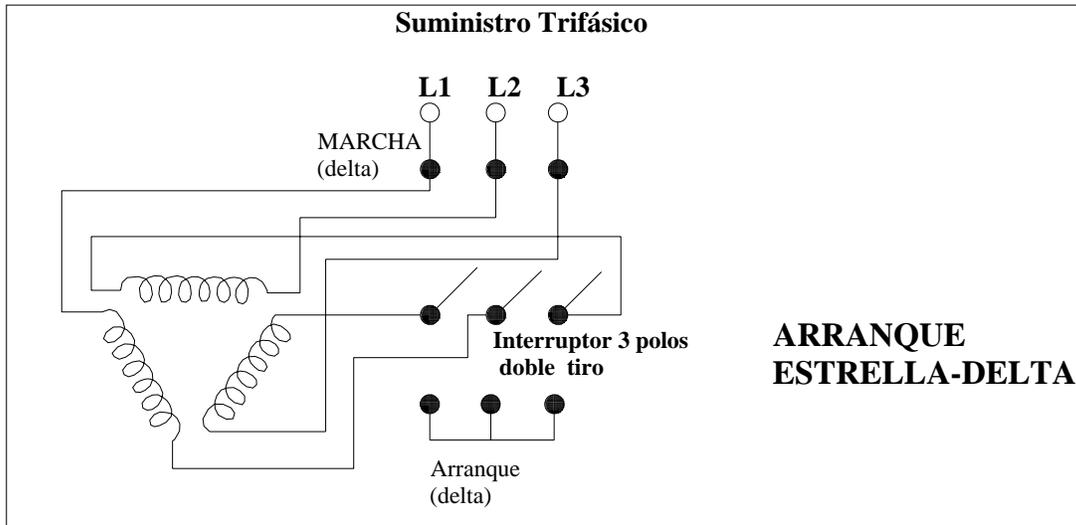


Figura 5.2.1 Arranque a tensión reducida a través de la conmutación estrella-delta.

Por ser ésta una relación fija, y dado que la influencia de la tensión sobre la corriente y la corriente es cuadrática, tanto la corriente como el par de arranque del motor se reducen en tres veces.

Además, es necesario que el motor esté construido para funcionar en triángulo con la tensión de la línea (380 / 660 V). Si no es así, no se lo puede conectar.

Además el estator debe tener sus seis bornes accesibles (situación que no se da en todos los motores, como por ejemplo en las bombas sumergibles). Para ello se abren los circuitos de las bobinas del estator y se las conecta al conmutador. En este caso al motor ingresan 6 cables, más el de puesta a tierra.

La conmutación de estrella a triángulo generalmente se hace en forma automática luego de transcurrido un lapso (que puede regularse) en el que el motor alcanza determinada velocidad.

En el caso más simple tres contactores realizan la tarea de maniobrar el motor, disponiendo de enclavamientos adecuados. La protección del motor se hace por medio de un relé térmico. El térmico debe estar colocado en las fases del motor. La regulación del mismo debe hacerse a un valor que resulta de multiplicar la corriente de línea por 0,58. La protección del circuito más adecuada también es el fusible.

Algunas indicaciones que se deben tener en cuenta sobre el punto de conmutación son: el pico de corriente que toma el motor al conectar a plena tensión (etapa de triángulo) debe ser el menor posible; por ello, la conmutación debe efectuarse cuando el motor esté cercano a su velocidad nominal (95% de la misma), es decir cuando la corriente de arranque baje prácticamente a su valor normal en la etapa de estrella.

Asimismo, el relé de tiempo debe ajustarse para conmutar en este momento, no antes ni después. Habitualmente, un arranque normal puede durar hasta 10 segundos, si supera los 12 segundos se debe consultar al proveedor del equipo. Si no se cumple con lo anterior, el pico de corriente que se produce al pasar a la etapa de triángulo es muy alto, perjudicando a los contactores, al motor y a la máquina accionada. El efecto es similar al de un arranque directo.

Finalmente digamos que el dispositivo estrella-triángulo tiene el inconveniente de que la corriente de arranque que se obtiene a veces no es suficiente para hacer arrancar máquinas con mucho momento de inercia, en cuyo caso se utilizan los dos métodos que se describen a continuación. Ambos permiten conectar motores trifásicos con motor de jaula, los cuales traccionan, por ejemplo, bombas sumergibles.

5.3 Arranque directo de motores asincrónicos con rotor en jaula

Se dice que un motor arranca en forma directa cuando a sus bornes se aplica directamente la tensión nominal a la que debe trabajar. (Ver figura 5.3.1)

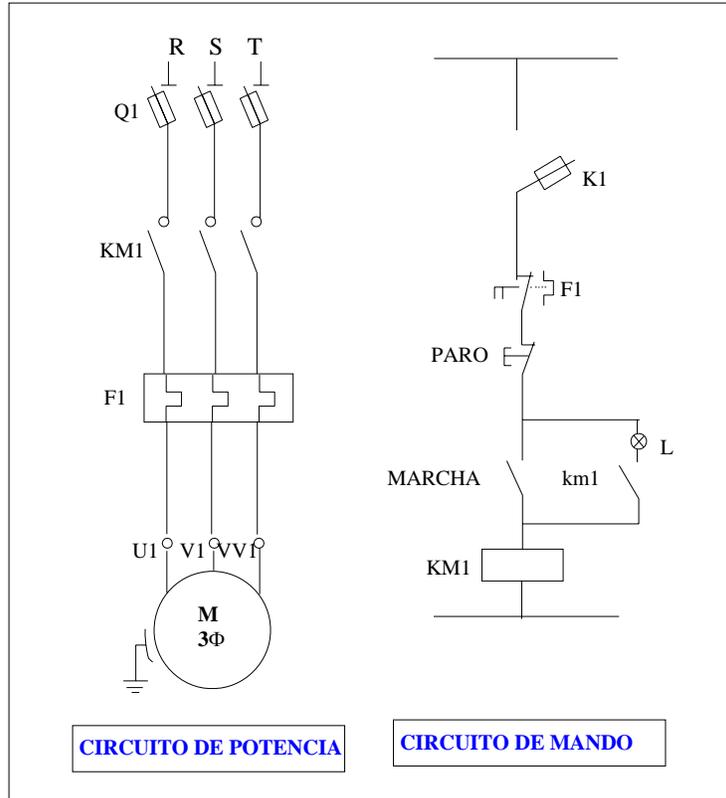


Figura 5.3.1 Arranque directo de un motor asíncono con rotor tipo jaula de ardilla.

Si el motor arranca a plena carga, el bobinado tiende a absorber una cantidad de corriente muy superior a la nominal, lo que hace que las líneas de alimentación incrementen considerablemente su carga y como consecuencia directa se produzca una caída de tensión. La intensidad de corriente durante la fase de arranque puede tomar valores entre 6 a 8 veces mayores que la corriente nominal del motor. Su principal ventaja es el elevado par de arranque: 1,5 veces el nominal.

Siempre que sea posible conviene arrancar los motores a plena tensión por la gran corriente de arranque que se obtiene, pero si se tuvieran muchos motores de media y gran potencia que paran y arrancan en forma intermitente, se tendrá un gran problema de perturbaciones en la red eléctrica.

Por lo tanto, de existir algún inconveniente, se debe recurrir a alguno de los métodos de arranque por tensión reducida.

5.4 Arranque con resistencias estatóricas

Consiste en reducir la tensión que producen unas resistencias conectadas en serie con el estator. Ver figura 5.4.1 Este sistema tiene el inconveniente de que consigue disminuir la corriente en función lineal de la caída de tensión producida. Sin embargo, el par queda disminuido con el cuadrado de la caída de tensión, por lo que su aplicación, se ve limitada a motores en los que el momento de arranque resistente, sea bajo.

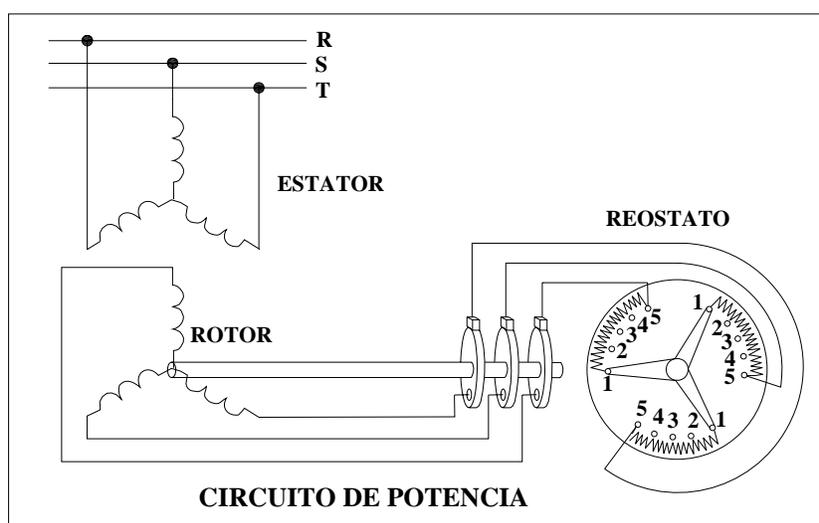


Figura 5.4.1 Arranque con resistencias estatóricas.

5.5 Arranque mediante resistencias en el rotor

Para este tipo de arranque se ha de utilizar un motor con el rotor bobinado. Se trata de conectar a las bobinas del rotor unas resistencias en serie y cortocircuitadas a su salida. En el primer tiempo se conectan todas las resistencias, en el segundo se elimina la mitad de las resistencias y en el tercero se cortocircuitan las bobinas del rotor funcionando el motor a su plena tensión como si fuera una jaula de ardilla. Ver figura 5.5.1 circuito de potencia.

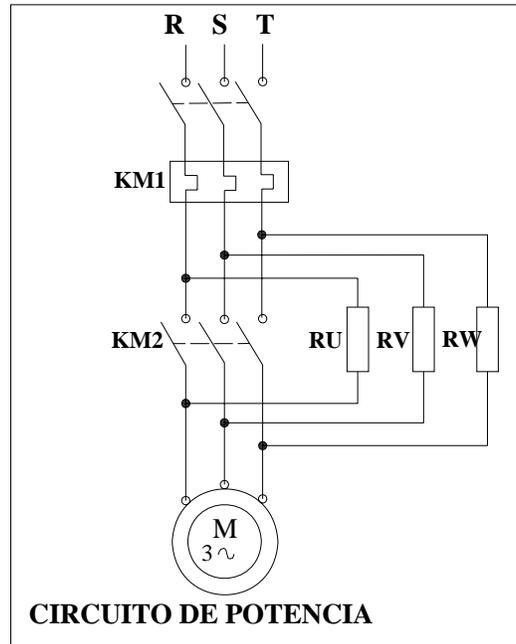


Figura 5.5.1 Arranque mediante resistencias en el rotor

5.6 Arranque por bobina

A veces se emplea también el arranque por bobina aunque ésta no se pueda dividir fácilmente en secciones. Las características de arranque son muy parecidas a las del arranque por resistencias estatoricas, pero el aumento de tensión en bornes a medida que el motor va adquiriendo la velocidad de sincronismo, lo que produce un mayor par máximo.

Un bajo factor de potencia del motor en el arranque da lugar a una resistencia más pequeña de la bobina para una reducción dada de la tensión con rotor parado, que la que se obtiene con resistencia estática. A medida que la velocidad del motor aumenta no solamente disminuye la corriente, sino que el factor de potencia aumenta y la tensión que cae de la bobina se desfasa con respecto a la caída de tensión en el motor, a medida que el motor va adquiriendo la velocidad nominal, mientras que la tensión en bornes y el par aumenta por encima del valor que se obtiene con arranque o resistencia para las mismas condiciones iniciales.

5.7 Arranque Wauchope

El arranque wauchope es una modificación del arranque estrella - triángulo. Introduce una resistencia al cambiar de la posición estrella a la de triángulo, evitando los picos de corriente. Además de no desconectar el motor de la línea durante la conmutación, proporciona un impulso adicional de aceleración.

En la parte “1” el motor está conectado en estrella a la línea. Durante el paso a la parte “2” queda conectada una resistencia en paralelo con cada fase del devanado del motor. La corriente de línea aumenta en la cantidad que absorbe la resistencia, pero la del devanado permanece constante. Este paso preparatorio solo dura una fracción de segundo. En la parte “3” “el neutro del devanado queda desconectado con lo que se logra conectar el devanado del motor en triángulo con una resistencia en serie en cada fase.

Finalmente en la parte “4” las resistencias se cortocircuitan y el motor queda conectado a la línea en triángulo.

Este método de arranque no solamente evita los transitorios de corriente, sino que logra un par continuo durante el periodo de arranque sin disminución de la velocidad durante la conmutación.

5.8 Arranque de motores asincrónicos con rotor en jaula por dispositivos electrónicos

Los arrancadores electrónicos son una mejor solución que los autotransformadores gracias a la posibilidad de su arranque suave, permitiendo un aumento en la vida útil de todas las partes involucradas. Ver Figura 5.8.1 Circuito de potencia.

Los mismos consisten básicamente en un convertidor estático alterna-continua-alterna ó alterna-alterna, generalmente de tiristores, que permiten el arranque de motores de corriente alterna con aplicación progresiva de tensión, con la consiguiente limitación de corriente y par de arranque. En algunos modelos también se varía la frecuencia aplicada.

Al iniciar el arranque, los tiristores dejan pasar la corriente que alimenta el motor según la programación realizada en el circuito de maniobra, que irá aumentando hasta alcanzar los valores nominales de la tensión de servicio.

maximizando el ahorro de energía durante el proceso y permiten un ahorro en el mantenimiento por ausencia de partes en movimiento que sufran desgastes.

5.9 Puesta en marcha con rotor en corto-circuito

Las constantes del circuito equivalente del motor de inducción pueden obtenerse de una prueba hecha con el motor girando libre y de la prueba de rotor bloqueado. Estas pruebas corresponden a las pruebas de cero carga y corto-circuito en el transformador.

5.10 Prueba de rotor bloqueado.

Las cantidades X_1, X_2 , y R_2 pueden ahora determinarse de los datos de la prueba de rotor trabado que se obtienen con el rotor trabado para evitar que gire, es decir, para $s=1$. la prueba de rotor trabado también se conoce como la prueba de rotor bloqueado.

Para motores convencionales la jaula individual menores de 25 hp nominales, sin incluir las maquinas de barra profunda, se aplica un voltaje reducido trifásico balanceado de frecuencia nominal al estator. Con el objeto de obtener constantes para la rotación normal, el voltaje se ajusta para producir una corriente nominal. Un voltaje nominal daría como resultado una corriente excesiva que saturaría las trayectorias del flujo de dispersión a través de los dientes del estator y rotor, dando lugar a menores valores de los normales de reactancia de dispersión para el rango de rotación. Adicionalmente a menos que se sostenga por un corto periodo, la corriente excesiva sobrecalentará los embobinados. Sin embargo, si adicionalmente a la característica de rotación, el funcionamiento a pleno voltaje debe determinarse, también se hace una prueba de rotor trabado aplicando un voltaje nominal a frecuencia nominal mientras las mediciones del voltaje, corriente y potencia así como del par, se hacen lo más rápidamente posible para prevenir el sobre calentamiento,

En la prueba de rotor trabado en un motor trifásico, sean:

V_L = voltaje de línea-a-línea

I_L = corriente de línea.

P_L = potencia de entrada.

5.11 Motores de inducción con rotor bobinado

Motor de rotor bobinado: En este tipo de motores, en el rotor se introduce un bobinado trifásico. El bobinado del rotor se puede conectar al exterior por medio de escobillas y anillos rozantes. Este tipo de motores pueden tener resistencias exteriores colocadas en el circuito del rotor, lo que permite reducir la corriente absorbida, reduciendo la saturación en el hierro y permitiendo un incremento en el par de arranque. Conforme la velocidad del rotor aumenta el valor de las resistencias se reduce hasta llegar a cero, lo que permite mantener un par alto.

5.12 Motor de inducción con propiedades de arranque mejoradas

Motor de rotor de doble jaula: En este tipo de motor el rotor tiene dos secciones, la exterior está diseñada con un material de resistencia más elevada que la interior. Cuando el motor esta funcionando a baja velocidad (mientras arranca), la frecuencia de deslizamiento es alta y la corriente del rotor tiende a circular por la cara exterior (debido al efecto piel), con lo que la resistencia efectiva es mayor y en consecuencia aumenta el par de arranque. Cuando la velocidad del rotor aumenta, la frecuencia de deslizamiento decrece, y la corriente del rotor circula por la zona de baja resistencia del rotor, de forma que las pérdidas energéticas son menores.

Aplicación del rectificador controlado a motores de inducción.

El rectificador controlado se puede utilizar para el control del voltaje aplicado a las terminales del mismo, colocándolo en serie con las terminales del estator.

También puede ser utilizado en las terminales del rotor para controlar la corriente del mismo, este segundo método constituye el propósito de este trabajo.

Operación del rectificador controlado.

El funcionamiento del rectificador controlado es esencialmente el de un rectificador en el cual el comienzo de la conducción puede ser controlado mediante una señal de disparo pequeña alimentada a la rejilla. La conducción solo puede detenerse reduciendo la corriente a cero o a un nivel muy bajo. Cuando se utilizan estos dispositivos en corriente alterna, el cese de la conducción se obtiene fácilmente.

Existen muchos arreglos que se utilizan para el control de corriente alterna; entre otros están los mostrados en la figura 5.12.1: en el primero (a) sólo hay conducción controlada durante medio ciclo, o sea que este arreglo sirve para la conversión de corriente alterna a directa, el segundo (b) conduce durante ambos medios ciclos pero solo existe conducción controlada durante uno de los medios ciclos y los últimos dos (c) y (d) el control de la conducción es durante los dos medios ciclos.

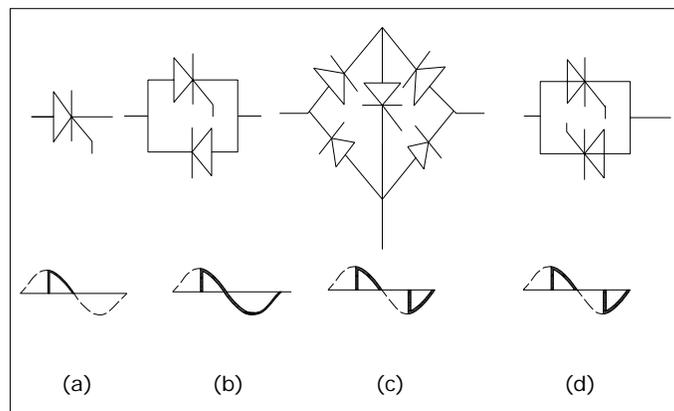


Figura 5.12.1 Tipos de rectificadores

Control de resistencia con el rectificador controlado.

Existen varios circuitos distintos que pueden utilizarse para el control de resistencia, entre los cuales se pueden considerar como típicos los mostrados en las figuras 5.12.2

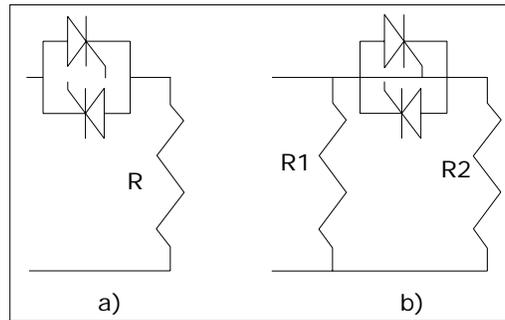


Figura 5.12.2 Control de resistencia con el rectificador controlado

El circuito mostrado en la figura 5.12.2, a) permite el control de la resistencia desde el valor infinito a un valor R , cuando los rectificadores no conducen y cuando conducen todo el tiempo respectivamente.

El circuito de la figura 5.12.2 b) permite el control de resistencia en un rango menor, es decir entre $R1$ y la combinación en paralelo de $R1$ y $R2$. Si $R2=0$, la variación será entre $R1$ y cero.

Características del voltaje del rotor.

Una de las principales características que se encuentran en el rotor lo es el voltaje que se obtiene en terminales del mismo, en primer lugar la magnitud del voltaje y la frecuencia son variables, es decir al aumentar la velocidad, la magnitud del voltaje disminuye y a la vez también disminuye la frecuencia. Esto impone algunas restricciones en cuanto al circuito de disparo.

Otra de las características lo es la forma de onda, que no es una senoidal perfecta, sino que cuenta con una pequeña oscilación superpuesta (de mucho mayor frecuencia), debida a las

ranuras presentes en el estator y el rotor que hacen que la reluctancia no sea constante al girar el rotor; estas oscilaciones hacen que los circuitos de disparo que dependen de esta forma de onda no produzcan conducción en forma simétrica.

Aplicación de los circuitos controladores de resistencia al rotor de un motor de inducción.-

Los circuitos mostrados en las Figura 5.12.2 a) y b) se pueden utilizar en el rotor, juntando tres semejantes para conectarlos en delta o estrella. Como generalmente en el rotor no se tiene disponible un neutro, es mas práctico el circuito delta, ya que en el circuito estrella es necesario que dos rectificadores se encuentren en estado de conducción para que exista circulación de corriente.

El circuito formado por tres elementos del tipo mostrado en la figura 5.12.2 a) tiene la ventaja de que el control de velocidad se logra desde cero a la máxima permitida por la resistencia R, arreglo bastante conveniente para evitar problemas de arranque del motor.

El circuito formado por tres elementos como los mostrados en la figura 5.12.2 b) hace posible la obtención de una mejor regulación de velocidad, sin embargo, no tiene la ventaja del circuito anterior en cuanto se refiere al arranque del motor.

Cuando los circuitos de disparo son alimentados por el voltaje que aparece a través de los rectificadores se obtiene un efecto de autorregulación muy conveniente. Esto se debe a que cuando aumenta la carga del motor la velocidad se reduce y al suceder esto el voltaje del rotor aumenta ocasionando que el disparo ocurra antes con la consiguiente reducción de las resistencias efectivas y la velocidad no disminuye tanto.

Circuitos de disparo.

Hay una variedad muy grande de circuitos de disparo que se pueden utilizar; la selección de uno de ellos depende del trabajo a desarrollar por el motor en cuestión. Entre los más sencillos, puede citarse los formados por simples resistencias o combinaciones de resistencias y capacitancias como los mostrados en la figura 5.12.3

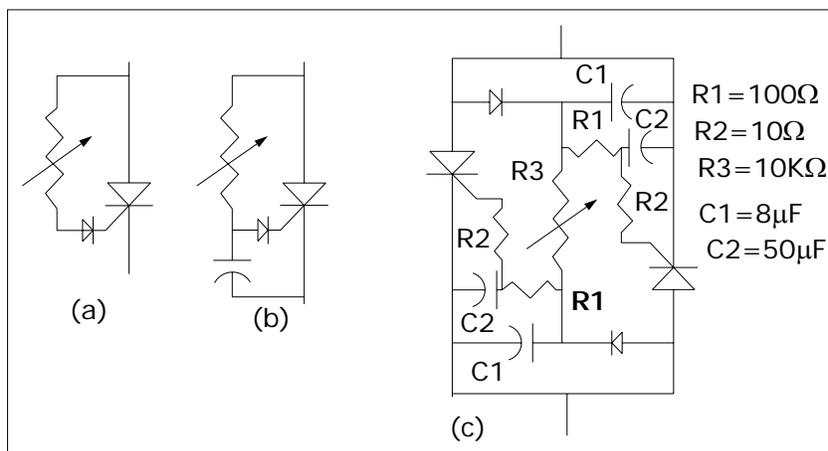


Figura 5.12.3 Circuitos de disparo.

