

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGÓN**

**"DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO
EN EL USO
DE MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS"**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

PRESENTA:

ALEJANDRO SEGURA TORRES

**DIRECTOR DE TESIS:
ing. David Franco Martínez**

Handwritten signature

MÉXICO D.F. OCTUBRE DEL 2001



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ARAGÓN - UNAM

JEFATURA DE CARRERA DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

OFICIO No. ENAR/JAME/0778/2001

ASUNTO: Sinodo

~~LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS
SECRETARIO ACADÉMICO
PRESENTE~~

Por este conducto me permito relacionar los nombres de los Profesores que sugiero integren el Sinodo del Examen Profesional del alumno: **SEGURA TORRES ALEJANDRO**, con Número de Cuenta: **9561828-1** con el tema de tesis: **"DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EN EL USO DE MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS"**.

PRESIDENTE:	ING. RAÚL BARRÓN VERA	OCTUBRE	78
VOCAL:	ING. J.J. RAMÓN MEJÍA ROLDÁN	MARZO	85
SECRETARIO:	ING. JUAN ANTONIO VILLANUEVA ORTEGA	SEPTIEMBRE	94
LENTE:	ING. ABEL VERDE CRUZ	ABRIL	95
SUPLENTE:	ING. DAVID FRANCO MARTÍNEZ	JULIO	98

Quiero subrayar que el Director de Tesis es el Ing. David Franco Martínez, el cual esta incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, Estado de México, 22 de septiembre del 2001

EL JEFE DE CARRERA

ING. RAÚL BARRÓN VERA



c.c.p.- Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez - Jefa del Depto. de Servicios Escolares.
Ing. David Franco Martínez - Asesor de Tesis.
Alumno.

RBV/tpv

Quiero dedicar esta tesis.....

A Dios:

Por darme la oportunidad de vivir y de seguir haciéndolo.

Por permanecer conmigo durante todos los momentos de mi vida y por seguir haciéndolo aún ahora.

Y por continuar acompañándome en el futuro: en mi vida personal y profesional, en mis derrotas y en los triunfos que pueda yo tener.

A mi Madre: Gloria Torres Fuentes

Por permanecer conmigo desde mi nacimiento hasta el día de hoy.

Por cuidarme y estar siempre pendiente de mí.

Por haberme educado con buenas costumbres morales y éticas.

Por estar conmigo en mis malos momentos, dándome consejos y soluciones, para poder levantarme y seguir adelante.

Por darme el ejemplo de que trabajando duro se puede conseguir lo que sea en esta vida.

Por apoyarme económicamente en el financiamiento total de mi tesis.

Debido a todo lo anterior quiero agradecerle a mi madre toda la ayuda incondicional que de ella recibí, además de su cariño y comprensión, acciones que se ganaron todo mi respeto y admiración. Por todo esto gracias mamá, ya que eres la persona más importante para mí.

A mi Padre: Joaquín Segura Rocha

Por haberme apoyado económicamente a lo largo de todos mis estudios, además de darme sustento alimenticio y de vestido, por darme la opción de ser alguien y de tener una alternativa más en la vida.

A mis Hermanas y Sobrina:

*Claudia Segura Torres
Verónica Segura Torres
Andrea Lara Segura*

Por no dejar que me sintiera sólo, por saber que contaba con alguien además de mis padres, por brindarme su compañía, apoyo y amistad. Y espero que esta nueva etapa en mi vida sirva como estímulo, para que también se superen profesionalmente y puedan formarse así un futuro mejor.

A mis Grandes Amigos:

*Héctor Cortes Fernández.
Oscar Jony García Santiago.
Álvaro Garduño Calvo.
Cruz Pele Gómez Flores.*

Por haber vivido y disfrutado de tantas experiencias y aventuras juntos dentro y fuera de la universidad al lado de otros compañeros; por apoyarnos los unos a los otros durante toda la carrera, con el sólo fin de llegar todos juntos a la meta y de cumplir así un sueño encomún. Y aunque tal vez ya no nos veamos más en el futuro, tendré siempre presente esos momentos que pasamos juntos.

A mi asesor:

David Franco Martínez.

Por toda la ayuda, el apoyo y el respaldo que de él recibí, para realizar y poder culminar esta tesis.

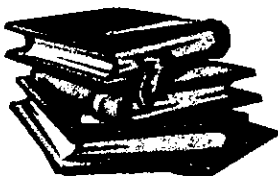
A la Universidad y a los Profesores

Por todos los conocimientos adquiridos durante mi estancia en ella, así como experiencias personales que ayudaron a enriquecerme como ser humano, pero sobre todo por darme un arma más en la vida para seguir superándome. Por lo que siempre estaré agradecido hacia la universidad por mi formación como profesionista. Y recompensare dicha preparación esforzándome cada día dentro de mi profesión, para poner en alto el nombre de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Alejandro Segura Torres



"Por mi raza hablará el espíritu"



DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EN EL USO DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	
CONSTRUCCIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS.	
1.1	Introducción 4
1.2	Clasificación de las Máquinas Eléctricas 4
1.2.1.	Generadores Eléctricos 5
1.2.2.	Motores Eléctricos 5
1.2.3.	Transformadores Eléctricos 5
1.2.4.	Convertidores Eléctricos 6
1.3	Clasificación de los Motores Eléctricos 7
1.4	Construcción del Motor de Inducción 9
1.4.1	Introducción 9
1.4.2	Construcción del Estator 10
1.4.3	Construcción de los Devanados del Estator 12
1.4.4	Aislamientos 17
1.4.5	Colocación de los aislamientos en las ranuras 20
1.4.6	Colocación de las bobinas en las ranuras 22
1.4.7	Construcción del rotor 27
1.4.8	Aislamientos en las bobinas 35
1.4.9	Otros componentes que Constituyen a un Motor de Inducción 38
1.5	Construcción de un Motor Síncrono 45
1.5.1	Construcción del Estator 45
1.5.2	Construcción del Rotor 46
1.5.3	Elementos Eléctricos Auxiliares en un Rotor 58

CAPÍTULO 2

CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS.

2.1	Introducción	69
2.2	Principio de Operación de un Motor de Inducción	69
2.3	Principio de Operación del Motor Síncrono	72
2.4	Circuito Equivalente de un Motor de Inducción	77
2.5	Circuito Equivalente de un Motor Síncrono	87

CAPÍTULO 3

PÉRDIDAS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS.

3.1	Introducción	93
3.2	Pérdidas en los Motores	93
3.2.1	Pérdidas Mecánicas	94
3.2.2	Pérdidas en el núcleo o en el hierro	94
3.2.3	Pérdidas en el Cobre o por Efecto Joule	95
3.2.4	Pérdidas Adicionales	95
3.3	Pérdidas en el Motor de Inducción	96
3.4	Pérdidas en el Motor Síncrono	104

CAPÍTULO 4

CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS

4.1	Introducción	113
4.2	Características de Operación del Motor de Inducción	113
4.2.1	Comportamiento de un Motor de Inducción Operando En Vacío	117
4.2.2	Comportamiento de un Motor de Inducción Operando a Media Carga	117
4.2.3	Comportamiento de un Motor de Inducción Operando a Plena Carga	118

4.2.4	Comportamiento de un Motor de Inducción Operando Más Halla de la Plena Carga	119
4.2.5	Obtención del Par en un Motor de Inducción	122
4.2.6	Efectos que se presentan al variar la resistencia del rotor	130
4.3	Características de Operación del Motor Síncrono	138
4.3.1	Comportamiento del Motor Síncrono con Carga Variable a Corriente de Excitación (I^F) Constante	138
4.3.2	Comportamiento con Excitación Variable y Carga Constante	148
4.3.3	Obtención de Par en un Motor Síncrono	154
4.3.4	Curvas en "V" del Motor Síncrono	157

CAPÍTULO 5

EFICIENCIA EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS.

5.1	Introducción	165
5.2	Eficiencia en las Clases de Diseño de los Motores De Inducción con Rotor Jaula de Ardilla	165
5.2.1	Clase de Diseño A	167
5.2.2	Clase de Diseño B	168
5.2.3	Clase de Diseño C	170
5.2.4	Clase de Diseño D	172
5.3	Características Específicas de la Eficiencia en los Motores de Inducción	174
5.4	Eficiencia en los Motores Síncronos	181
5.4.1	Eficiencia que Ofrece la Manipulación del Factor de Potencia en un Motor Síncrono	182
5.5	Factor de Potencia (F.P)	190
5.5.1	El Factor de Potencia en un Motor de Inducción	192
5.5.2	El Factor de Potencia en un Motor Síncrono	192

CAPÍTULO 6

METODOLOGÍA DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO PARA EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS.

6.1	Introducción	196
6.2	Diagrama de Flujo de la Metodología Del Diagnóstico Energético	196

6.3	Recopilación de Datos	199
6.3.1	Datos Básicos (Antecedentes)	199
6.3.2	Datos Sobre los Motores	202
6.3.2.1	El Número de Motores Tanto de Inducción Como Síncronos	203
6.3.2.2	Datos de Placa en Ambos Tipos De Motores	204
6.3.2.3	Ubicación de Ambos Tipos de Motores	206
6.3.2.4	Tareas que Desarrollan Ambos Tipos de Motores	207
6.3.2.5	Condiciones Actuales de Operación en Ambos Tipos de Motores	208
6.3.2.6	El Tiempo que Tienen Operando Ambos Tipos de Motores, así como su Historial de Reparaciones	209
6.3.2.7	Horario de Operación en Ambos Tipos de de Motores	210
6.3.2.8	Eficiencia y Factor de Potencia Actual en Ambos Tipos de Motores	213
6.4	Análisis de los Datos Recopilados	220
6.4.1	Condiciones Actuales de Operación en Ambos Tipos de Motores	220
6.4.1.1	Estado de Limpieza en el que se encuentran	221
6.4.1.2	Condición en la que se Encuentra la Ventilación	221
6.4.1.3	Condición en la que se Encuentran los Valeros, Chumaceras o Cojinetes	222
6.4.1.4	Condición en la que se Encuentra el Eje o Flecha del Motor	222
6.4.1.5	Condición en la que se Encuentran las Escobillas Y los Anillos Rozantes o Colectores Según sea el Caso	223
6.4.2	El Tiempo de Operación en Ambos Tipos de Motores, así como el Historial de Reparaciones de los Mismos	224
6.4.3	Horario de Operación en Ambos Tipos de Motores	224
6.4.4	Eficiencia y Factor de Potencia Actual En Ambos Tipos de Motores	225
6.5	Alternativas Para el Ahorro de la Energía Eléctrica	226
6.5.1	En la Eficiencia	226
6.5.2	En el Factor de Potencia	228
6.5.2.1	Selección Correcta del Tipo de Motor	228
6.5.2.2	Preferir Motores Trifásicos	229
6.5.2.3	Aumento de la Carga de los Motores a su Potencia Nominal	230
6.5.2.4	Reparación Correcta y de Alta Calidad de los Motores	230

6.5.2.5	Empleo de Motores Síncronos en Lugar de Motores de Inducción	231
6.5.3	Recomendaciones Generales	231
6.6	Resultados Obtenidos	235
6.6.1	Ahorro de Energía con la Utilización de Motores De Alta Eficiencia	235
6.6.2	Corrección del Factor de Potencia	239
6.6.2.1	Métodos de Corrección del Factor de Potencia	241
6.6.2.2	Determinación del Factor de Potencia en una Instalación Eléctrica Industrial	243
6.6.2.3	Cálculo de la Potencia Reactiva Capacitiva Que se necesita para corregir el Factor de Potencia, por medio de los Capacitores de Potencia	244
6.6.2.4	Consideraciones para la Localización de los Capacitores de Potencia	256
6.6.2.5	Bancos de Capacitores Automáticos	259
6.6.2.6	Consideraciones Básicas	259
6.7	Implementación de las Alternativas	261
6.8	Implementación de Programas de Ahorro de Energía Eléctrica	262

CAPÍTULO 7

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

7.1	Introducción	267
7.2	Recopilación de Datos	268
7.2.1	Datos Básicos	268
7.2.2	Datos sobre los Motores	270
7.2.2.1	El número de motores trifásicos tanto De inducción como síncronos	270
7.2.2.2	Datos de placa de los motores trifásicos De inducción	271
7.2.2.3	Ubicación de los motores trifásicos De inducción	271

7.2.2.4	Tareas que desarrollan los motores trifásicos De inducción	273
7.2.2.5	Condiciones actuales de operación de los Motores trifásicos de inducción	284
7.2.2.6	El tiempo que llevan operando los Motores trifásicos de inducción, así como su historial de reparaciones	284
7.2.2.7	Horario de operación de los motores trifásicos De inducción	285
7.2.2.8	Eficiencia y Factor de Potencia en los motores Trifásicos de inducción	286
7.3	Análisis de los datos recopilados	294
7.3.1	Motor trifásico de inducción uno (Motor I_1)	294
7.3.1.1	Condiciones actuales de operación	294
7.3.1.2	El tiempo de operación, así como el Historial de reparaciones	296
7.3.1.3	Horario de operación	297
7.3.1.4	Eficiencia y Factor de Potencia actual	297
7.3.2	Motor trifásico de inducción dos (Motor I_2)	298
7.3.2.1	Condiciones actuales de operación	298
7.3.2.2	El tiempo de operación, así como el Historial de reparaciones	300
7.3.2.3	Horario de operación	301
7.3.2.4	Eficiencia y Factor de Potencia actual	301
7.3.3	Motor trifásico de inducción tres (Motor I_3)	302
7.3.3.1	Condiciones actuales de operación	302
7.3.3.2	El tiempo de operación, así como el Historial de reparaciones	304
7.3.3.3	Horario de operación	305
7.3.3.4	Eficiencia y Factor de Potencia actual	305
7.3.4	Motor trifásico de inducción cuatro (Motor I_4)	306
7.3.4.1	Condiciones actuales de operación	306
7.3.4.2	El tiempo de operación, así como el Historial de reparaciones	308
7.3.4.3	Horario de operación	309
7.3.4.4	Eficiencia y Factor de Potencia actual	309

7.3.5	Motor trifásico de inducción cinco (Motor I ₅)	310
7.3.5.1	Condiciones actuales de operación	310
7.3.5.2	El tiempo de operación, así como el Historial de reparaciones	312
7.3.5.3	Horario de operación	313
7.3.5.4	Eficiencia y Factor de Potencia actual	313
7.3.6	Motor trifásico de inducción seis (Motor I ₆)	314
7.3.6.1	Condiciones actuales de operación	314
7.3.6.2	El tiempo de operación, así como el Historial de reparaciones	316
7.3.6.3	Horario de operación	317
7.3.6.4	Eficiencia y Factor de Potencia actual	317
7.4	Alternativas para el ahorro de la energía eléctrica	318
7.4.1	Acciones correctivas para el ahorro de la energía eléctrica En los seis motores trifásicos de inducción	318
7.4.2	Recomendaciones para obtener ahorros adicionales En el consumo de la energía eléctrica en los seis Motores trifásicos de inducción	325
7.5	Ahorro de energía con la utilización de motores de alta eficiencia	329
7.6	Implementación de un programa de ahorro de energía eléctrica	340
ANEXO A		
TABLAS		
		342
CONCLUSIÓN		
		351
BIBLIOGRAFÍA		
		353

INTRODUCCIÓN

Si hay una energía que sea capaz de llevar a cabo todas las actividades desarrolladas en el mundo por el ser humano, esa es la energía eléctrica. Energía que se ha vuelto indispensable, ya que desde que surgió, toda la tecnología que ha creado el hombre hasta ahora se basa para funcionar en el uso de dicha energía. Por lo que si uno se pudiera imaginar un mundo sin energía eléctrica, se pensaría en un letargo en cuanto a todos los avances que ha logrado la humanidad, dando la apariencia de que el tiempo se hubiese detenido, provocando que se piense en utilizar antiguos métodos para tratar de reactivar la actividad del mundo, como la energía que producía el vapor para mover maquinarias, trenes, barcos, etc. Aunque existen otras formas alternas a la energía eléctrica para llevar a cabo algunas actividades, como la energía solar; no suelen ser tan eficientes y confiables como la energía eléctrica, debido a la poca atención e inversión que se les presta a este tipo de energías alternas.

Es por todo lo anterior que resulta primordial, poner atención a la buena utilización de la energía eléctrica, debido a que este tipo de energía se obtiene principalmente de los recursos naturales con los que cuenta el planeta, uno de ellos es el petróleo, que se considera como un recurso natural no renovable y que es utilizado para producir combustible, el cual es uno de los elementos principales para poder obtener energía eléctrica en una central termoeléctrica, que es de las más populares en todo el mundo. El problema en este tipo de centrales, es de que como el petróleo se utiliza para algo más que obtener combustible para dichas centrales, es más probable que este recurso natural no renovable se agote, aunque existen varios países con yacimientos petroleros, esto no asegura que sea para siempre, ya que la principal preocupación de los productores de petróleo es vender más este producto y obtener más ganancias económicas mientras dure. A pesar de esto existen otras formas para producir energía eléctrica como la fuerza del agua en las hidroeléctricas, la fuerza del vapor en las geotérmicas, y el poder de los elementos radioactivos para las núcleo eléctricas, así como otras no tan difundidas como las plantas óleo eléctricas que usan la fuerza del aire, así como las plantas de energía solar entre algunas otras.

Es debido a la probable escasez de los recursos naturales a futuro (principalmente el petróleo) que es necesario tomar conciencia en el consumo de la energía eléctrica, desde el uso más insignificante de ella en el hogar hasta la utilización más grande en una planta industrial. La forma primordial de consumir racionalmente la energía eléctrica es adoptar medidas de ahorro, por lo que para esto existen diversas áreas en el cual se podría ahorrar energía eléctrica, como por ejemplo: en los sistemas de iluminación, en los sistemas de aire acondicionado, entre otros que requieran de la energía eléctrica para llevar a cabo una determinada función.

INTRODUCCIÓN

Si hay una energía que sea capaz de llevar a cabo todas las actividades desarrolladas en el mundo por el ser humano, esa es la energía eléctrica. Energía que se ha vuelto indispensable, ya que desde que surgió, toda la tecnología que ha creado el hombre hasta ahora se basa para funcionar en el uso de dicha energía. Por lo que si uno se pudiera imaginar un mundo sin energía eléctrica, se pensaría en un letargo en cuanto a todos los avances que ha logrado la humanidad, dando la apariencia de que el tiempo se hubiese detenido, provocando que se piense en utilizar antiguos métodos para tratar de reactivar la actividad del mundo, como la energía que producía el vapor para mover maquinarias, trenes, barcos, etc. Aunque existen otras formas alternas a la energía eléctrica para llevar a cabo algunas actividades, como la energía solar; no suelen ser tan eficientes y confiables como la energía eléctrica, debido a la poca atención e inversión que se les presta a este tipo de energías alternas.

Es por todo lo anterior que resulta primordial, poner atención a la buena utilización de la energía eléctrica, debido a que este tipo de energía se obtiene principalmente de los recursos naturales con los que cuenta el planeta, uno de ellos es el petróleo, que se considera como un recurso natural no renovable y que es utilizado para producir combustible, el cual es uno de los elementos principales para poder obtener energía eléctrica en una central termoeléctrica, que es de las más populares en todo el mundo. El problema en este tipo de centrales, es de que como el petróleo se utiliza para algo más que obtener combustible para dichas centrales, es más probable que este recurso natural no renovable se agote, aunque existen varios países con yacimientos petroleros, esto no asegura que sea para siempre, ya que la principal preocupación de los productores de petróleo es vender más este producto y obtener más ganancias económicas mientras dure. A pesar de esto existen otras formas para producir energía eléctrica como la fuerza del agua en las hidroeléctricas; la fuerza del vapor en las geotérmicas, y el poder de los elementos radioactivos para las núcleo eléctricas, así como otras no tan difundidas como las plantas óleo eléctricas que usan la fuerza del aire, así como las plantas de energía solar entre algunas otras.

Es debido a la probable escasez de los recursos naturales a futuro (principalmente el petróleo) que es necesario tomar conciencia en el consumo de la energía eléctrica, desde el uso más insignificante de ella en el hogar hasta la utilización más grande en una planta industrial. La forma primordial de consumir racionalmente la energía eléctrica es adoptar medidas de ahorro, por lo que para esto existen diversas áreas en el cual se podría ahorrar energía eléctrica, como por ejemplo: en los sistemas de iluminación, en los sistemas de aire acondicionado, entre otros que requieran de la energía eléctrica para llevar a cabo una determinada función.

Para saber si un determinado sistema esta desperdiciando energía eléctrica, es decir, consumiendo energía eléctrica inútilmente, será necesario realizar un estudio en dicho sistema, con el fin de poder localizar las fallas o los problemas que están causando el desperdicio de la energía eléctrica, para que posteriormente se lleven a cabo las medidas correctivas pertinentes en dicho sistema y poder tener así un consumo de energía eléctrica adecuado.

La forma más adecuada para poder localizar esas fallas y que posteriormente se puedan corregir, es por medio de la aplicación de un diagnóstico energético, el cual se lleva a cabo siguiendo una determinada metodología.

Un diagnóstico energético consiste en realizar un estudio, con el cual será posible localizar problemas referentes al desperdicio de la energía eléctrica, y una vez esto se propondrán alternativas correctivas dentro del diagnóstico, para mejorar el consumo de la energía eléctrica. Para poder llevar a cabo dicha tarea es necesario seguir un patrón, un protocolo, es decir, una secuencia de pasos que sea capaz de llevarnos del inicio del diagnóstico hasta el final del mismo, esto sólo es posible mediante una metodología, la cual nos propondrá una secuencia de pasos a seguir para poder llevar a cabo la realización o aplicación de un diagnóstico energético.