Durante el desarrollo de la experimentación los rectificadores controlados no disparaban en forma simétrica aún cuando se usaran en una fuente de frecuencia y voltaje constante. Esto se debe a que los rectificadores controlados no tienen características idénticas en las señales necesarias para iniciar la conducción. Para remediar esto en una región de control (por ejemplo el comienzo de la conducción) se pueden modificar ligeramente los valores de los elementos de los circuitos de disparo.

La figura 5.12.3 c) muestra el circuito de disparo utilizado durante la mayor parte de la investigación. Este circuito obtenido de un manual de Westinghouse tiene la ventaja de que se controla el disparo de dos rectificadores controlados con un solo potenciómetro.

La figura 5.12.4 muestra los circuitos utilizados en el rotor. En estos no se ha incluido el circuito de disparo, pero el utilizado fué el mostrado en la figura 5.12.3.

Economía en el uso de rectificadores controlados.

El avance en los últimos años de estos dispositivos del tipo semiconductor hacen que este método de control resulte bastante económico debido al bajo precio de gran cantidad de ellos. El mantenimiento es casi nulo y solo debe tenerse precaución de mantener un método adecuado para disipar el calor generado en los rectificadores; esto generalmente se logra con piezas metálicas con aletas para radiar el calor al aire.

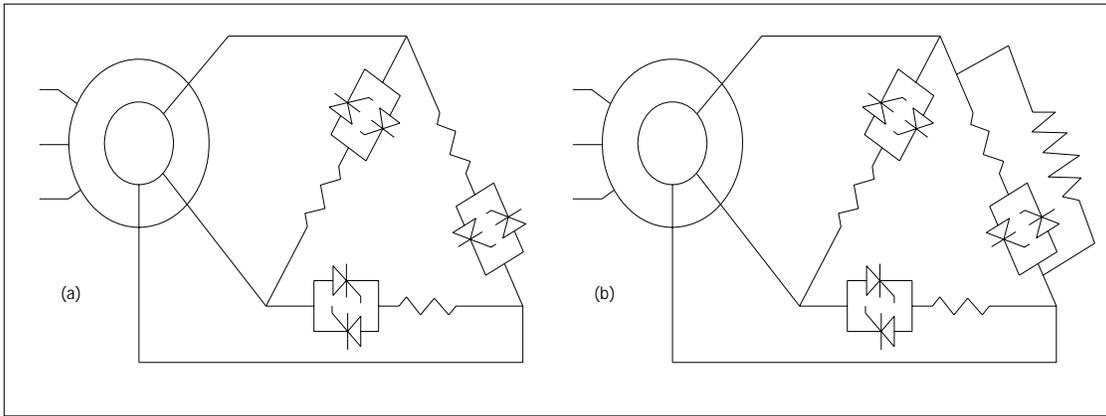


Figura 5.12.4 Circuitos utilizados en el rotor.

CAPÍTULO VI

DISEÑO Y FABRICACIÓN

6.1 Mejoras en los diseños

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.

Aunque los motores modernos tienen rendimientos relativamente altos, gracias a la alta conductividad del Cobre, se han creado nuevos diseños que permiten un mejor aprovechamiento energético, ahorrando así energía.

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

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

Los motores eficientes fueron diseñados para reducir mínimo las pérdidas constantes por carga. Con estos diseños genera menos calor residual requiere por ende menos energía para enfriar el motor. Esto permite emplear un ventilador más pequeño, obteniendo un doble ahorro y una operación mucho más silenciosa. En la figura 6.1.1 muestra la eficiencia de un motor y las pérdidas para diferentes capacidades de Hp.

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

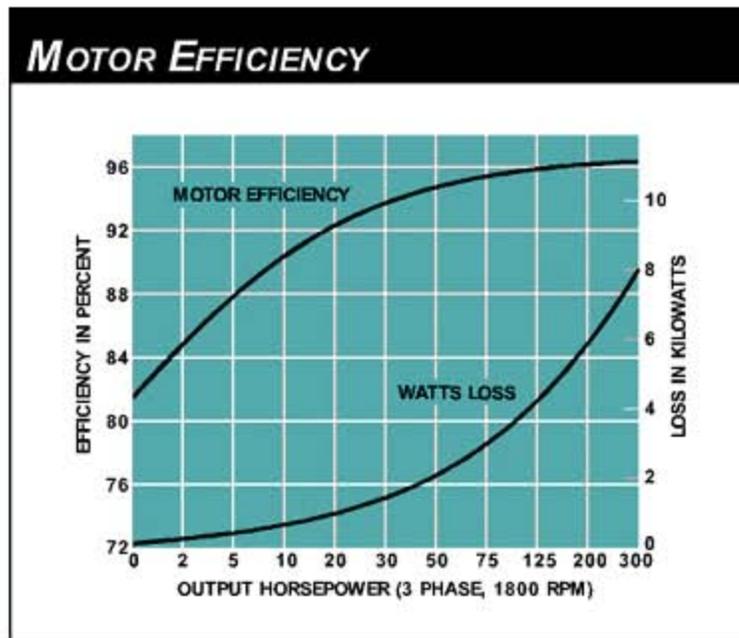


Figura 6.1.1 Curva de Eficiencia-capacidad (Hp).

La mayoría de los motores funcionan en forma muy eficiente durante casi todo el período de operación cuando están bajo régimen de plena carga. Los motores eficientes se diseñaron para ahorrar energía logrando una mejor eficiencia en un rango entre 1/2 y plena carga.

6.2 Selección de motores eficientes

Para la selección de un motor, además de tomar en cuenta los criterios que marcan las normas de funcionamiento y seguridad de los motores eléctricos, se deben observar las

Normas de eficiencia energética. La información que publican los fabricantes en los catálogos y placas de los motores deben satisfacer la normativa vigente.

Se puede apreciar claramente que un motor de eficiencia alta o premium ofrecen los menores consumos respecto al motor estándar y, mejor aún, para este ejemplo, un motor de 50 c.p. moviendo una carga de 36.5 c.p., tiene menor demanda de energía que el motor de 40 c.p. Suponiendo que sólo se dispusiera de un motor de 40 c.p. de eficiencia estándar, un motor de 50 c.p. y eficiencia alta o premium sería una solución energética y económicamente viable. En la selección de motores se deben tomar en cuenta varios

factores para obtener la eficiencia óptima, ya que la eficiencia propia del motor decaerá si no se cuidan factores tales como (NEMA, 1994):

- a) Tensión de suministro
- b) Potencia nominal
- c) Frecuencia de rotación
- d) Régimen de servicio
- e) Tipo de motor
- f) Tipo de enclaustramiento
- g) Condiciones ambientales
- h) Tipo de montaje
- i) Tipo de conexión del motor a la carga
- j) Accesorios o modificaciones.

Criterios de selección de motores de Eficiencia Alta

Una pregunta muy común: ¿Cuándo se justifica el uso de un motor de Eficiencia Alta?; Existe mucha literatura que puede ayudar a soportar esta decisión, e incluso, técnicas bien definidas que permiten apoyar en un estudio de recuperación de la inversión en función de la Energía ahorrada por estos equipos.

En forma general se puede decir que estos motores son empleados cuando el resultado de un programa de ahorro de energía así lo requiera, sin embargo hay recomendaciones generales que el usuario bien puede considerar al momento de adquirir e instalar estos motores, que le permitirán tener la mejor utilización de los mismos, algunas de ellas son:

Evitar un sobredimensionamiento excesivo de la potencia requerida; Es muy común que cuando se elige un motor de cierta capacidad, este sea sobredimensionado hasta el doble de su potencia, esto hará que el motor no opere en su punto de potencia nominal de salida desaprovechando así el mejor nivel de eficiencia del producto.

Evitar condiciones de instalaciones eléctricas en mala condiciones, siempre es recomendable un buen sistema de alimentación que permita un suministro de energía eléctrica adecuado al motor.

Evitar condiciones de instalaciones mecánicas en malas condiciones, como pueden ser bandas mal tensadas, mal anclaje del motor, vibraciones excesivas.

Estos motores tendrán un mejor resultado si son empleados en regímenes continuos de operación y no en regímenes intermitentes.

A medida de lo posible permitir una buena circulación de aire para garantizar que el sistema de refrigeración opere en forma óptima.

6.3 Aplicación de los nuevos materiales

Estos motores están fabricados de manera especial para reducir sus pérdidas. Para lograrlo, diversos fabricantes, han realizando varias acciones entre las que se puede mencionar:

- Utilización de acero con mejores propiedades magnéticas
- Reducción del entrehierro
- Reducción del espesor de la laminación
- Incremento en el calibre de los conductores
- Utilización de ventiladores y sistemas de enfriamiento más eficientes
- Utilización de mejores materiales aislantes

6.4 Automatización de la manufactura.

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

- Cortes más uniformes en ranuras y dientes.
- Reducción de la fricción en rodamientos.
- Por otro lado la automatización de las pruebas de línea y pruebas finales mantienen los parámetros eléctricos, magnéticos y dimensiones dentro de rangos muy reducidos, lográndose mayor uniformidad y calidad en el producto.

En el mismo sentido se encuentran trabajando los fabricantes ya que con la creación de programas para el diseño como el de la marca WEG, “DISEÑO A ESCALA”, así como;

El software para la selección de motores y análisis de ahorros (IMSSA)

El software para la Selección de Motores y Análisis de Ahorros (IMSSA) es una herramienta diseñada para apoyar la industria, a consultores en el área energética y distribuidores de motores. En la figura 6.4.2 se muestra la pantalla de inicio del software IMSSA.

El funcionamiento del software es muy simple, después de instalarlo (bajarlo de: www.imssa.cl), se ingresan las especificaciones del motor y se obtienen diferentes posibilidades. El rango varía desde motores pequeños, como para impulsar una bomba de agua, hasta motores industriales grandes, como aquellos que mueven correas transportadoras o que operan un agitador en la industria minera.

IMSSA requiere de actualizaciones constantes, relación con los proveedores y depuración de datos. Se está diseñando una forma de trabajo con The Washington State University, entidad que programó IMSSA, para que realicen la manutención del producto. Además de Codelco, el Comité que desarrolló este programa está integrado por la Asociación Internacional del Cobre (ICA), el Departamento de Energía de E.U., Natural Resources Canadá, Carbon Trust y Joint Research Centre, de la Comisión Europea.



Figura 6.4.2 Software IMSSA

IMSSA posee una enorme base de datos interna que contiene información y precios de más de 43.000 motores vendidos en el mundo.

El software permite introducir información de nuevos motores, así como modificar la de los existentes. **IMSSA** puede configurarse para inglés, español y francés y realiza análisis económicos usando monedas locales. El software también permite al usuario insertar nuevos aranceles de importación, estándares de eficiencia mínimos, introducir costos de reemplazo y reparación de motores, y estimar las pérdidas en eficiencia debido al rebobinado.

La eficiencia energética ahorra dinero para su negocio haciéndolo mas competitivo.

El empleo de motores eficientes es un buen negocio para la empresa, debido a que no sólo disminuye sus costos de producción, sino que además aumenta la confiabilidad de los procesos. En los motores se produce un menor desgaste; disminuye la tasa de fallas, la temperatura de trabajo, la frecuencia de mantenimiento y tienen vida útil mayor.

El uso eficiente de la energía también reduce la necesidad de ampliar la potencia contratada al sistema eléctrico. Esto genera un ahorro de energía, lo cual implica una reducción en la emisión de gases efecto invernadero, que eventualmente permitirían vender bonos de carbono. Asimismo se reducen las emisiones de contaminantes locales y otros daños ambientales asociados a la producción, transmisión y consumo de energía.

El software para la Selección de Motores y Análisis de Ahorros (IMSSA, por sus siglas en inglés), que busca ayudar a la industria, a consultores del área energética y a distribuidores de motores a seleccionar uno eficiente que les permita, entre otros beneficios, un mayor ahorro de energía, fue desarrollado por la Corporación Nacional del Cobre (Codelco) y la Comisión Nacional de Energía (CNE). El empleo de motores eléctricos eficientes puede traducirse en un ahorro de 2500 GWh/año, que corresponde a más de US\$ 100 millones (al 2010); y de 5700 GWh/año, que corresponde a un ahorro de US\$ 230 millones (al 2020). Sólo en 2002 la generación de la megacentral hidroeléctrica de Rapel (350 MW) fue de 1500 GWh, mientras que la de la central Antuco (350 MW) fue de 1700 GWh. Según se informó, IMSSA simplifica la comparación de un motor eficiente versus uno estándar pues

incluye una base de datos interna, con precios e información de más de 43.000 motores comercializados en el mundo. Sólo se necesita las especificaciones del motor (potencia nominal, velocidad sincrónica, tipo de carcasa, y tensión de operación) y el software le entregará una lista de los motores disponibles, clasificados en orden descendente de acuerdo a su eficiencia a plena carga.

También permite comparar los costos de operación de las alternativas disponibles, tomando en cuenta la eficiencia del motor a un grado de carga seleccionado, horas de operación anual y los costos por facturación eléctrica.

Motor-CAD

Es un programa modular único que sin duda va a revolucionar el diseño térmico de motores eléctricos y alternadores.

Capacidades propias:

- Módulos para motores brushless de imanes permanentes, inducción y de reluctancia conmutada.
- Proporciona un análisis rápido de los cambios de diseño y de fabricación.
- Facilita una respuesta rápida a las especificaciones del usuario.
- Disposición orientada al usuario.
- Transferencia de datos entre módulos de manera fluida
- Validado con mediciones así como cálculos fluidodinámicos

Editor de secciones

Las diferentes pantallas proporcionan una valiosa comprobación visual a la hora de introducir datos en los editores de sección radial y axial. Numerosos tipos de carcasas pueden ser tenidos en cuenta. También es posible precisar si el motor se encuentra montado sobre un pie o empotrado y si dispone de un dispositivo de medida. La figura 6.4.3, 6.4.4, 6.4.5 y 6.4.6 muestra la pantalla para el editor de secciones.

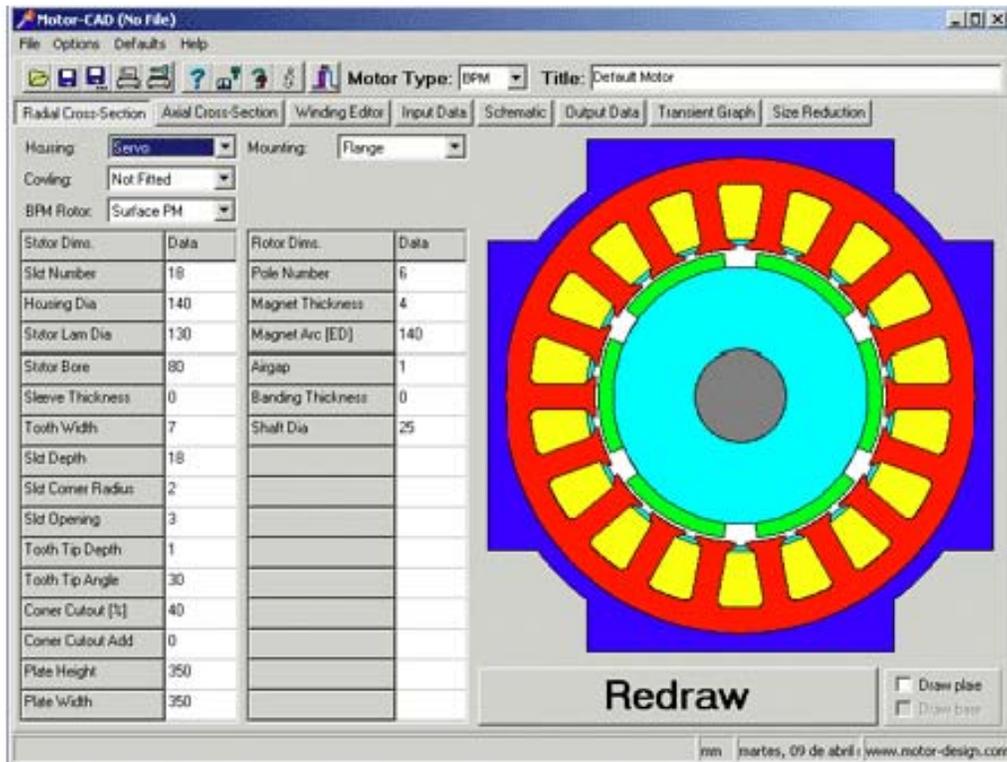


Figura 6.4.3 Editor de sección radial de un motor brushless de imanes permanentes.

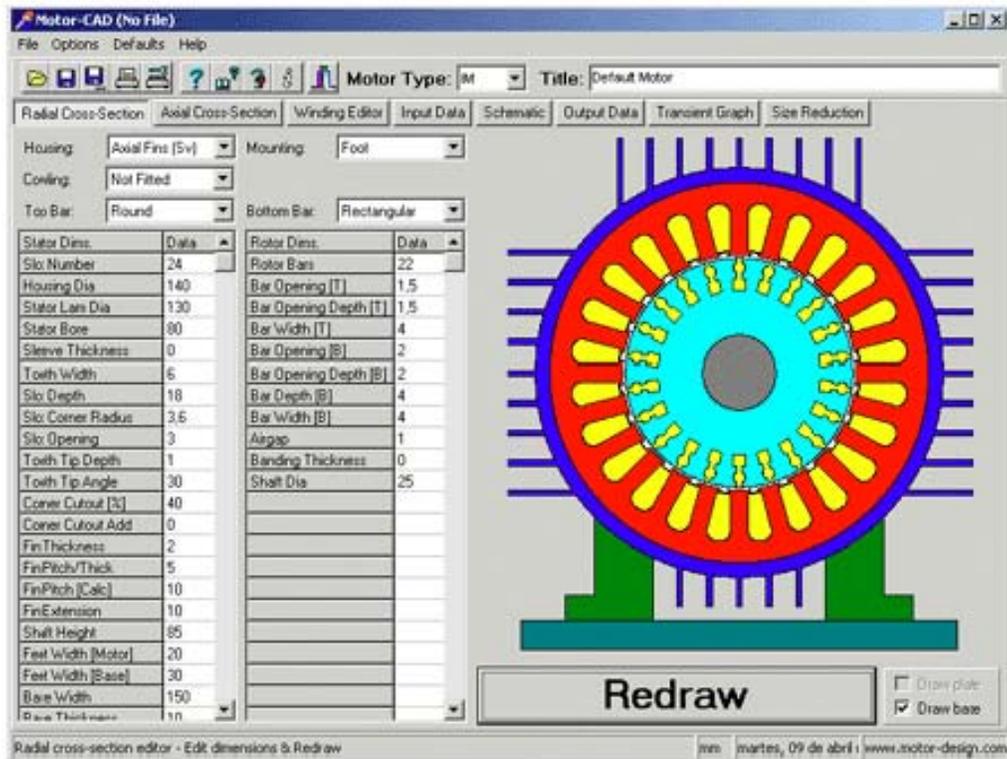


Figura 6.4.4 Editor de sección radial de un motor de inducción.

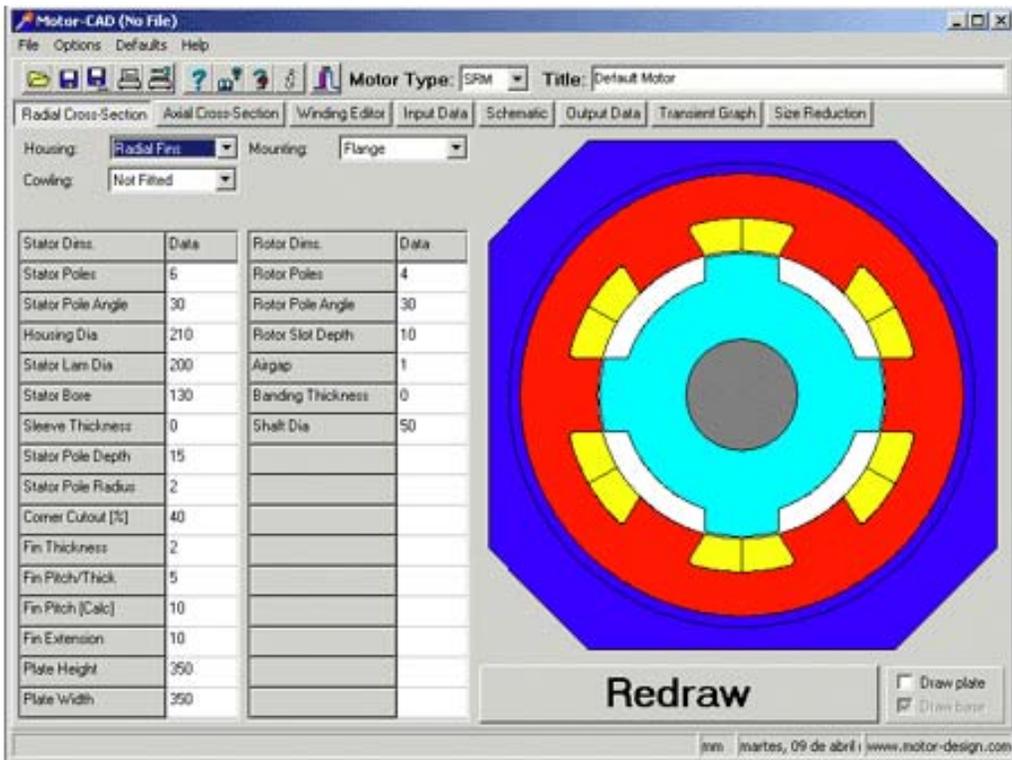


Figura 6.4.5 Editor de sección radial de un motor de reluctancia conmutada.

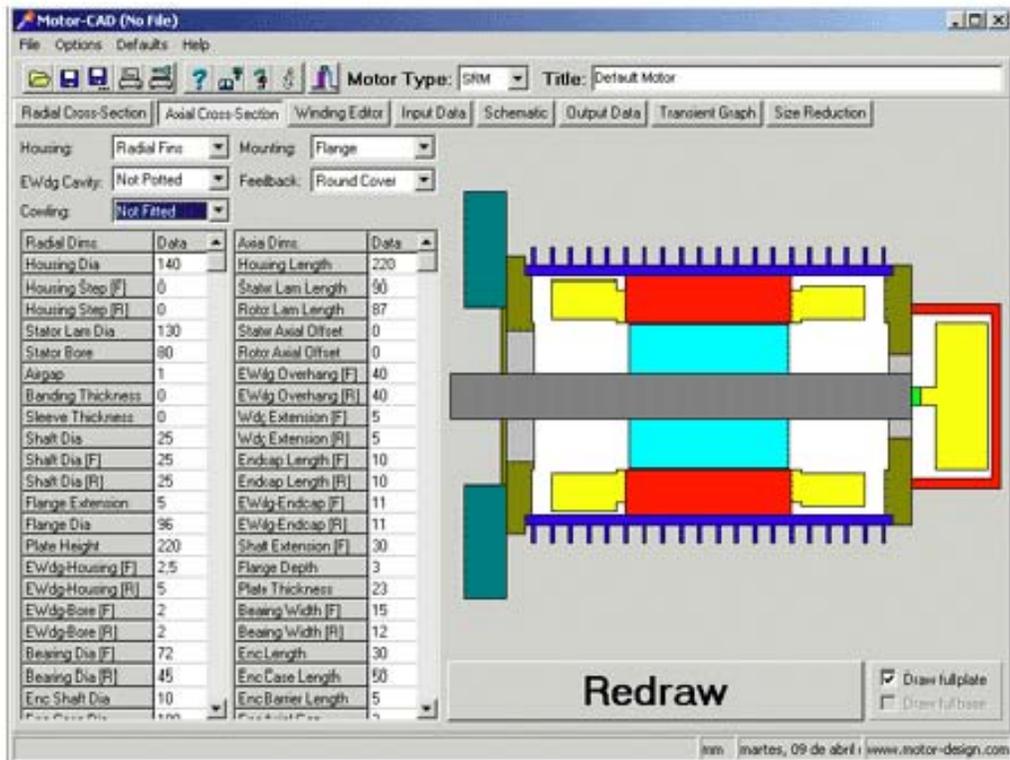


Figura 6.4.6 Editor de sección axial.