Debido a lo anterior, un diagnóstico energético representa una solución factible para el ahorro de la energía eléctrica, pero como el área en el ahorro de energía es muy amplia, será necesario aplicar a cada área un diagnóstico energético, con el fin de poder abarcar un ahorro general de electricidad. Es por esta razón que en la presente tesis únicamente se concentrara al diagnóstico energético en el uso de motores de inducción y síncrono trifásicos, con el afán de poder obtener ahorros de energía eléctrica en los mismos.

Esta tesis comprende de siete capítulos, de los cuales los primeros cinco tratan sobre aspectos básicos de los motores de inducción y síncronos, como su: construcción, consideraciones básicas, pérdidas, características de operación y la eficiencia. Aspectos que son necesarios conocer para poder saber como es que funcionan y como se comportan bajo ciertas condiciones, ya que el conocer esto será de mucha utilidad en la aplicación del diagnóstico energético, al localizar y proponer soluciones para el ahorro de la energía eléctrica en los motores de inducción y síncronos trifásicos.

En el capítulo seis se elaborará y propondrá una metodología, para llevar a cabo un diagnóstico energético en el uso de motores de inducción y síncronos trifásicos, además de dar una completa descripción y explicación de cada uno de los pasos a seguir en la metodología del diagnóstico energético.

En el séptimo y último capítulo se aplicará la metodología del diagnóstico energético en el uso de motores de inducción y síncronos trifásicos, propuesta en el capítulo seis, en una industria, en la cual se cuenten con estos dos tipos de motores. Esto se hace con el fin de mostrar la aplicación práctica que tiene el diagnóstico energético aquí propuesto, por lo que será una forma de demostrar que dicho diagnóstico realmente puede localiza y proponer soluciones con respecto al ahorro de energía eléctrica, fin para el cual fue diseñado.

CAPÍTULO 1

CONSTRUCCIÓN DE LOS
MOTORES DE INDUCCIÓN
Y SÍNCRONOS

CONSTRUCCIÓN BÁSICA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS

1.1 INTRODUCCIÓN.

Si se desea conocer a los motores de inducción y síncronos que mejor manera de empezar, que por saber como están contruidos. Con esto será posible enterarse sobre los elementos que conforman a un motor, así como la función que realizan, además de saber los principales aspectos de fabricación de cada uno de ambos tipos de motores.

En este primer capítulo se empezara por dar un pequeño semblante sobre la clasificación de las máquinas eléctricas más conocidas, posteriormente se entrara de lleno a conocer como están contruidos los motores de inducción y síncronos, explicando de forma básica cada uno de los elementos que los conforman. Con esto se tendrá una idea fundamental sobre como están contruidos ambos tipos de motores, así como conocer las características principales que los distinguen.

Como un respaldo visual se presentarán varias figuras con las cuales será posible tener una idea más clara, sobre de lo que sé esta hablando en un determinado texto.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

Para el ser humano la energía desempeña un papel muy importante, ya que representa la capacidad de realizar trabajo. Así el vapor de agua de una caldera posee energía, puesto que es capaz de efectuar el trabajo de mover las turbinas de una planta de generación eléctrica; la energía se puede presentar en diversas formas: química, mecánica, térmica, eléctrica, atómica o nuclear, etc. En el caso del vapor de una caldera, decimos que posee energía térmica, y que al mover las turbinas, genera energía mecánica, que se transforma luego en energía eléctrica en los generadores.

Debido a todo lo anterior, el objetivo principal es poder transformar una forma de energía en otra, capaz de obtener una utilización más racional y conveniente. Así las máquinas son los elementos físicos que pueden realizar la transformación de la energía. Una máquina consta principalmente de una entrada, en la cual se recibe la energía que se quiere transformar, y de una salida, en la que se obtendrá la energía deseada.

Los tipos de máquinas, en las que se encuentra presente la energía eléctrica ya sea en la entrada, o en la salida o en ambas, se conocen como máquinas eléctricas y se clasifican en *máquinas generadoras (generadores)*, *máquinas motrices (motores)* y *máquinas transformadoras y convertidoras (transformadores y convertidores)*.

En seguida se dará una explicación básica de cada una de las máquinas descritas anteriormente :

1.2.1 GENERADORES ELÉCTRICOS.

Forman parte de las máquinas dinámicas o giratorias, por el nombre se pensaría que generan energía eléctrica, pero más que generar, transforman la energía mecánica aplicada a su eje (en la entrada) a energía eléctrica (en la salida).

La entrada de un generador eléctrico, normalmente es su eje de rotación y la salida son las terminales a través de las cuales se obtiene la energía eléctrica, que se pueden conectar a una red externa, ya que constan de un voltaje y una corriente. Si la corriente entregada a la salida es continua, entonces se trata de un generador de corriente directa o continua, pero si la corriente es alterna, entonces se trata de un generador de corriente alterna; para este último generador los hay monofásicos o trifásicos, y del tipo síncrono o asíncrono.

1.2.2 MOTORES ELÉCTRICOS

Forman parte de las máquinas giratorias, son utilizadas para transformar energía eléctrica (entrada) a energía mecánica (salida), como se puede ver es la operación inversa del generador eléctrico, por lo que manipulando el sentido del flujo de la energía, un motor puede funcionar como generador y un generador puede funcionar como motor.

Como en el caso de los generadores, hay motores de corriente directa y de corriente alterna monofásicos o trifásicos y del tipo síncronos o asíncronos, este último conocido como motor de inducción.

1.2.3 TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS.

Forman parte de las máquinas estáticas, también constan de terminales de entrada y salida. En este tipo de máquinas fluye sólo energía eléctrica, tanto en la entrada como en la salida y sirven para modificar voltajes y corrientes, por lo que un transformador se usa para obtener distintos niveles de tensión en la salida, ya sea que se quiera un voltaje mayor a la salida con respecto a la entrada o un voltaje menor a la salida con respecto a la entrada.

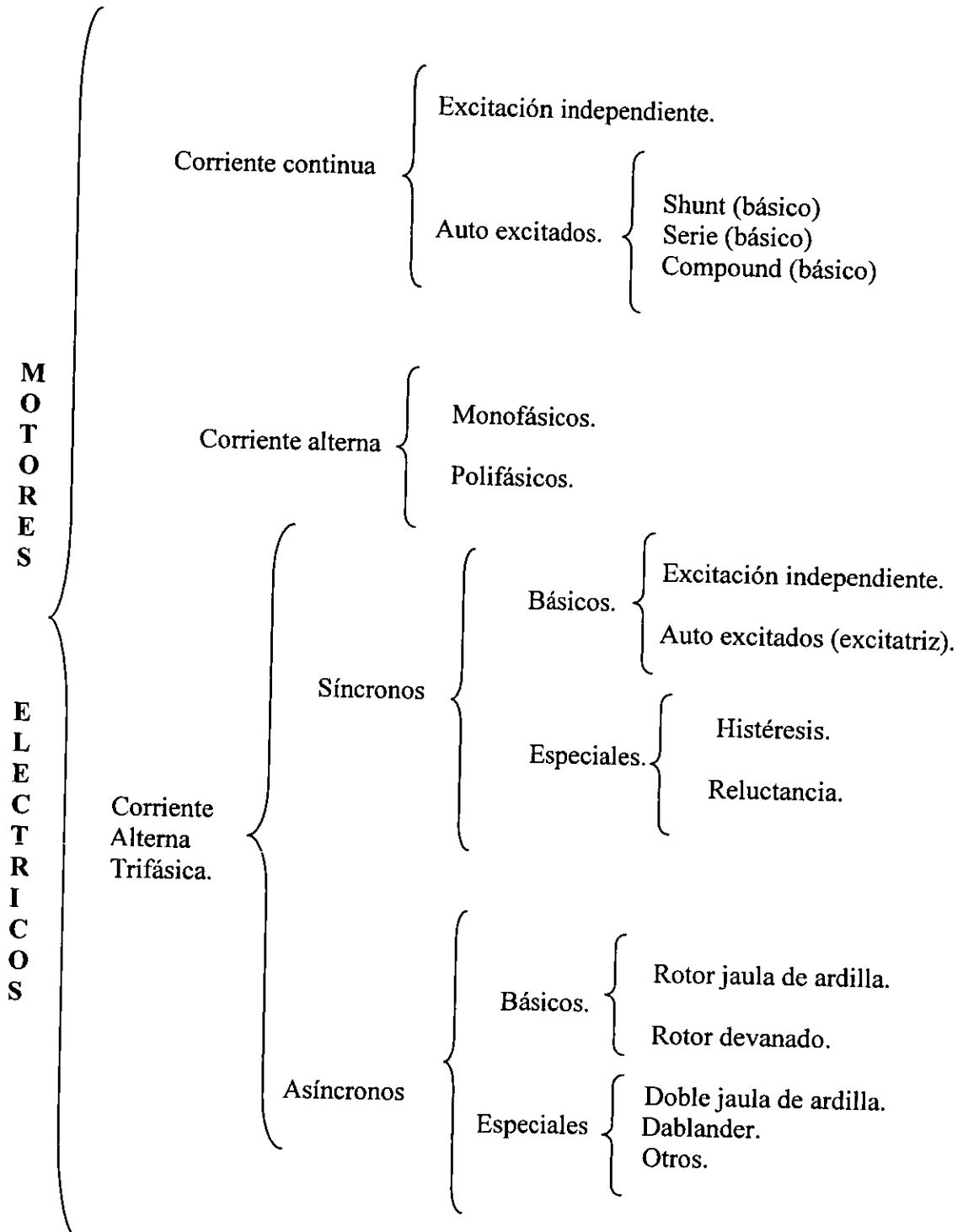
1.2.4 CONVERTIDORES ELÉCTRICOS.

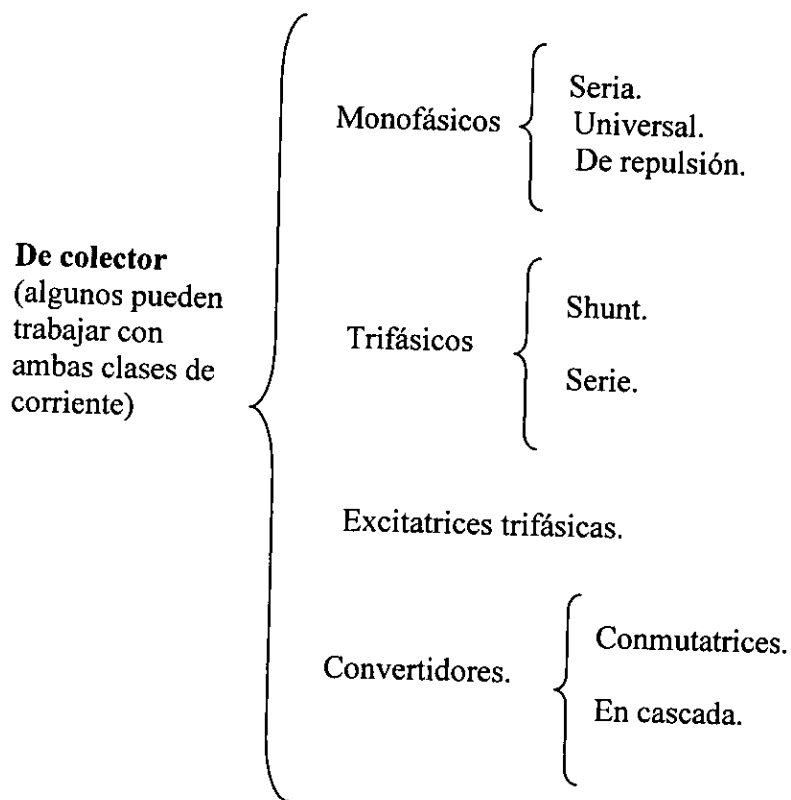
Como su nombre lo dice, son máquinas que transforman corriente alterna a corriente directa o el proceso inverso, las máquinas que desarrollan la primer función son las llamadas rectificadoras y al proceso inverso se les llama inversoras; pueden formar parte de las máquinas giratorias o estáticas, aunque la mayoría son del tipo estáticas.

Todas las máquinas eléctricas descritas anteriormente, se basan en el principio de inducción electromagnética. Y que decir de los motores eléctricos, que serán el tema principal a partir de ahora. A continuación se presentara una clasificación de los motores eléctricos más importantes o conocidos.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS.

La siguiente clasificación se basa en el tipo de corriente que usan para poder funcionar:





Como se menciona anteriormente, los motores eléctricos son el tema principal en este apartado, pero debido a que sería muy extenso hablar de todos y de cada una de sus características propias; únicamente se les prestará atención a los motores síncronos y a los asíncronos mejor conocidos como motores de inducción, ambos trifásicos, ya que son los tipos de motores eléctricos más usados en la industria, para llevar a cabo diversas actividades.

Para poder familiarizarse con los motores síncronos y de inducción, que mejor que dar una explicación sobre las características propias de cada motor; primero se hablara sobre el motor de inducción (asíncrono) después sobre el motor síncrono, pero con respecto a un mismo tema, es decir, se tratarán ambos al mismo tiempo, para poder ver y distinguir las diferencias entre los dos.

1.4 CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

1.4.1 INTRODUCCIÓN.

Nikola Tesla construyó el primer motor eléctrico de inducción en el año de 1883, y lo patentó en 1888. Posteriormente presentó un artículo en el que describía el funcionamiento de este motor, al American Institute Of Electrical Engineers (AIEE), que actualmente es el IEEE.

Cuando Tesla propuso los principios básicos para el motor de inducción de rotor devanado, aun no se desarrollaban las fuentes de potencia de dos y tres fases, que eran necesarias para poder producir el campo magnético giratorio dentro del motor; por lo que hubo un periodo de espera de 1888 hasta 1895, tiempo en el cual se introdujo el rotor de jaula de ardilla; un año después en 1896 el motor de inducción trifásico salió comercialmente a la venta.

Desde ese momento hasta la década de los 70's, se lograron muchos avances con respecto a la calidad de los materiales, que se requerían para la construcción de los motores de inducción, por lo que el resultado fue un ahorro considerable en los costos de producción.

Entrando en materia, los motores de inducción se clasifican en monofásicos, bifásicos y trifásicos según el número de fases; por el tipo de rotor los hay de rotor devanado y de rotor de jaula de ardilla.

Los elementos que componen principalmente al motor de inducción son: el estator, el rotor, la carcaza y los elementos auxiliares (como: tapas tanto delanteras como posteriores, chumaceras o valeros, tornillos de sujeción, caja de conexiones y la base o soporte); además de los componentes anteriores existen otros más, que por estar dentro del motor no son visibles a simple vista, pero que se explicaran más adelante.

Con lo anterior se puede decir, que el estator es la parte fija externa de forma cilíndrica, que junto con la carcaza comprenden la estructura mecánica de soporte, otras funciones de la carcaza son: servir de centrado al rotor que es la parte interna giratoria del motor y también sirve como soporte para los elementos auxiliares.

Ahora se presentará de forma básica sin necesidad de detallar mucho, los elementos que son necesarios para la construcción de un motor de inducción. Como se mencionó anteriormente hay motores de inducción monofásicos, bifásicos, y trifásicos, y esto representa pequeños cambios de diseño; por lo que aquí se tratará únicamente al motor trifásico de inducción que es el más utilizado en la industria, además de que ofrece grandes ventajas de ahorro de energía eléctrica, en relación con aquellos de dos y de una sola fase.

1.4.2 CONSTRUCCIÓN DEL ESTATOR.

El estator de los motores de inducción esta construido por paquetes de laminaciones troqueladas, es decir, por un conjunto de laminas hechas de acero al silicio troqueladas en forma de ranuras, en las cuales se colocan las bobinas del estator. La forma de las ranuras varía de acuerdo con el tamaño o tipo de motor.

Las laminaciones son de forma circular y troqueladas en la parte interior de dicha circunferencia, con un espesor del orden de 0.5mm por cada lámina, el diámetro de las laminaciones depende del tipo de ranuras que se troquelan en el interior de la lámina. Las ranuras abiertas se usan en motores de inducción de menos de 25 HP, y las ranuras semicerradas se usan en motores de potencias muy pequeñas con estatores que tienen diámetros menores a 40 cm, estos dos tipos de ranuras se muestran en la figura 1.1.



**ESTATOR DE RANURAS
ABIERTAS**

(a)



**ESTATOR DE RANURAS
SEMICERRADAS**

(b)

Figura 1.1. En esta figura se pueden observar las siguientes laminaciones, (a) Laminación con ranuras abiertas, (b) Laminación con ranuras semicerradas. Esta figura fue obtenida del libro de "Curso De Transformadores y Motores Trifásicos De Inducción" de Enríquez Harper.

Hay laminaciones que no se troquelan de forma completa como las anteriores, sino en forma seccionada, este tipo de laminaciones se usan en grandes motores de inducción con estatores que tienen un diámetro alrededor de 1m.

Una de las características importantes en las laminaciones es su calidad, ya que de esta dependen las pérdidas que se tienen en el hierro, y afectan directamente a la eficiencia del motor. En motores de poca potencia se usan laminaciones normales que tienen pérdidas en el hierro de aproximadamente 3.5 watts/Kg, en motores de gran potencia adquiere mayor importancia su eficiencia, por lo que hay que reducir todas las pérdidas que se puedan dar en el motor, así las laminaciones de este tipo de motores tienen pérdidas que no exceden los 2.5 watts/Kg. Para poder reducir dichas pérdidas, las laminaciones son de acero al silicio, con un 3% de silicio.

Como se dijo anteriormente el estator esta formado por paquetes de laminaciones, las cuales por lo general se recubren de un aislante que puede ser a partir de goma; las laminaciones deben estar ya troqueladas, es decir, ya con las ranuras en las cuales se colocaran las bobinas; en la siguiente figura 1.2 se muestra a un estator con sus respectivas laminaciones además de la carcasa y su base.

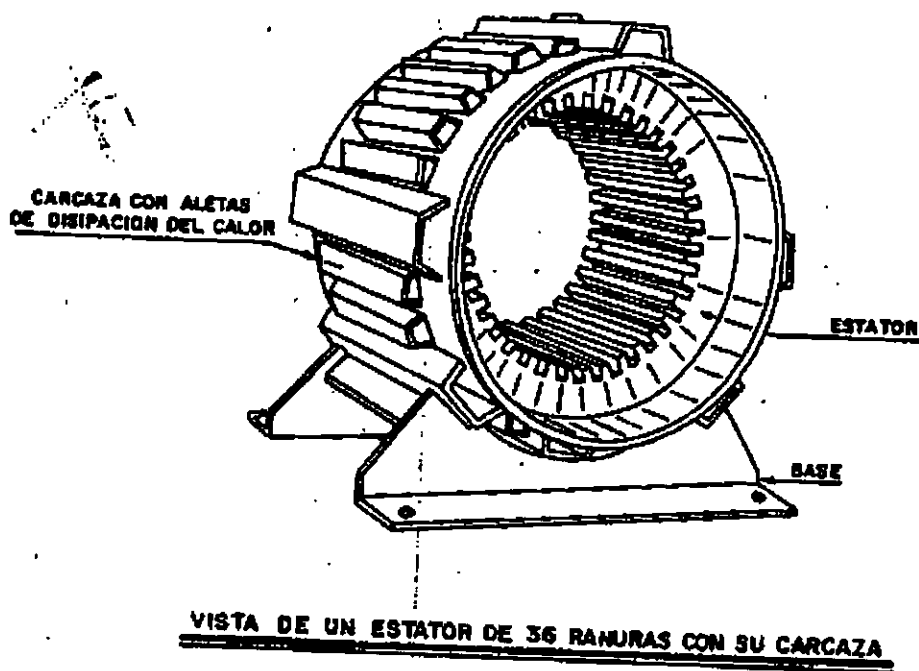
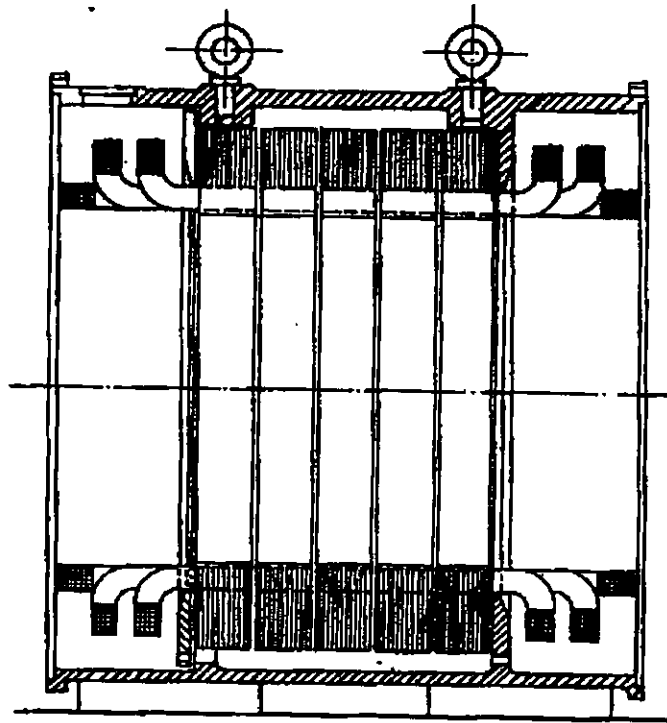


Figura 1.2. Vista de un estator con sus respectivas laminaciones de 36 ranuras y con su carcasa. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

En la figura 1.3 se muestra un corte lateral del estator de un motor de inducción de gran potencia, en donde se pueden ver los paquetes de laminaciones que forman al estator.



**CORTE DEL ESTATOR DE UN MOTOR DE INDUCCION
DE GRAN POTENCIA Y ALTA VELOCIDAD**

Figura 1.3. Corte Lateral del estator de un motor de inducción. Esta figura fue obtenida del libro de “El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)” de Gilberto Enríquez Harper.

1.4.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS DEVANADOS DEL ESTATOR

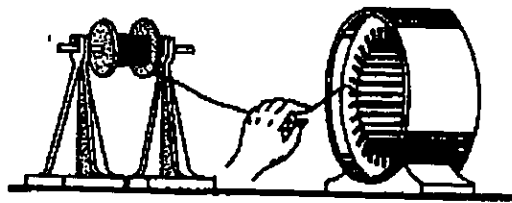
Los conductores eléctricos más usados en la construcción de los devanados para los motores eléctricos, deben reunir ciertos requisitos que son de mucha importancia, tales como:

- a) La más alta conductividad posible.
- b) El menor coeficiente posible de temperatura por resistencia eléctrica.
- c) Una adecuada resistencia mecánica.
- d) Deben ser dúctiles y maleables.
- e) Debe tener una adecuada resistencia a la corrosión.

Dichos conductores eléctricos son los de cobre, ya que reúnen propiedades como: la alta conductividad, buenas condiciones mecánicas, relativa inmunidad a la oxidación y corrosión bajo ciertas condiciones de operación, además de ser dúctil y maleable. El tipo de conductor de cobre para embobinados de motores es el alambre magneto redondo esmaltado, cuyo diámetro no debe ser superior de 2.5 a 3.0 mm por razones de tipo constructivo.

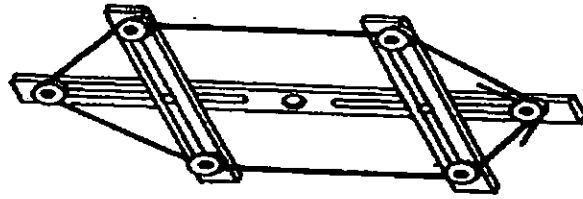
En motores de poca y mediana potencia se utilizan conductores de forma circular, para motores de gran potencia se usan alambres de cobre de sección rectangular o cuadrada para la formación de bobinas.

La fabricación de bobinas para un estator, se puede hacer de forma directa como se muestra en la figura 1.4, por medio de moldes como se observa en las figuras 1.5 y 1.6, o utilizando máquinas bobinadoras, el uso de estos métodos dependen de los recursos económicos con que se cuenten.

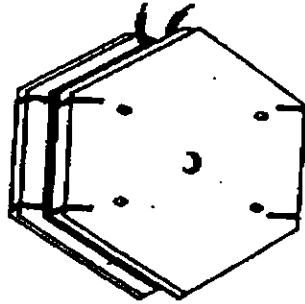


POSICION DEL ESTATOR Y ALAMBRE DURANTE EL BOBINADO

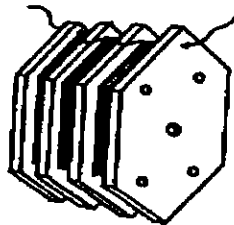
Figura 1.4. En esta figura se puede observar la forma en que se fabrican las bobinas del estator de forma manual o directa. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.



MOLDE A BASE DE SOLENAS METALICAS
CON CANALES PARA AJUSTAR EL TAMAÑO.

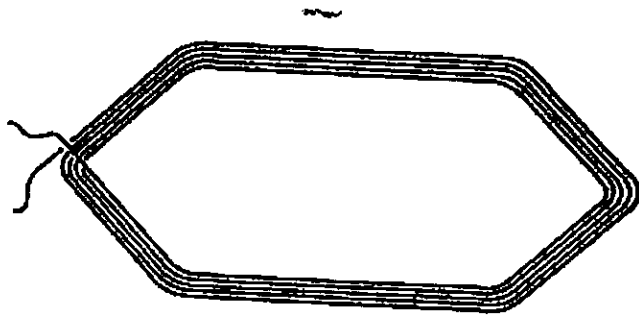


MOLDE DE MADERA PARA UNA BOBINA.

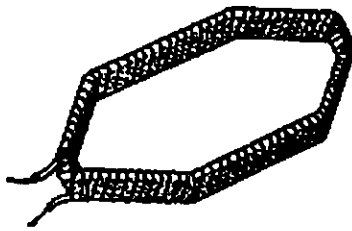


MOLDE DE MADERA PARA VARIAS BOBINAS.

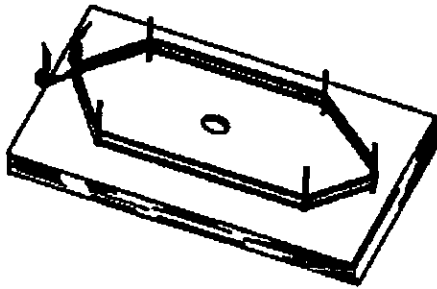
Figura 1.5. En esta figura se puede observar como es posible prefabricar las bobinas del estator por medio de moldes. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.



BOBINA TIPO DIAMANTE



BOBINA TIPO DIAMANTE ENCINTADA



MOLDE ELEMENTAL PARA BOBINA TIPO DIAMANTE A BASE DE UN BLOQUE DE MADERA Y CLAYOS SIN CABEZA Y SIN FILO, SE AJUSTAN AL TAMAÑO DESEADO DE LA BOBINA.

Figura 1.6. En esta figura también se muestran otras distintas formas que existen para la elaboración de las bobinas de forma prefabricada. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Las bobinas suelen tener distintas formas, tales como: rectangulares, cuadradas o de diamante las cuales se utilizan más.

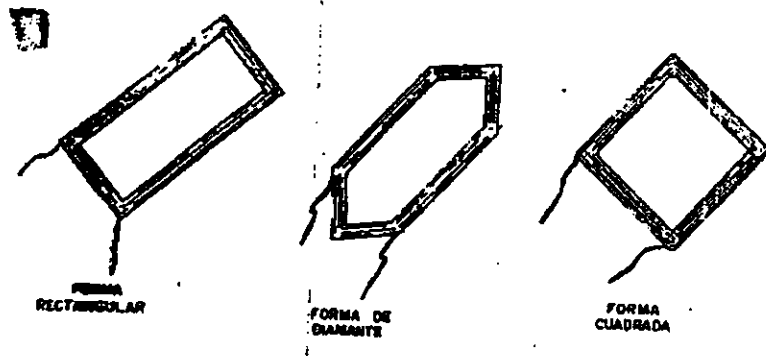
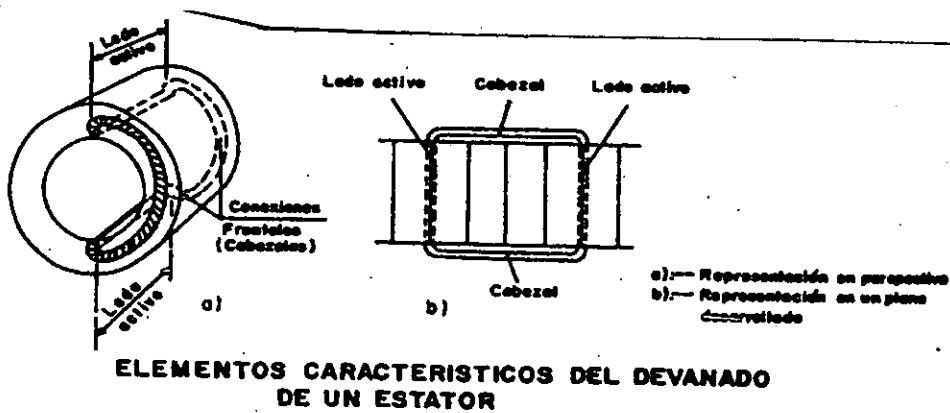


Figura 1.7. En esta figura se pueden observar tres de las formas generales más comunes que suelen presentar las bobinas: rectangulares, cuadrada y de diamante. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Los devanados de un estator suelen tener elementos característicos, como los lados activos que son las partes de las bobinas que están contenidas dentro de las ranuras y las conexiones frontales o cabezales que es la parte de las bobinas que conectan ambos lados activos y salen de las ranuras hacia el exterior, como se puede ver en la figura 1.8.



ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DEL DEVANADO DE UN ESTATOR

Figura 1.8. Elementos característicos del devanado de un estator. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Para la construcción de los devanados normalmente se utilizan diagramas esquemáticos, que muestran las conexiones y colocación que deben llevar los devanados en el estator; además de los diagramas existen cálculos, que definen otras características de los devanados, tales como: el número de conductores necesarios en la bobina, el número de ranuras que se debe tener por polo y por fase, el paso de bobina, entre algunas otras características más que se dan en los embobinados.

1.4.4 AISLAMIENTOS.

Antes de colocar las bobinas o los devanados en las ranuras, estas se deben aislar completamente, las ranuras normalmente se aíslan con aislantes que tengan buenos requerimientos de voltaje, temperatura y mecánicos, algunos de los aislantes más usados en los motores eléctricos son:

a) Papeles.

Es común el uso de papel *pescado* y el papel *coreco* que soportan hasta 60°C y si se recubren de barniz soportan hasta 90°C, otro tipo de papel que llega a soportar hasta 180°C es el papel *isoplex*. Es el material más usado para aislar las ranuras.

b) Telas.

La tela *cambrige* es una de las más usadas en motores, se usa para separar grupos de bobinas, además de que suele combinarse con los tipos de papeles antes mencionados para aislar las ranuras. Las telas son normalmente de color amarillo o negro.

c) Barnices.

Este aislante se utiliza para proporcionar impregnación a los devanados, hay dos tipos de barniz: *el barniz claro horneado* y *el barniz de secado al aire*. El embarnizado de los devanados suele ser de forma superficial y en algunos casos se requiere una impregnación profunda con el tipo de barniz de secado al aire.

d) Fibras especiales.

Se encuentra la fibra *maylard* que es derivada del petróleo y que puede soportar altas temperaturas, también esta la fibra roja que se usa en el acabado de bobinas, pero también se fabrican cuñas con esta fibra para cerrar las ranuras cuando ya contienen las bobinas en su interior, las cuñas también suelen ser de madera de buena calidad.

Con lo anterior es posible darse cuenta que existe una gran diversidad en orígenes y propiedades de los materiales aislantes, y es por eso que ahora se presentaran los aspectos más importantes en los aislantes, tales como las propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas.

Las principales propiedades eléctricas de los materiales aislantes que determinan el uso de un material aislante son:

- La resistividad o resistencia específica.
- La tensión disruptiva.
- La permitividad.
- La histéresis dieléctrica.

Como complemento a las propiedades eléctricas se debe considerar también las propiedades mecánicas y su capacidad para soportar la acción de agentes químicos, el calor y otros elementos presentes durante su operación.

Por otra parte uno de los factores que más afectan la vida de los aislamientos, es la temperatura de operación de los motores, esta temperatura esta producida principalmente por las pérdidas, durante su operación estas pérdidas están localizadas en los siguientes elementos principales (las pérdidas se presentaran con más detalle en el capítulo tres):

- a) *El estator y el rotor que constituyen el circuito magnético*, aquí las pérdidas son producidas por el efecto de histéresis y las corrientes circulantes en las laminaciones, son dependientes de la inducción, es decir que influye el voltaje de operación.
- b) *Los devanados*, aquí las pérdidas se deben principalmente al efecto Joule (RI^2) y en menor medida por corrientes de Foucault, estas pérdidas en los devanados son dependientes de la carga en los motores.

Todas las pérdidas mencionadas producen calentamiento en los motores y se debe eliminar este calentamiento a valores que no resulten peligrosos para los aislamientos, por medio de la aplicación de distintos medios de enfriamiento.

Con el propósito de mantener en forma confiable y satisfactoria la operación de los motores, el calentamiento de cada una de sus partes, se debe controlar dentro de ciertos límites previamente definidos. Las pérdidas en los motores son importantes, no tanto porque constituya una fuente de ineficiencia, sino porque pueden representar una fuente importante de elevación de temperatura para los devanados, esta elevación de temperatura puede producir efectos en los aislamientos de los propios devanados o bien en los aislamientos entre devanados y estator o rotor, según sea el caso, por esta razón es siempre importante que todos los aislamientos se mantengan dentro de los límites de temperatura que garanticen su correcta operación sin perder su efectividad. Como la elevación en la temperatura depende también de la carga en los motores, se debe tener cuidado de mantener también a estos dentro de sus límites de carga establecidos, para así respetar los límites de temperatura de sus aislamientos.

En su régimen nominal de operación, los motores tienen estrechamente ligados su voltaje y potencia a los límites impuestos por los aislamientos usados y en menor grado por las pérdidas para efecto Joule.

Según la norma "NMX-J-075/1-1994-ANCE" de la asociación nacional de normalización y certificación del sector eléctrico (ANCE), las clases de aislamiento para motores son divididos en cuatro clases, estas son: A, B, F y H de acuerdo a la capacidad para soportar los efectos térmicos del sistema específico a capacidad nominal.

NOMENCLATURA	TEMPERATURA °C	TEMPERATURA °K
A	105	378.15
B	130	403.15
F	155	428.15
H	180	473.15

Tabla obtenida de la norma NMX-J-075/1-1994-ANCE, apartado 5.2.2 referente a las clases de aislamiento.

Una descripción breve de estos materiales aislantes se da a continuación:

CLASE A

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales, tales como el algodón, seda y papel con alguna impregnación o recubrimiento o cuando se sumergen en dieléctricos líquidos tales como aceite. Otros materiales o combinación de materiales que caigan dentro de estos límites de temperatura pueden caer dentro de esta categoría.

CLASE B

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales, tales como la mica, fibra de vidrio, asbestos, etc., con algunas sustancias aglutinantes, pueden haber otros materiales inorgánicos.

CLASE F

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales, tales como: mica, fibra de vidrio, asbestos, etc., con sustancias aglutinables, así como otros materiales o combinaciones de materiales no necesariamente inorgánicos.

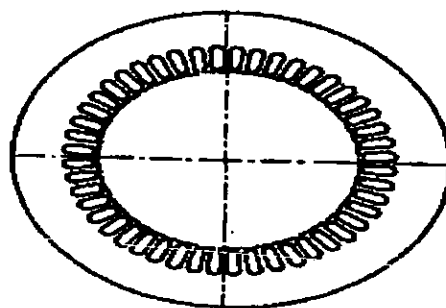
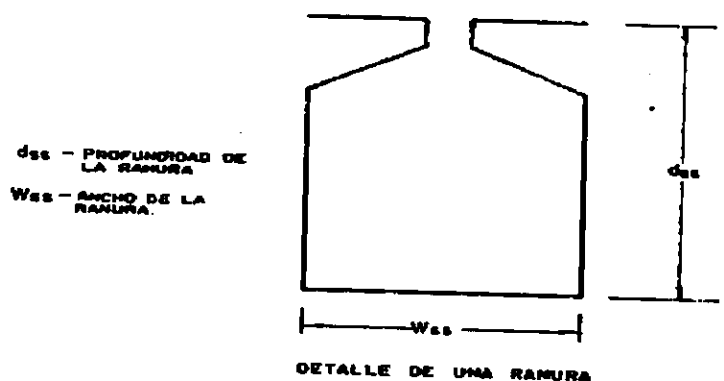
CLASE H

Este aislamiento consiste de materiales, tales como el silicón, elastómeros y combinaciones de materiales tales como la mica, la fibra de vidrio, asbestos, etc., con sustancias aglutinantes como son las resinas y silicones apropiados.

1.4.5 COLOCACIÓN DE LOS AISLAMIENTOS EN LAS RANURAS.

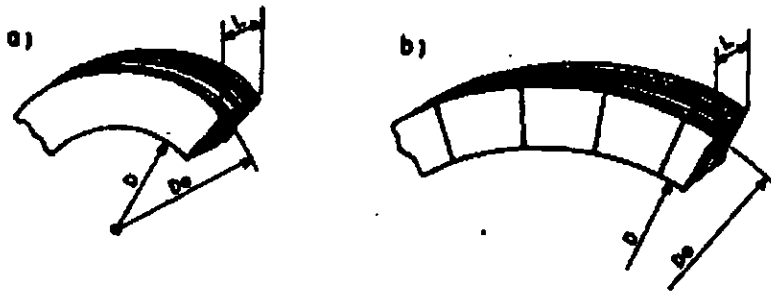
Para poder colocar un aislamiento en las ranuras se deben tomar en cuenta las dimensiones de dichas ranuras, además de la forma y la medida de las bobinas que serán colocadas. Una vez que se tomó en cuenta todo lo anterior se procede a elaborar los aislamientos, normalmente se coloca papel dentro de las ranuras, y conociendo las dimensiones de las ranuras y de las bobinas se escoge el grosor del aislante ya sea papel, tela, papel con tela o papel con recubrimiento de barniz. El grosor de los aislamientos también depende de otros factores como: el voltaje de operación del motor, así como el grueso de los conductores que se usan para la fabricación de las bobinas.

En la figura 1.9 se muestran las dimensiones de las ranuras; en la figura 1.10 se observan los elementos en las laminaciones de los estatores.



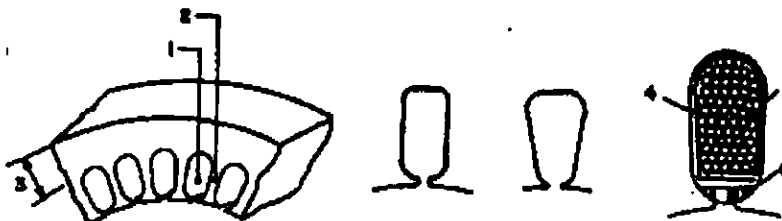
LAMINACIONES PARA ESTATOR

Figura 1.9. Figura en la cual se muestra una laminación, además de las dimensiones de la ranura que componen a dicha laminación. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.



ESTATOR COMPUESTO POR LAMINACIONES

- a) = DISCOS COMPLETOS
- b) = CON LAMINACIONES SECCIONADAS
- D = DIAMETRO INTERNO
- De = DIAMETRO EXTERNO
- L = ANCHO DE LAS LAMINACIONES



FORMAS DE RANURAS DE LOS ESTADORES

- 1 - RANURA
- 2 - DIENTE
- 3 - CORONA (des) ó YUGO
- 4 - PAPEL AISLANTE
- 5 - CONDUCTORES
- 6 - CUÑA PARA IMPEDIR QUE SE SALGAN LOS CONDUCTORES DE LA RANURA

Figura 1.10. En esta figura se pueden observar las dimensiones de un conjunto de laminaciones que conforman al estator, además de algunas especificaciones referente a las ranuras, así como también de las bobinas que se colocan dentro de cada ranura. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

1.4.6 COLOCACIÓN DE LAS BOBINAS EN LAS RANURAS.

Una vez que el aislamiento ya está en las ranuras se procede a colocar las bobinas, si las bobinas son prefabricadas se deben de impregnar de aislante (barniz) y posteriormente colocarse en las ranuras, este procedimiento de impregnación de aislante se explicará más adelante, pero por ahora se tomara en cuenta que las bobinas ya fueron recubiertas de aislante.

En la siguiente figura 1.11, se observa la colocación del aislamiento y de la bobina en una ranura..

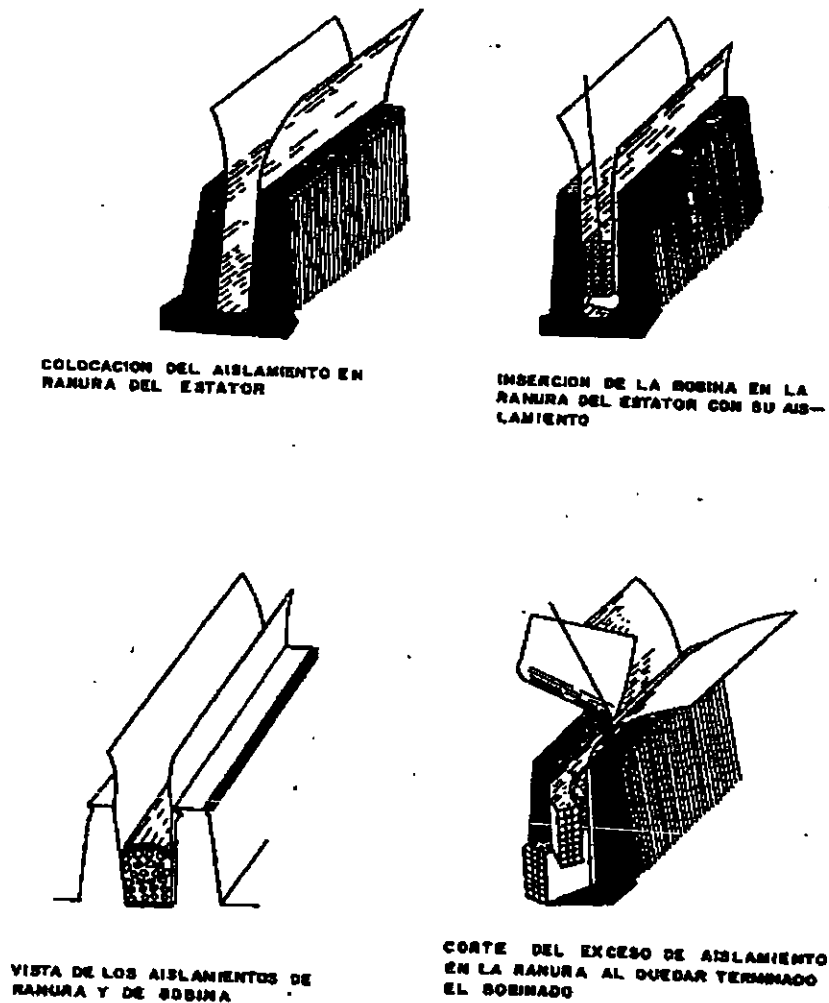


Figura 1.11. En esta figura se observan algunos pasos que son necesarios para poder colocar una bobina dentro de una ranura: (1) Colocación del aislamiento en la ranura del estator, (2) Inserción de la bobina en la ranura del estator con su aislamiento, (3), Vista de los aislamientos en la ranura y de la bobina, (4) Corte del exceso de aislamiento en la ranura al quedar terminado el bobinado. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

La colocación de una bobina debe hacerse de forma cuidadosa, ya que de no ser así el aislamiento que cubre las bobinas puede sufrir peladuras, se pueden presentar cruzamientos de los conductores de las bobinas o aislamientos de las ranuras puede sufrir roturas, estas dos últimas consecuencias pueden pasar si el embobinado se hace de forma directa como se mostró en la figura 1.4.