Editor de devanados:

La Figura 6.4.7 muestra una representación gráfica de los datos de entrada del devanado. El devanado se divide automáticamente en diferentes capas de tal suerte que la diferencia de las temperaturas entre la zona interior y exterior pueda ser calculada. Los detalles de las capas dependen del tipo del devanado, el área de la ranura, del factor de relleno de ranura, del número y del tamaño de conductor empleado. También pueden considerarse devanados a diferentes capas.

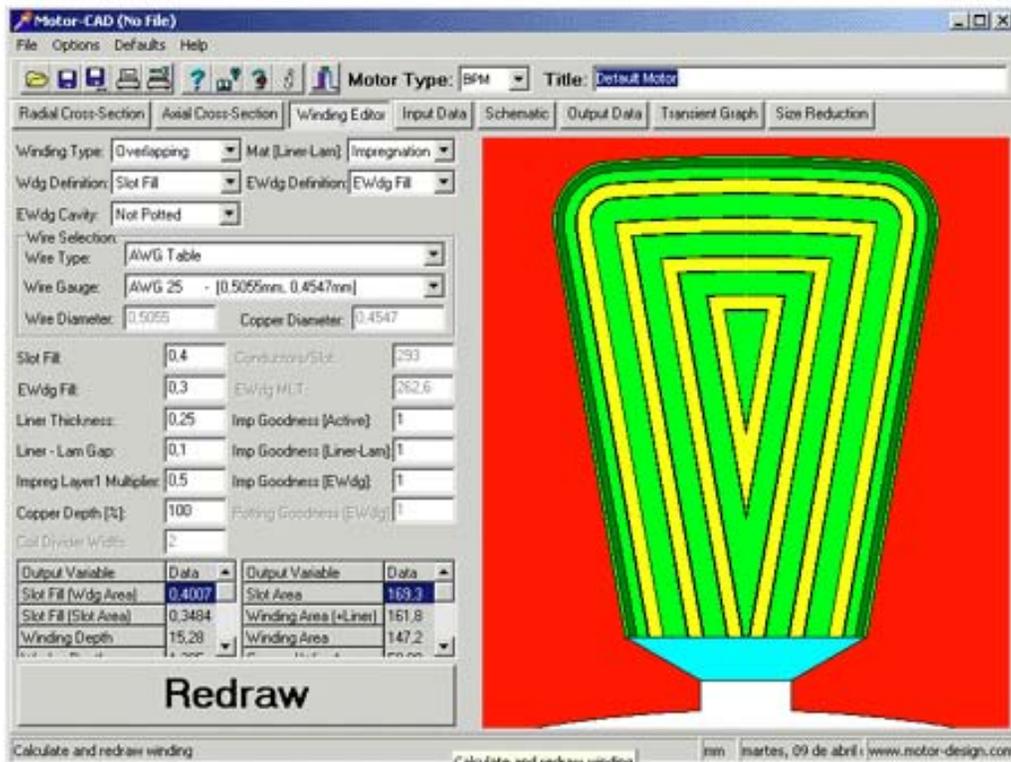


Figura 6.4.7. Editor de devanados.

Editor de entrada de datos:

Todos los datos de entrada que no sean geométricos, pueden introducirse a través de editores específicos. La figura 6.4.8. y 6.4.9 muestra pantallas en las cuales se trabaja.

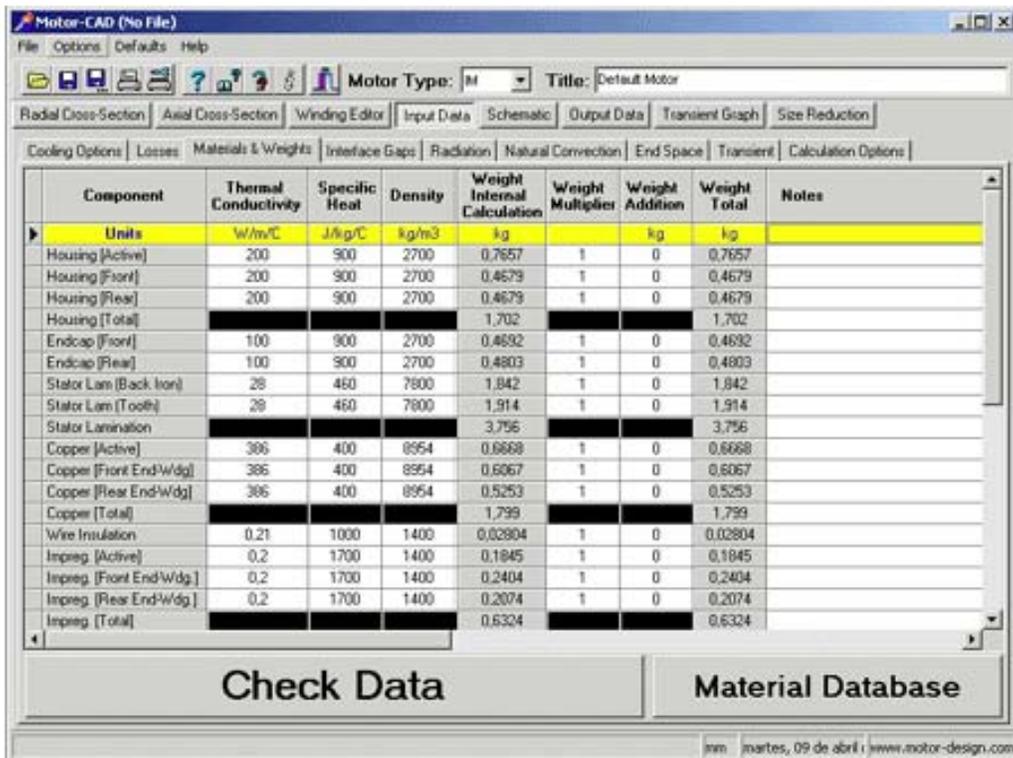


Figura 6.4.8 Editor de entrada de datos de la sección de características de materiales.

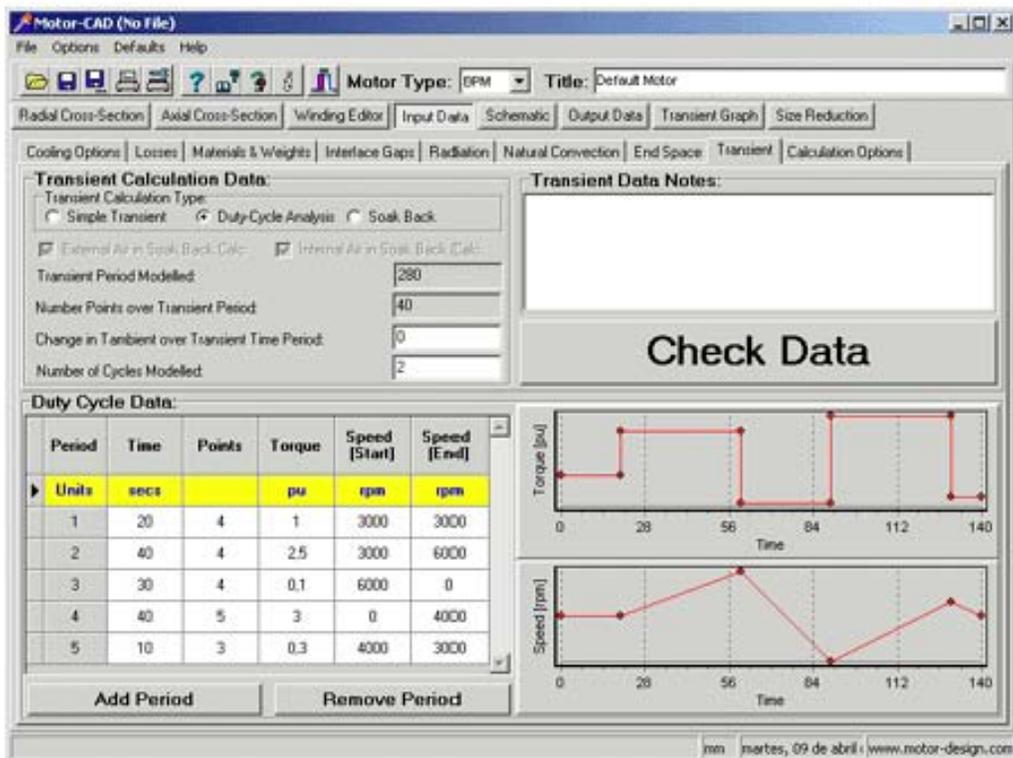


Figura 6.4.9 Editor de entrada de datos de la sección de cálculo transitorio.

Algoritmos térmicos:

El modelo térmico desarrollado está basado en el análisis de circuitos equivalente, proporcionando tiempos de cálculo casi instantáneos. Las alternativas, como el análisis por Elementos Finitos, o los cálculos fluidodinámicos, pueden requerir hasta varios días para plantear un modelo representativo en 3 dimensiones. Los módulos ofrecen algoritmos matemáticos eficientes, precisos y robustos, tanto para convección natural como forzada, refrigeración por líquidos, radiación y conducción. Para obtener modelos precisos para todas las superficies, se ha empleado una gran librería de correlaciones de convección laminar o turbulenta que ha sido previamente probada.

El modelo del entrehierro incluye, convección laminar, vortex y turbulenta.

Resultados en régimen permanente:

La figura 6.4.10 muestra la pantalla básica empleada para el análisis de los resultados en régimen permanente. Los componentes están codificados por colores, coincidiendo con los que se muestran en los editores de secciones. También pueden visualizarse los resultados en forma de tabla en la figura 6.4.11.

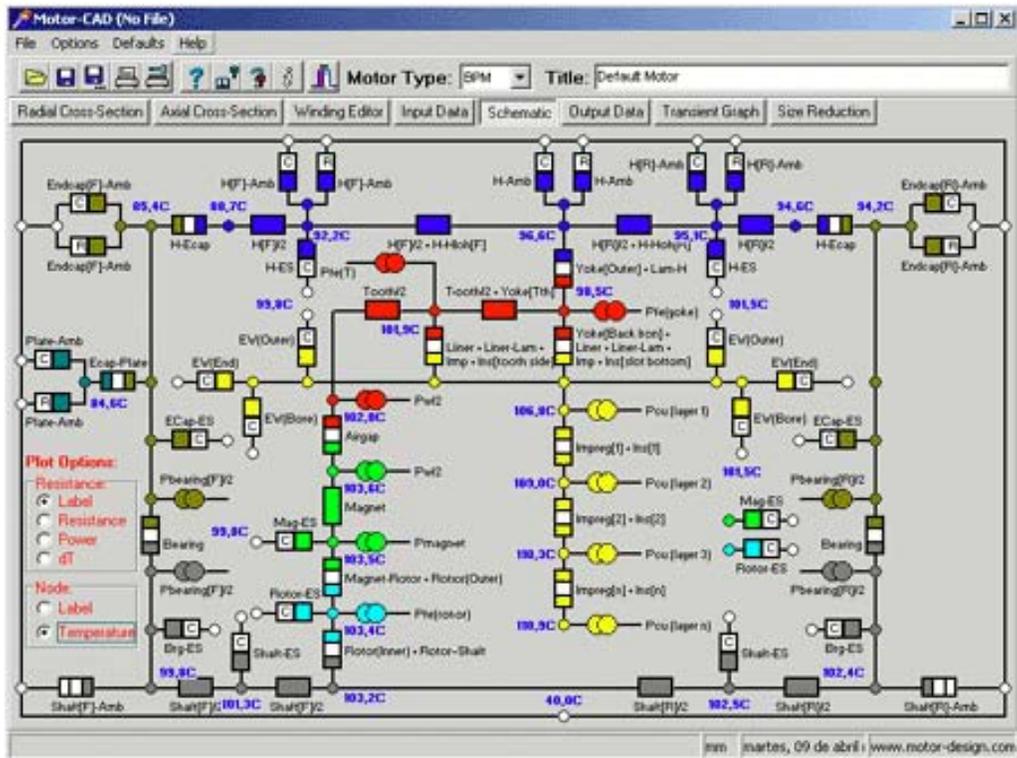


Figura 6.4.10 Resultados en régimen permanente en forma de esquema.

The screenshot shows the Motor-CAD interface with the 'Temperature' tab selected. The table displays the following data:

Temperature	Value [C]	Temperature	Value [C]	Temperature	Value [C]
T (Distribu)	48	T (Rotor Surface)	103.6	T (Winding Average)	108.8
T (Housing - Active)	36.58	T (Magnet Inner Surface)	100.5	T (Winding Layer = 1)	105.8
T (Housing - Jvhang(F))	32.17	T (Rotor Laminator)	100.4	T (Winding Layer = 2)	109
T (Housing - "out")	38.74	T (Shaft - Center)	100.2	T (Winding Layer = 3)	110.3
T (Endcap - Front)	35.14	T (Shaft - Front)	99.82	T (Winding Layer = 4)	110.9
T (Flange Mounted - Base)	34.62	T (Shaft - Rear)	102.4		
T (Housing - Jvhang(R))	35.86	T (End Space - F)	99.76		
T (Housing - Rear)	34.63	T (End Space - R)	107.5		
T (Endcap - Rear)	34.21				
T (Rotor Lam (tooth))	101.5				
T (Rotor Lam (stator))	98.47				
T (Stator Box)	102				

Figura 6.4.11 Resultados en régimen permanente en forma de tabla.

Resultados en régimen transitorio:

El transitorio térmico del motor puede calcularse y visualizar en forma de gráfico o de forma tabular. Es fundamental llevar a cabo un análisis térmico detallado cuando se emplean ciclos de trabajo complejos, si se lleva al motor a sus máximas prestaciones. La figura 6.4.12 muestra la pantalla para el transitorio en forma de gráfico.

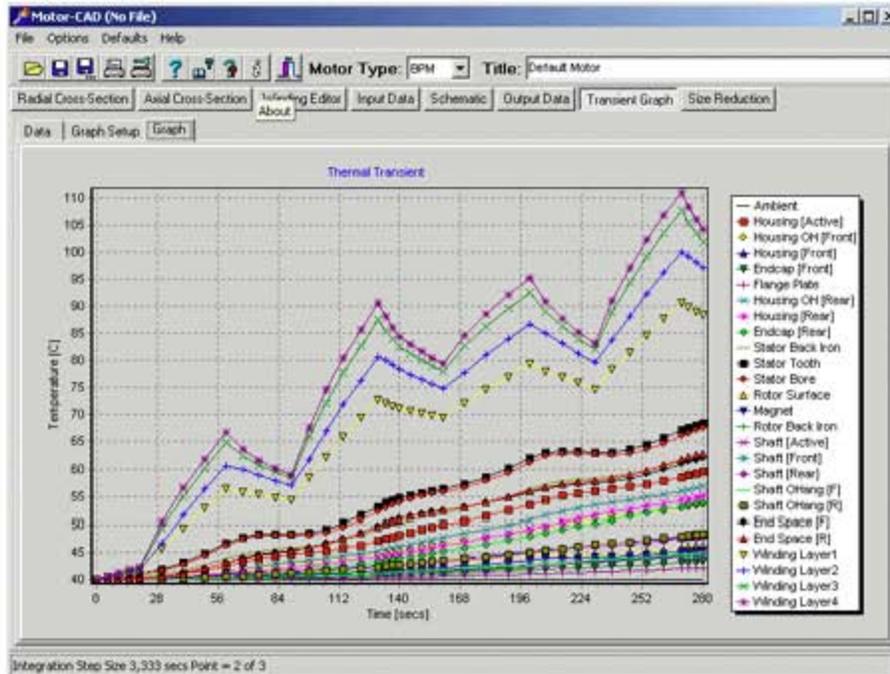


Figura 6.4.12. Resultados en régimen transitorio en forma de gráfico.

Equipo para monitoreo de motores energizados. Modelo explorer II. Marca baker Instruments company.

Análisis completo de motores

Como la última innovación en manejo de planta, el monitor de funcionamiento de motores: Explorer Series II ejecuta cinco funciones trascendentales en un programa de mantenimiento predictivo completo. Identifica posibles problemas en el circuito de alimentación que degradan la salud del motor, examina en su totalidad las condiciones de

potencia del motor, monitorea la carga y observa el funcionamiento del motor más la estimación de ahorros de energía. La figura 6.4.13 muestra los elementos del explorer II.

Está programado para proveer información en el balance de voltaje, distorsión, nivel de voltaje, estado de la jaula del rotor, eficiencia del motor, factor de servicio efectivo, sobrecorriente, junto con oscilación del torque e historial de carga. Este amplio rango de pruebas le permite explorar la condición real de la integridad y funcionamiento del motor.



Figura 6.4.13 Equipo para monitoreo de motores energizados. Modelo Explorer II.

Monitoreo vfd (drive de frecuencia variable).

La compañía de instrumentos Baker diseñó el Explorer series II una herramienta de monitoreo completo. Junto con cualquier motor de inducción trifásico también verificará las actividades de la aplicación del drive de frecuencia variable. Por primera vez el diagnóstico de problemas en motores puede ocurrir aún bajo las circunstancias más demandantes del drive de frecuencia variable.

El Explorer Series II muestra como la frecuencia, velocidad, torque y nivel de voltaje varían con respecto al tiempo, permitiendo la identificación de sobrecargas transitorias del motor por el VFD. Provee la habilidad de identificar y reparar ajustes deficientes de

velocidad proporcionando la habilidad de ver cuales son las condiciones verdaderas de operación del motor.

Colección avanzada de datos

Una vez que la prueba se ha completado, los resultados pueden ser guardados y almacenados para cada motor individual. Este tipo de documentación es crítica para cualquier programa de mantenimiento predictivo. Permite recordar información previa para analizar tendencias. Con el Explorer Series II, los resultados de prueba son coleccionados, almacenados y manejarlos usando MS Acces® estándar crear archivos en formato de base de datos relacional. Reportes pueden ser generados rápida y fácilmente a través de la consola de impresión, permitiendo al operador confirmación visual de la información de integridad del motor.

El Explorer Series II utiliza múltiples pruebas para determinar las condiciones de alimentación, integridad, carga y perfil de energía del motor. Los siguientes dominios describen la función principal detrás de cada prueba.

1. Condiciones de potencia

Prueba de nivel de voltaje (figura 6.4.14):

- Determina condiciones de sobre y bajo voltaje.
- Compara los voltajes medidos con los voltajes de los umbrales definidos por el usuario.

Esta prueba le informa si existen condiciones de bajo o sobrevoltaje.

-  Buena condición de operación.
- 
-  Advertencia

Advertencia sobre una condición de operación severa.

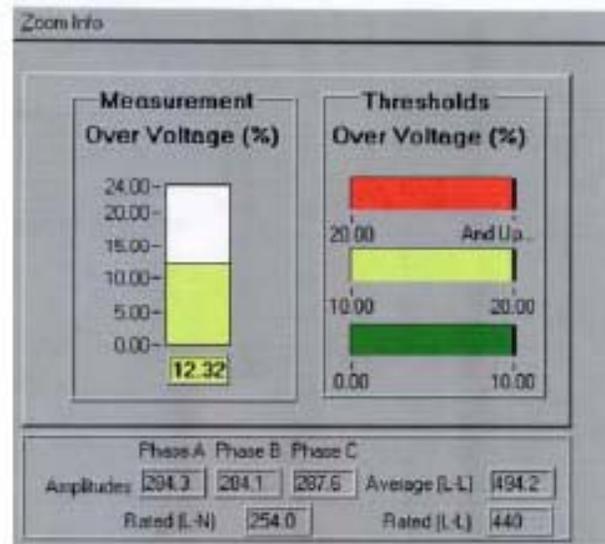


Figura 6.4.14 Prueba de desbalanceo de voltajes.

- Examina los voltajes de fase en el motor calculando el porcentaje de desbalance.
- Calcula el nivel de desbalance comparado con el resultado almacenado en los umbrales.

Una condición de operación con voltajes no balanceados provoca corrientes de secuencia negativa en el estator provocando calor excesivo.

Prueba de distorsión (figura 6.4.15):

- Examina la distorsión armónica total de los tres voltajes de fase.
- Evalúa el nivel de distorsión armónica total y lo compara con el umbral almacenado.

La prueba de distorsión armónica examina las condiciones que causan calor excesivo en el motor, i.e. fuerte distorsión en las ondas de voltaje.

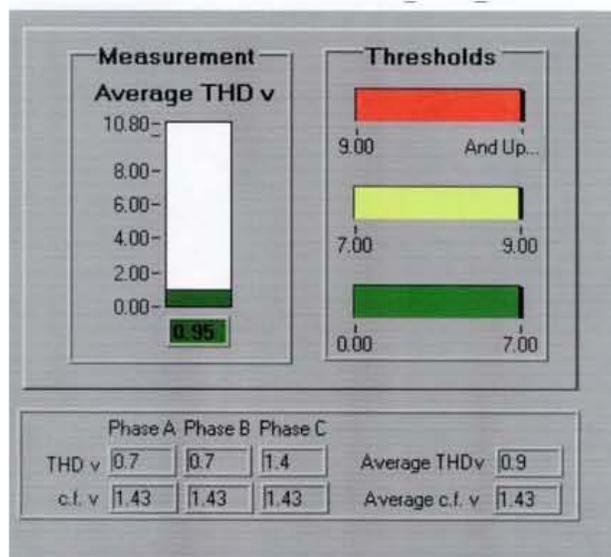


Figura 6.4.15 Prueba de distorsión.

2. Desempeño del motor

Prueba de sobrecorriente (Figura 6.4.16):

- Analiza la corriente de fase comparándola con la corriente de placa del motor. Demasiada corriente circulando por las fases del motor puede someter al aislamiento a severos esfuerzos térmicos disminuyendo su vida útil.

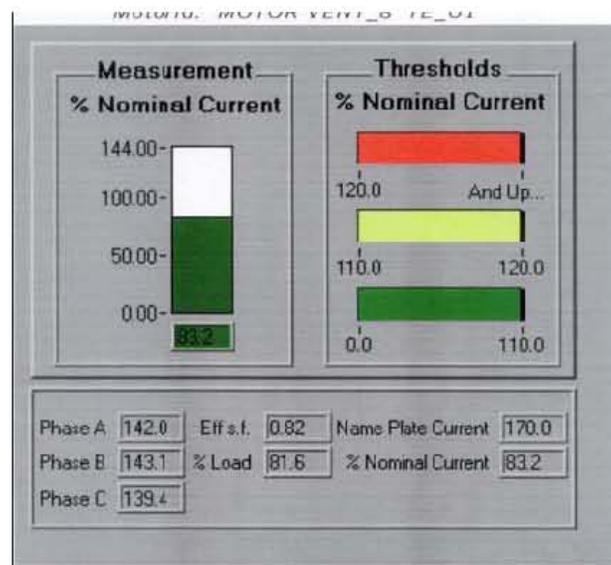


Figura 6.4.16. Prueba de Sobrecorriente.

Prueba de factor de servicio (figura 6.4.17):

- Determina si existe alguna condición de sobrecarga en el motor.
- Identifica que tan cerca se encuentra operando el motor del factor de servicio de placa permitiendo establecer ahorros de dinero.