En la figura 1.12 se muestra la colocación de una bobina; y en la figura 1.13 se muestra la misma colocación de la bobina pero de una toma más abierta.

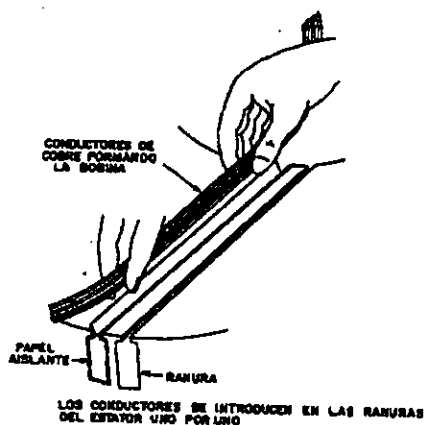


Figura 1.12. Forma en que se colocan las bobinas prefabricadas dentro de las ranuras del estator de una forma manual. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores De Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

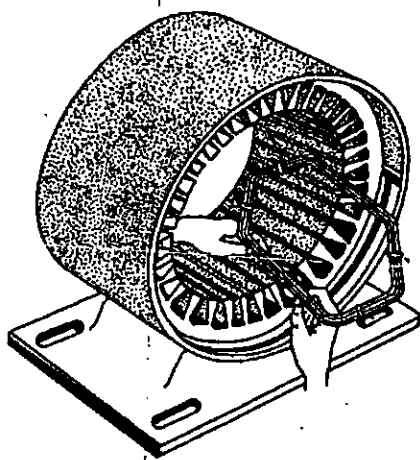


Figura 1.13. En esta figura también se observa la colocación de una bobina prefabricada de forma manual dentro de las ranuras del estator, pero con una vista más completa que en la figura 1.12. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores De Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Después de que se colocan las bobinas en las ranuras, se utilizan cuñas para fijar y mantener a las bobinas dentro de las ranuras, las cuñas pueden ser de metal, de madera de buena calidad, de fibras, de cartón o carrizo; el uso más común de cuñas es de madera. En la figura 1.14 se muestra el uso de las cuñas, además del procedimiento de devanado de un polo en forma manual.

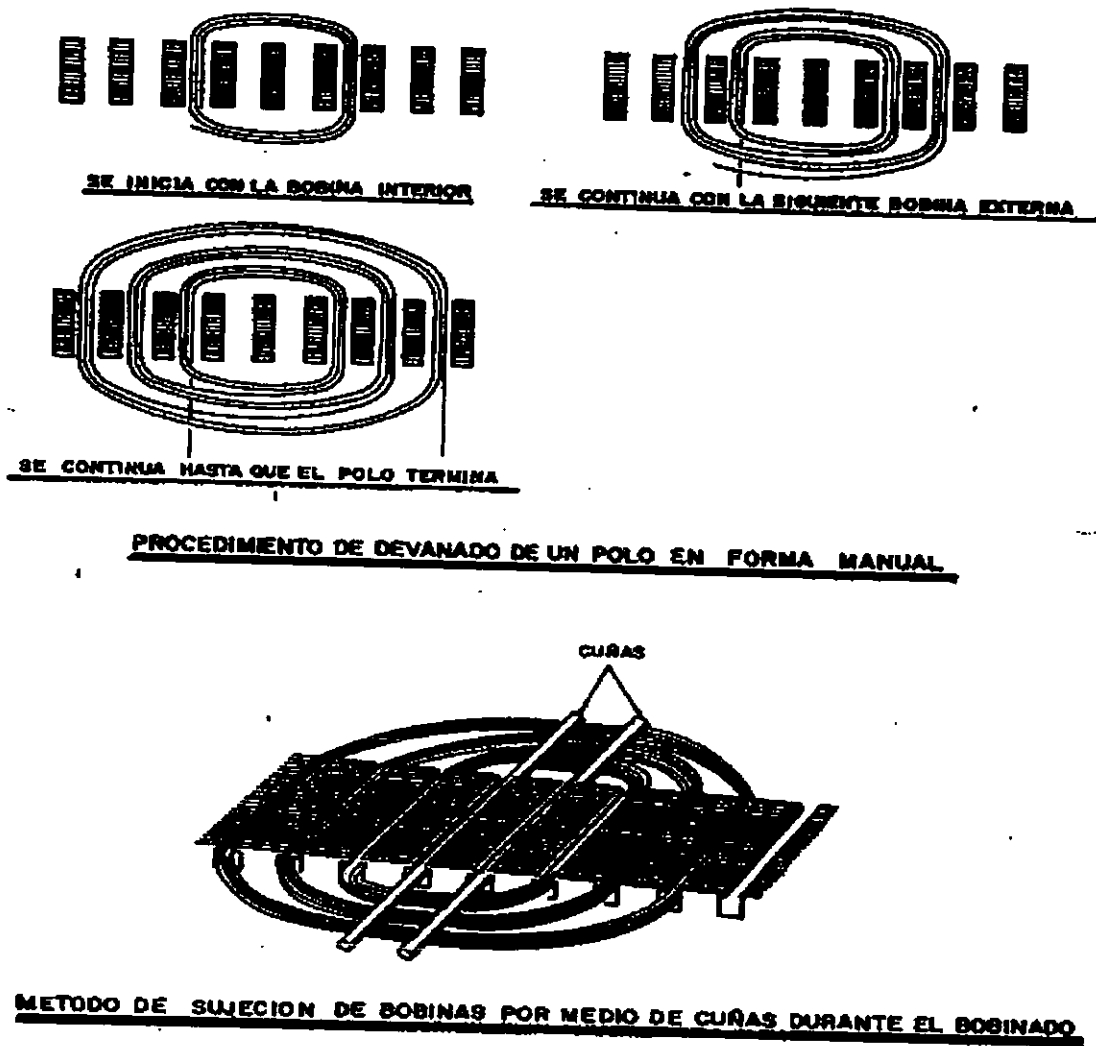
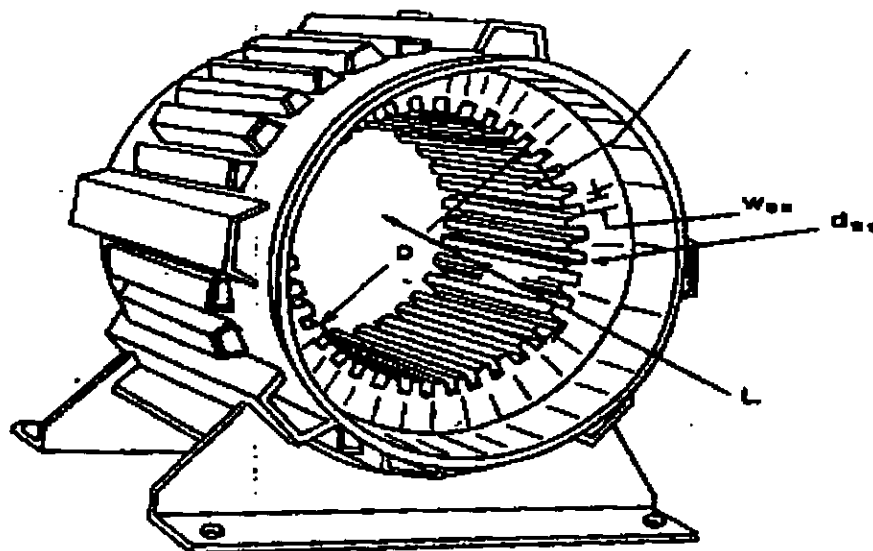


Figura 1.14. En esta figura se observa el procedimiento de devanado de un polo en forma manual, además del método de sujeción de bobinas por medio de cuñas durante el bobinado. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Por ultimo los cables de salida que van a la conexión trifásica, se deben aislar con cinta de lino barnizada o con tubo espaguete que es un aislante de forma tubular echo de materiales como: algodón, seda, fibra de vidrio y de plástico flexible. Estos aislantes deben ser resistentes, flexibles y que soporten el trato rudo.

Para terminar con el estator se muestran unas figuras en donde se ven todas las dimensiones de un estator con y sin carcasa.



DIMENSIONES GENERALES DEL ESTATOR

L= Longitud del estator o núcleo

D= Diámetro interior del estator

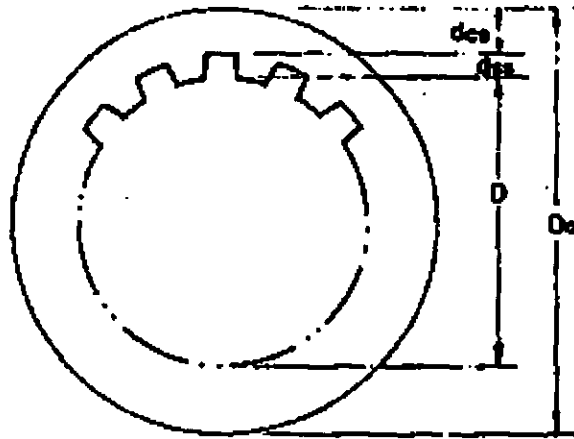
dca= Profundidad del estator (núcleo)

dsa= Profundidad de la ranura del estator

Do= Diámetro exterior del estator

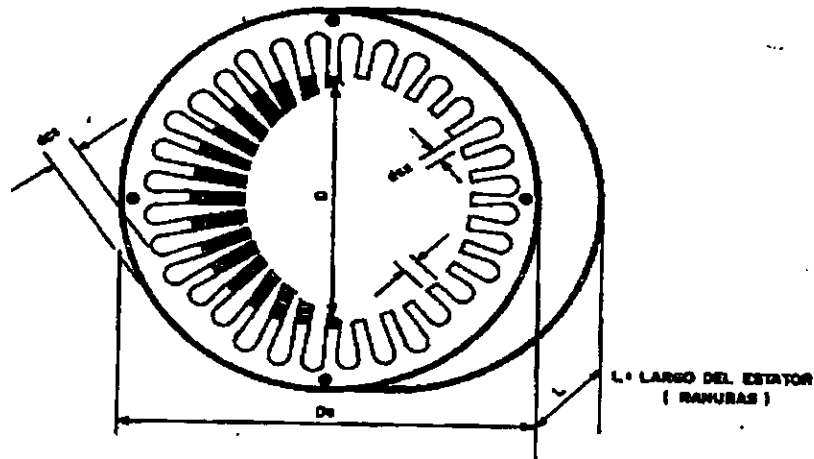
$Do = D + 2 \times dsa + 2 dca$

(a)



DIMENSIONES GENERALES DE LAS LAMINACIONES DEL ESTATOR

(b)



DIMENSIONES GENERALES DEL ESTATOR SIN CARCAZA

(c)

Figura 1.15. (a) Vista de la carcasa de un estator formado por sus laminaciones, en la cual se pueden observar las dimensiones generales del estator tales como: (L) La longitud del estator o núcleo, (D) Diámetro interior del estator, (dcs) Profundidad del estator (núcleo), (D) Diámetro exterior del estator, (Do) Diámetro exterior del estator; (b) Dimensiones generales de las laminaciones del estator; (c) Dimensiones generales del estator sin carcasa. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

1.4.7 CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR.

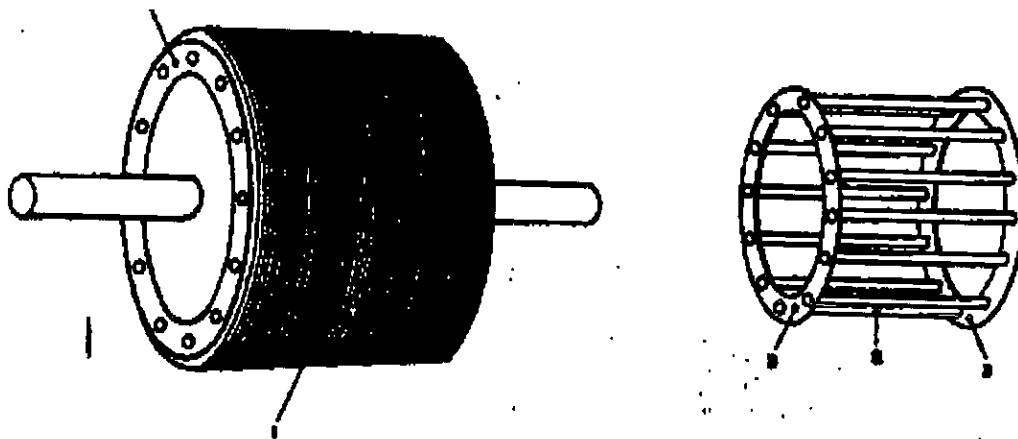
Como se mencionó anteriormente un motor de inducción tiene dos tipos de rotores básicos:

- 1) Rotor Jaula de Ardilla.
- 2) Rotor Devanado.

Ahora se describirá la construcción de ambos rotores, empezando por el rotor jaula de ardilla.

1) Rotor Jaula de Ardilla.

Este tipo de rotor es mucho más popular por ciertas características que se verán más adelante. Por otro lado el rotor es la parte giratoria del motor; así como el estator, el rotor de jaula de ardilla esta formado por paquetes de laminaciones que juntas forman un cilindro, en las ranuras de dichas laminaciones se colocan conductores ya sea de cobre o de aluminio, éstos conductores se conectan entre sí (se cortocircuitan) por medio de anillos de conexión tanto frontales como traseros, en la siguiente figura 1.16 se muestra lo descrito anteriormente.



ROTOR EN CORTO CIRCUITO DE UN MOTOR DE INDUCCION

- 1.- PAQUETE DE LAMINACIONES
- 2.- DEVANADO DEL ROTOR
- 3.- ANILLO DE CONEXION ELECTRICA DE LAS BARRAS.

Figura 1.16. Vista de un rotor jaula de ardilla, además de la denominada jaula que lo compone, aquí se pueden observar los paquetes de laminaciones, el devanado del rotor y el anillo de conexión eléctrica de las barras. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

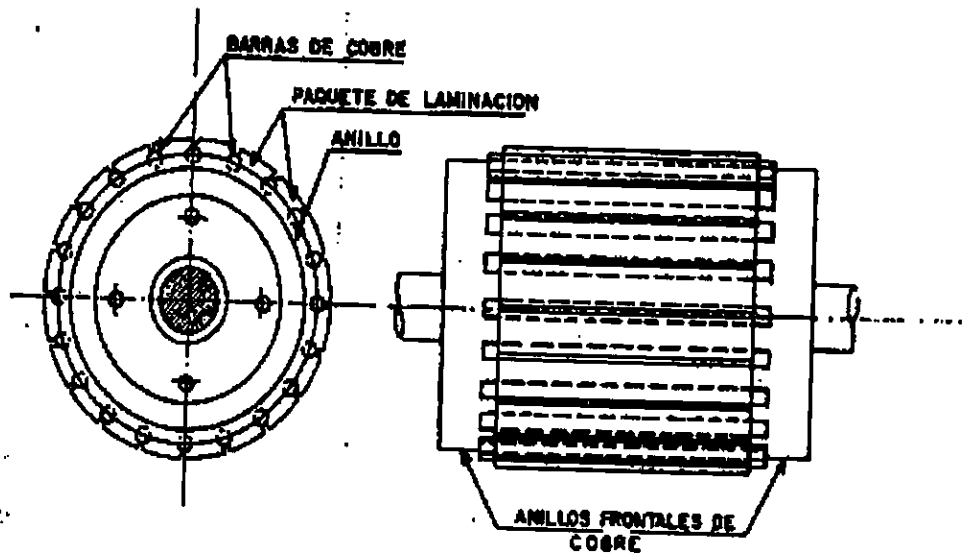
En la figura 1.16 se puede ver porque se le denomina rotor jaula de ardilla, simplemente por la forma que tienen los conductores que se colocan entre las ranuras de las laminaciones y unidas por medio de anillos, formando la apariencia de las jaulas donde juegan las ardillas o las marmotas.

Para un motor de inducción de rotor de jaula de ardilla, su devanado esta compuesto por los conductores y los anillos que forman la jaula, es decir, su devanado es la llamada jaula de ardilla.

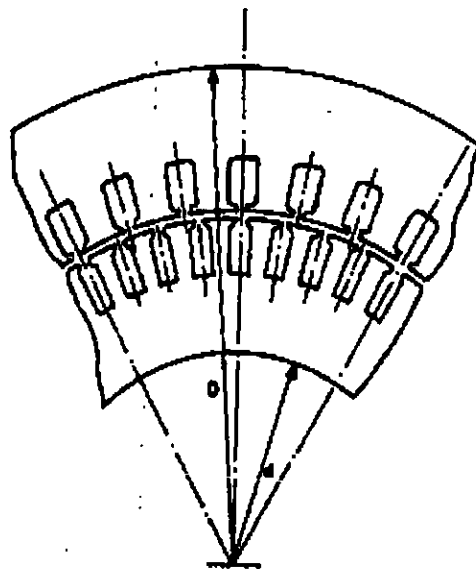
Existen dos técnicas básicas de fabricación de la jaula o devanado, el primero es usar devanados de aluminio fundido, consiste en ensamblar las laminaciones que después serán colocadas en un molde, en donde se vaciara aluminio fundido a presión, de manera tal que se formen las barras en las ranuras y los anillos de cortocircuito, quedando la jaula o devanado en una sola pieza.

La segunda forma es usar barras de cobre de forma circular o rectangular, las cuales se colocan en las ranuras de las laminaciones del rotor, las barras son unidas a los anillos de cortocircuito por medio de soldadura, quedando así el devanado.

La siguiente figura 1.17 muestra la vista de un rotor jaula de ardilla con sus elementos característicos.



VISTA DE UN ROTOR JAULA DE ARDILLA



EL NUMERO DE RANURAS POR POLO Y POR FASE ENTRE EL ESTATOR Y EL ROTOR SON PRIMOS ENTRE SI

Figura 1.17. (a) Vista lateral y frontal de un rotor jaula de ardilla con sus elementos característicos; (b) Vista que se tiene entre las ranuras del estator y del rotor. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

En la figura 1.18 se pueden ver las partes principales de un rotor jaula de ardilla ya bien ensamblado.

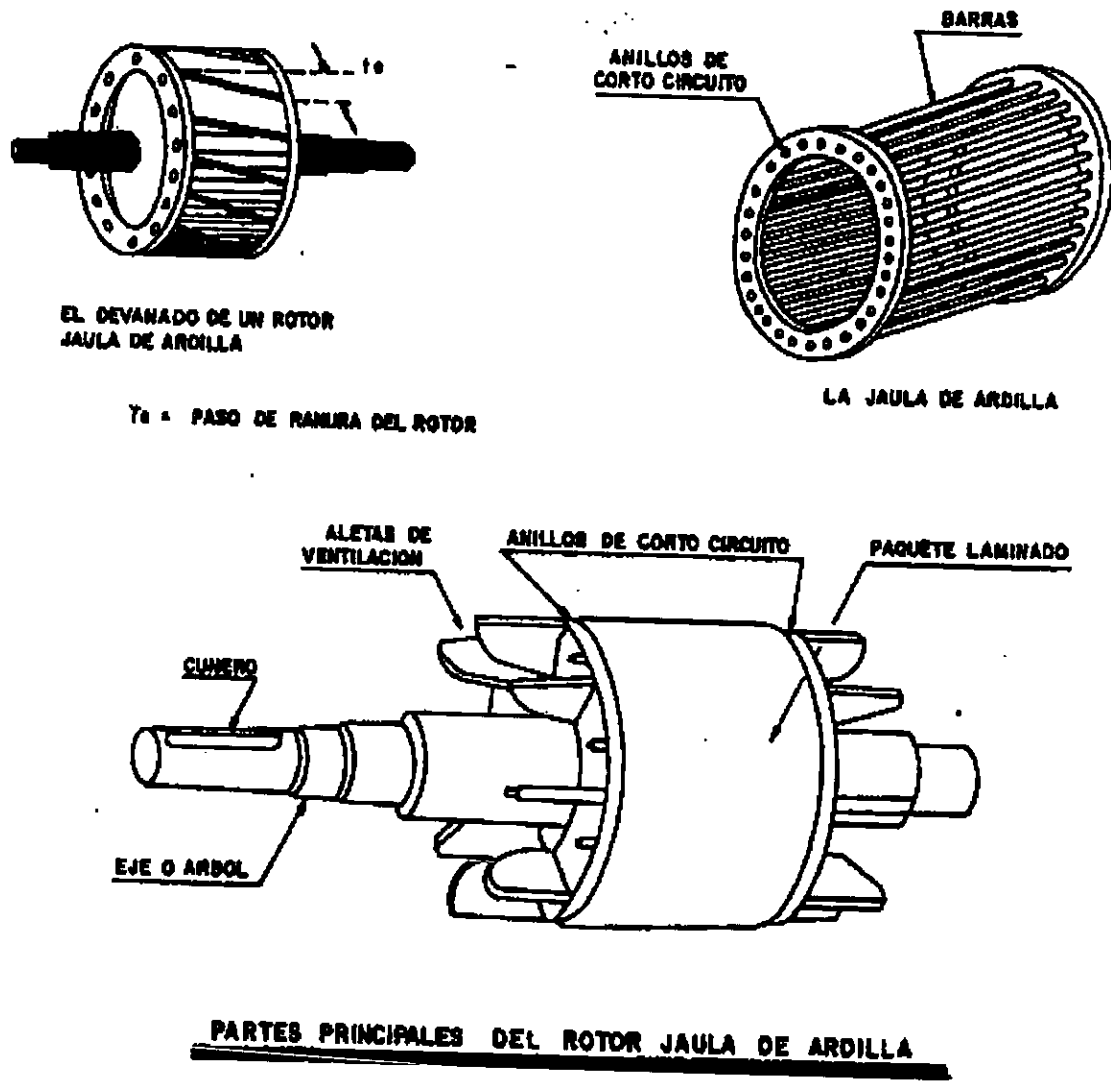


Figura 1.18. Vista de las partes principales de un rotor jaula de ardilla. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Con respecto a las laminaciones, existen varios tipos de diseño y se distinguen por las distintas formas que tienen las ranuras. La NEMA (National Electrical Manufacturers Association) a normalizado cuatro principales diseños de laminaciones, que se conocen como clases de diseño; así un motor completo se puede mencionar como un motor diseño de la clase "x", la "x" es la letra con la que se asignan las clases de diseño.

Existen las clases de diseño A, B, C y D, que son las laminaciones con las que se construyen los rotores de los motores de inducción de jaula de ardilla de clase A, B, C y D. Por ejemplo: si un rotor está fabricado con laminaciones de diseño A, se dice que el motor es de clase de diseño A; si un rotor es fabricado con laminaciones de diseño B, se dice que el motor es de clase de diseño B; y así con los de clase C y D.

En la siguiente figura 1.19, se muestran las laminaciones de las cuatro clases de diseño, normalizadas por NEMA.

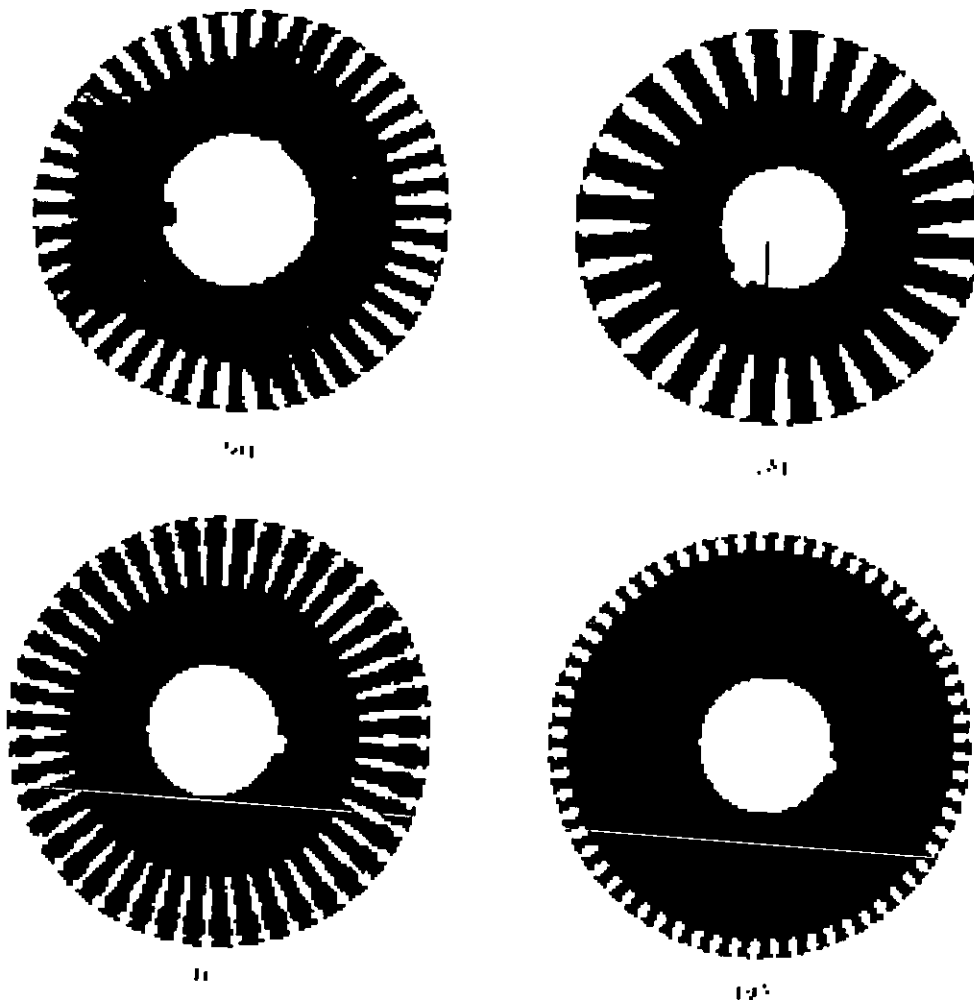


Figura 1.19. Laminaciones para rotores típicos de motores de inducción de jaula de ardilla, indicando la forma de la sección transversal de las barras. (a) Diseño NEMA clase A: barras grandes cercanas a la superficie; (b) Diseño NEMA clase B: barras grandes y profundas. (c) Diseño NEMA clase C: rotor de doble jaula. (d) Diseño NEMA clase de diseño D: barras pequeñas cercanas a la superficie. Esta figura fue obtenida del libro de “Máquinas Eléctricas” de Stephen J. Chapman.

El propósito general de las clases de diseño es poder modificar las características del devanado, así un motor construido con una determinada clase de diseño, obtiene ciertas características de funcionamiento, que lo hacen útil sólo para ciertas aplicaciones en la industria. Esto se explicara con un poco de detalle más adelante.

Existe una construcción especial del rotor jaula de ardilla, que es el rotor de doble jaula de ardilla, aquí se utilizan dos grupos de barras hechas de distintas aleaciones, la barra superior que se construye con una aleación de cobre de alta resistencia y la barra inferior es de cobre de baja resistencia o de aluminio fundido. La barra superior se llama así porque esta colocada en la parte superior de la ranura y la barra inferior porque esta en la parte profunda de la ranura. En la figura 1.20 se nota todo lo anterior.

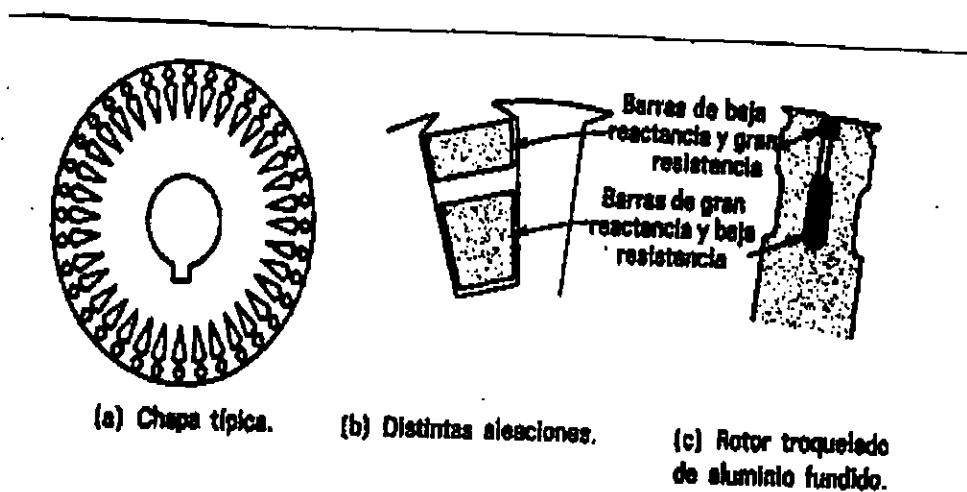


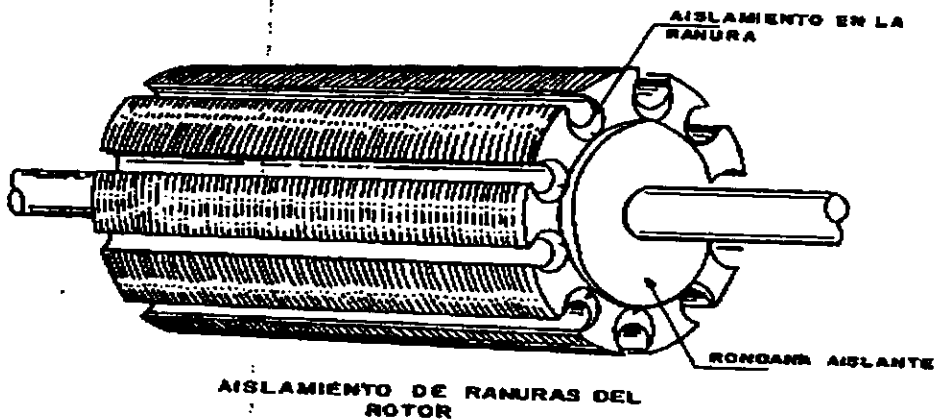
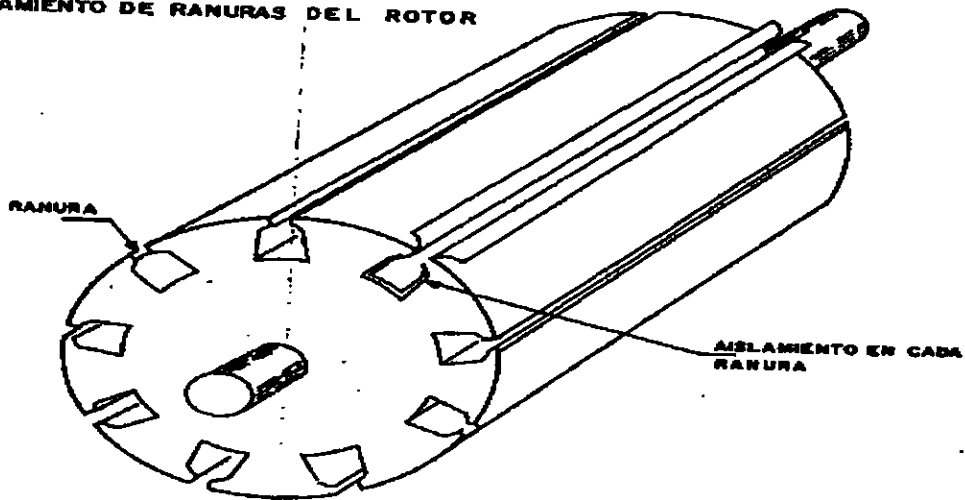
Figura 8-15. Construcción del rotor de doble jaula.

Figura 1.20. Vista de la construcción de un rotor de doble jaula de ardilla. (a) laminación típica, (b) colocación de las dos barras que forman a la doble jaula en una ranura. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

2) Rotor devanado.

Este tipo de rotor está formado por paquetes de laminas troqueladas montadas sobre el eje del rotor, en las ranuras se colocan las bobinas como se hace en el estator, pero antes se coloca el aislante en las ranuras como se observa en la figura 1.21. Las bobinas son construidas en forma directa o prefabricadas.

AISLAMIENTO DE RANURAS DEL ROTOR



AISLAMIENTO DE RANURAS DEL ROTOR

Figura 1.21. Vista de un rotor devanado en el cual se muestra la forma en que se coloca el aislante en la ranura antes de recibir la bobina. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Las bobinas colocadas en las ranuras, deben estar bien sujetas de tal forma que no se muevan cuando el rotor está girando, por lo que se sujetan con hilos de acero o fibra de vidrio. Como en el estator las bobinas se recubren de aislante, pero esto se verá más adelante.

Los devanados del rotor se pueden conectar en delta o estrella, generalmente se conectan en estrella, y las terminaciones de cada fase van hacia el exterior, en donde son colocadas a los anillos rozantes.

Así como con el rotor jaula de ardilla es posible fabricar un motor con características especiales, para ser usado en determinadas aplicaciones; dependiendo únicamente del diseño en las laminaciones. En el rotor devanado no pasa todo lo anterior, ya que se pueden modificar las características del devanado, colocando resistencias en serie en las escobillas, de tal forma que se le quite o se le sume resistencia al rotor de forma externa. Por lo que un motor de rotor devanado se puede utilizar para diversas aplicaciones, con sólo variar la resistencia del rotor.

De tal manera el rotor jaula de ardilla tiene ventajas sobre el rotor devanado, algunas de estas son:

- a) No consta de anillos rozantes.
- b) No requiere de un reóstato de arranque, para variar la resistencia del rotor.
- c) Consta ligeramente de mayor eficiencia.
- d) Su construcción es más compacta y barata.
- e) Tienen menores pérdidas en el cobre (efecto joule).
- f) Tiene mayor espacio de ventilación y por lo tanto mejores condiciones de enfriamiento.
- g) Ofrece un mejor factor de potencia.
- h) Proporciona mayor capacidad de sobre carga.

El rotor devanado tiene desventajas básicas como:

- a) Son muy costosos.
- b) Necesitan más mantenimiento, debido a los anillos rozantes y las escobillas.
- c) Requieren de circuitos automáticos de control muy complejos.

Pero tiene la ventaja de que se le puede controlar la velocidad dentro de ciertos límites, además de que son usados cuando se requieren pares de arranque grandes.

1.4.8 AISLAMIENTOS EN LAS BOBINAS.

Como se había mencionado anteriormente, las bobinas eran recubiertas de aislante principalmente barniz.

Las bobinas que eran fabricadas en moldes o en máquinas bobinadoras, se recubren de barniz y posteriormente se colocan en el estator, el mismo procedimiento ocurre con el rotor bobinado.

Cuando se embobina de forma directa un estator y se ha terminado de embobinarlo, se le aplica el recubrimiento de barniz a dicho embobinado y lo mismo ocurre con el rotor devanado.

Ahora se hablara de algunas técnicas para la aplicación del aislante en las bobinas.

Por Calentamiento Previo.

Las bobinas prefabricadas son calentadas a 100°C en un horno durante una o dos horas, después se retiran de dicho horno y se les aplica el barniz por medio de una brocha, el método es simple pero tiene la desventaja de que el barniz no se aplica uniformemente y además el recubrimiento sólo se hace superficialmente.

Por Calentamiento Previo (Sumergido En Barniz).

Las bobinas prefabricadas son calentadas a 100°C en un horno durante una o dos horas, después se retiran de dicho horno y se sumergen en un recipiente que contenga barniz, las bobinas se dejan dentro del recipiente el tiempo que sea necesario, hasta que dejan de hacer burbujas, con respecto al otro método, este permite una impregnación más uniforme y no sólo superficialmente sino que también el aislante penetra en los devanados. En la figura 1.22 se muestra todo esto.

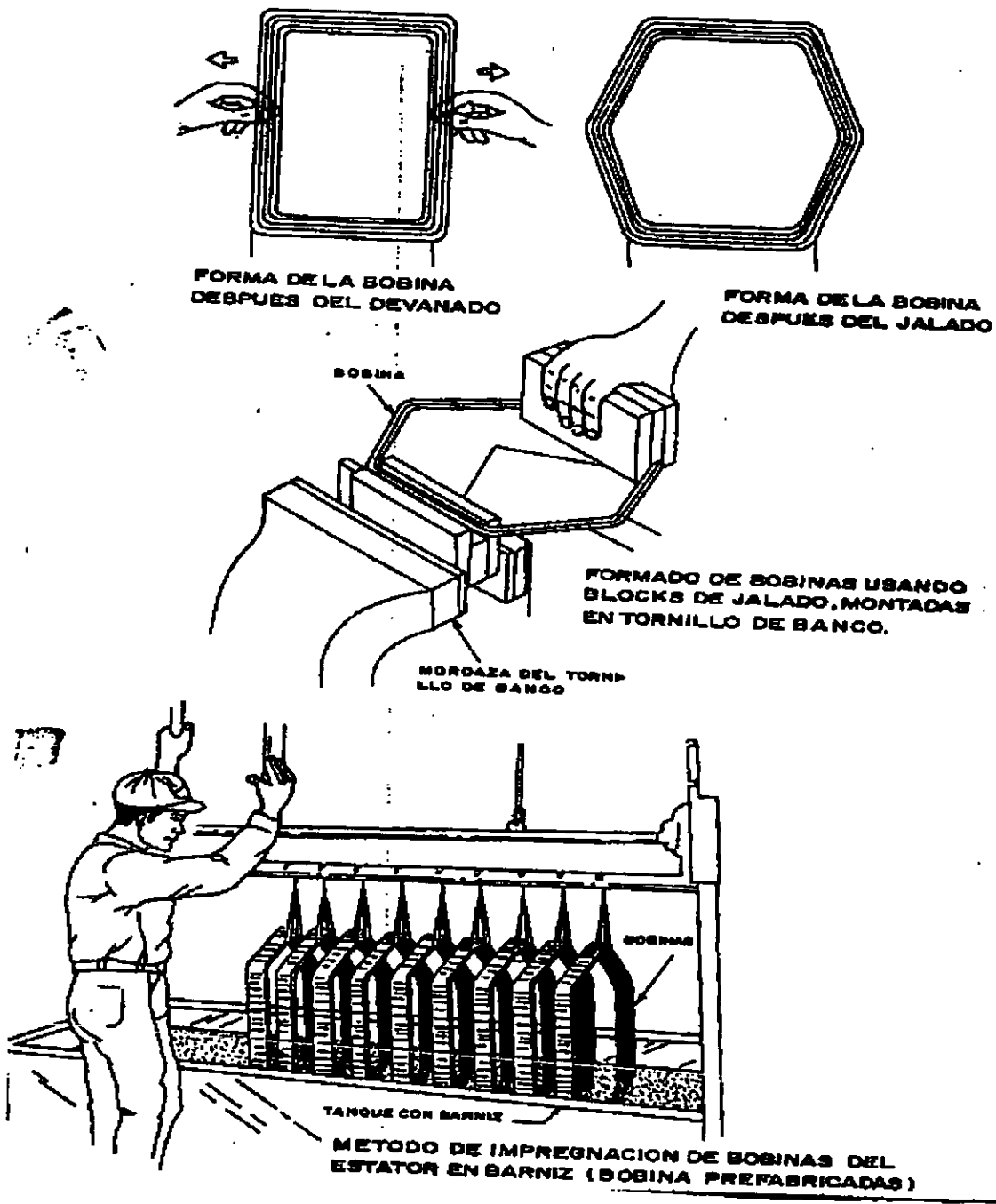


Figura 1.22. En esta figura se puede observa la forma en que son prefabricadas las bobinas del estator, además del método de impregnación de las bobinas del estator en barniz (bobina prefabricadas) .Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Existen otros métodos en los cuales se sumergen los rotores en tanques que contienen barniz a una cierta temperatura, según la temperatura a la que se encuentre el aislante, es la calidad con la que se adhiere a los devanados del rotor. En estos métodos se debe de tener cuidado de no cubrir ciertas partes como los anillos rozantes o los cinchados o amarres de las bobinas en los rotores devanados.

En la siguiente figura se representa la explicación anterior.