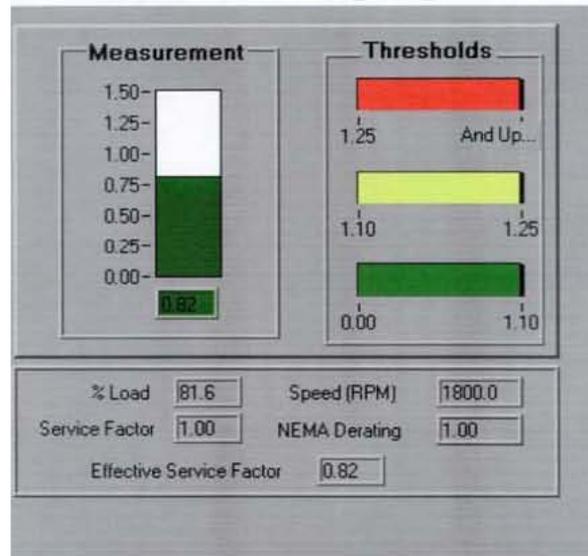


Figura 6.4.17) Prueba de factor de servicio.

3. Condiciones del motor

Prueba de barras del rotor (figura 6.4.18):

- Registra la amplitud relativa de las componentes de corriente diferentes a la frecuencia fundamental que circulan en el rotor. Barras quebradas del rotor pueden ocasionar color excesivo en el motor, decrementar la eficiencia, la vida útil del aislamiento y causar posibles daños al núcleo.

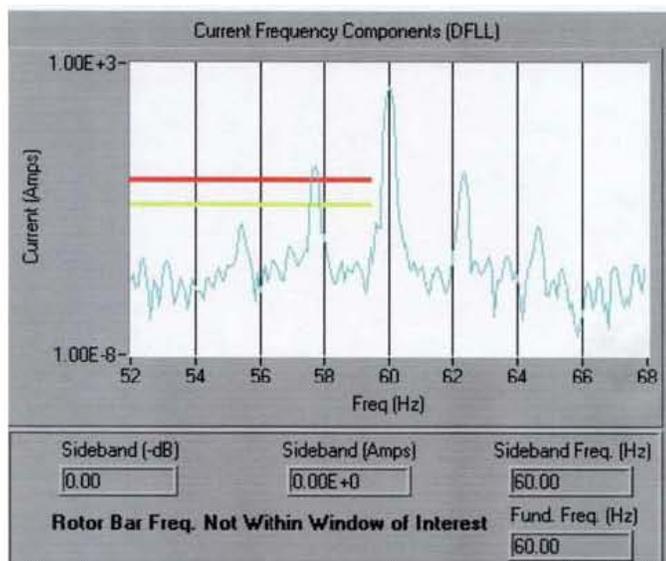


Figura 6.4.18 Prueba de barras del rotor.

Prueba del punto de operación (figura 6.4.19):

- Compara los valores de torque, velocidad y corriente del motor contra los valores previamente almacenados.
- Alerta si algunos de los valores se desvían de las condiciones previas de operación.

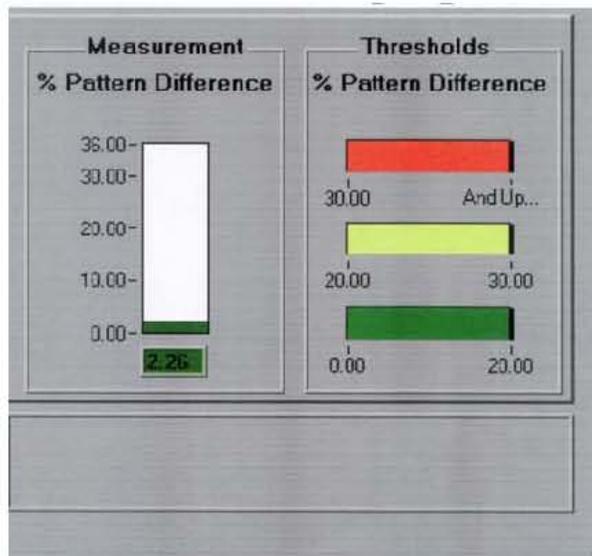


Figura 6.4.19 Prueba del punto de operación.

4. PRUEBA DE CARGA DEL MOTOR

Oscilación del torque (Figura 6.4.20):

- Esta prueba identifica la oscilación que la carga del motor esta requiriendo. Advierte si la carga del motor se encuentra oscilando o demandando torque variable. Compara el nivel de carga del motor con el nivel de carga encontrado en pruebas anteriores.

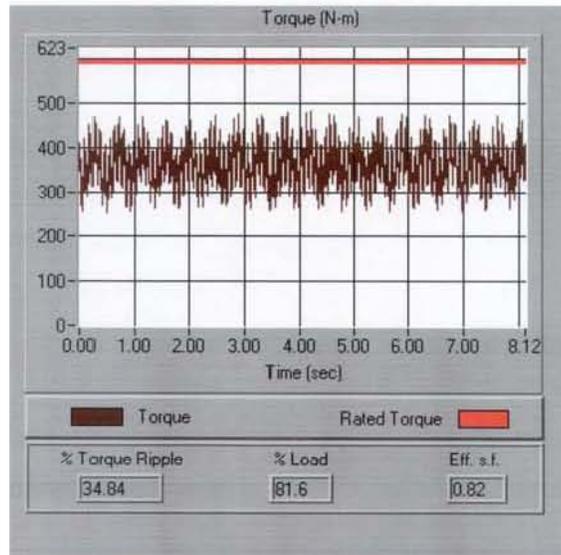


Figura 6.4.20 Oscilación del torque.

Historial de carga (figura 6.4.21):

- Para motores que operan con carga constante, la prueba de historial de carga advierte si ocurre algún cambio en la operación de carga. Compara el nivel de carga del motor con el nivel de carga encontrado en pruebas anteriores.

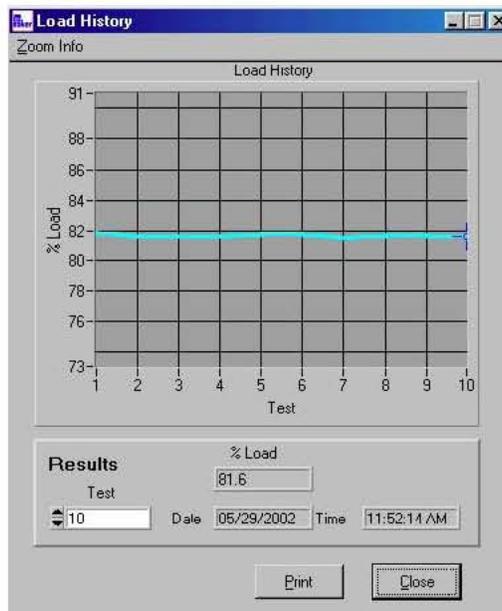


Figura 6.4.21. Historial de carga.

Evaluación de la energía (figura 6.4.22):

Eficiencia

- Examina las condiciones de operación actuales y las compara con motores similares, identifica ahorros de dinero potenciales y contribuye en la decisión del reemplazo del motor.

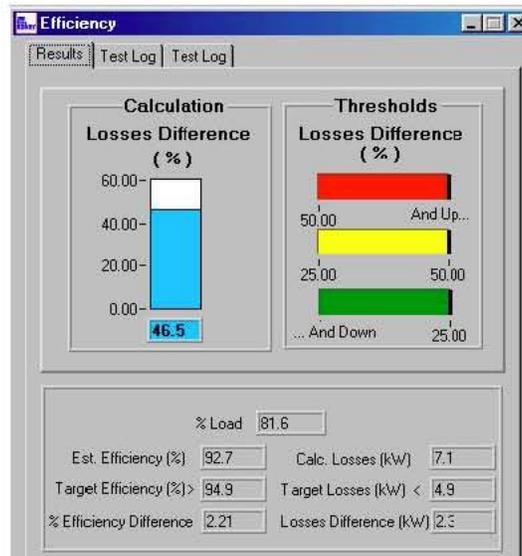


Figura 6.4.22 Evaluación de la energía.

Periodo de Pago (figura 6.4.23)

- Busca en la base de datos maestra del motor y calcula el periodo de tiempo en el cual el reemplazo por un motor de alta eficiencia se pagaría por si mismo.

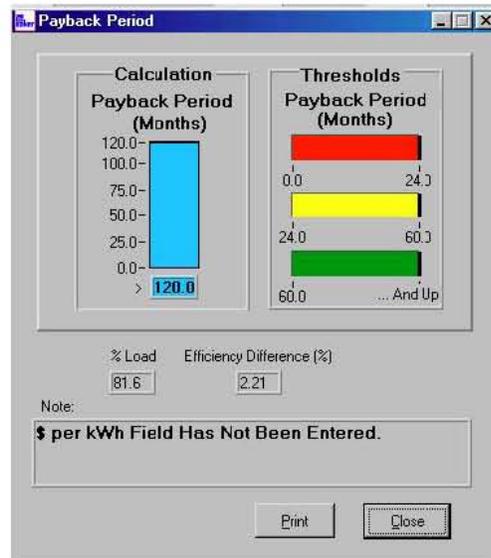


Figura 6.4.23. Periodo de pago.

6.5 Clasificación y recomendaciones para reducir pérdidas en los motores

Se tiene por pérdidas la potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica que ocurre en el motor. Las pérdidas por su naturaleza se pueden clasificar en 5 áreas: pérdidas en el cobre del estator, pérdidas en el cobre del rotor, pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y ventilación y pérdidas adicionales.

6.5.1 Pérdidas en los conductores.

Las pérdidas en los conductores se dividen en dos zonas: estator ($I^2 R$ en las bobinas del estator) y rotor ($I^2 R$ en los bobinados del rotor). Estas pérdidas dependen del cuadrado de la corriente.

6.5.2 Pérdidas en los conductores del estator.

Estas pérdidas son una función de la corriente que fluye en el devanado del estator y la resistencia de ese devanado. Son mínimas en vacío y se incrementan al aumentar la carga.

En función del factor de potencia (FP), la corriente de línea en el estator puede expresarse como:

$$I_L = \frac{\text{potencia} \cdot \text{eléctrica} \cdot \text{de} \cdot \text{entrada}}{\sqrt{3} * \text{Voltaje} \cdot \text{de} \cdot \text{linea} * FP} \dots\dots\dots (6.5.2.1)$$

Cuando se desea mejorar el comportamiento del motor, es importante reconocer la interdependencia entre la eficiencia (EF) y el factor de potencia (FP). Si se despeja el factor de potencia la ecuación se rescribe:

$$PF = \frac{\text{potencia} \cdot \text{mecánica} \cdot \text{de} \cdot \text{salida}}{\sqrt{3} * \text{Voltaje} \cdot \text{de} \cdot \text{linea} * L_L * EF} \dots\dots\dots (6.5.2.2)$$

Por lo tanto si se incrementa la eficiencia, el factor de potencia decrecerá. Para que el factor de potencia permanezca constante, la corriente del estator debe reducirse en proporción al aumento de la eficiencia. Si se pretende que el factor de potencia mejore, entonces la corriente debe disminuir más que lo que la eficiencia aumente. Desde el punto de vista del diseño, esto es difícil de lograr debido a que hay que cumplir otras restricciones operacionales como el momento máximo. Por otra parte la corriente de línea se puede expresar:

$$I_L = \frac{\text{potencia} \cdot \text{mecánica} \cdot \text{de} \cdot \text{salida}}{\sqrt{3} * \text{Voltaje} \cdot \text{de} \cdot \text{salida} * FP * EF} \dots\dots\dots (6.5.2.3)$$

La expresión hace evidente que las pérdidas en el estator ($I^2 R$) serán inversamente proporcionales al cuadrado de la eficiencia y del factor de potencia. Adicionalmente las pérdidas en los conductores del estator dependen de la resistencia del bobinado. Para un motor dado la resistencia del bobinado es inversamente proporcional al peso del bobinado del estator, es decir a mas material conductor en el estator menos pérdidas.

6.5.3 Pérdidas en los conductores del rotor.

Son directamente proporcionales a la resistencia del embobinado del rotor, dependen del cuadrado de la corriente que circula en el embobinado del rotor (barras y anillos) y dependen del flujo magnético que atraviesa el entrehierro. Son prácticamente cero en vacío y se incrementan con el cuadrado de la corriente en el rotor y también se incrementan con la temperatura. Las pérdidas en el rotor se pueden expresar en función del deslizamiento:

$$Pérd. \cdot Rotor = \frac{(PMS + Pérdidas \cdot FyV)}{1 - S} S \dots\dots\dots (6.5.3.1)$$

PMS. : Potencia Mecánica de Salida

F y V: Fricción y Ventilación

S : Deslizamiento

6.5.4 Pérdidas en el núcleo magnético.

Estas pérdidas tienen dos componentes, las pérdidas por corrientes de Eddy y las pérdidas por el fenómeno de histéresis, incluyendo las pérdidas superficiales en la estructura magnética del motor. Las pérdidas en el núcleo del rotor debido al flujo magnético principal, son virtualmente cero.

6.5.5 Pérdidas por Histéresis.

Son causadas debido a la propiedad de remanencia que tienen los materiales magnéticos al ser excitados por un flujo magnético en una dirección. Como el flujo de excitación esta cambiando de dirección en el núcleo magnético, la remanencia hace que se forme el ciclo de histéresis, cuya área esta relacionada por la energía gastada en magnetizar y desmagnetizar el núcleo continuamente. Estas pérdidas dependen del flujo máximo de excitación, de la frecuencia de variación del flujo y de la característica del material que determina el ancho del ciclo de histéresis.

6.5.6 Pérdidas por corrientes de Eddy.

Son causadas por las corrientes inducidas o corrientes de Eddy que circulan en las láminas magnéticas del núcleo del estator las que son inducidas por el flujo magnético giratorio del estator. En efecto de acuerdo a la ley de Faraday el campo magnético variable en el tiempo crea campos eléctricos de trayectoria cerrada en el núcleo magnético y como el acero es un material conductor estos campos hacen circular corrientes (corrientes de Eddy) a través de su trayectoria cerrada, por esta razón el núcleo magnético se hace de láminas magnéticas. Por lo tanto estas pérdidas dependen del flujo magnético máximo, de la frecuencia de variación del flujo magnético y de la resistividad del acero magnético.

6.5.7 Pérdidas por fricción y ventilación.

Las pérdidas por fricción y ventilación son debidas a la fricción en los rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y de otros elementos rotativos del motor.

La fricción en los rodamientos es una función de las dimensiones de este, de la velocidad, del tipo de rodamiento, de la carga y de la lubricación usada. Estas pérdidas quedan relativamente fijadas para un tipo de diseño, y debido a que constituyen un porcentaje pequeño de las pérdidas totales del motor, los cambios que se pueden hacer en el diseño para reducirlas no afectan significativamente la eficiencia del motor.

6.5.8 Pérdidas adicionales en carga.

Son pérdidas residuales difíciles de determinar por medio de mediciones directas o de cálculos. Estas pérdidas están relacionadas con la carga y generalmente se suponen que varían con el cuadrado del momento de salida.

La naturaleza de estas pérdidas es muy compleja. Están en función de muchos factores de diseño y de fabricación del motor. Algunos de los elementos que influyen en estas pérdidas son: el diseño del devanado, la relación entre la magnitud del entrehierro y la abertura de las ranuras; la relación entre el número de las ranuras del estator y del rotor, la inducción en

el entrehierro; las condiciones en la superficie del rotor, el tipo de contacto superficial entre las barras y las laminaciones del rotor.

6.5.9 Distribución de las pérdidas.

Dentro de un intervalo limitado de eficiencia, las distintas pérdidas analizadas son independientes unas de las otras. Sin embargo, cuando se procuran mejoras sustanciales en la eficiencia, se encuentra que las mismas están fuertemente entrelazadas. El diseño final de un motor es un balance entre las eficiencias y las pérdidas, con el objetivo de obtener una eficiencia elevada y aun poder satisfacer otros requerimientos operacionales como el momento de arranque, la corriente de arranque, el momento máximo y el factor de potencia.

La forma en que se distribuye relativamente estas pérdidas depende del tipo y tamaño del motor y, para tener una idea general, en la Tabla 6.5.9.1 se muestra como se distribuyen las pérdidas en motores de diseño NEMA B de distinta potencia nominal. En esta tabla se puede evidenciar que a potencia nominal resulta relativamente amplio el intervalo que varía cada una de las pérdidas dependiendo de la potencia del motor.

Potencia (HP)	5	20
Tipo de pérdidas	% Pérdidas	% Pérdidas
Conductores Estator	40	38
Conductores Rotor	20	22
Núcleo Magnético	29	20
Fricción y ventilación	4	8
Adicionales con carga	7	12
Eficiencia %	83	90.5

Potencia (HP)	100	200
Tipo de pérdidas	% Pérdidas	% Pérdidas
Conductores Estator	28	30
Conductores Rotor	18	16
Núcleo Magnético	13	15
Fricción y ventilación	14	10
Adicionales con carga	27	29
Eficiencia %	91.5	93

Tabla 6.5.9.1 Distribución típica de pérdidas en los motores diseño NEMA B.

Fuente: Andreas Jhon ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC MOTORS. Second Edition.

Copyring Marcel Dekker, Inc. New York, USA 1992.

Es importante para los diseñadores entender la forma en que se distribuyen las pérdidas con el objetivo de realizar cambios para aumentar la eficiencia del motor. En general la distribución de pérdidas promedio para los motores diseño NEMA B puede resumirse en la tabla 6.5.9.2

Componentes Pérdidas en el Motor	% Pérdidas Totales
Pérdidas Conductores Estator	37
Pérdidas Conductores Rotor	18
Pérdidas Núcleo Magnético	20
Pérdidas Fricción y ventilación	9
Pérdidas Adicionales con carga	16

Tabla 6.5.9.2 Distribución de pérdidas Promedio Motores Diseño NEMA B.

6.6 Mejoras en los diseños de la mayoría de los motores de alta eficiencia.

- **Las pérdidas en los conductores del estator:** disminuyen aumentando el área disponible para los conductores mediante la colocación en las ranuras de conductores de más sección o a través de un incremento de las dimensiones de las ranuras. Una variación en la configuración del devanado puede conducir también a una reducción de estas pérdidas, si se logra disminuir con ello la longitud de las cabezas de bobina y por lo tanto la resistencia del embobinado del estator.

- **Las pérdidas en los conductores del rotor:** pueden reducirse incrementando la cantidad del material conductor (en las barras y en los anillos), utilizando materiales de mayor conductividad, así como aumentando el flujo total que atraviesa el entrehierro. La magnitud de estos cambios esta limitada por las siguientes restricciones: momento mínimo de arranque requerido, corriente máxima de arranque permisible y el factor de potencia mínimo aceptable.

- **Las pérdidas en el núcleo magnético:** se reducen haciendo que el motor opere con inducciones más bajas que las normales y para compensar se incrementa la longitud de la estructura ferromagnética. Esto reduce las pérdidas por unidad de peso, pero debido a que el peso total aumenta, la mejoría en cuanto a pérdidas no es proporcional a la reducción unitaria de estas. La disminución en la carga magnética también reduce la corriente de magnetización; y esto influye positivamente en el factor de potencia.

- **Las pérdidas por fricción y ventilación:** están asociadas a los ventiladores y a la cantidad de ventilación requerida para extraer el calor generado por otras pérdidas en el motor, tal como las pérdidas en el cobre, las del núcleo y las adicionales. Según se reducen las pérdidas que generan calor, es posible reducir el volumen de aire requerido para moverlas y de esta manera, se pueden reducir las pérdidas por ventilación. Esto resulta válido especialmente en el caso de motores cerrados con ventilación externa forzada. Otro camino es el logro de un mejor diseño aerodinámico. Uno de los subproductos importantes de la reducción de las pérdidas de ventilación, es la disminución de los niveles de ruido.

- **Las pérdidas adicionales:** se pueden reducir mediante un diseño optimizado del motor y mediante un proceso cuidadoso de producción. Como estas pérdidas están asociadas al procesamiento, tal como las condiciones superficiales del rotor, se pueden minimizar a través de un control cuidadoso del proceso de fabricación. Las pérdidas adicionales son las más difíciles de controlar en el motor, debido al gran número de variables que contribuyen a las mismas.

6.7 Rodamientos para cada aplicación

Rodamiento tipo antifricción

Los rodamientos antifricción son estándar en los armazones 500, 580 y en la mayoría de motores de 8 polos y menores. Son de una sola fila, abiertos y re-engrasables. Nueva grasa se añade a través de graseras, expulsando la grasa vieja a través de puertos de drenes de salida. La gran reserva de lubricante protege el rodamiento de contaminantes externos mientras la tapa balero metálica protege el estator del exceso de grasa.

Rodamientos tipo chumaceras.

El rodamiento tipo chumaceras es opcional en cualquier motor en donde el rodamiento tipo antifricción es estándar. El rodamiento tipo chumaceras, es estándar en armazones 680 y mayores. Una gran reserva de aceite provee un auto-enfriamiento en la mayoría de los motores.

El anillo de aceite entrega el aceite a través de los canales para que se distribuyan en todo el rodamiento. Se provee de un puerto en la caja para una visualización externa de los rodamientos y así verificar la correcta operación.

La provisión para la lubricación por flujo se encuentra en todos los motores de rodamiento por chumacera. Ambos lados del rodamiento tienen sello laberinto y son ventilados a la atmósfera para prevenir migración de aceite.

Cuando sea requerido se proveerá de un rodamiento aislado para prevenir daños de corrientes circulantes a la flecha. Se provee de indicadores para visualizar el nivel de aceite del motor.

Aislamiento

Siemens incorpora el sistema de aislamiento clase F como un diseño estándar de los grandes motores. Las bobinas tipo Random son estándar hasta armazones de 580 para voltajes de 600V. Las bobinas tipo Form son estándar para todos los armazones de voltajes arriba de 600V y sistemas de 13.8kV.

Estatores con bobina Random

El alambre barnizado individualmente con barniz poliéster/amida es insertado en bobinas individuales dentro de las ranuras semi-cerradas. Las bobinas son conectadas y reforzadas en caso de ser necesario. Para un aislamiento clase H estatores son sumergidos dos veces en una resina epóxica híbrida y horneados para producir un estator sólido rígido y apropiado para el comienzo para el arranque a tensión plena.

Estatores con bobina Form

El sistema de aislamiento de sellado epóxico tipo Siemens MiCLADTM provee una protección sólida para todas las bobinas tipo FROM y es capaz de pasar la prueba de Conformidad de Bobinado Sellado de la normas NEMA MG1-20.

Un encintado fuerte de poliéster o de Dracon es usado para un recubrimiento individual. Para evitar esfuerzos de voltaje entre la bobina y la ranura se aplica un aislamiento adicional de mica.

Las bobinas preformadas son conectadas e insertadas en las ranuras del estator las ranuras son cubiertas por una película de poliéster como estándar, sin embargo, cuando se requiera una protección por efecto corona, una capa mas gruesa de poliéster es colocada en las ranuras.

El estator es colocado en un tanque de impregnación al vacío (VPI), el estator recibe dos tratamientos de impregnación al vacío como estándar.

Cada tratamiento VPI somete al estator a un alto vacío, eliminando el aire atrapado y los gases del sistema de aislamiento. Una resina epóxica sólida termoestable al 100% se

introduce. El estator sumergido es entonces presurizado varias veces a presiones atmosféricas. El estator se saca del tanque y es horneado para curar la resina catalizada, produciendo un sistema de aislamiento sólido, sellado, impermeabilizado a la humedad y a los agentes químicos.

Rotores y ejes.

Los ejes hechos por siemens están maquinados de una barra de acero carbón medio y están generosamente dimensionadas para una transmisión segura del torque del motor a la carga. Todos los rotores tienen pasajes de aire y aberturas que son creadas en el centro del motor para un enfriamiento superior. Aberturas axiales paralelas a la flecha, llevan el aire enfriado a las aberturas radiales que están en el centro del rotor. El aire que pasa a través de las aberturas recoge el calor y lo saca fuera del rotor.