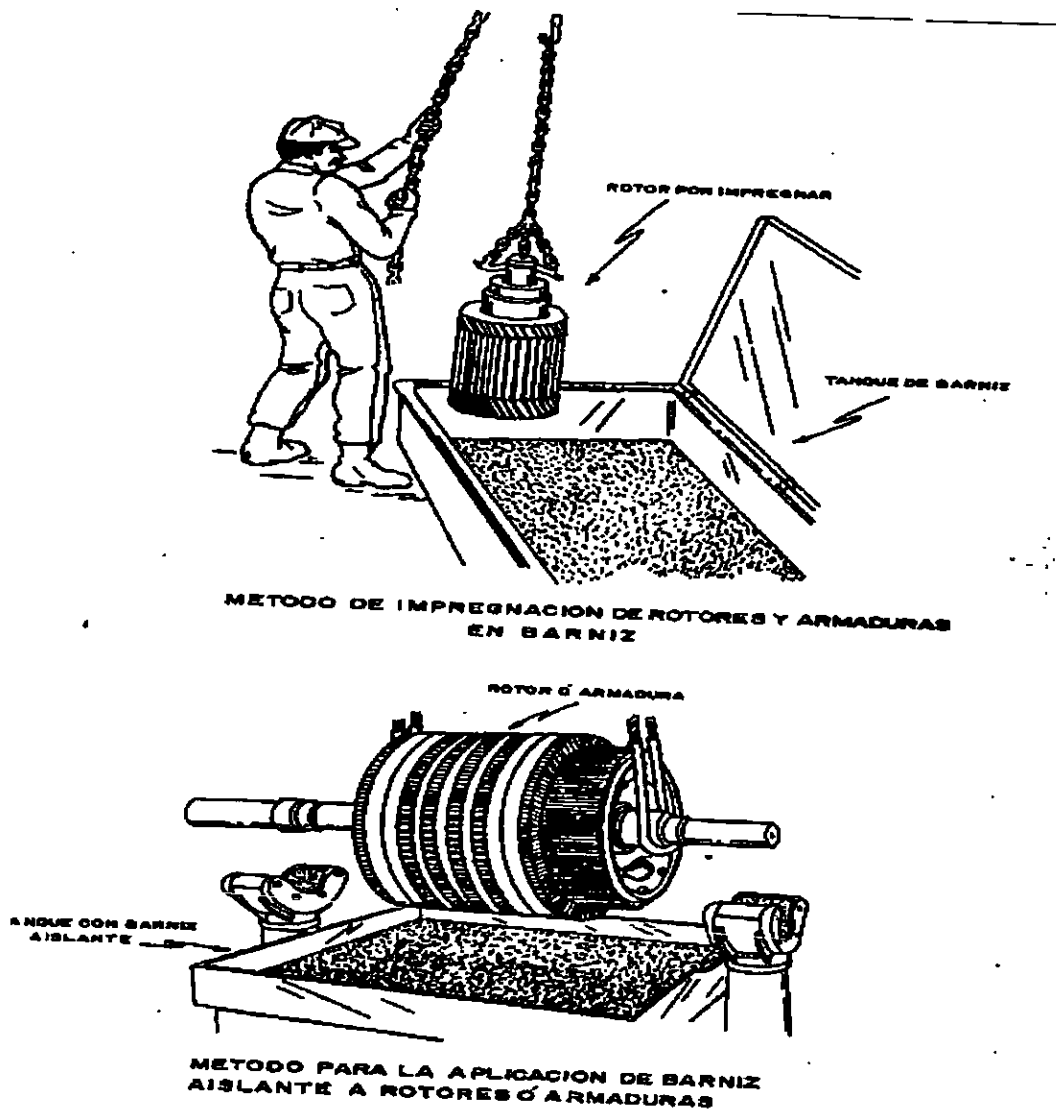


Figura 1.23. En esta figura se puede observar primero una imagen que muestra el método de impregnación de rotores y armaduras en barniz; por último se tiene una imagen que muestra el método para la aplicación de barniz aislante a rotores o armaduras. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

1.4.9 OTROS COMPONENTES QUE CONSTITUYEN A UN MOTOR DE INDUCCIÓN.

En los motores de inducción con rotor devanado se usan los anillos rozantes, este rotor consta de un devanado trifásico, que por lo general se conecta internamente en estrella, y las tres salidas de los devanados se conectan a los anillos rozantes. Normalmente están fabricados de bronce o de bronce con un contenido de fósforo, son de forma redonda y son tres ya que el devanado del rotor es trifásico.

Los anillos rozantes se montan en el núcleo del rotor y normalmente en la extensión del eje o flecha del rotor como se ve en la figura 1.24. Los anillos rozantes se aíslan para no tener contacto directo con la flecha del motor.

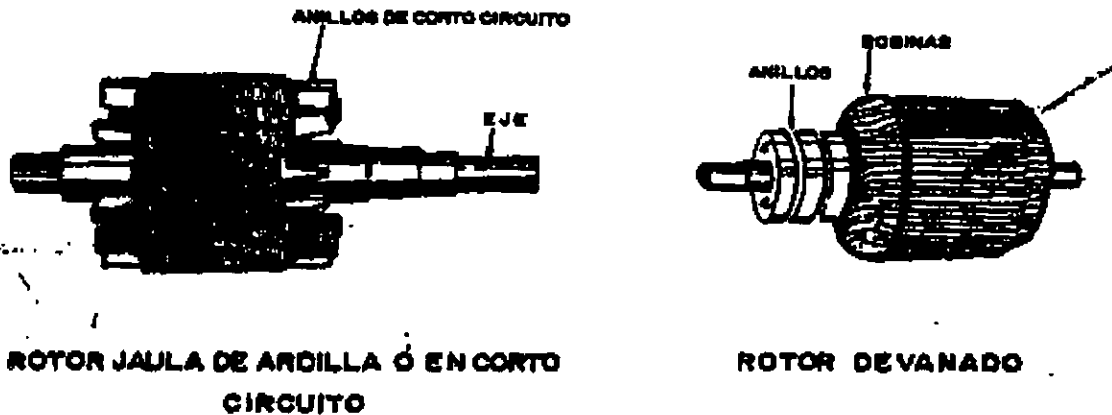
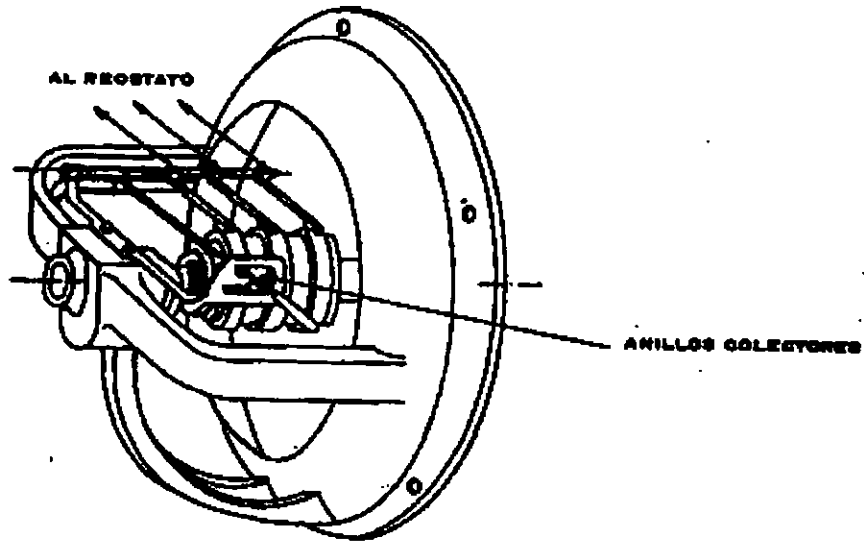


Figura 1.24. Vista de los rotores jaula de ardilla y de rotor devanado. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Los anillos rozantes hacen contacto con las escobillas, las cuales llevan al exterior del motor la corriente que circula por los devanados del rotor, se tiene una escobilla por cada anillo rozante, las escobillas se llevan a un reóstato de arranque externo, con el cual se varía la resistencia del rotor.

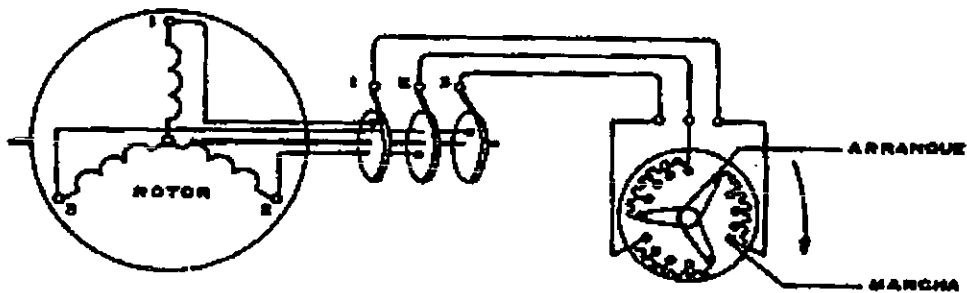
En la figura 1.25, se muestra la parte posterior de un motor de inducción con rotor devanado, en el cual se pueden ver los tres anillos rozantes o colectores haciendo contacto con las tres escobillas.



DETALLE DE MONTAJE DE LOS ANILLOS ROZANTES Y TAPA

Figura 1.25. Vista posterior de un rotor de rotor devanado en el que se muestran los anillos rozantes o colectores y las escobillas. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

En la figura 1.26, se puede observar la conexión completa, desde el devanado del rotor conectado en estrella pasando por los anillos rozantes luego por las escobillas hasta terminar en el reóstato de arranque.



ESTRUCTURA ESQUEMÁTICA DE UN ROTOR TRIFASICO CON REOSTATO DE ARRANQUE

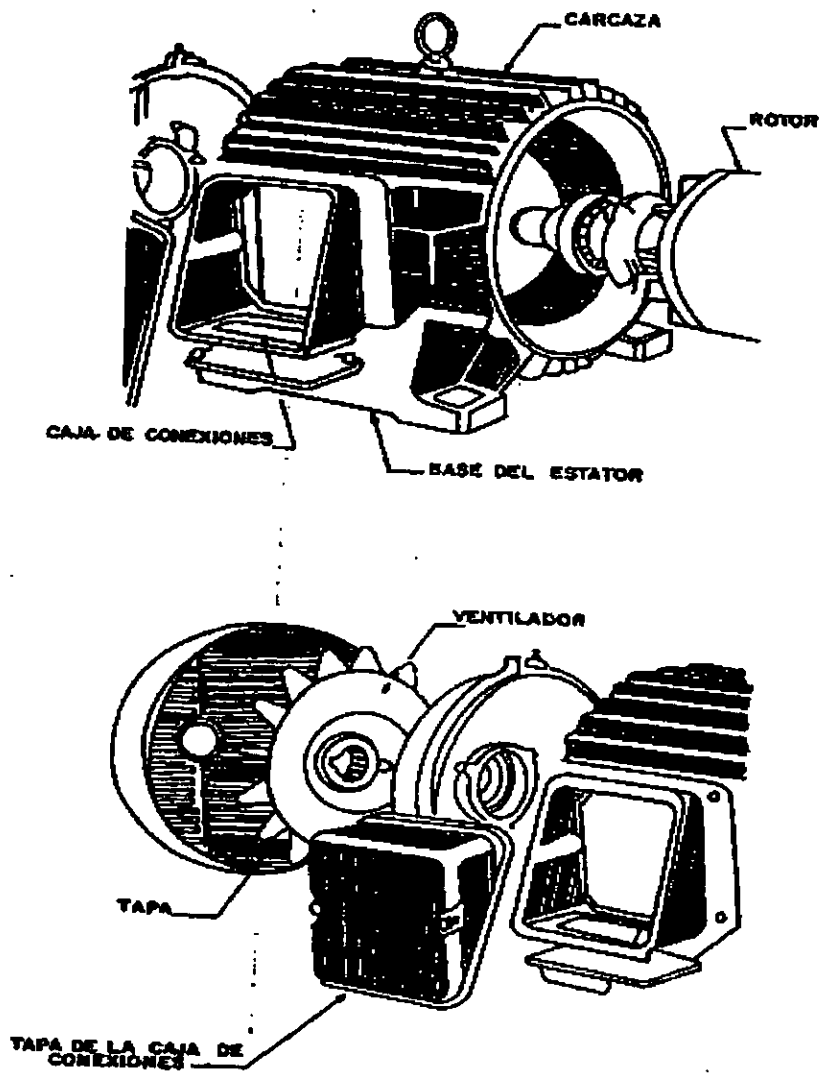
Figura 1.26. Estructura esquemática de cómo se conectan las terminales del devanado de campo a un reóstato de arranque mediante los anillos rozantes y las escobillas. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

Al espacio de separación que hay entre los devanados del estator y del rotor se le llama *entrehierro*, esta separación debe ser lo más pequeña posible, pero evitando el rozamiento que pudiera haber entre el rotor y el estator. Los elementos que ayudan en mucho a lo anterior, son aquellos que sirven de soporte y guía, y que se encuentran montados en las tapas de los motores, conocidos como chumaceras o valeros. Estos elementos son los que dan la alineación y ajuste al entrehierro, usualmente cuando se desgastan por el trabajo excesivo provocan problemas en el motor, por lo que se les debe dar mantenimiento y si es necesario cambiarlos por componentes nuevos.

Como se dijo anteriormente, la carcasa es el medio mecánico del estator, es fabricado de acero fundido para máquinas grandes; para máquinas medianas y pequeñas, y se fabrica de placas de acero rolado.

Según el tamaño del motor la carcasa sufre cambios, uno de esos cambios es el construir la carcasa con disipadores de calor para motores grandes; además de que debe de ser fuerte y rígida, ya que es el elemento de soporte del motor.

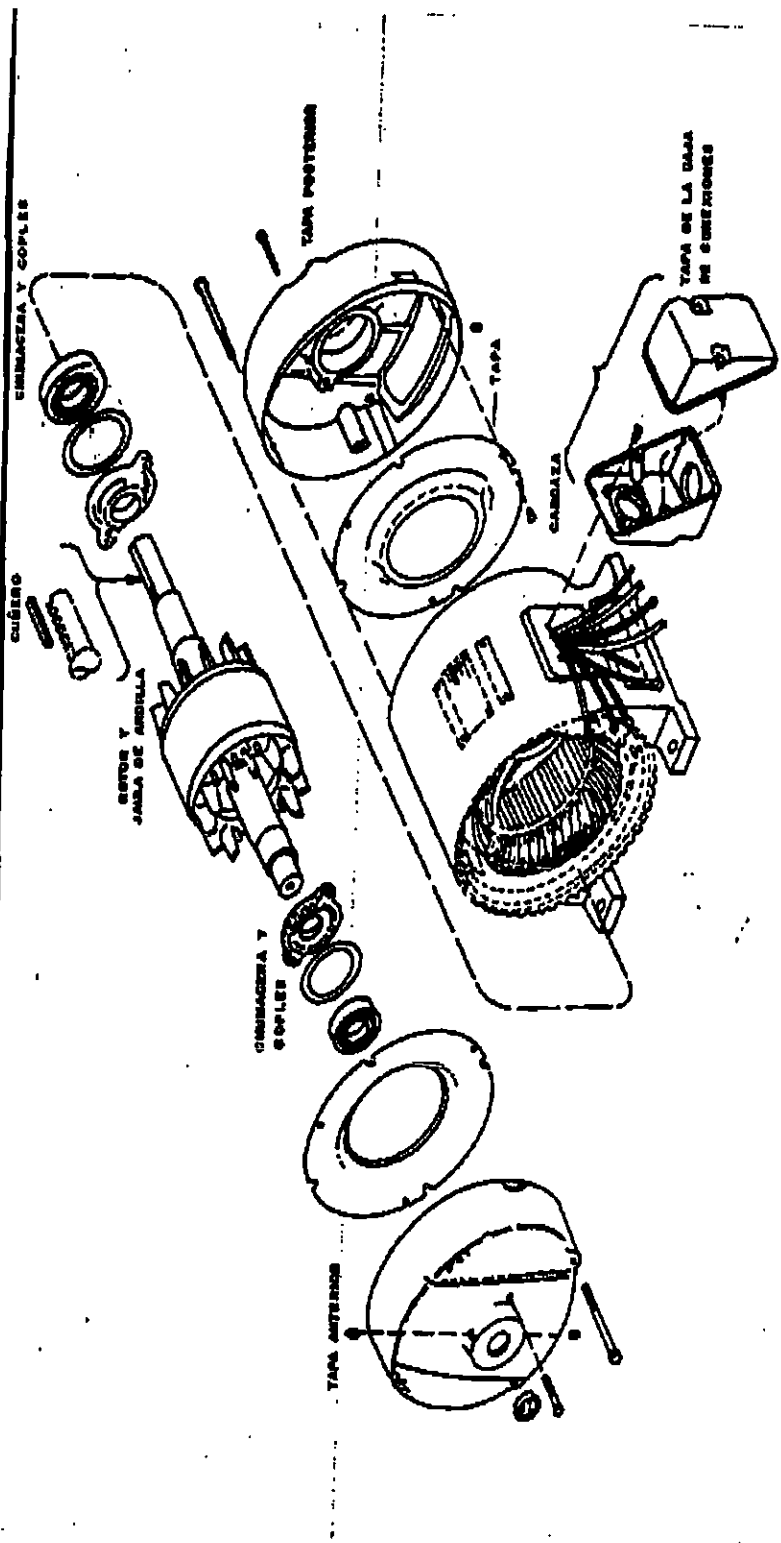
En la figura 1.27 se muestran algunos componentes auxiliares que forman parte de un motor de inducción.



VISTA DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DE UN MOTOR DE INDUCCION

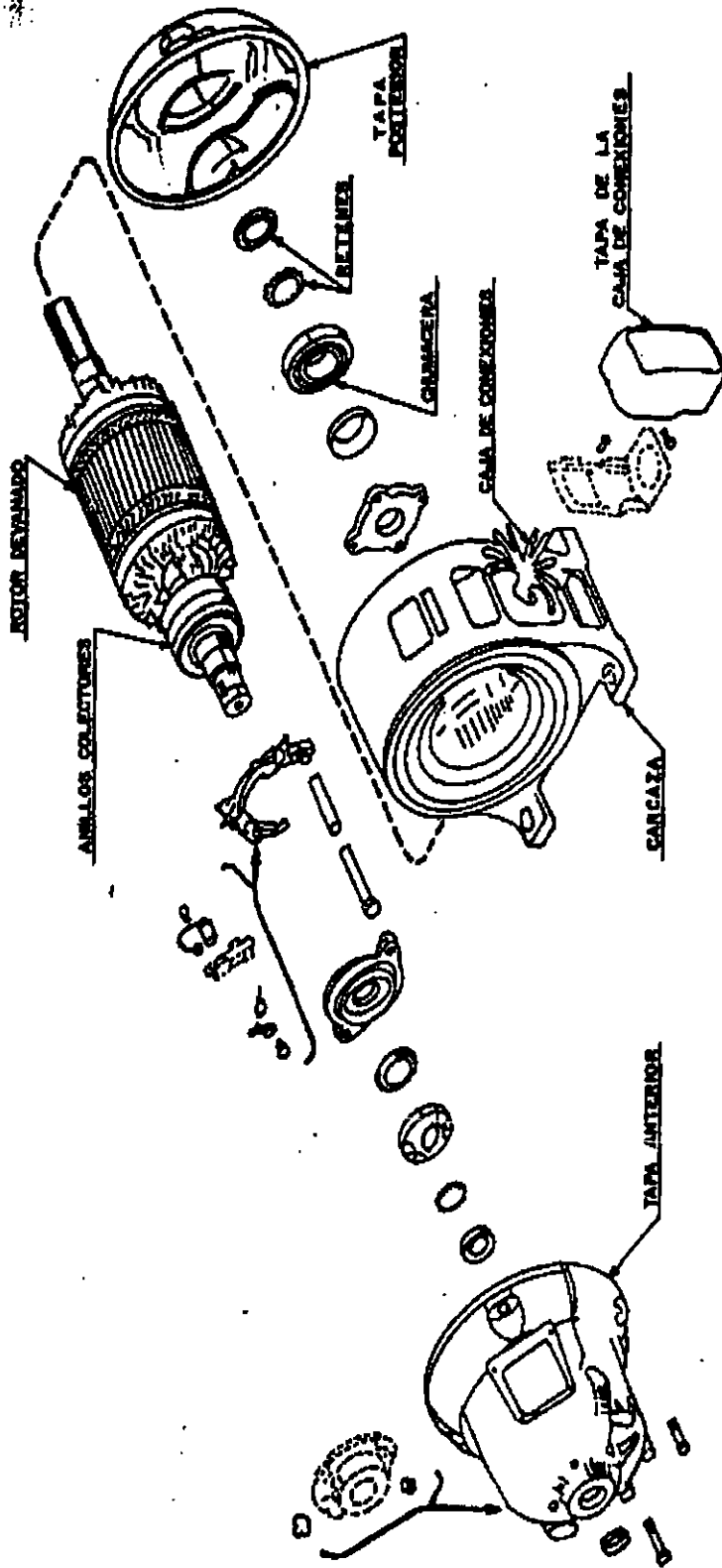
Figura 1.27. Vista de los principales componentes de un motor de inducción. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

En la siguiente figura 1.28 se observan los componentes que forman a un motor de inducción con rotor jaula de ardilla. Además de la forma en que es ensamblado.



VISTA DE UN MOTOR DE INDUCCION POLIFASICO DE JAULA DE ARDILLA.
 CONJUNTO DEL NUCLEO DEL ROTOR Y BOBINAS, EN EL CUAL NO SE REQUIEREN CONEXIONES CONDUCTIVAS FISICAS.

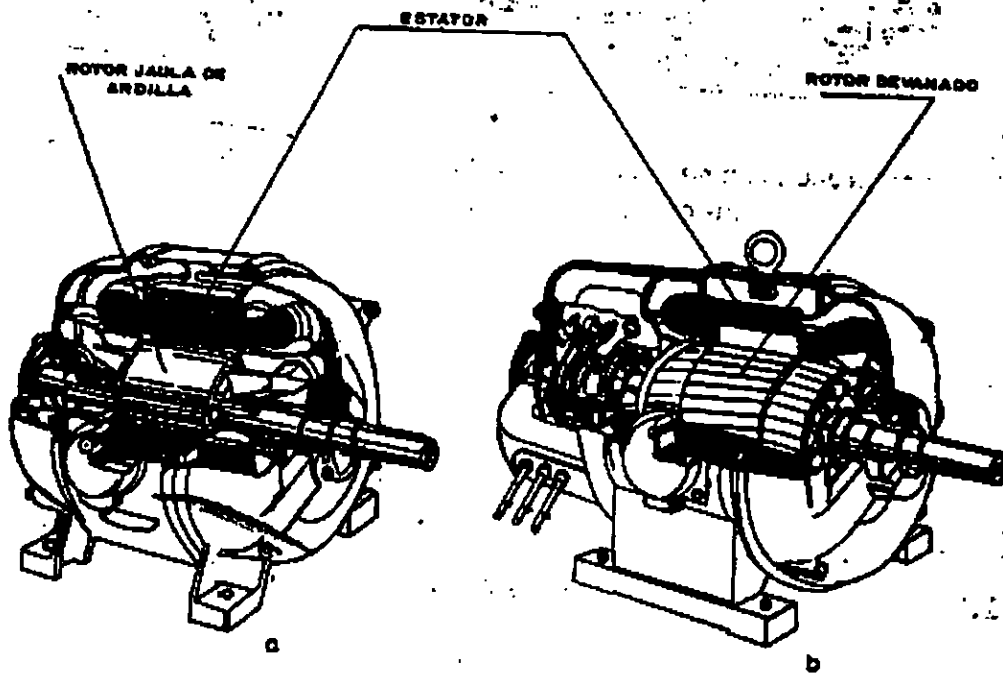
Figura 1.28. Vista de un motor de inducción trifásico de jaula de ardilla (conjunto del núcleo de rotor y bobinas, en el cual no se requieren conexiones conductivas físicas). Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enriquez Harper. Como en la figura anterior, ahora se muestra en la figura 1.29 los componentes que forman un motor de inducción con rotor devanado y la forma en que es ensamblado.