Todos los rotores son balanceados a una velocidad operacional con equipos sofisticados de balanceo de alta velocidad.

Estos rotores son también construidos de barras de aluminio fundido o cobre, dependiendo de la aplicación y/o requerimientos.

Motores de aluminio

Las laminaciones de acero para formar rotores son apiladas en una prensa de sujeción, comprimida y puesta en un molde para inyección de aluminio. Posteriormente se ensambla el eje al centro del rotor antes de ser balanceado. La construcción de barras y anillos de fundición son de una pieza robusta y sólida, eliminando la posibilidad de fallas en las uniones.

Rotores de barras de cobre

Las laminaciones de acero son apiladas en una prensa de sujeción, comprimidas y ajustadas. El centro del rotor es asegurado rígidamente por terminales de acero pesado con soportes para prevenir el flameado.

Las barras de cobre son presionadas en las ranuras del rotor, las cuales son alineadas con rieles de acero para asegurar un mejor ajuste.

Las barras y los conectores terminales son unidos con soldadura usando un proceso de inducción hecho a la medida, el cual permite que cada terminal del rotor sea soldado en un solo paso, Este proceso asegura la unión eléctrica y mecánica.

Características especiales

Estatores y armazones para uso rudo.

El estator está construido de laminaciones de acero al silicio de alto grado. Este acero es seleccionado por sus propiedades eléctricas y magnéticas. Las laminaciones son apiladas, cerradas comprimidas y aseguradas con un anillo de contención de acero. Esta estructura ofrece un ensamblado fuerte y rígido, el cuál minimiza la vibración, el ruido y asegura una exactitud vital en el entrehierro.

El armazón del motor esta construido tanto de hierro fundido como de laminaciones de acero, dependiendo del tamaño del armazón y tipo de envolvente. Ambos tipos de estructuras son elegidos por su fuerza y durabilidad estos son maquinados finamente para asegurar un alineamiento preciso del motor y del estator así como para ofrecer un soporte fuerte y resistente del rodamiento.

Protecciones de rodamientos

Detectores de temperatura por resistencia (rtd)

Un alambre es colocado al final de un sensor, el cuál es instalado en la escobilla. Este sensor es instalado a través de un cuidadoso agujero hecho en la caja de rodamientos. La punta del sensor es bloqueada al contacto con la escobilla. Las terminales son colocadas en una caja auxiliar. El monitoreo de los cambios de resistencia producirá una lectura directa de la temperatura. Los metales disponibles en el RTD son cobre con una resistencia

nominal de 10 ohms o platino con una resistencia nominal de 100 ohms. Normalmente los RTD son usados con los motores de rodamiento tipo chumaceras.

Termopar

Este detector es similar al RTD. Las combinaciones de pares termoeléctricos disponibles son de hierro- Constantan (tipo J), Cromo-alumel(tipo K) y Cromo Constantan(tipo E)

Termómetros

Los termómetros de lectura directa están disponibles. El termómetro es instalado de la misma forma que el detector RTD y la cara de este es montado en el armazón del motor.

Relevadores

Un bulbo lleno de gas es instalado en la escobilla del rodamiento. Un tubo capilar delgado flexible conecta al bulbo a un relevador montado en el armazón del motor. El relevador tiene un contacto normalmente abierto y uno normalmente cerrado. Al incrementar la temperatura, la presión del gas que está adentro del bulbo también se incrementa, este hace exceder los límites preestablecidos causando que el relevador dispare. Al enfriarse suficientemente, el relevador automáticamente se resetea. Se dispone de relevadores ajustables y relevadores con indicación de temperatura.

Detectores

Se puede montar un detector de vibración en el motor cerca del rodamiento del motor para un rodamiento tipo anti-fricción. Este tipo de protección es recomendado, debido a que la experiencia ha demostrado que una excesiva vibración usualmente ocurre antes de que se detecte un calor excesivo en el rodamiento.

Sensores de proximidad

Los sensores de proximidad sensibles a la vibración para motores de rodamiento tipo chumaceras. Estos sensores son dispositivos para corrientes de Eddy, los cuales miden la distancia y los cambios en la misma. Estos son montados en la caja de rodamiento o afuera de la guarda de aceite con la punta de proximidad especialmente preparada para la superficie de la flecha.

Protección del estator

Detectores de temperatura por resistencia (rtd)

Los RTD pueden ser incrustados en las ranuras del estator esto permite una lectura directa de la temperatura del área mas caliente del bobinado del motor. Los detectores con una resistencia de 100 ohms son los estándar, también están disponibles detectores de 10 ohms y 120 ohms.

Termopar

Los termopares pueden ser instalados en las ranuras del estator o en las últimas vueltas del embobinado, dependiendo como se requiera. El tipo puede ser elegido dependiendo del equipo de monitoreo. Los termopares disponibles son cobre-constantan y cromo-alumel.

Termistores

Los Termistores son los dispositivos que tienen un gran cambio de resistencia para un pequeño cambio de temperatura. Los termistores son montados en las ultimas vueltas de la bobina (el tamaño no permite que sean montados en las ranuras) para indicar una sobrecarga de temperatura vía un relevador. Este dispositivo es solo un dispositivo de alerta de sobrecarga y no de lectura actual de temperatura.

Protección contra sobre tensión.

Una protección estándar a la sobre tensión consiste en un capacitor en cada fase con resistencias de descargas incorporadas y tres estaciones de aparta-rayos montados en un gabinete metálico adyacente al motor.

Protección diferencial.

Seis terminales extras en la caja terminal pueden ser suministrados para la protección diferencial. Usualmente los transformadores son suministrados y montados por terceros, pero pueden ser suministrados con el motor.

Resistencias calefactoras.

Para instalaciones en lugares de gran humedad, se recomiendan las resistencias calefactoras para reducir la condensación y deben ser energizados tan pronto el motor es desenergizado. Estos están disponibles en 120 o 240 volts en una sola fase. También están disponibles calentadores de superficies especiales de bajas temperaturas para 3 fases.

Pruebas

Pruebas estándar

A todos los motores se les da una prueba comercial (rutina) de los estándares NEMA, ANSI e IEE

Pruebas opcionales.

Supervisadas o no supervisadas.

Prueba completa por la IEEE 122 en los métodos E, E1, F*, o F1*.

Pruebas de presión de sonido por la IEEE 58 y nema MG1-9

Prueba de bobinado sellado por NEMA MG1-20

Prueba de temperatura a los rodamientos

Prueba de par vs. Velocidad /corriente

Prueba de índice de polarización por la IEEE 45

*Máximo 3000 Hp para métodos F o F1.

CAPÍTULO VII

FACTORES EXTERNOS QUE DETERMINAN LA EFICIENCIA DE UN MOTOR TRIFÁSICO

7.1 Factores que afectan el comportamiento de un motor

Desde el punto de vista simplificado, un motor se utiliza para convertir energía eléctrica en energía mecánica de rotación. En 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 definitivo de trabajo, se le somete a un medio circulante distinto al de 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.

7.2 Variación de tensión de 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 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.

Al 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 terminaciones del transformador apropiado.

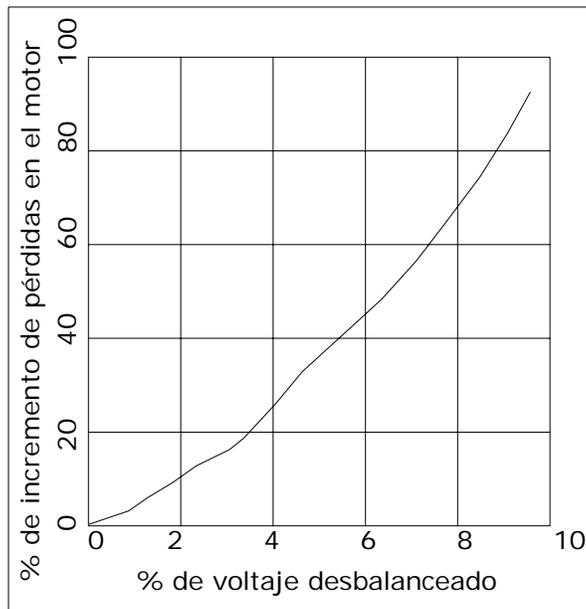


Figura 7.2.1. Incremento de las pérdidas con el voltaje desbalanceado

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 un 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 de 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-FASE) se expresa por medio de la relación:

$$V_{des} = \frac{\text{desviacion_respecto_valor_medio_de_voltaje}}{\text{voltaje_promedio}} \times 100 \dots\dots\dots(7.2.1)$$

La eficiencia del motor se reduce en forma notable a medida que aumenta el desequilibrio, como se puede observar en la figura 7.2.1 un desequilibrio del 4 % se traducirá en un aumento de las pérdidas de aproximadamente un 25%, con el consiguiente incremento en la elevación de la temperatura de operación del motor.

En la fase que conduce la corriente más intensa, el porcentaje en que aumenta la temperatura es aproximadamente proporcional a 2 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 cual suelen ser adecuados los relevadores de sobrecarga.

7.3 Efectos de la variación de la frecuencia

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

Para la reducción de la frecuencia se tiene:

- ❑ La velocidad del motor se reduce en forma proporcional a la reducción de la frecuencia.
- ❑ El flujo Φ , y por tanto la densidad del mismo en el circuito magnético del motor se incrementan, por ser inversamente proporcional a la frecuencia.
- ❑ La corriente magnetizante debe aumentar al incrementarse al flujo.
- ❑ El par que debe desarrollar el motor es más alto debido a la reducción de la velocidad.
- ❑ Se incrementa el par de arranque del motor.
- ❑ Se eleva así mismo el valor del par máximo.
- ❑ El factor de potencia desciende en el mayor de los casos.
- ❑ Normalmente, también la eficiencia tiende a disminuir.
- ❑ 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.
- ❑ 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:

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

- ❑ El par máximo que puede desarrollar el motor disminuye también en la misma proporción.
- ❑ El factor de potencia tiende a mejorar ligeramente.
- ❑ La eficiencia tiende también a incrementarse.
- ❑ La elevación de temperatura normalmente se reduce como consecuencia de menores pérdidas y una mayor eficacia en el sistema de ventilación.
- ❑ Se reduce el ruido de origen magnético.

7.4 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. La figura 7.4.1 ilustra la forma en que varían la eficiencia y el factor de potencia con la carga en un motor 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 al factor de potencia que corresponden al valor de la carga real. Por ejemplo, supóngase una aplicación en una bomba que requiere un motor de 40 c.p. y 4 polos.

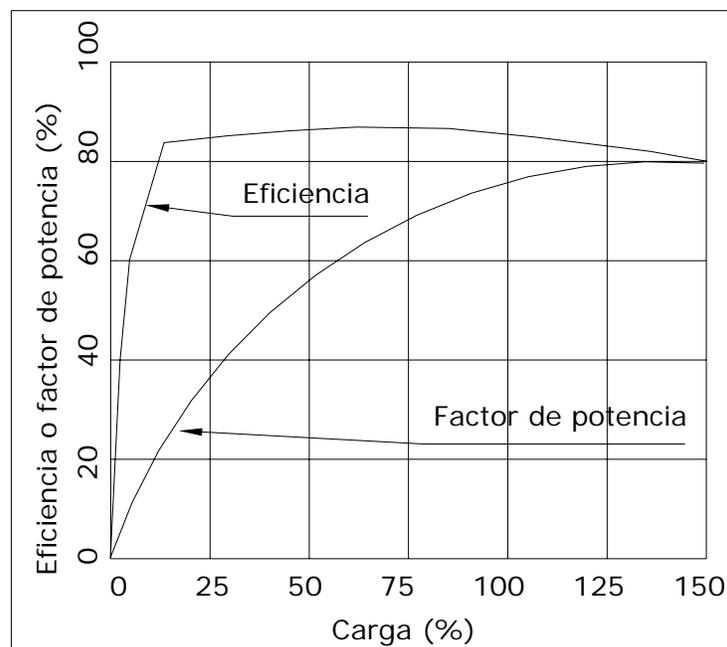


Figura 7.4.1. Características de un motor estándar típico.

La eficiencia de un motor Standard 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 $\frac{3}{4}$ de carga y las eficiencias respectivas a este valor de carga son de 88 y 92.4%. Con estos valores el valor alcanza 14145 kW/h anuales. De esto se desprende la influencia que tiene la carga del motor en el ahorro de energía.

Motores poco cargados o sobrecargados

Los motores industriales no suelen funcionar a plena carga, pruebas de campo de la California Energy Commission llevadas a cabo en cuatro plantas industriales nos indican que por término medio los motores eléctricos operan al 60% de su carga asignada. Es común que las industrias instalen motores de mayor potencia a la requerida por varias razones prácticas:

- ❑ Prevención indirecta de fallos en procesos críticos.
- ❑ Desconocimiento de la carga real del motor en la elección de éste.
- ❑ Previsión de futuras ampliaciones productivas.
- ❑ Por reducciones posteriores de producción.
- ❑ Por sustitución de un motor previamente fallido que era de menor potencia.

En cuanto a los motores poco cargados, debe advertirse que no siempre su eficiencia es menor, excepto cuando la carga sea acentuadamente pequeña (menor del 25%) Por ello, cuando la carga supera el 50% no se pueden dar recomendaciones simples de sustitución de éstos motores. En todo caso su factor de potencia es menor y esto afecta a las pérdidas en la distribución eléctrica

Los costos extra indeseables de estos motores son: mayor costo de adquisición del motor y su equipamiento y mayor costo de consumo energético por la reducción de la eficiencia del motor y el sistema eléctrico (factor de potencia) En muchas ocasiones resulta económicamente interesante sustituir un motor poco cargado por un motor de alta eficiencia o incluso por un motor de eficiencia normal.

7.5 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 watorimetro o del medidor de demanda. Por consiguiente, aún cuando podría haber un ligero decremento en las pérdidas: $I^2 R$, 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 esta 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.

7.6 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. Por otro lado los grandes ventiladores suelen ser de elevada inercia y el tiempo de arranque puede llegar a ser de unos 20 seg.

El aire frío opone mayor resistencia al movimiento que el aire caliente, de modo que los ventiladores para los sistemas de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire son un 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 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 arranque frecuentes, la temperatura excederá los límites térmicos de los devanados del estator y rotor. Por lo cual son recomendables 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 sólo por el número total de horas que ha trabajado sino también por el número de arranques que ha tenido.

7.7 Efecto de la altura al nivel del mar

Cuando instala un motor a una altura 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 de un 5% por cada 300 mts. (1000 ft) 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 aplicación.

CAPÍTULO VIII

LA TECNOLOGÍA DE LOS MOTORES EN LA ACTUALIDAD

8.1 Clasificación de eficiencia y normas correspondientes

Eficiencia nominal de motores estándar.- Es el promedio de eficiencia de un lote de motores estándar del mismo diseño y que cumple con los valores de eficiencia nominal de las Tablas 8.1.2 y 8.1.3.

Eficiencia nominal de motores de eficiencia alta.-Es el promedio de eficiencia de un lote de motores de alta eficiencia del mismo diseño y que cumplen con los valores de eficiencia nominal de las Tablas 8.1.4. y 8.1.5.

Eficiencia mínima (motores de eficiencia estándar y alta).- Las variaciones de fabricación, procesado de material y precisión del método de prueba tienen como resultado alteraciones en la eficiencia, para una gran población de motores del mismo diseño; por lo tanto, para cada valor nominal de eficiencia cualquier motor de ese diseño debe cumplir con su valor mínimo asociado.

La Tabla 8.1.1 muestra los valores de eficiencia mínima para cada eficiencia nominal, de acuerdo con la NOM-ENER-016-1998. Los valores de la eficiencia nominal de la Columna A se obtienen a partir del 99,0%, con incrementos de pérdidas del 10%. Los valores de eficiencia mínima asociada de la Columna B, se obtienen incrementando las pérdidas en un 20%.

Eficiencia nominal y mínima asociada (en porciento)			
Columna A	Columna B	Columna A	Columna B
Eficiencia Nominal	Eficiencia Mínima	Eficiencia Nominal	Eficiencia Mínima
99.0	98.8	94.1	93.0
98.9	98.7	93.6	92.4
98.8	98.6	93.0	91.7
98.7	98.5	92.4	91.0
98.6	98.4	91.7	90.2
98.5	98.2	91.0	89.5
98.4	98.0	90.2	88.5
98.2	97.8	89.5	87.5
98.0	97.6	88.5	86.5
97.8	97.4	87.5	85.5
97.6	97.1	86.5	84.0
97.4	96.8	85.5	82.5
97.1	96.5	84.0	81.5
96.8	96.2	82.5	80.0
96.5	95.8	81.5	78.5
96.2	95.4	80.0	77.0
95.8	95.0	78.5	75.5
95.4	94.5	77.0	74.0
95.0	94.1	75.5	72.0

Tabla 8.1.1. Eficiencia nominal y mínima asociada (en porciento)

Valores eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados de eficiencia estándar (en porciento)				
Potencia nominal, kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0.746	74.0	75.5	75.5	72.0
1.119	77.0	80.5	78.5	75.5
1.492	80.0	81.5	78.5	75.5
2.238	81.5	81.5	80.0	75.5
3.730	82.5	84.0	81.5	82.5
5.595	84.0	86.5	82.5	84.0
7.460	85.5	86.5	84.0	85.5
11.19	85.5	87.5	85.5	85.5
14.92	86.5	87.5	86.5	86.5
18.65	86.5	89.5	86.5	86.5
22.38	87.5	90.2	87.5	87.5
29.84	88.5	90.2	88.5	88.5
37.30	88.5	91.0	88.5	89.5
44.76	89.5	91.7	89.5	89.5
55.95	89.5	91.7	90.2	89.5
74.60	90.2	92.4	90.2	90.2
93.25	91.0	92.4	91.0	91.0
111.90	91.0	92.4	91.0	91.7
149.20	91.7	93.0	91.7	91.7

Tabla 8.1.2. Valores eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados de eficiencia estándar.

Eficiencia nominal

La National Electrical Manufacturers Association (NEMA) (NEMA, 1998) considera que las variaciones en materiales, procesos de manufactura y pruebas, resultan en una variación de la eficiencia de motor a motor para un mismo diseño. La eficiencia para una población grande de motores no es un valor único, sino una banda de valores. Por lo tanto, la Tabla 8.1.1 se ha establecido para indicar una serie lógica de eficiencias nominales y mínimas. La eficiencia que debe incluirse en la placa de datos de los motores se denomina Eficiencia nominal, cuyo valor se debe tomar de la Tabla 8.1.1., Columna A, y no debe ser mayor que la eficiencia promedio de una población grande de motores de la misma capacidad y mismo diseño. La eficiencia nominal representa el valor que debe tomarse para calcular consumos energéticos de un motor o grupo de motores. La eficiencia a carga plena, a tensión y frecuencia eléctrica nominales, no debe ser menor que el valor mínimo indicado en la Columna B de la misma tabla. Por ejemplo, la variación del 10% en las pérdidas del acero, que es una tolerancia común para los fabricantes de aceros eléctricos, puede producir por sí sola un cambio de 0,3% en la eficiencia de un motor de 7,46 kW (10 c.p.) (Nadel, 1992).

Valores eficiencia nominal a plena carga para motores abiertos de eficiencia estándar (en porcentaje)				
Potencia nominal, kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0.746	72.0	72.0	72.0	72.0
1.119	72.0	74.0	74.0	74.0
1.492	74.0	75.5	75.5	75.5
2.238	80.0	81.5	80.0	78.5
3.730	80.0	81.5	80.0	80.0
5.595	81.5	82.5	81.5	81.5
7.460	82.5	82.5	82.5	82.5
11.19	84.0	84.0	84.0	84.0
14.92	84.0	84.0	84.0	84.0
18.65	86.5	86.5	86.5	86.5
22.38	87.5	88.5	87.5	87.5
29.84	88.5	89.5	88.5	88.5
37.30	89.5	89.5	89.5	89.5
44.76	90.2	90.2	90.2	90.2
55.95	90.2	90.2	90.2	90.2
74.60	90.2	91.0	90.2	90.2
93.25	91.0	92.4	91.0	91.0
111.90	91.0	92.4	91.0	91.0
149.20	91.7	93.0	91.7	91.7

Tabla 8.1.3. Valores eficiencia nominal a plena carga para motores abiertos de eficiencia estándar.

Valores eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados de eficiencia alta (en porcentaje)				
Potencia nominal, kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0.746	75.5	82.5	80.0	74.0
1.119	82.5	84.0	85.5	77.0
1.492	84.0	84.0	86.5	82.5
2.238	85.5	87.5	87.5	84.0
3.730	87.5	87.5	87.5	85.5
5.595	88.5	89.5	89.5	85.5
7.46	89.5	89.5	89.5	88.5
11.19	90.2	91.0	90.2	88.5
14.92	90.2	91.0	90.2	89.5
18.65	91.0	92.4	91.7	89.5
22.38	91.0	92.4	91.7	91.0
29.84	91.7	93.0	93.0	91.0
37.30	92.4	93.0	93.0	91.7
44.76	93.0	93.6	93.6	91.7
55.95	93.0	94.1	93.6	93.0
74.60	93.6	94.5	94.1	93.0
93.25	94.5	94.5	94.1	93.6
111.90	94.5	95.0	95.0	93.6
149.20	95.0	95.0	95.0	94.1

Tabla 8.1.4. Valores eficiencia nominal a plena carga para motores cerrados de eficiencia alta (en porcentaje)

Las variaciones mecánicas también pueden afectar la eficiencia mediante el cambio de la longitud del entrehierro (una diferencia del 10% en el entrehierro es común) y, como consecuencia, en las pérdidas indeterminadas. El maquinado preciso de las partes del motor es costoso y los fabricantes hacen un balance entre la precisión y el costo del herramental a utilizar en la línea de producción. Bajo estas condiciones, una población grande de motores del mismo modelo pueden caracterizarse estadísticamente mediante la eficiencia promedio y la eficiencia mínima de esa población.

La Figura 8.1.1 muestra una curva en forma de campana (distribución normal), que representa la distribución de la eficiencia de un grupo de motores. El promedio se considera la eficiencia nominal del motor y se utiliza para predecir los requerimientos de energía de una aplicación dada.

Valores eficiencia nominal a pena carga para motores abiertos de eficiencia alta (en porciento)				
Potencia nominal, kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0.746		82.5	80.0	74.0
1.119	82.5	84.0	84.0	75.5
1.492	84.0	84.0	85.5	85.5
2.238	84.0	86.5	86.5	86.5
3.730	85.5	87.5	87.5	87.5
5.595	87.5	88.5	88.5	88.5
7.460	88.5	89.5	90.2	89.5
11.190	89.5	91.0	90.2	89.5
14.920	90.2	91.0	91.0	90.2
18.650	91.0	91.7	91.7	90.2
22.380	91.0	92.4	92.4	91.0
29.840	91.7	93.0	93.0	91.0
37.300	92.4	93.0	93.0	91.7
44.760	93.0	93.6	93.6	92.4
55.950	93.0	94.1	93.6	93.6
74.600	93.0	94.1	94.1	93.6
93.250	93.6	94.5	94.1	93.6
111.900	93.6	95.0	94.5	93.6
149.200	94.5	95.0	94.5	93.6

Tabla 8.1.5 Valores eficiencia nominal a pena carga para motores abiertos de eficiencia alta (en porciento)

Eficiencia mínima

La eficiencia mínima representa una combinación desfavorable de tolerancias en la materia prima y en las tolerancias de fabricación. Sin embargo, 5% de los motores en una población pueden, dependiendo del fabricante, tener eficiencias menores a la eficiencia mínima.