VISTA DE UN MOTOR DE INDUCCION POLIFASICO DE ROTOR DEVANADO

Figura 1.29. Vista de un motor de inducción trifásico de rotor devanado. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enriquez Harper.

Por último y para terminar el tema de la construcción del motor de inducción, se presentaran en la siguiente figura 1.30 a un motor con jaula de ardilla y a un motor con rotor devanado ya ensamblados. Como se puede observar es fácil distinguirlos físicamente uno del otro.



VISTA DE UN MOTOR CON ROTOR DE JAULA DE ARDILLA (a) Y CON ROTOR DEVANADO (b)

Figura 1.30. Vista de un motor con rotor de jaula de ardilla (a) y de un motor con rotor devanado. Esta figura fue obtenida del libro de "El ABC De Las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)" de Gilberto Enríquez Harper.

1.5 CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR SÍNCRONO.

1.5.1 CONSTRUCCIÓN DEL ESTATOR.

Como se ha mencionado anteriormente, el estator es la parte fija o estática en un motor de inducción, así que en el motor síncrono esto no será la excepción.

El estator de un motor síncrono al igual que el de un motor de inducción, esta formado por paquetes de laminaciones troqueladas de tal forma que en el interior de dichas laminaciones se tengan ranuras o canales estrechos en los cuales se pueden colocar los devanados del estator.

Las ranuras en las laminaciones pueden ser de dos tipos: abiertas y semicerradas, las cuales se muestran en la figura 1.31. Las ranuras del tipo abierto son usadas en motores de gran potencia, el uso de este tipo de ranuras permite prefabricar las bobinas para que posteriormente se instalen en el interior de dichas ranuras en el estator; las ranuras del tipo semicerradas se usan en motores de potencia no tan grandes, el uso de este tipo de ranuras no permite que las bobinas sean prefabricadas, sin en cambio permite una mejor fijación del aislamiento en el interior de dichas ranuras.

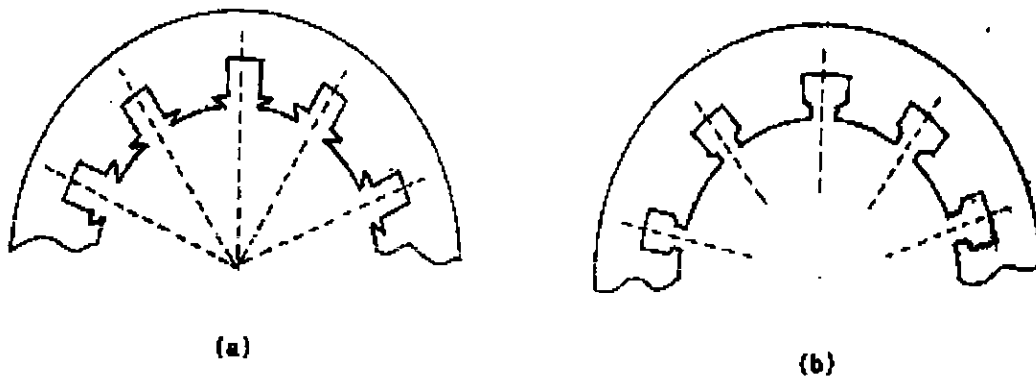


Figura 1.31. (a) Laminación con ranuras abiertas, (b) Laminación con ranuras semicerradas. Estas figuras fueron obtenidas del libro de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enríquez Harper.

Hay laminaciones que no se troquelan de forma completa si no en forma seccionada, debido a que las laminaciones no son discos completos sino discos formados por secciones. Este tipo de laminaciones se usan en estatores que tendrán un diámetro externo mayor de 1m; para estatores con diámetro externo menor a 1m se usan las laminaciones que son troqueladas de forma completa, es decir, que constan de ranuras a lo largo de la circunferencia interna de las laminaciones.

Los paquetes de laminaciones están formados por laminas de acero al silicio, las cuales tienen un espesor de aproximadamente 0.35mm a 0.5mm, estas laminas pueden provocar pérdidas en el núcleo de 3 a 25 watts.

Al formar los paquetes de laminaciones, cada lámina debe aislarse con una capa de papel muy delgada por un solo lado, además de una capa muy delgada de barniz, esto se hace con el fin de disminuir el efecto de las corrientes parásitas. Posteriormente el conjunto de paquetes de laminaciones son montados y fijados en el interior de la carcasa de manera similar como se hace en el motor de inducción.

La carcasa en un motor síncrono al igual que en un motor de inducción es el medio mecánico de soporte del estator, es fabricado con acero soldado y algunas veces con acero fundido. Para motores de baja potencia la carcasa es construida de una sola pieza y en motores de gran potencia se construyen de dos partes o con secciones de cuatro partes, esto debido a razones de montaje; normalmente las carcasas que se construyen en cuatro secciones son para grandes generadores síncronos.

La carcasa en un motor síncrono suele tener diversas formas y esto es debido a varias razones, algunas de ellas son: la dimensión que suele tener el motor; los diversos materiales que son empleados en su construcción; el sistema de ventilación que se adopte, entre otras.

Como la construcción del estator en un motor síncrono es muy similar a la de un motor de inducción, la construcción de los devanados para el estator también lo son, así como los aislamientos utilizados y su colocación en las ranuras, además de las formas de colocación de las bobinas en las ranuras; por lo tanto los temas mencionados aquí y vistos anteriormente en la construcción del estator en un motor de inducción se aplican también a la construcción del estator para el motor síncrono.

1.5.2 CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR.

El rotor es la parte interna giratoria en un motor síncrono y se construye de dos tipos de acuerdo a la fabricación de sus polos magnéticos en:

- a) Rotor de polos salientes.
- b) Rotor de polos lisos.

Ahora se describirá la construcción de ambos rotores, empezando por el rotor de polos salientes.

a) Rotor de polos salientes.

Este tipo de rotor es utilizado en motores de baja velocidad, a causa de su estructura no puede usarse en motores de alta velocidad debido a las excesivas fuerzas centrífugas y a los elevados esfuerzos mecánicos que se tienen a esas velocidades.

Los rotores de polos salientes constan de cuatro o más polos magnéticos, este tipo de polos sobresalen de la superficie del rotor por lo que son muy notorios a simple vista, debido a esto es que se le denomina rotor de polos salientes; normalmente este tipo de rotores son menos costosos al fabricarlos que los rotores de polos lisos.

Los polos magnéticos en este tipo de rotor se pueden fabricar de dos maneras, una de ellas es por medio de laminaciones cuyas laminas son de acero y con un espesor de aproximadamente 1.5mm; otra forma son los polos macizos los cuales son fabricados en una sola pieza entera forjada de acero.

El aro del rotor que es la estructura de soporte de los polos se fabrica de forma maciza de una sola pieza forjada de acero, pero también se puede fabricar por medio de laminaciones cuyas laminas deben ser hechas de acero.

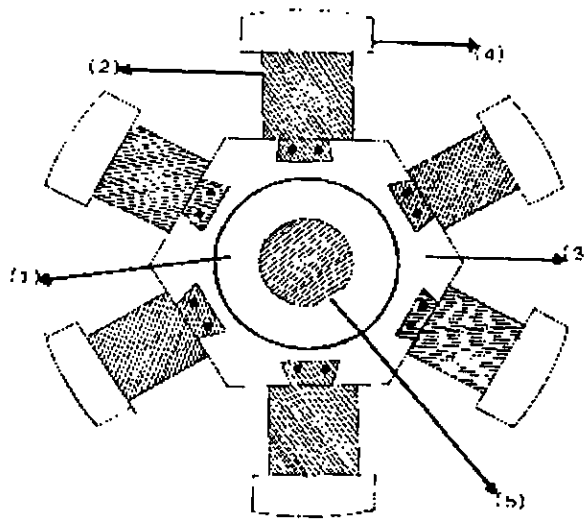
La forma en que se fabrique el aro del rotor dependerá de ciertos parámetros, uno de ellos es el diámetro que tendrá dicho rotor y el otro es el número de polos que se monten sobre el aro, además de la potencia y la velocidad del motor.

Para rotores de gran diámetro, la estructura de soporte de los polos o aro del rotor se fabrica con paquetes de laminaciones de acero, por otro lado si se toman efectos presentes en el rotor como la resistencia mecánica y la velocidad periférica, el aro del rotor puede ser fabricado ya sea con placas de acero laminado de 20mm a 25mm de espesor o también de placas de acero fundido con espesores que van de 150mm hasta 200mm.

En el caso de motores de pequeña potencia el aro del rotor es fabricado por medio de paquetes de laminaciones cuyas laminas tienen espesores que van de 0.5mm a 6mm.

Conforme aumenta el diámetro del rotor, su estructura se va modificando con el fin de que pueda soportar tanto a los polos como los esfuerzos centrífugos al que está sometido, por lo que en algunos casos tanto los polos como la demás estructura del rotor se fabrican en una sola pieza de acero fundido.

En la siguiente figura 1.32 se muestra un rotor de polos salientes provisto de seis polos.

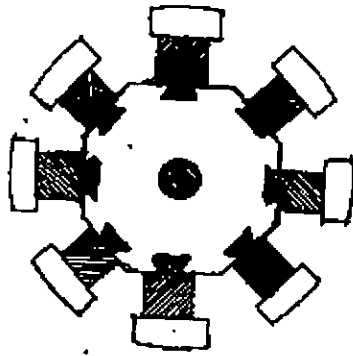


- 1) Núcleo o masa.
- 2) Polo.
- 3) Aro del rotor.
- 4) Expansión polar.
- 5) Flecha o eje del rotor.

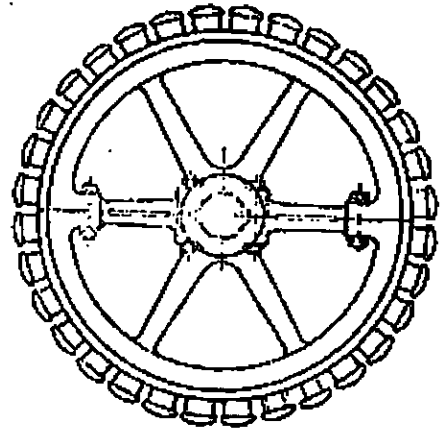
Figura 1.32. Vista frontal de un rotor de polos salientes. Esta figura fue obtenida del libro de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enríquez Harper.

En la figura 1.32, se observa que los polos están soportados por el aro del rotor como se dijo anteriormente, cada polo está ubicado sobre una superficie de dicho aro el cual tiene forma hexagonal, por lo que se puede decir que el aro del rotor está formado por tantas superficies según el número de polos del rotor. Conforme se va aumentando el número de polos en un rotor la forma que tenga el aro del rotor cambiara esto es debido a que surge la necesidad de que se tengan suficientes superficies para poder montar los polos, por lo que se puede decir que entre más polos tenga un rotor, la estructura en el aro del rotor tendrá que cambiar asemejándose a la de una circunferencia.

En la figura 1.33, se observa un rotor de polos salientes (inciso (a)) provisto de 8 polos y se nota el aumento en el número de superficies en el aro del rotor con respecto al rotor de la figura 1.32; en el inciso (b) se tiene otro rotor de polos lisos provisto de un gran número de polos, por lo que ahora el aro del rotor tiene la forma de una corona circular. El aumento de polos en un rotor en sí lo que hace es disminuir las dimensiones de las superficies que tiene el aro del rotor de tal forma que llegan a desaparecer, por lo que ahora la forma que toma dicho aro es circular dejando atrás la forma del polígono visto en la figura 1.32.



(a)



(b)

Figura 1.33. Vista frontal de un rotor de polos salientes. (a) rotor constituido por ocho polos, (b) rotor constituido por más de ocho polos. Esta figura fue obtenida del libro de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enríquez Harper.

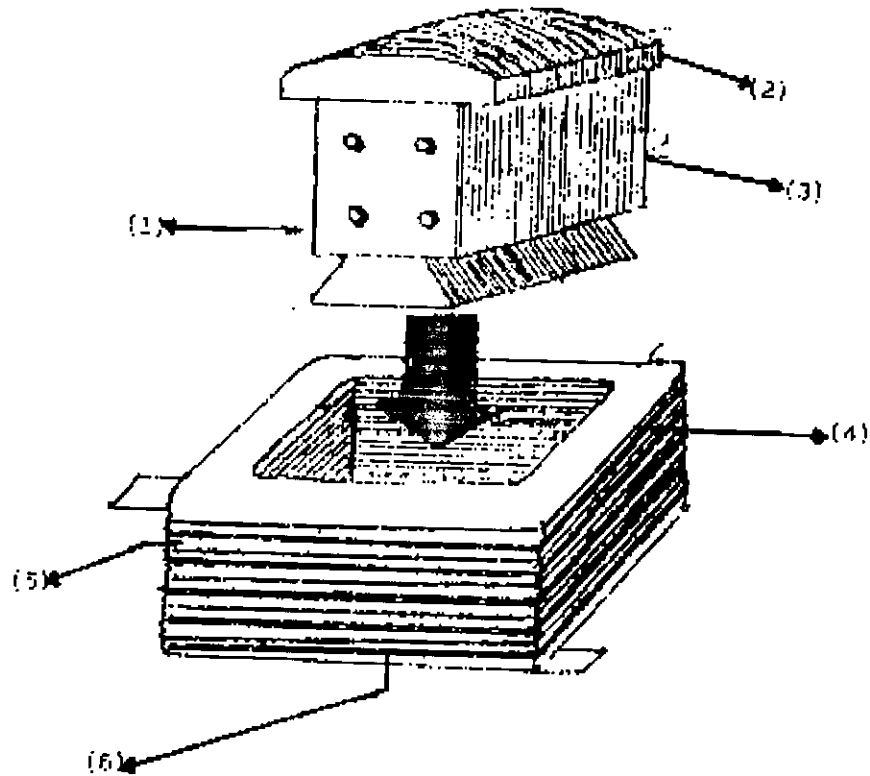
La razón por la cual se usan en los polos la expansión polar, es debido a las pérdidas por corrientes parásitas, ya que dicha expansión reduce estas pérdidas que nacen en las ranuras del estator.

El rotor de un motor síncrono, en este caso de polos salientes consta de un devanado, el cual es conocido como devanado de campo y se alimenta sólo de corriente directa (C.D). Este devanado normalmente es prefabricado y está construido con alambres de cobre para motores pequeños, y en motores de gran tamaño las bobinas son fabricadas con conductores de sección rectangular o barras de cobre.

El devanado de campo en un rotor está construido por bobinas conectadas en serie y se tienen tantas bobinas como polos se tienen en dicho rotor, las bobinas son prefabricadas de forma independiente y se montan en los polos, de tal forma que cada polo contiene una bobina, las que posteriormente se conectan en serie.

Las bobinas que forman el devanado de campo están constituidas normalmente de conductores desnudos de cobre, dichos conductores van aislados unos a otros por medio de una resina termo reactiva, posteriormente la bobina se prensa y se recubre de aislante.

Una vez que la bobina es prefabricada se procede a montarse en el polo, como se muestra en la figura 1.34, pero antes de esto el cuerpo del polo se debe de aislar por completo.



- 1) Polo.
- 2) Expansión polar.
- 3) Laminaciones.
- 4) Bobina del devanado de campo.
- 5) Conductor.
- 6) Aislamiento entre espiras de los conductores.

Figura 1.34. Se muestra la colocación de una bobina del devanado de campo en un polo. Esta figura fue obtenida del libro de Máquinas Síncronas” de Gilberto Enríquez Harper.

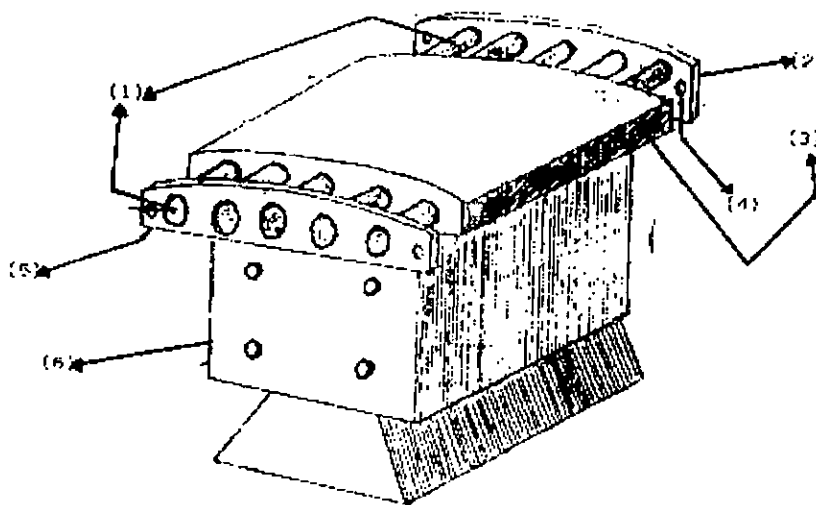
La forma en que se sujeta la bobina al polo se mostrara más adelante.

En algunos motores síncrono el rotor consta de dos tipos de devanados, uno es el ya mencionado devanado de campo y el otro es un devanado conocido como devanado de amortiguamiento, el cual tiene la función de poder arrancar al motor síncrono, ya que un motor síncrono sin este devanado no puede arrancar por si sólo, si no que necesita de ayuda externa para poder hacerlo.

El devanado de amortiguamiento no es otra cosa más que la ya mencionada jaula de ardilla, popular en el rotor del motor de inducción; la finalidad de poner la jaula de ardilla en un motor síncrono y tomarla como un devanado auxiliar denominado devanado de amortiguamiento, es que por medio de este el motor síncrono podrá arrancar como un motor de inducción para posteriormente operar a velocidad síncrona, pero esto se explicará con mejor detalle más adelante.

Los polos son los que contienen al devanado de amortiguamiento en la parte superior y para hacerlo, dichos polos deben ser fabricados por paquetes de laminaciones; un polo fabricado de forma maciza no puede constar de un devanado amortiguador debido a la presencia de unas corrientes denominadas de Foucault inducidas en el cuerpo de los polos lo que produce un efecto de amortiguación, por lo que hace innecesario la colocación de dicho devanado en este tipo de polos.

Un devanado de amortiguamiento esta formado por barras de cobre de forma circular, las cuales están cortocircuitadas en ambos extremos por medio de unos segmentos de cortocircuito, como se puede observar en la figura 1.35.



- 1) Barras del devanado amortiguador.
- 2) Segmento de corto circuito.
- 3) Expansión polar.
- 4) Orificio de conexión para la unión de otro conjunto de barras de amortiguamiento contenidas en los polos adyacentes.
- 5) Segmento de cortocircuito.
- 6) Polo formado por paquetes de laminaciones.

Figura 1.35. Vista del devanado amortiguador en un polo, el cual no contiene todavía el devanado de campo. Esta figura fue obtenida del libro de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enríquez Harper.

Es obvio que cada polo contiene las barras de amortiguamiento, por lo que estas se encuentran alrededor del rotor y para poder formar la jaula o devanado amortiguador, las barras contenidas en cada polo deberán unirse por medio de los segmentos de cortocircuito, es decir, los segmentos de cortocircuito contenidos en un polo se unen con otros segmentos de cortocircuito contenidos en los polos adyacentes, por lo que de esta manera quedara formado el devanado amortiguador de forma completa.