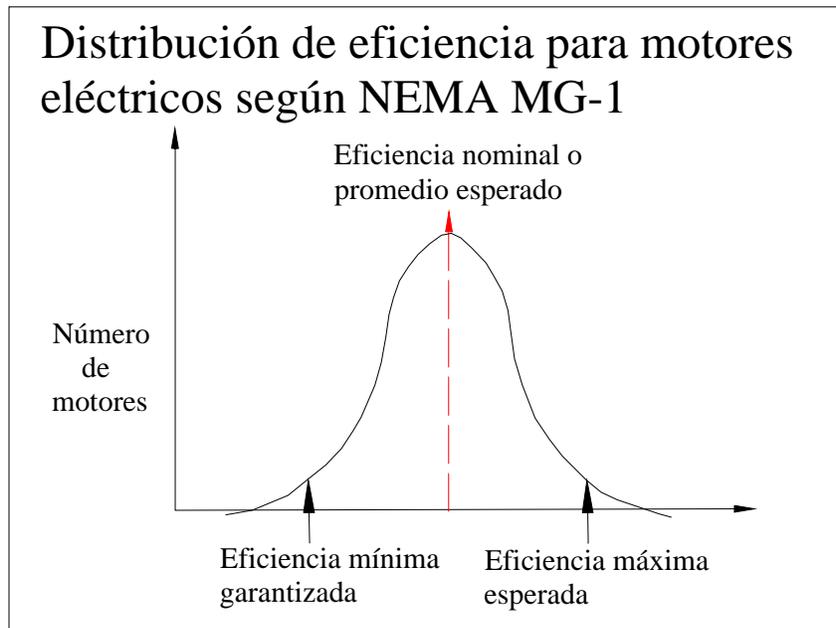


Figura 8.1.1 Distribución de eficiencia para motores eléctricos según NEMA MG-1

El método de etiquetado de la NOM-ENER-016, define actualmente a la eficiencia mínima a plena carga de un motor como el nivel que corresponde a 20% más de pérdidas que el valor nominal enlistado.

Cálculo de la eficiencia mínima

La eficiencia nominal se define como:

$$\eta_{nom} = \frac{P_s}{P_s + P_{ed}} \dots\dots\dots(8.1.1)$$

Donde:

η_{nom} es: la eficiencia nominal;

P_s es; la potencia de salida; y

P_{ed} son; las pérdidas en el motor.

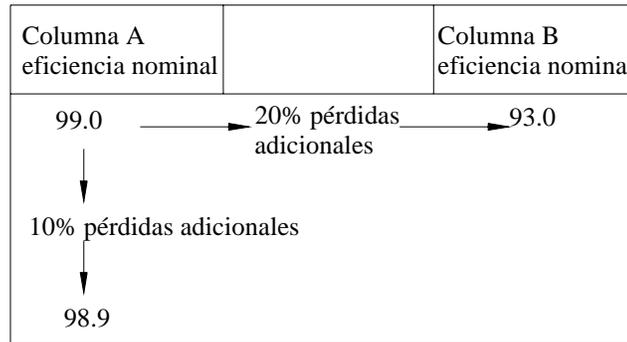
Las pérdidas del motor se calculan entonces por la relación:

$$P_{erd} = P_S \times \left(\frac{1}{\eta_{nom}} - 1 \right) \dots\dots\dots(8.1.2)$$

Mientras que la eficiencia mínima se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{nom} = \frac{1}{1 + \left[1,2x \left(\frac{1}{\eta_{nom}} \right) - 1 \right]} \dots\dots\dots(8.1.3)$$

Donde el factor 1,2, representa un 20% adicional de pérdidas que el valor nominal. Para la Tabla 1, este criterio se puede ilustrar gráficamente como sigue (NEMA, 1994):



8.2 Situación de la eficiencia nacional frente a la internacional

En México, la eficiencia de los motores eléctricos de corriente alterna, de uso general, diseños A y B, que se fabrican y comercializan están sujetos al cumplimiento de la norma NOM-ENER-016-1997. Sin embargo, ante la dinámica de la normativa exterior, principalmente la de los Estado Unidos de América, México debe revisar sus niveles de eficiencia, sobre todo los que se refieren al nivel, denominado por la norma, como "eficiencia estándar". Por ejemplo, en 1989, NEMA desarrolló y adoptó valores de eficiencia y funcionamiento en la norma MG-1 (NEMA 1989). Dichos valores fueron empleados por el Congreso de los EUA, como la base para seleccionar los niveles mínimos de eficiencia para el acta de política energética de 1992 (Energy Policy Act, EPAct, 1992). Posteriormente en octubre de 1997, el EPAct, establece niveles de eficiencia mínima, denominados "Energy-Efficient", los cuales son aceptados por NEMA y por toda la industria (Souzzo, 2000). Los niveles de eficiencia "Energy-Efficient", son similares a los

valores para motores de "eficiencia alta" definidos en la norma NOM-ENER-016, la diferencia es que en E.U.A ya no se considera la "eficiencia estándar". Paralelamente, en EUA, el Consorcio para la Eficiencia Energética (Consortium for Energy Efficiency, CEE), que está formado por una alianza de grupos públicos y privados y por el gobierno, ha desarrollado un conjunto de niveles de eficiencia superiores a los definidos en el EPAct. Dichas eficiencias se han denominado "Premium Efficiency". La diferencia en eficiencia entre motores Premium Efficiency y Energy-Efficient es grande, mientras que la diferencia de precios es pequeña, particularmente para motores totalmente cerrados de cuatro polos.

A continuación se presenta gráficamente (Figuras 8.1.2. y 8.1.3.) las eficiencias para motores de cuatro polos, abiertos o cerrados. En dichas gráficas se presentan las eficiencias nominales para las capacidades de potencia definidas en las normas. En las gráficas anteriores se puede ver claramente las diferencias entre los niveles de eficiencia estándar, alta y premium. Siendo el nivel premium el óptimo.

Construcción de la curva de eficiencia

Generalmente los motores no operan a su carga nominal, por lo que es necesario saber cual es la eficiencia para una carga dada. El siguiente método, servirá para seleccionar un motor eficiente de acuerdo con la carga a manejar. Para fines de cálculo clasificaremos las pérdidas como sigue:

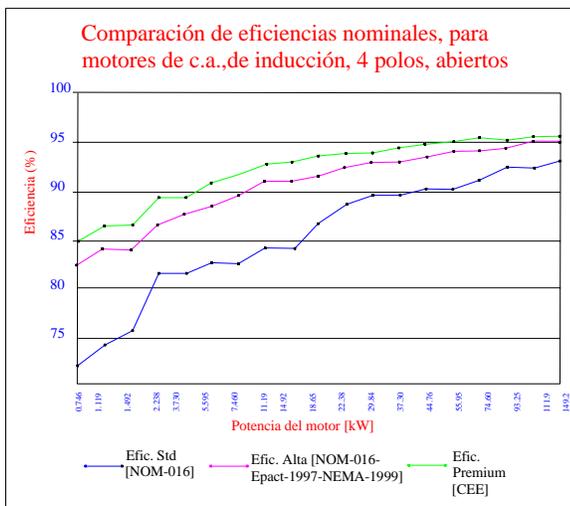


Figura 8.1.2. Eficiencias para motores 4 polos abiertos

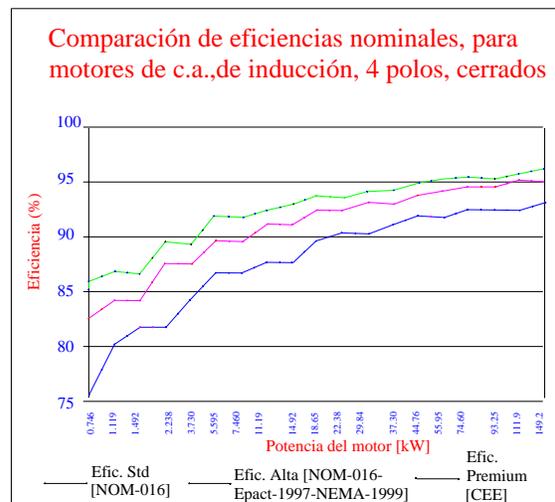


Figura 8.1.3. Eficiencias para motores 4 polos cerrados

• Pérdidas fijas, las cuales varían de la siguiente forma:

- Mecánicas, (5% a 8%).
- Magnéticas, (20% a 25%).

• Pérdidas variables, se distribuyen como sigue:

- Eléctricas, (55% a 60%).
- Indeterminadas, (11% a 14%).

Los fabricantes de motores especifican valores de eficiencia para valores de carga de 100% y 75%. Si tenemos dichos valores de eficiencia, podremos calcular las pérdidas como sigue:

$$P_{100\%} = 0.746 * c.p. * \left(\frac{1}{\eta_{100\%}} - 1 \right) \dots\dots\dots(8.2.1)$$

$$P_{75\%} = 0.746 * c.p. * \left(\frac{1}{\eta_{75\%}} - 1 \right) \dots\dots\dots(8.2.2)$$

Donde:

$P_{100\%}$ = Pérdidas de potencia al 100% de carga (KW).

$P_{75\%}$ = Pérdidas de potencia al 75% de carga (KW).

0.746 = Equivalencia en KW de 1 c.p.

$\eta_{100\%}$ = Eficiencia a plena carga.

$\eta_{75\%}$ = Eficiencia al 75% de carga.

Para el cálculo de las pérdidas fijas y variables se procede como sigue:

$$a = \frac{P_{100\%} - P_{75\%}}{0.4375} \dots\dots\dots(8.2.3)$$

$$b = P_{100\%} - a \dots\dots\dots(8.2.4)$$

Siendo:

a = Pérdidas variables (KW)

b = Pérdidas fijas (KW)

Se definen, a partir de esto, las pérdidas fijas por unidad de potencia a carga plena:

$$c = \frac{b}{P_{100\%}} \dots\dots\dots(8.2.5)$$

Con esto es posible obtener una fórmula para las pérdidas (P), a cualquier valor de carga, desde el vacío hasta carga plena:

$$P = P_{100\%} [c + Y^2(1 - c)] \dots\dots\dots(8.2.6)$$

donde: Y= relación de potencia

$$Y = \frac{Potencia_{DESARROLLADA}}{Potencia_{NOMINAL}} \dots\dots\dots(8.2.7)$$

Ejemplo 1:

Supongamos un motor de 100 c.p., Super-Eficiency, 460V, 1780 rpm, TCCV, con eficiencias de:

Carga [%]	Eficiencia [%]
100	95,0
75	95,4

Partiendo del procedimiento descrito, se obtiene la fórmula para calcular las pérdidas (P), a cualquier valor de carga.

$$P = 1.118277 + 2.80804Y^2 \dots\dots\dots(8.2.8)$$

Conociendo las pérdidas del motor, es posible graficar la curva de eficiencia. Con dicha curva, tendremos una visión clara del comportamiento energético de nuestro motor al operarlo a diferentes valores de carga.

8.3 Situación actual de los equipos nacionales

La Comisión Nacional para el Ahorro de energía (Conae) hizo pública, a través del Diario Oficial de la Federación (DOF), la nueva Norma Oficial Mexicana (NOM-016-ENER-2002) de eficiencia energética para motores trifásicos, los cuales, según estimaciones, consumen el 60% de la electricidad en la industria, además de ser utilizados en el bombeo de agua, elevadores, sistemas de ventilación y aire acondicionado, entre otros usos.

Con esta disposición, dada a conocer el 03 de marzo del 2003 y cuya aplicación será obligatoria a partir del 13 de marzo del mismo, los motores eléctricos que se comercialicen en México, de los cuales se prevé que en 2003 se venderán en México 180 mil unidades, tendrán las mismas eficiencias mínimas que se exigen a estos equipos en Estados Unidos y Canadá, lo que ubica al mercado de estos equipos en nuestro país en igualdad de condiciones con los líderes del mundo en esta materia.

Así, con la aplicación de la nueva NOM, que sustituye a la que estaba en vigor desde 1997, se estima que el país ahorrará, durante el 2003, 194 GWh en el consumo de energía, equivalentes a unos 200 millones de pesos, así como 68 MW en capacidad de generación evitada, equiparables a la capacidad instalada de la Unidad 1, de la Central de Ciclo Combinado Gómez Palacio del Estado de Durango.

La nueva norma elimina los niveles de eficiencia estándar, establecidos en el ordenamiento anterior, y deja, como únicos, los de eficiencia alta, más acordes con las necesidades de competitividad y eficiencia de la industria nacional. Además, se amplía el campo de aplicación para incluir motores de mayor capacidad (hasta 373 kW equivalentes a 500 HP), como también los motores verticales.

Recientemente la Secretaría de Energía (SENER) por conducto de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) publicó el 19 de mayo del 2005 la nueva NOM-014-ENER-2004 y entro en vigor el 19 de julio del 2005, esta norma actualiza a la anterior mencionada.

Cabe señalar que esta nueva NOM es resultado de un proceso de consulta y consenso de la Conae con los diversos actores involucrados, principalmente fabricantes, importadores y comercializadores, quienes solicitaron su revisión, conscientes de la necesidad de mantenerla actualizada de acuerdo con el desarrollo tecnológico del país y del mundo.

La expedición de la norma responde a la necesidad de incrementar el ahorro de energía, la preservación de nuestros recursos energéticos y el cuidado del ambiente; además, se evitará que los usuarios adquieran aparatos de menor calidad y de excesivo consumo de electricidad, que pudieran llegar al mercado nacional. Como resultado del proceso de Certificación, actualmente se ha otorgado el SELLO FIDE a los productos de las siguientes marcas:

Producto	Empresa	Marca
Motores Eléctricos de Inducción	USEM de México, S.A. de C.V.	
	WEG México, S. A. de C.V.	
	Siemens, S.A. de C.V.	

- Provistos de tecnología de punta, garantizan beneficios económicos y ambientales
- Los equipos electrónicos pasan pruebas de calidad, para lograr el "Sello FIDE"
- Cuentan con apoyos financieros los fabricantes y los consumidores: FIDE

Sólo los aparatos electrónicos que ostenten en lugar visible el "Sello FIDE" --emblema no comercial-- son garantía de que se trata de equipos de alta eficiencia y ahorradores de energía eléctrica, porque cuentan con tecnología vanguardista y contribuyen también al cuidado del entorno ambiental de México, además de brindar beneficios económicos para el consumidor.

El Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), un organismo de carácter privado, no lucrativo, creado a iniciativa de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y que se integra con representantes de los sectores público, privado y social, promueve, entre los fabricantes de electrónicos, la incorporación de equipo ahorrador de energía eléctrica, que beneficia por igual a los propios fabricantes, a los consumidores y al país.

Para que un producto eléctrico obtenga el "Sello FIDE", que es garantía de equipo ahorrador de energía, el fabricante o distribuidor --si lo desean voluntariamente-- deben pasar antes por los mecanismos de certificación oficial de calidad y seguridad de que, en todo caso, se trata realmente de equipos y productos de garantizada eficiencia

Los usuarios de los productos que ostenten este Sello, recibirán incentivos económicos y financiamiento del FIDE para adquirir esos productos que porten el "Sello FIDE" y podrán reducir el pago por consumo de energía eléctrica, para beneficiarse así, económicamente.

El fabricante de estos productos identificados con el "Sello FIDE", podrán a su vez, fomentar la competitividad tecnológica y comercial entre productores que les permita incorporar al mercado productos de mejor calidad y precio, además de participar en los programas de financiamiento e incentivos que el FIDE realiza para la fabricación, compra y uso de equipos de alto rendimiento.

Entre los beneficios para el país, el "Sello FIDE", contribuye a reducir la emisión de gases contaminantes al ambiente, como consecuencia de un menor consumo de los combustibles que realizan las plantas generadoras de energía eléctrica.

Los equipos susceptibles de portar el "Sello FIDE", son principalmente, utilizados en los sectores industrial, comercial, residencial y de servicios públicos y agrícolas. Esto es, motores eléctricos trifásicos monofásicos, lámparas, balastos y luminarias; electrodomésticos como aire acondicionado, refrigeradores y lavadoras de ropa; equipos de bombeo de agua potable, aguas negras y riego agrícola; controles de ahorro de energía como sensores de presencia foto celdas y compresores de aire, concluye el organismo privado.

8.4 Clasificación de rendimientos de equipos líderes en el mercado

WEG México

El dispositivo de conversión de energía electromecánica más comúnmente empleado dentro de la industria y, por consecuencia, unos de los más estudiados en su comportamiento y metodología de diseño, así como uno de los más altamente regulados por normas y estándares nacionales e internacionales, es el motor de inducción trifásico de jaula de ardilla en baja tensión (Menor a 660 V).

WEG México, con el objeto de cumplir y superar las expectativas de comportamiento solicitadas por estas regulaciones, destina anualmente recursos financieros para mantener activos programas de investigación y desarrollo que permitan una mejor integración de nuevas tecnologías a la fabricación de estos productos. Unos de los resultados de estos programas lo constituye la línea de productos “Generación PREMIUM “(WORLD ENERGY GUARDIAN), presentados en este documento.

Descripción

El motor “Generación PREMIUM” es un motor de inducción trifásico, tipo jaula de ardilla, en baja tensión que coadyuvan al éxito de cualquier programa de eficiencia energética en el que sean requeridos productos de este tipo.

Entre las principales características de esta línea están:

- Rango de potencias desde 0,25 HP hasta 500 HP 2,4,6 y 8 polos
- Totalmente cerrados con ventilación exterior ó abiertos ODP
- Factor de Servicio 1.15 - 1.25
- Armazón de aluminio en potencias 0.25 HP hasta 20 HP
- Armazón de hierro fundido en potencias de 1 HP hasta 500 HP
- Operación Continua
- Aislamiento clase F
- Dimensiones NEMA ó IEC
- Incremento de temperatura clase B
- Ventilador de plástico anti-flama (Auto extingüible)
- Tensiones normalizadas: 208-230/460 V, 575 V
- Frecuencia normalizada : 60 Hz
- Grado de protección interna IP55 / Motores Cerrados e IP21 para motores abiertos.
- Variantes: Motores con brida C, D o especial; para aplicación en bombas; diversos montajes; a prueba de explosión, para aplicaciones especiales.

Los núcleos de estos motores son fabricados con chapas de acero eléctrico de alta permeabilidad que permiten una reducción en las pérdidas magnéticas hasta de un 25% respecto a los aceros

convencionales. Utilizan rodamientos de baja fricción que junto con grasas de alta viscosidad permiten una operación silenciosa, bajo nivel de fricción y permiten almacenajes más largos de los equipos sin que la vida útil de los rodamientos se reduzca.

El sistema de aislamiento está diseñado para absorber los cambios bruscos de tensión y sobrecalentamientos repentinos debidos a variaciones repentinas en la carga; esto permite que el motor pueda operar durante periodos cortos de tiempo bajo estas condiciones de inestabilidad sin disminuir su vida útil. Lo anterior, más un alto grado de automatización en el proceso (Fundición, maquinados, embobinados, etc.) hacen del motor "Generación PREMIUM" el más confiable de su clase.

Dimensiones y Montaje

Los motores de la línea Generación PREMIUM están diseñados bajo un proyecto de acuerdo a NEMA MG-1, referente a dimensiones y asignación de potencias y armazones. Sin embargo, estos pueden ser surtidos bajo requerimiento de acuerdo a otros estándares internacionales o locales garantizando que el proyecto eléctrico cumplirá con el nivel de eficiencia requerido.

Aplicaciones comunes.

Los motores de la línea "Generación PREMIUM" pueden ser clasificados como "Motores de Uso General"; pero pueden ser empleados, sin ningún problema, en aplicaciones específicas como:

- Aplicaciones en ambientes polvosos
- Bombas
- Compresores
- Ventiladores
- Correderas y bandas transportadoras
- Elevadores

Certificaciones

La línea de motores Generación PREMIUM - WORLD ENERGY GUARDIAN, ha sido certificada bajo los siguientes esquemas:

- NOM: Eficiencia Energética

- UL: Sistemas de Aislamiento y Componentes
- CSA: Seguridad y Eficiencia Energética
- DOE: Eficiencia Energética
- FIDE: Eficiencia Energética

Cumplimiento con Normas de Eficiencia Energética

NOM-016-ENER-1997

La línea de motores "Generación PREMIUM" está proyectada para cumplir y exceder los requisitos de eficiencia energética solicitados por la NOM-016-ENER-1997, tal y como lo demuestran los certificados de cumplimiento expedidos por la ANCE para estos productos. (Todos los productos cumplen con los niveles especificados para eficiencia alta.)

La determinación de este nivel de eficiencia es hecha a partir del método de segregación de pérdidas y ha sido corroborado por laboratorios nacionales debidamente certificados ante la EMA (Entidad Mexicana de Acreditamiento).

FIDE (WM001)

Esta línea de motores ha demostrado el cumplimiento en la gran mayoría de sus productos de los niveles de eficiencia energética solicitados por el FIDE para poder ostentar el logo "SELLO FIDE"

CSA Y DOE

Otras instancias que han otorgado certificaciones por cumplimiento con estándares en niveles de eficiencia energética son: CSA (EEV113496, EEV78282) y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE).

Pruebas

La metodología de pruebas para determinar la eficiencia energética en estos motores es conocida como "Segregación de Pérdidas" y consiste básicamente en identificar y cuantificar los diferentes tipos de pérdidas existentes en estos productos; una vez cuantificadas se obtiene la potencia real de salida y con la lectura de la potencia de entrada se determina la eficiencia.

En México el método de pruebas para determinar la eficiencia energética está definido en la NOM-016, otras pruebas aplicadas a este tipo de motores son: Pruebas de Rutina (al 100% de la producción), prueba de arranque, prueba de par máximo, prueba de aceleración, operación con inversores de frecuencia o de común arreglo con el cliente pruebas especiales de comportamiento.

Otras certificaciones

La línea de motores "Generación PREMIUM" ha sido evaluada en otros aspectos diferentes al de eficiencia energética, como es la seguridad. En este rubro se han obtenido certificaciones de UL (E101071, E102938, E104590) y CSA (LR67881, LR38324, LR50962).

WEG Generación Premium

Los motores WEG Generación Premium son construidos de acuerdo a las especificaciones NEMA para uso en ambientes húmedos o polvosos sin afectar su vida útil. Sus valores de eficiencia cumplen con los requisitos marcados por la Norma Oficial Mexicana NOM – 016.

Aplicaciones

- * Bombas
- * Ventiladores
- * Industria alimenticia
- * Molinos
- * Compresores
- * Plantas químicas
- * Industria del plástico
- * Industria textil
- * Grúas
- * Industria cementera
- * Transportadores
- * Elevadores
- * Motorreductores
- * Otros (industria en general)

Características Generales

- * Factor de Servicio 1.15 para motores de aluminio,
1.25 para motores de hierro hasta 100 HP,
1.15 para mayores a 100 HP
- * Diseño NEMA B
- * Rodamientos re-engrasables a partir del tamaño 254T en motores de hierro.
- * Rodamientos de bolas del lado de la flecha hasta el armazón
365T, de rodillos cilíndricos del lado de la flecha a partir del armazón 404/5T en 4,6y 8 polos
- * Eficiencia alta
- * Uso general
- * 3 fases, 60 Hz, 208-230/460 V,
- * Rotor jaula de ardilla de fundición de aluminio
- * Motores totalmente cerrados con ventilación exterior (TCCV)
- * Uso continuo
- * Grado de protección IP55 Conexión D// -Y// -D-Y a partir del armazón 254T de hierro
- * Dimensiones de acuerdo a NEMAMG-1
- * Aislamiento Clase F

CAPÍTULO IX

AHORRO EN EL RAMO

INDUSTRIAL MEXICANO

(Conclusiones)

Introducción

Cuando se elige un motor eléctrico, un parámetro que no se debe pasar por alto es la eficiencia del motor. La eficiencia alta representa ahorros económicos para el usuario final y beneficios sustentables para el país y la sociedad en su conjunto.

La mayor parte del consumo de energía eléctrica en la industria se debe al uso de los motores eléctricos, ya que así lo demuestran las estadísticas de países altamente industrializados y la industria mexicana (Acoltzi, 1994). Con base en lo anterior, sabemos que los motores consumen alrededor del 62% del total de la energía generada y más del 75% de la energía suministrada a la industria. Dichas estadísticas confirman también que el 50% de la energía suministrada a la industria la consumen en su alimentación los motores que van desde 1 a 125 c. p. y el restante 50% lo consumen los motores con potencias de 150 c. p. y mayores (Acoltzi, 1994).

De la energía eléctrica que se genera en México, alrededor del 70% la consumen en su funcionamiento los motores eléctricos, distribuidos en la industria, el comercio, los servicios y el hogar (Fide).

El hecho de que los motores eléctricos suministren la mayor parte de la energía motriz que mueve a los equipos industriales y el uso tan extendido que tienen, representan uno de los campos más fértiles de oportunidades para el ahorro de energía, que se traducirán en una reducción en los costos de producción y en una mayor competitividad.

El ahorro de energía comienza desde la selección apropiada de los motores. Se debe elegir el más adecuado para las necesidades que se tienen, tomando en cuenta las condiciones ambientales de operación, condiciones de arranque y regulación de velocidad, así como su tamaño y potencia. Los mayores ahorros de energía se logran cuando el motor opera a su máxima eficiencia.

En México se tiene una norma que establece los niveles de eficiencia nominales y mínimos, el método de prueba para determinarlos, los criterios de acreditación y etiquetado para motores de inducción con potencias de 1 a 200 c. p., de uso general. En 1998 entró en vigor la norma NOM-016- ENER-1997 (Secretaría de Energía, 1998). La observación de los criterios de esta norma puede ser un apoyo importante para la selección de tales máquinas.

9.1 Antecedentes

Demanda de energía eléctrica

El crecimiento de la demanda por electricidad en el país ha crecido históricamente a un ritmo mayor al del PIB y al gasto público; la capacidad del sector público para cubrir los recursos que demanda el sector eléctrico son cada vez menores.

De 2004 al 2011, las necesidades de inversión en el sector eléctrico ascenderán a 74 mil millones de pesos, con un crecimiento promedio anual de 4.7 por ciento.

Con las reformas a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica de 1992, se reconoció la necesidad de aprovechar la coparticipación de los sectores privado y social para colaborar en el crecimiento del sector.

El potencial de crecimiento del mercado de manufacturas eléctricas puede ser mucho mayor. Hacia el 2015, por cada punto porcentual de crecimiento, la industria puede crecer 0.85%, más que la tendencia actual (0.70%).

En un escenario de alto dinamismo económico nacional (6%), el sector eléctrico requerirá incrementar anualmente su nivel de inversión a un ritmo de 7 a 8 por ciento anual, para expandir su cobertura de servicio de energía eléctrica y sus obras, los requerimientos de generadores, conductores, transformadores, motores y reguladores de potencia y distribución, wathorímetros, tableros y equipos de control, continuarán.

El crecimiento de las manufacturas eléctricas también estará vinculado a las tendencias esperadas de crecimiento de la población y sus implicaciones en vivienda y obra pública.

Exportación

Desde la apertura comercial el mercado externo ha representado una alternativa al desarrollo de muchas empresas mexicanas, impulsándolas a elevar sus estándares de calidad de sus productos y procesos.

El comercio de manufacturas eléctricas de México hacia el resto del mundo se ha incrementado, particularmente después del TLCAN. El principal destino es Estados Unidos, pero en los últimos años se ha observado un aumento en la proporción de productos exportados hacia Europa y Latinoamérica.

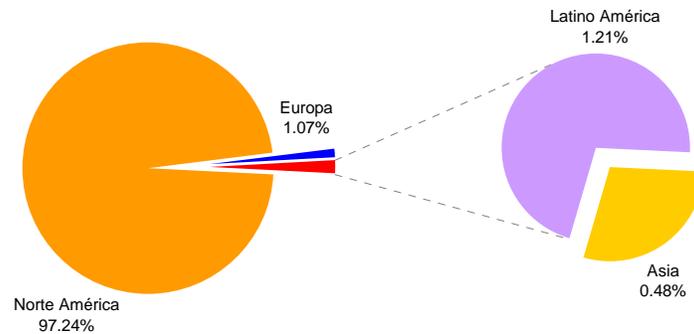


Figura 9.1.1 México: Principales destinos de exportación de las manufacturas eléctricas de México, 2003. (Estructura porcentual)

Fuente: Consultores Internacionales, S.C., con datos Secretaría de Economía.

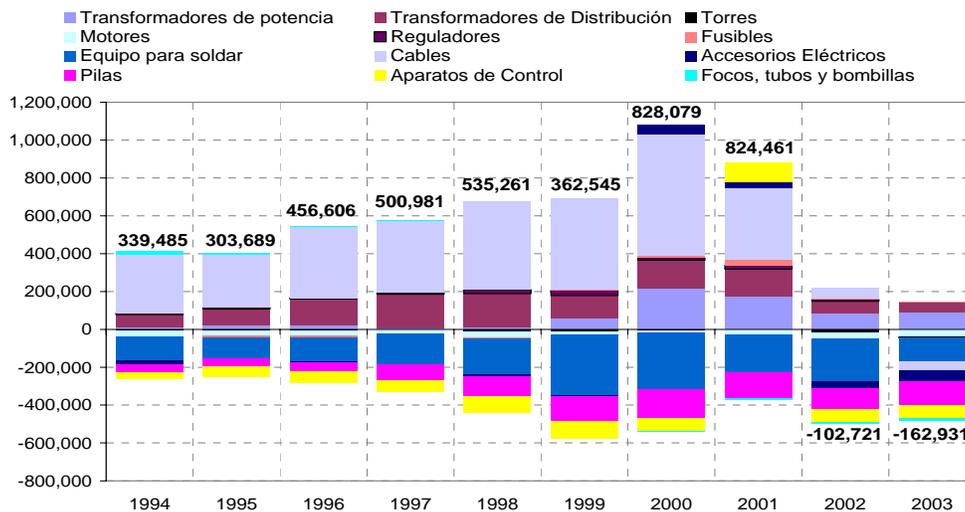


Figura 9.1.2 México: Balanza comercial de manufacturas eléctricas por segmento, 1994- 2002. (MILES DE DÓLARES)

Fuente: Consultores Internacionales, S.C., con datos de Secretaría de Economía.

La plataforma que le brinda el mercado interno y los acuerdos comerciales que tiene suscritos nuestro país, han permitido a las manufacturas eléctricas expandirse a otros mercados. De 1995 a 2000, nuestro país ha registrado una balanza comercial superavitaria, no obstante los últimos dos años se observa un déficit, promovido por el incremento de productos importados en el país.

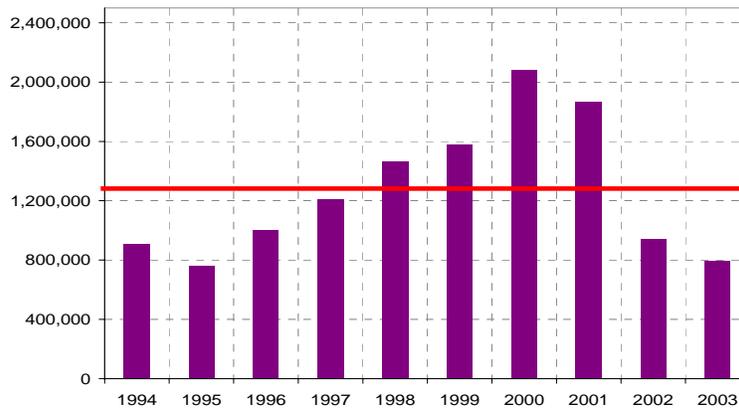


Figura 9.1.3 México: Exportaciones de manufacturas eléctricas, 1990- 2003.
(Miles de dólares)

Fuente: Consultores Internacionales, S.C., con datos Secretaría de Economía.

Entre los principales productos mexicanos que se demandan en el exterior destacan los conductores eléctricos, tanto cables aislados como cables desnudos de aluminio y cobre, y en menor medida motores.

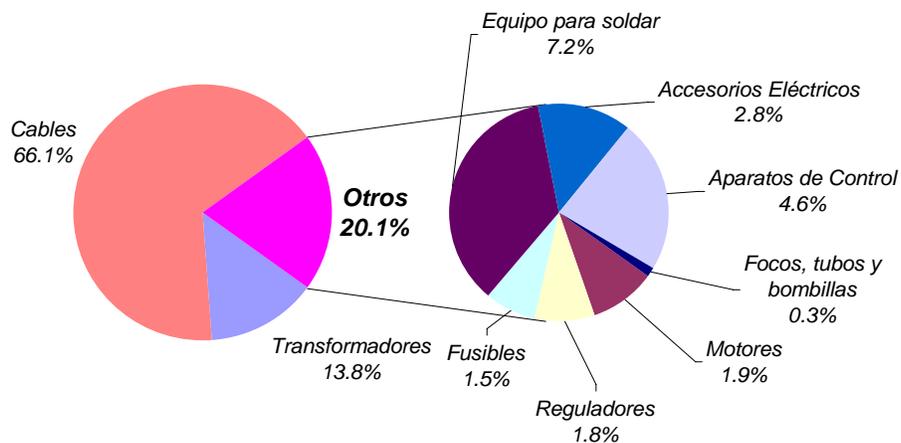


Figura 9.1.4 México: Principales productos de exportación de manufacturas eléctricas, 2003.
(Estructura porcentual)

Fuente: Consultores Internacionales, S.C., con datos Secretaría de Economía.

En 2003, el monto de importaciones ascendió a 959 millones de dólares. Las importaciones provienen principalmente de Estados Unidos y Asia, y en menor proporción de Europa y América Latina.

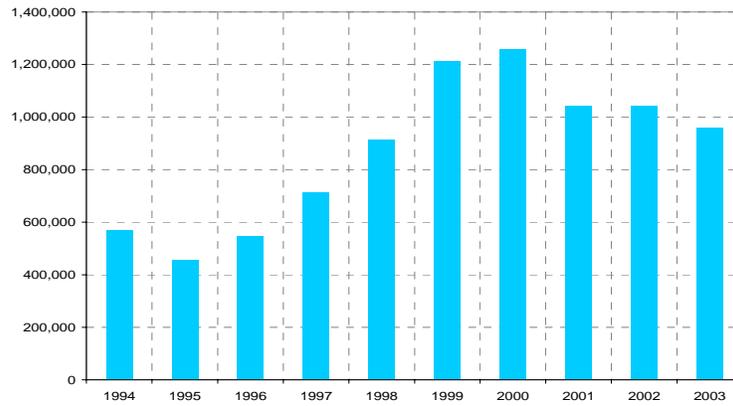


Figura 9.1.5 México: Importaciones de manufacturas eléctricas, 1990-2003.

(Miles de dólares)

Fuente: Consultores Internacionales, S.C., con datos Secretaría de Economía.

El origen de las importaciones de manufacturas eléctricas es más amplio que en el caso de las exportaciones; el 58 por ciento provienen de Estados Unidos y el 32 por ciento de Asia, siendo esta región la más dinámica en los últimos años.

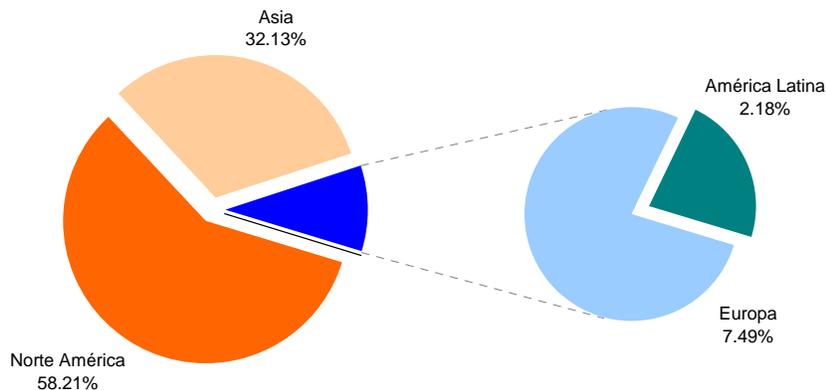


Figura 9.1.6 México: Origen de las importaciones de manufacturas eléctricas, 2003.

(Estructura porcentual)

Fuente: Consultores Internacionales, S.C., con datos Secretaría de Economía.

Dado que algunas manufacturas poseen grandes limitaciones en términos de tamaño, la ubicación geográfica de los destinos de exportación cumple un papel determinante en el comercio internacional de este tipo de bienes; por ello, y entre otros factores como el tamaño del mercado, y los acuerdos comerciales, hacen de Estados Unidos el principal destino de las ventas de manufacturas eléctricas, en particular en el segmento de transformadores y conductores.

Otros segmentos del mercado como los productos de baja tensión, tienen mayores opciones en mercados externos como el europeo.

Visión de desarrollo al año 2015.

La visión de desarrollo de largo plazo para las manufacturas eléctricas puede enunciarse de la siguiente manera:

Hacia el año 2015, las manufacturas eléctricas de México pasarán a ser una de las industrias más dinámicas y de alta contribución al fortalecimiento del sector energético nacional.

Se distinguirá por su derrama económica y creciente innovación tecnológica, con una orientación al desarrollo integral del mercado, tanto en compras de gobierno como en mercados privados, y una creciente plataforma de exportación.

Se fortalecerá como el principal proveedor de la industria eléctrica nacional, con un marco regulatorio cada vez más claro y efectivo, que favorezca la cooperación y no la confrontación.

Forjará sinergias con sus proveedores, clientes y prestadores de servicios para ofrecer mejores productos de alta calidad y diferenciación, a precios competitivos a nivel mundial.

Se distinguirá por ser una industria propositiva y colaboradora de los tres poderes de la Unión y promotora de la cohesión empresarial en México.

Derivado de esta visión, hacia el 2015, los objetivos puntuales para la cadena productiva son, en orden de prioridad:

Incrementar de manera sostenida el tamaño del mercado nacional de manufacturas eléctricas a una tasa media anual de 6%

Elevar la participación de mercado de la proveeduría nacional, de 51 a 75 por ciento.

Generar mil empleos directos anuales permanentes de mejor calidad e inducir 5 mil empleos indirectos en la cadena productiva

Aumentar la participación de 11 a 15 por ciento de las PYME's en el valor de la proveeduría de manufacturas eléctricas y servicios

Ampliar las exportaciones nacionales de 750 a más de 1,500 millones de dólares, con una plataforma diversificada en segmentos y países.

En el caso del programa de incentivos para la comercialización de equipos eficientes, en la tabla 9.1.1 se indica la distribución de los equipos por sector. Tanto en la encuesta de 1999 como en la del 2001 el mayor peso lo tienen los motores. Asimismo, se investigó el destino de los equipos de

alta eficiencia adquiridos, con los resultados que se muestran en la tabla 9.1.2 Es significativo que el mayor porcentaje se concentra en el reemplazo de equipos que estaban operando.

Equipos				
Sector	Año de la encuesta	Motores	Compresores	Equipo de Alumbrado %
Industrial	1999	62.5	6.3	31.2
	2001	71.4	19.0	38.1
Comercial y de Servicios	1999	0.0	33.3	66.7
	2001	14.3	14.3	71.4
Servicios Municipales	1999	0.0	0.0	0.0
	2001	0.0	0.0	0.0
Agrícola	1999	0.0	0.0	0.0
	2001	100.0	0.0	0.0
Total	1999	52.6	10.5	36.8
	2001	60.0	16.6	45.3

Tabla 9.1.1 Equipos de alta eficiencia adquiridos a través el programa de incentivos.

Equipos				
Sector	Año	Reemplazar equipo operando %	Instalación Nueva %	Otro %
Industrial	1999	75.0	0.0	25.0
	2001	81.0	14.3	4.8
Comercial y de Servicios	1999	66.7	0.0	33.3
	2001	71.4	28.6	0.0
Servicios Municipales	1999	0.0	0.0	0.0
	2001	0.0	0.0	0.0
Agrícola	1999	0.0	0.0	0.0
	2001	100.0	0.0	0.0
Total	1999	73.7	0.0	26.3
	2001	80.0	16.7	3.3

Tabla 9.1.2 Destino de los equipos adquiridos con incentivos.

9.2 Ventajas de los motores de alta eficiencia

El hecho de que se tenga una eficiencia mayor significa que se disminuye los costos de operación del motor y se puede recuperar la inversión adicional en un tiempo razonable, sobre todo si se opera a una carga cercana a la potencia nominal. Recuerde que en un año el costo de la energía es aproximadamente seis veces el costo de compra del motor.

Los motores de alta eficiencia poseen generalmente un menor deslizamiento (mayor velocidad de operación) que los motores de eficiencia estándar, debido a los cambios que se producen en los parámetros del motor. La mayor velocidad puede ser ventajosa en muchos casos, pues mejora la ventilación.

Los motores de alta eficiencia son normalmente más robustos y mejor construidos que los motores estándar, lo que traduce en menores gastos en mantenimiento y mayor tiempo de vida. Aunque los motores de alta eficiencia son más caros, que los de eficiencia estándar, es sumamente rentable su aplicación. Los motores de eficiencia alta, presentan ventajas adicionales como:

1. Costo de operación menor, por reducción de la factura;
2. Mayor vida del motor por reducción de las pérdidas;
3. Mayor adaptabilidad a las condiciones atmosféricas;

Las siguientes son alternativas para mejorar el consumo de energía de motores eléctricos de inducción en las plantas industriales:

1. Sustituir los motores actuales por motores de alta eficiencia;
2. Redimensionar motores;
3. Mejorar la eficiencia del conjunto control-motor-acoplamiento-carga;
4. Mejorar y/o controlar la calidad de energía para operar los motores;
5. Optimizar las técnicas de mantenimiento y reparación del motor; y
6. Uso de controladores velocidad-carga.

Incremento de la eficiencia en los motores asincrónicos

El incremento de la eficiencia en los motores asincrónicos de jaula de ardilla se logra con la reducción de sus pérdidas.

Según aumenta la potencia de salida y en consecuencia la eficiencia nominal, se incrementa también el grado de dificultad para mejorar la eficiencia y por lo tanto el costo de mejorar la eficiencia de un motor. Considerando solamente las pérdidas en los conductores del estator y del rotor para mejorar un punto en la eficiencia, se requiere un aumento creciente en la reducción de estas pérdidas, según se puede observar en la tabla 9.2.1, confeccionada para valores promedio de los diseño NEMA B.

HP	Eficiencia Original	Eficiencia Incrementada	Reducción requerida en pérdidas en conductores
1	73	74	8
5	83	84	11
25	89	90	16
50	90.5	91.5	19
100	91.5	92.5	28
200	93	94	38

Tabla 9.2.1 Reducción requerida en las pérdidas en los conductores para aumentar la eficiencia en un punto.

Las pérdidas en el motor pueden reducirse hasta alrededor de un 50% a través del uso de mejores materiales, optimizando la geometría, ajustando mejor el motor con la carga y mejorando el proceso de fabricación.

Cuando se intenta maximizar la eficiencia de un motor, debe considerarse que ésta pueda incrementarse por dos métodos diferentes. Una posibilidad es seguir el camino en el cual la mejoría se logra fundamentalmente a base de adicionar materiales y empleando tecnologías más costosas. La otra posibilidad es optimizar el diseño del motor utilizando métodos de optimización. La diferencia entre los dos enfoques es que en el primer caso la mejoría se alcanza modificando un diseño existente, mientras que en el segundo caso se obtienen diseños totalmente nuevos.

En la primera variante, el incremento de los materiales implica fundamentalmente aumentar el volumen del material activo (acero magnético y material conductor de la corriente) y las mejoras tecnológicas significan emplear aceros magnéticos de mejor calidad, utilizar un mayor factor de llenado en las ranuras, incrementar el número de ranuras del estator y del rotor, etc.

9.2 Incentivos para la compra de motores de alta eficiencia.

El FIDE a partir del 1° de octubre del año 2000 otorga incentivos económicos los cuales se aplican como descuento en la factura de compra de Equipos de Alta Eficiencia con la finalidad de que el usuario reciba de forma inmediata el monto del incentivo, reduciendo el costo del equipo.

Marcas Participantes. Ver figura 9.2.1



Figura 9.2.1 Marca participantes en el programa de incentivos.

El Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), ha establecido un Programa de Incentivos y desarrollo de mercado para los motores de alta eficiencia. El sobre costo de los motores de alta eficiencia contra los motores estándar es de aproximadamente 20%. Este sobre costo se reduce con la aplicación del programa, que consiste en entregar bonificaciones económicas a los usuarios. Por la adquisición de éstos motores de las marcas participantes, (Baldor, Motores US, IEM y Siemens) se obtendrán incentivos de \$36.00 por HP, si el motor cuenta con el sello FIDE y de \$20.00 por HP, si sólo cumple con la Norma Oficial Mexicana NOM-074-SCFI-1994 o subsecuentes, para motores de alta eficiencia, en los rangos de 1 a 500 Hp. Ver tabla 9.2.2

Monto para incentivos		
Capacidad	Tipo de motor	Incentivo para motores eficientes sin sello FIDE
De 1 a 3 hp	Con sello fide	\$ 242.00 por unidad
De 5 a 500 hp	Con sello fide	\$ 59.00 por hp
De 5 a 500 hp	Sin sello fide	\$ 20.00 por hp

Tabla 9.2.2 Incentivos por la compra de motores alta eficiencia.

Ejemplo:

El usuario compra un motor de 50 HP de alta eficiencia con sello FIDE y el distribuidor o vendedor entregará el motor y el bono correspondiente por la cantidad de \$1,800.00. El usuario enviará al FIDE copia de la factura de la compra del motor, copia del recibo de energía eléctrica y el bono recibido en la compra de su motor. A vuelta de correo el FIDE le enviará al usuario un cheque por la cantidad de \$1,800.00. Como puede observarse en la tabla 9.2.2, si el motor de 50 HP de alta eficiencia tiene un costo de \$34,248.00 y un motor estándar de 50 HP cuesta \$28,540.00 la diferencia de costo es de \$5,708.00. Si el FIDE está reintegrando la cantidad de \$1,800.00, el sobre costo se reduce a \$3,908.00, lo cual se recupera en menos de un año. La diferencia de costo anual de la energía es de \$4,199.00.

Resultados del programa de Incentivos a Motores Eléctricos de Alta Eficiencia

Resultados de la Transformación del mercado de equipos eficientes

Antecedentes

Las acciones emprendidas en nuestro país durante los últimos años para promover el uso racional y eficiente de la energía eléctrica han demostrado que las inversiones aplicadas con esta finalidad son técnicamente factible y económicamente rentables tanto para los usuarios finales como para el sector eléctrico en su conjunto.

En la figura 9.2.2 se muestra como en 1997 la penetración de los Motores de alta eficiencia no era mayor del 3% y se puede ver como se esperaba su desarrollo y las grandes oportunidades que planteaba el desarrollo de un mercado estimulado.

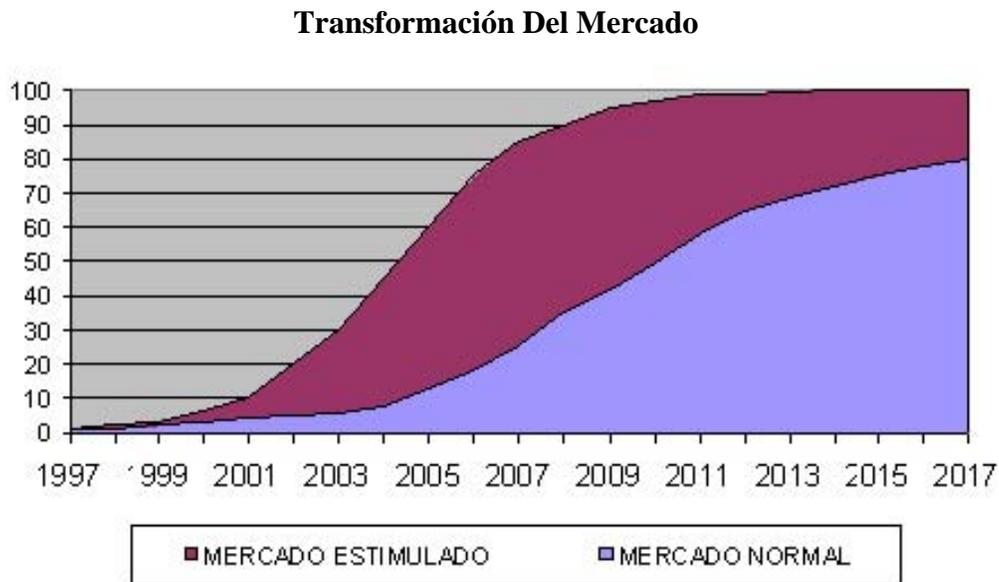


Figura 9.2.2 Transformación del mercado de motores alta eficiencia.

Similar a este proyecto los mercados de lámparas T8 y compresores de aire eficientes son muy semejantes ya que para el caso de lámparas se estima que en ese año la penetración del mercado de las lámparas t8 no era mayor al 7% y los compresores eficientes eran apenas conocidos.

Con este panorama y por iniciativa de la Comisión Federal de Electricidad y a través del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica, se puso en marcha en el año de 1998 el Programa de Incentivos y Desarrollo de Mercado.

El programa se desarrolló con el soporte de un préstamo otorgado por el Banco Interamericano de Desarrollo por 23.4 millones de dólares, que es el más importante que se ha concedido para un programa de eficiencia energética, y el primero que se otorga en forma independiente a un proyecto de infraestructura eléctrica; Asimismo, la CFE y el FIDE aportan también recursos integrando un presupuesto total de 46.8 millones de dólares para la realización de este programa, el cual tuvo una cobertura a nivel nacional.

La estrategia global de este programa fue dirigida a eliminar las barreras comerciales, de oferta y de conocimiento por parte de los usuarios de tecnologías de alta eficiencia, induciendo a una

mayor participación de los fabricantes y distribuidores de estos equipos, facilitando la transición hacia un mercado sostenible a través del desarrollo de una mayor oferta de equipos, financiamiento y servicios para el ahorro de energía eléctrica, así como una eficaz promoción y difusión de las ventajas de utilizar estas tecnologías.

Objetivos y metas originales del programa:

I

Impulsar la transformación del mercado de equipos, financiamiento y servicios para el ahorro de energía eléctrica.

II

Promover la comercialización de equipos eléctricos de alta eficiencia en los sectores productivos del país. En el caso del proyecto de motores se plantea que al final del proyecto se alcance un 30% en la penetración de equipos de alta eficiencia.

III

Generar beneficios económicos para los usuarios de la energía eléctrica, las empresas de servicios de eficiencia energética y la empresa eléctrica.

IV

Lograr beneficios ambientales por la reducción en la emisión de contaminantes debido al ahorro de energía eléctrica.

Barreras detectadas al inicio del programa:

- Insuficiente disponibilidad de equipos de alta eficiencia.
- Alto costo incremental en los equipos de alta eficiencia.
- Falta de esquemas y financiamiento en el mercado.
- Falta de servicios integrales.
- Carencia de información.
-

9.3 Resultados del programa FIDE

Con el desarrollo del Programa de Incentivos para Motores de Alta Eficiencia, se ha logrado transformar el mercado de motores en México, con el otorgamiento de bonificaciones

económicas a todos los usuarios que adquieran estos equipos, en donde se trabaja en forma conjunta con los principales fabricantes que han sido aliados a este, como son: Motores US de México, Industrias IEM, Siemens y Weg de México.

La comercialización de Motores de Alta Eficiencia pasó del 3% en 1997, a más del 85% en 2002 y se esperaba que en su totalidad a principios del 2003, con la entrada en vigor de la Norma Oficial Mexicana NOM-016-ENER-02. Cabe destacar que el mes de diciembre del 2002 se han comercializado 182,262 Motores de Alta Eficiencia que permiten ahorros de 144MW en demanda y de 1,597 GWH en consumo. La penetración de mercado ha superado en gran manera las expectativas trazadas al inicio del Programa; por tal motivo, el Programa de Incentivos culminó el 28 de febrero del 2003.

La Secretaria de energía por conducto de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía publico el 19 de mayo del 2005 la nueva NOM-014-ENER-2004 y entro en vigor el 19 de julio del 2005, esta norma actualiza a la anterior mencionada.

A manera de ejemplificar el gran avance alcanzado en este proyecto en la figura 9.3.1 se muestra el incremento de la comercialización de motores eficientes desde el inicio del programa hasta el 28 de febrero del 2003.

El programa ha permitido superar ampliamente la meta planteada que consistía en pasar de menos de un 3% de penetración de motores eléctrico de alta eficiencia al inicio del proyecto, al 30 % en un lapso de 5 años. Lográndose que actualmente prácticamente la totalidad de los motores que se comercializan en México sean de alta eficiencia.

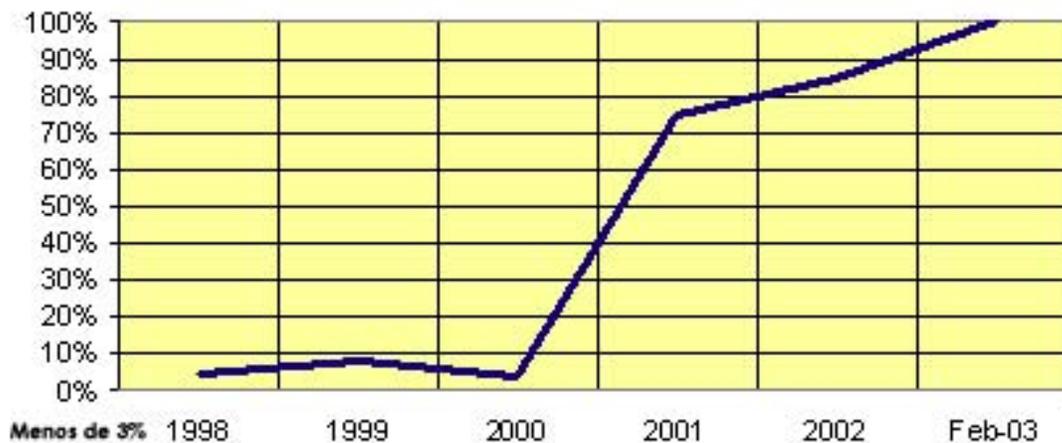


Figura 9.3.1 Mercado de Compra de Motores de Alta Eficiencia

El programa de incentivos permitió superar las barreras detectadas al inicio del mismo lográndose:

- ❑ Un amplio conocimiento de los equipos de ahorro de energía por parte de los distribuidores y usuarios finales
- ❑ Se incrementó la oferta y la demanda de equipos eficientes.
- ❑ Se redujeron los tiempos de entregas de 6 y 8 semanas a entrega inmediata.
- ❑ Se redujeron los precios de los equipos eficientes.

El programa de incentivos logró adelantar el reemplazo del 33% de los equipos que se encuentran en operación.

De manera acumulada se han instalado 211,246 motores eléctricos de alta eficiencia, que permiten ahorros por 2'584.5 GWh/año en consumo y 168,034 MW en demanda.

Adicionalmente, como resultado de este proyecto el FIDE promovió y participó en el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y uso Racional de los Recursos Energéticos que coordina la CONAE; como resultado de esto, destaca la publicación de la Norma de Eficiencia Energética para Motores Trifásicos de Inducción NOM-016-ENER-2002 el 13 de enero del 2003 en el Diario Oficial de la Federación y entró en vigor el 13 de marzo del 2003.

Esta norma contempló lo siguiente:

- ❑ Se eliminaron las eficiencias especificadas para motores de eficiencia estándar
- ❑ Se incluyó a los motores verticales.
- ❑ Se amplió el alcance de la Norma para cubrir hasta 500 HP.
- ❑ Avance de las eficiencias que se ha tenido en los motores de alta eficiencia.

9.4 Comparación en el consumo y ahorro de energía entre motor Standard y alta eficiencia.

Ejemplo 1: Novaquim S.A.

Empresa dedicada a la manufactura de diferentes productos químicos destinados a la industria del hule.

Sistema:

La empresa tiene contratada una tarifa HM (Horaria mediana tensión y cargas igual o mayor a 1,000 kW), con una alimentación de 34.5 kV, distribuyendo en 4.16 kV para alimentar la mayor parte de las cargas en 440 voltios. Los consumos promedios de energía entre diciembre de 1993 y mayo de 1994 fueron los siguientes:

Consumo kWh/mes (base)	Consumo kWh/mes (punta)	Demanda kW (base)	Demanda kW (punta)	Factor de potencia (%)	Factor de carga (%)
564,882	49,679	1,181	652	91.64	59.49

Tabla 9.4.1 Consumos promedio de energía, Novaquim, S.A., ejemplo 1

Descripción del potencial de ahorro:

El diagnóstico energético realizado en la industria Novaquim, permitió detectar las principales cargas consumidoras de energía eléctrica, localizada en la tracción mecánica a través de motores de inducción, quedando en segundo término la producción de hidrógeno (materia prima para uno de los productos). Cabe señalar que el empleo de energía eléctrica se hace imprescindible también en los sistemas de agua helada de agua de enfriamiento y en algunos equipos del proceso.

Acción:

-Sustitución de motores estándar por motores de alta eficiencia: se sustituyó un lote de motores por otros de igual capacidad, pero con un diseño de alta eficiencia.

-Optimización del sistema de alumbrado: se sustituyeron las lámparas incandescentes por otras de alta intensidad de descarga, principalmente del área de producción, donde el equipo es a prueba de explosión. Ver tabla 9.4.2

Medidas	Ahorro en demanda kW	Ahorro en consumo kWh/año
Sustitución de motores estándar por motores de alta eficiencia	13.00	80,160.00
Optimización del sistema de alumbrado	41.00	175,584.00
TOTAL	54.00	255,744.00

Tabla 9.4.2 Medidas adoptadas por la empresa Novaquim y ahorros obtenidos.

El proyecto de ahorro de energía en la empresa Novaquim, presenta una alta rentabilidad energética-económica, colocando a empresas en lo más altos niveles de eficiencia en la rama del hule.

Fuente: Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE). México

Ejemplo 2

Como muchas empresas hoy en día, los hoteles buscan ser más competitivos. Debido a la necesidad cada vez más apremiante de disminuir costos de operación, existe un nicho de oportunidad de ahorro en el uso de motores de alta eficiencia. Dado que el costo de la energía eléctrica está en aumento constante, esta oportunidad es aun más rentable.

Existen varias oportunidades para conseguir considerables disminuciones de costos de operación usando motores de alta eficiencia. Se pueden sustituir los motores estándar cuando se dañen o adquirir motores de alta eficiencia para nuevas instalaciones, sobre todo cuando operan más de 12 horas al día. También la instalación de variadores de velocidad representa una oportunidad de ahorro, aplicados a los motores que operan con cargas variables. A continuación, se presentarán más detalles sobre estas dos opciones.

Los motores eléctricos.

Son según estadísticas los responsables del 70 al 80 % de la energía consumida en los hoteles. Esto significa que si se están utilizando motores estándar con eficiencias promedio del 80%, en lugar de motores de alta eficiencia con eficiencias arriba de 90%, más del 10% de la energía eléctrica que consumen los motores, son pérdidas.

Los variadores de velocidad.

Por otro lado, también existen motores que operan con cargas variables, a veces en función de la temperatura, otras veces en función de flujo o presión, dependiendo de las necesidades de uso o de la ocupación y es en estos casos en los que utilizando los variadores de velocidad, se adaptan los caballos de potencia (Horse Power - HP) del motor a la necesidad, logrando con esto tener por así decirlo, un motor de potencia variable y por lo tanto un motor que reduce sus requerimientos de energía eléctrica, obteniendo así ahorros sustanciales. Ver tabla 9.4.3

BASE DE COMPARACIÓN	MOTOR STANDARD	MOTOR DE ALTA EFICIENCIA	DIFERENCIA	COMENTARIOS
Precio de compra (\$)	28,540	34,248	5,708	20% mayor
Eficiencia (%)	89.5	93.6	4.1	4.5% mayor
Pérdidas (%)	10.5	6.4	4.1	39% menor
Costo anual de energía (\$)	95,785	91,586	4,199	3.3 y 2.7 veces el costo inicial de los motores
Costo anual de pérdidas (\$)	10,061	5,862	4,199	41.7 % menor
Costo de la energía en 20 años (\$)	1,915,700	1,831,720	83,980	4.3 % menor
Costo de pérdidas en 20 años (\$)	201,220	117,240	83,980	15 veces el costo de la diferencia del precio de compra

Tabla 9.4.3 Comparación de costos de operación de un motor 50 HP.

De 1998 al año 2001 los ahorros de energía eléctrica se incrementaron de 1635 a 2,692 GWh por año. Tabla 9.4.4 Los ahorros logrados en el año 2000 representaron el 1.29% de las ventas de energía eléctrica de ese año, a su vez los del 2001 representaron el 1.71%.

Ahorro Energía Eléctrica GW/año	1998	1999	2000	2001
Industria	988	1,136	1,128	1,688
Comercio y Servicios	234	265	217	281
Servicios Municipales	166	190	235	288
Bombeo Agrícola	119	123	155	135
Doméstico	128	146	270	300
Totales	1,635	1,860	2,005	2,692

Tabla 9.4.4 Ahorros de energía eléctrica por sectores de 1998 a 2001.

El 63% de los ahorros corresponde al sector Industrial, 11% al sector doméstico, 11% a los servicios municipales, a 10% a las instalaciones de comercios y servicios diversos y 5% al sector agrícola. Ver figura 9.4.1

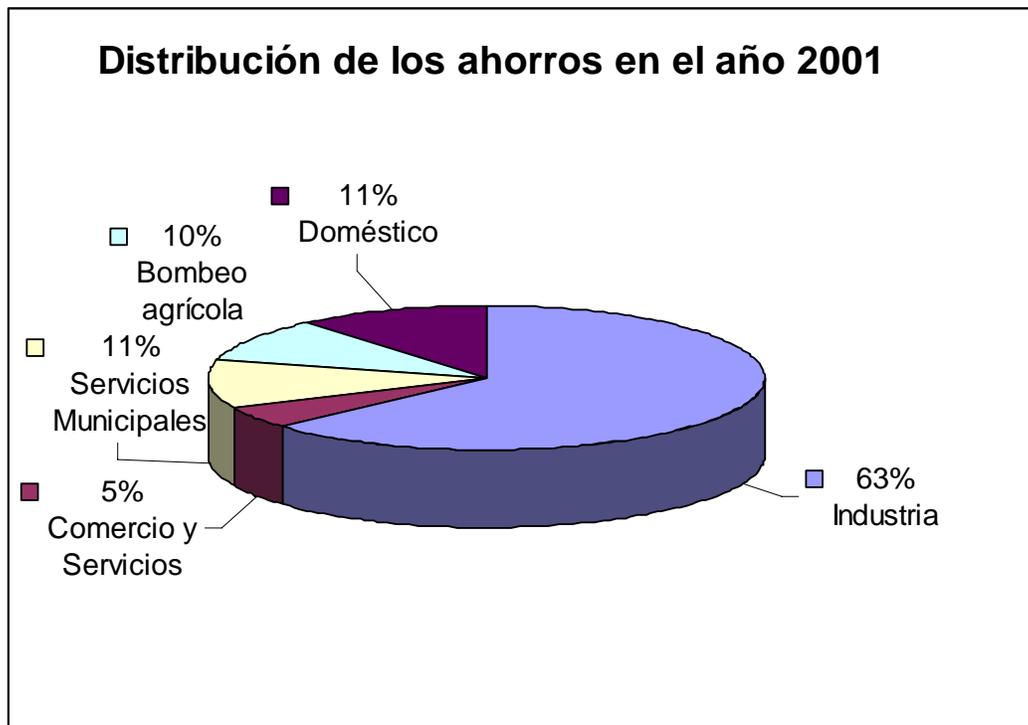


Figura 9.4.1 Ahorro por sectores (%).

Entre las medidas de ahorro de energía eléctrica más aplicadas se encuentran:

- Disminución o eliminación de fugas de aire comprimido y acondicionado
- Instalación de apagadores individuales
- Sustitución de focos incandescentes por lámparas fluorescentes compactas
- Sustituir lámparas fluorescentes por lámparas T-8 de mayor eficiencia
- Sustituir lámparas de vapor de mercurio por de sodio en alta presión
- Instalación de Fococeldas para apagar iluminación de áreas que reciben buena luz natural
- Sustitución de motores eléctricos estándar por de Alta eficiencia
- Corrección del desbalanceo de fases en equipos finales

Ahorros acumulados.

A lo largo de los 11 años se han acumulado ahorros equivalentes a 11,877 GWh, siendo el sector industrial en que más ha aportado a este logro, sin embargo se observan incrementos importantes en el sector doméstico y las instalaciones de servicios. Ver tabla 9.4.5 Y Figura 9.4.5 Evolución de ahorros acumulados de energía eléctrica (GWh/año) de 1991 a 2001.

Sector	Industrial	Comercial y de Servicios	Servicios Municipales	Agrícola	Doméstico	Ahorro Total Acumulado
1991	389	45	94	17	38	577
1992	1,038	123	233	69	113	1,576
1993	1,757	263	342	91	215	2,668
1994	2,489	405	472	200	264	3,830
1995	3,272	580	599	295	315	5,061
1996	3,947	768	727	393	381	6,216
1997	4,590	942	858	519	471	7,380
1998	4,975	935	941	485	516	7,853
1999	5,516	977	1,059	494	579	8,625
2000	6,069	1,006	1,213	562	771	9,620
2001	7,592	1,155	1,478	630	1,021	11,877

Tabla 9.4.5 Ahorros acumulados del año 1991 al año 2001.

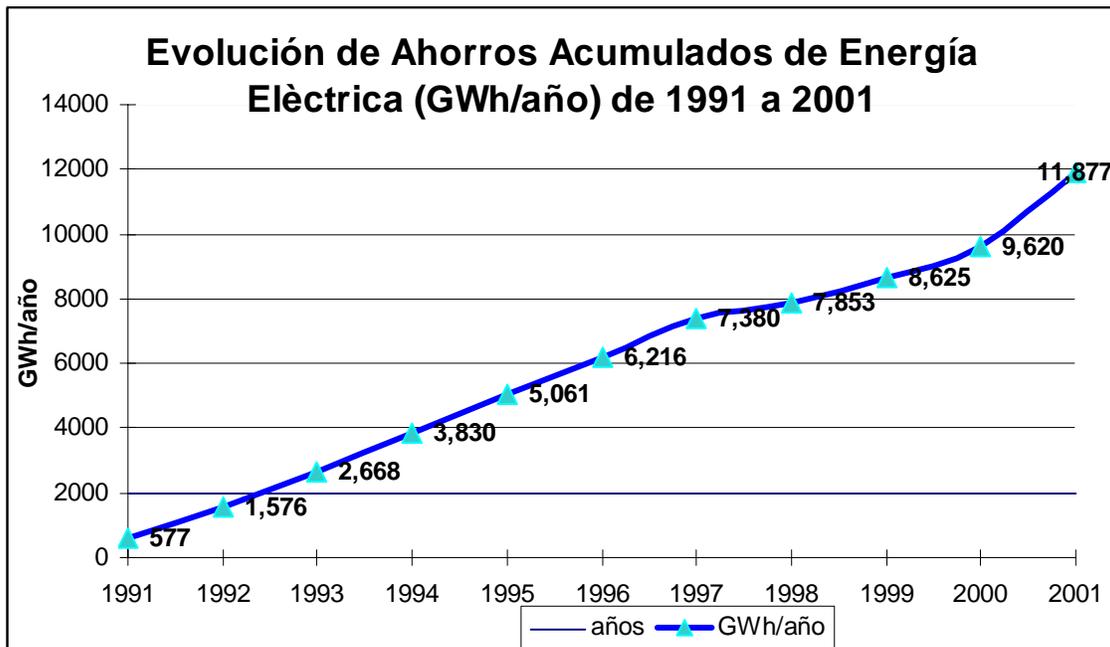


Figura 9.4.5 Evolución de ahorros acumulados de energía eléctrica (GWh/año) de 1991 a 2001.

9.5 Limitaciones de los motores alta eficiencia.

El hecho de que los motores de alta eficiencia operan a una velocidad mayor, puede ocasionar un incremento en la carga, sobre todo cuando se accionan ventiladores o bombas centrífugas, este hecho debe valorarse en cada situación.

El momento de arranque y el momento máximo son en algunos diseños ligeramente mayores y en otros ligeramente menores, por lo tanto es necesario analizar detalladamente en cada aplicación.

La corriente de arranque suele ser mayor. Esto puede provocar que se sobrepasen los límites máximos de caída de voltaje en la red. También puede influir en la capacidad de los equipos de maniobra, aunque muchas veces se puede operar con los mismos que se usan con los motores estándar y en ocasiones sólo resulta necesario cambiar los elementos térmicos.

La corriente transitoria en el arranque, que tiene su máximo en el primer medio ciclo, se incrementa debido a la tendencia a un mayor valor de la relación X/R. Aunque esta corriente puede no afectar el tamaño del arrancador, si se afecta el disparo instantáneo del interruptor del

motor, por lo que hay que buscar un compromiso entre la coordinación del interruptor y los disparos del arranque.

El factor de potencia del motor puede ser menor que un motor estándar. Un estudio reciente realizado por Bonnett (1997) encontró que los motores de alta eficiencia construidos en USA, en el intervalo de 3 a 10 HP tienen un factor de potencia mayor que los estándares, inferior en el intervalo de 15 a 40 HP, aproximadamente igual de 50 a 100 HP y de nuevo menor de 125 HP en adelante.

BIBLIOGRAFIA

PROCOBRE-MEXICO.

Motores de alta eficiencia.

[México D.F.]: Procobre, sin fecha. 2 vols.

Video ntsc. Contiene: motores de alta eficiencia: recorte sus gastos.- motores de alta eficiencia.

OSTOLAZA, RODOLFO.

Utilización del cobre para el uso eficiente de la energía eléctrica en la operación de motores asíncronos.

sin pie de imprenta, 20-22 pp.

FASCÍCULO DEL FIDE (FIDEICOMISO PARA EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA)

“Ventajas del uso de motores eléctricos de alta eficiencia”

www.fide.org.mx

CATALOGO GENERAL DE MOTORES ELÉCTRICOS (SIEMENS)

www.siemens.com.mx

ACOLTZI, HIGINIO. MOTORES EFICIENTES, NORMALIZACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA EN MÉXICO, Instituto Tecnológico de Apizaco. México, 1994, Capitulo 3.

SECRETARIA DE ENERGÍA. NOM-014-ENER-2004

Eficiencia energética de motores de inducción de corriente alterna, tipo jaula de ardilla en potencias 0,746 kW (1CP) a 149,2 kW (200CP). Límites-métodos de prueba. México 2005.