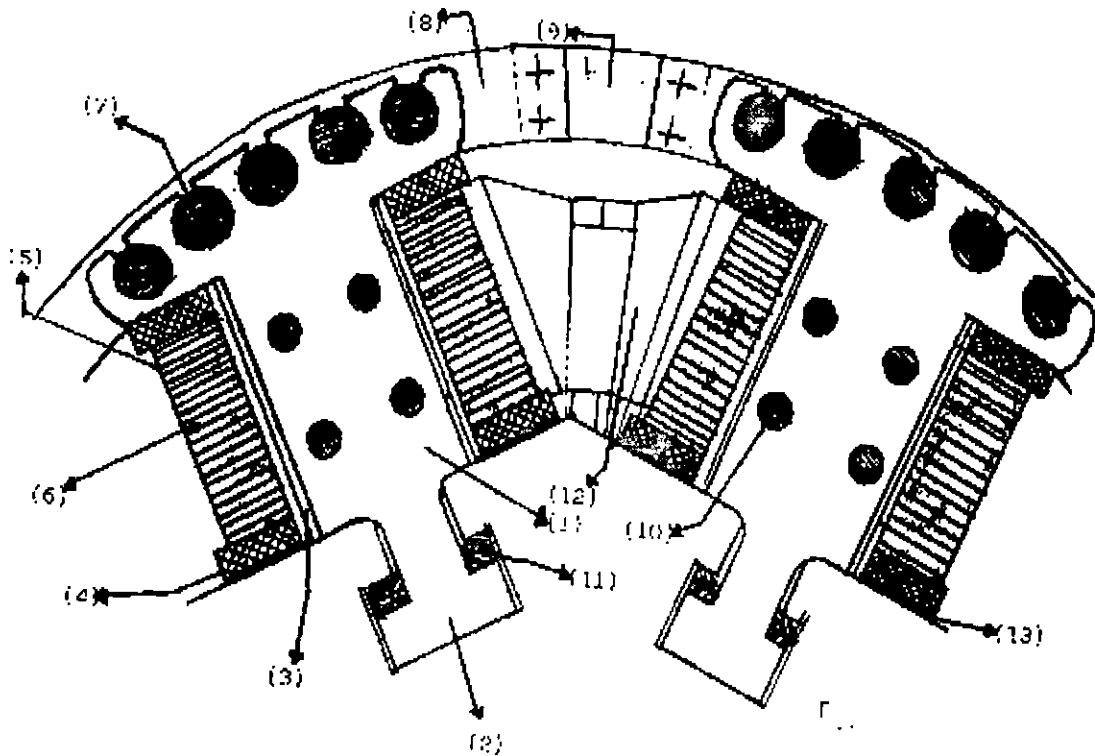
Como se había mencionado anteriormente los polos son montados en el aro del rotor, por lo que dichos polos deben ser desmontables para que así la bobina del devanado de excitación prefabricada pueda ser colocada.

En el caso de los polos fabricados por medio de laminaciones, dichas laminaciones que forman el polo son sujetas y apretadas por medio de espárragos, como se puede observar en la figura 1.36; la forma de sujetar los polos al aro del rotor es por medio de colas en "T" las cuales se fijan con cuñas de acero en ambos lados de dichas colas en "T", estas cuñas son de forma rectangular y también se muestran en la figura 1.36.

La forma en que normalmente se sujetan las bobinas del devanado de campo en los polos se presenta en la figura 1.36, en donde se puede observar el aislamiento que se le coloca a ambas paredes del polo antes de la colocación de las bobinas, también se observa que la bobina de campo es fijada por medio de arandelas hechas de material aislante.

Para el caso de las barras que componen el devanado amortiguador, las laminaciones del polo deben ser fabricadas con ranuras redondas semicerradas en la parte superior del polo como se puede observar en la figura 1.36, para que así las barras del devanado amortiguador se puedan colocar en los polos; también se puede ver en la figura 1.36 los segmentos de cortocircuito, además se puede observar como están unidos los segmentos de dos polos por medio de puentes de unión flexibles para formar la jaula o devanado amortiguador en el rotor.

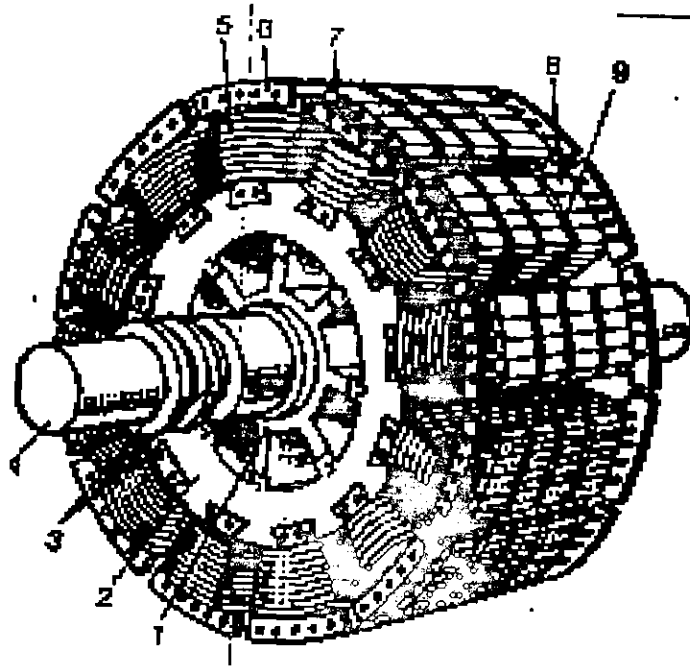
Hay motores síncronos con rotor de polos salientes en cuyos rotores no se tienen uniones en el devanado amortiguador, es decir, no existen uniones entre los segmentos de cortocircuito entre cada polo, por lo que debido a esto la jaula o devanado amortiguador no tiene propiamente la forma de la jaula de ardilla, un rotor así se representa en la figura 1.37. Este tipo de devanado amortiguador no tiene muy buenas condiciones de operación como las tendría un rotor con el devanado amortiguador con uniones de los segmentos de cortocircuito entre polos formando así la apariencia de una jaula de ardilla.



- 1) Polo.
- 2) Cola en "T" del polo.
- 3) Aislamiento del cuerpo del polo.
- 4) Arandela aisladora.
- 5) Aislamiento entre espiras de los conductores.
- 6) Conductor desnudo de la bobina del devanado de campo.
- 7) Barra del devanado amortiguador.
- 8) Segmento de cortocircuito.
- 9) Conexión flexible entre los segmentos.
- 10) Espárrago de apriete.
- 11) Cuñas para la sujeción de la cola en "T" del polo.
- 12) Traversa interpolar.
- 13) Arandela de acero.

Figura 1.36. Corte frontal de un rotor de polos salientes en el que se muestra el acoplamiento de los polos al aro del rotor, además de la fijación del devanado amortiguador y de campo. Esta figura fue obtenida del libro de "Máquinas Eléctricas de Ivanov Smolenski.

En la figura 1.37, se muestra un rotor de polos salientes con sus principales componentes.



- 1) Núcleo o masa.
- 2) Aro del rotor.
- 3) Anillos colectores.
- 4) Eje o flecha.
- 5) Bobina o devanado de campo.
- 6) Segmento de cortocircuito.
- 7) Barras del devanado amortiguador.
- 8) Conjunto del núcleo polar.
- 9) Canal de ventilación en el polo.

Figura 1.37. Forma física de un rotor de polos salientes sin unión entre los segmentos de cortocircuito de cada polo. Esta figura fue obtenida del libro de "Máquinas Eléctricas de Ivanov Smolenski.

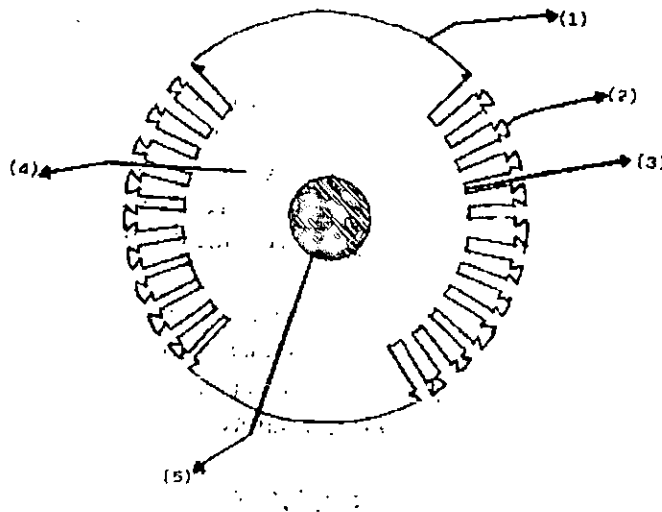
b) Rotor de polos lisos.

Este tipo de rotores es utilizado en motores de alta velocidad, cuya velocidad de operación va desde las 1500 rpm hasta las 3000 revoluciones por minuto (rpm); en los motores con rotor de polos salientes su velocidad de operación no sobrepasa las 1500 rpm.

Los rotores de polos lisos se fabrican con dos o cuatro polos, por lo que se puede decir que los rotores son bipolares y cuadripolares, este tipo de rotores son llamados también rotores cilíndricos ya que el polo magnético es construido al ras de la superficie del rotor, por lo que dichos polos no son muy notorios a simple vista como lo son en los rotores de polos salientes.

La fabricación de los rotores de polos lisos normalmente son hechos de una pieza entera forjada de acero, debido a las altas velocidades a las que opera este tipo de rotor, el acero que se utiliza para su fabricación es más resistente, ya que tiene aleaciones de otros materiales como: níquel y molibdeno, esto le da al rotor una buena resistencia mecánica suficiente para poder soportar las fuerzas centrífugas a las que está expuesto dicho rotor.

Sobre la superficie del rotor de polos lisos (el cual es de forma cilíndrica) se fresan ranuras de forma rectangular distribuidas uniformemente, esto se puede observar en la figura 1.38, en la que se tiene un rotor de polos lisos visto de frente.



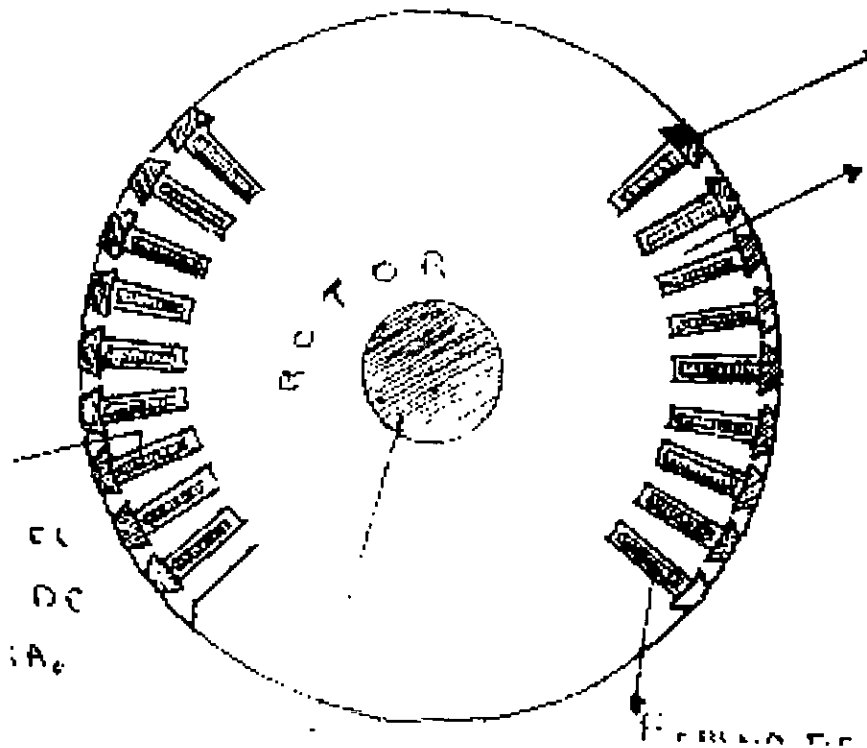
- 1) Polo.
- 2) Diente.
- 3) Ranura.
- 4) Rotor.
- 5) Eje o flecha.

Figura 1.38. Vista frontal de un rotor de polos lisos provisto de dos polos. Esta figura fue obtenida del libro de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enriquez Harper.

En el interior de las ranuras es donde se colocan las bobinas del devanado de campo, en el rotor de polos lisos las bobinas normalmente no son prefabricadas, si no que se fabrican de forma manual; en el caso de que se usen las bobinas de forma radial entonces dichas bobinas si pueden ser prefabricadas.

Los conductores utilizados para la fabricación de las bobinas del devanado de campo normalmente son de sección rectangular; debido a que los conductores experimentan la acción de grandes fuerzas centrífugas y grandes cargas térmicas, dichos conductores con los que se fabrican las bobinas del devanado de campo son de cobre con adición de plata ya que con esto se adquieren elevadas propiedades de resistencia mecánica.

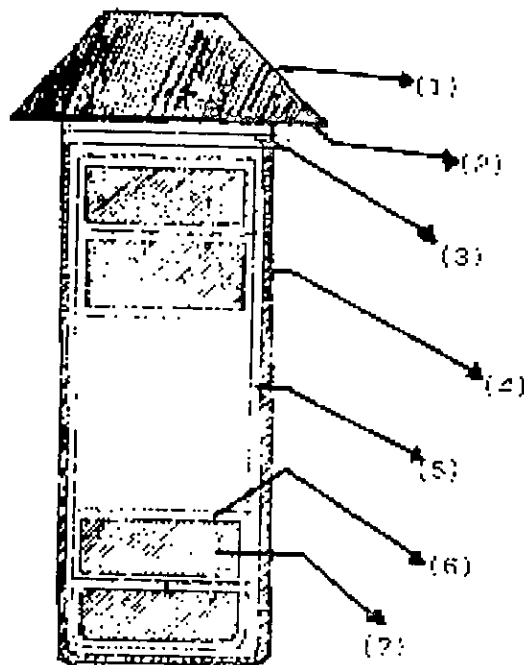
En la siguiente figura 1.39, se presenta un rotor de polos lisos visto de frente idéntico al de la figura 1.38, con la diferencia que ahora se tiene el devanado de campo.



- 1) Cuña.
- 2) Diente.
- 3) Bobina del devanado de campo.
- 4) Aislante usado en el interior de la ranura.

Figura 1.39. Vista frontal de un rotor de polos lisos, en el cual se tienen ya las bobinas del devanado de campo montadas en el interior de las ranuras. Esta figura es una combinación de dos figuras obtenidas de los libros de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enríquez Harper; y "Máquinas Eléctricas" de Ivanov Smolenski.

Como se pudo observar en la figura anterior las bobinas son colocadas a presión en las ranuras del rotor, además de los conductores utilizados en la fabricación de bobinas para el devanado de campo los aislamientos utilizados también están expuestos a la acción de grandes fuerzas centrífugas y de cargas térmicas considerables, por lo que el aislamiento utilizado entre las espiras de los conductores es de *micanita* (un tipo especial de mica) con fibra de vidrio; para el aislamiento usado en el interior de las ranuras se utilizan las llamadas cajas de ranura o camisas, las cuales están hechas de micanita o de tejido de lana de vidrio, esto se puede observar en la figura 1.40.

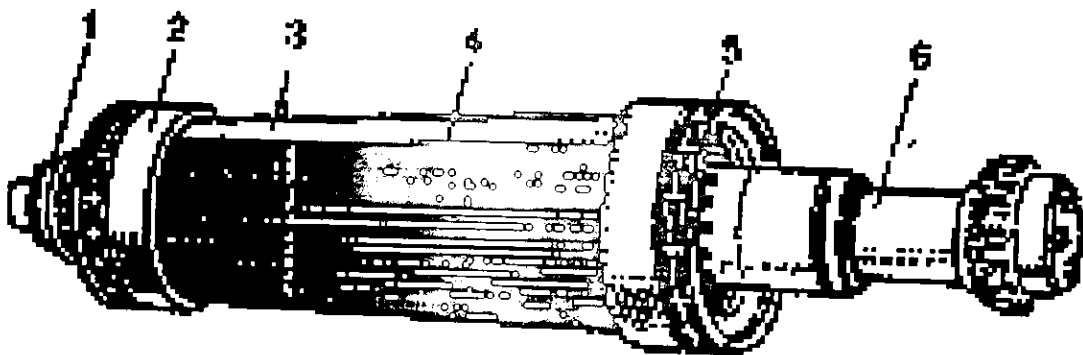


- 1) Cuña.
- 2) Lamina de acero.
- 3) Juntas de micanita.
- 4) Envoltura protectora.
- 5) Camisa.
- 6) Aislamiento entre conductores.
- 7) Conductor.

Figura 1.40. Estructura del aislamiento y de la sujeción de los devanados en una ranura de un rotor de polos lisos. Esta figura fue obtenida del libro de "Máquinas Eléctricas de Ivanov Smolenski.

Como se puede observar en la figura 1.40, la llamada caja de ranura o camisas tiene antes una envoltura protectora hecha de acero; posteriormente se colocan los conductores que forman el devanado de campo con su respectivo aislamiento entre conductores el cual es de micanita; por ultimo se procede a acuñar la ranura para así fijar una parte del devanado de campo, pero antes de acuñar es necesario colocar las juntas de micanita por encima de la caja como se muestra en la figura 1.40, después de las juntas se coloca una lamina de acero y entonces ahora si se acuña la ranura. Las cuñas son de un material llamado *dural*, ya que tiene buenas propiedades mecánicas.

Un rotor de polos lisos se muestra en la siguiente figura con sus respectivos componentes.



- 1) Anillos Colectores.
- 2) Anillos de bandaje.
- 3) Polo magnético.
- 4) Cuña de la ranura del rotor.
- 5) Ventilador centrífugo.
- 6) Eje o flecha.

Figura 1.41. Vista de un rotor de polos lisos. Esta figura fue obtenida del libro de "Máquinas Eléctricas de Ivanov Smolenski.

1.5.3 ELEMENTOS ELÉCTRICOS AUXILIARES EN UN ROTOR.

El devanado de campo en un rotor de un motor síncrono se debe de alimentar con corriente directa (C.D), para esto existen dos formas: una es por medio de una fuente externa de C.D y la otra es mediante una excitatriz.

En el primer caso que es utilizar una fuente externa de corriente directa, el rotor debe tener unos aditamentos con los cuales es posible llevar la corriente obtenida de la fuente externa hacia el devanado de campo, dichos aditamentos son los anillos colectores y las escobillas. Cada uno de los extremos del devanado de campo se conectan a los anillos colectores y estos a su vez hacen contacto con las escobillas, las cuales van conectadas a la fuente, por lo que el devanado se alimenta de corriente directa en todo momento sin importar la velocidad del rotor.

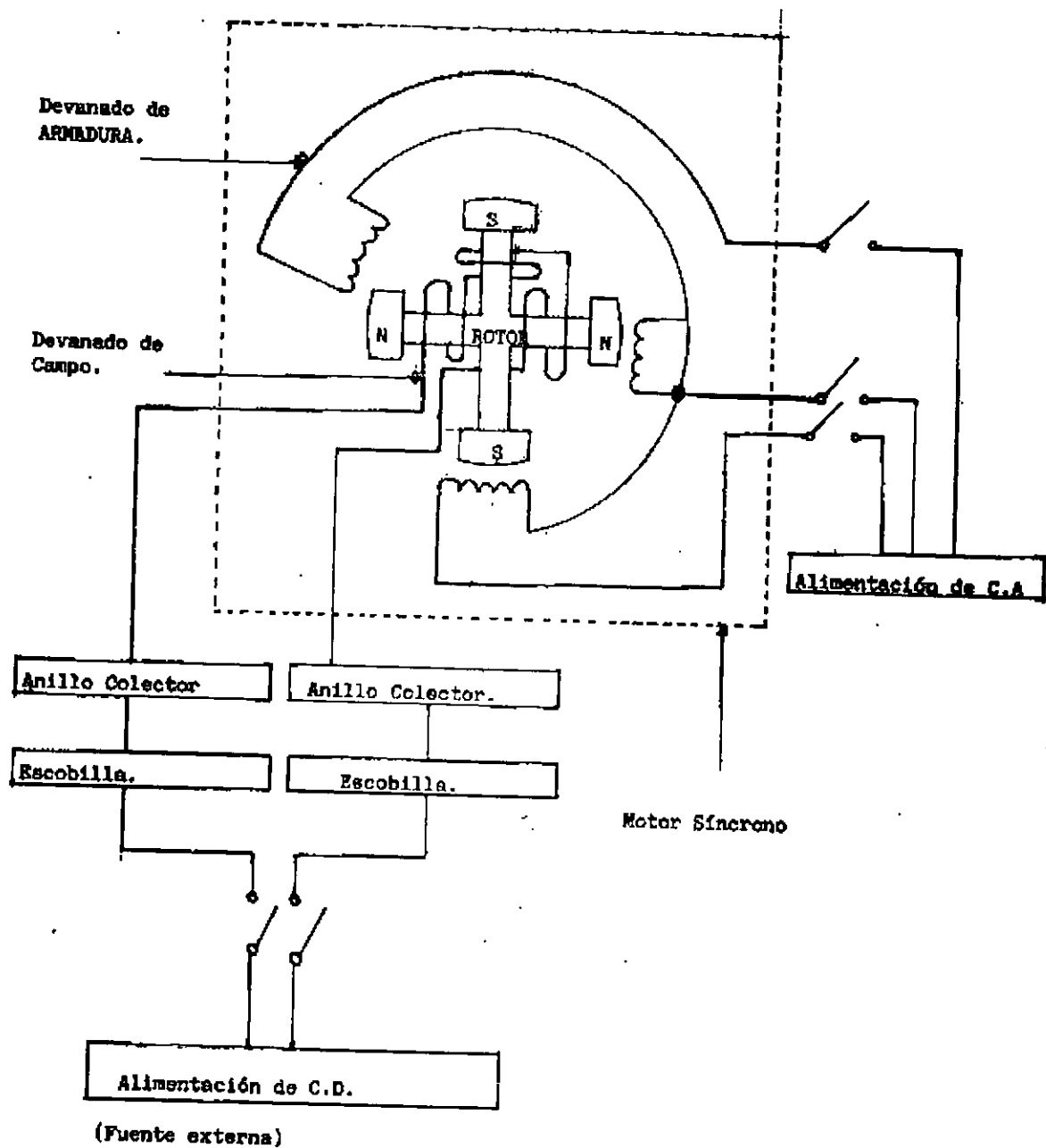
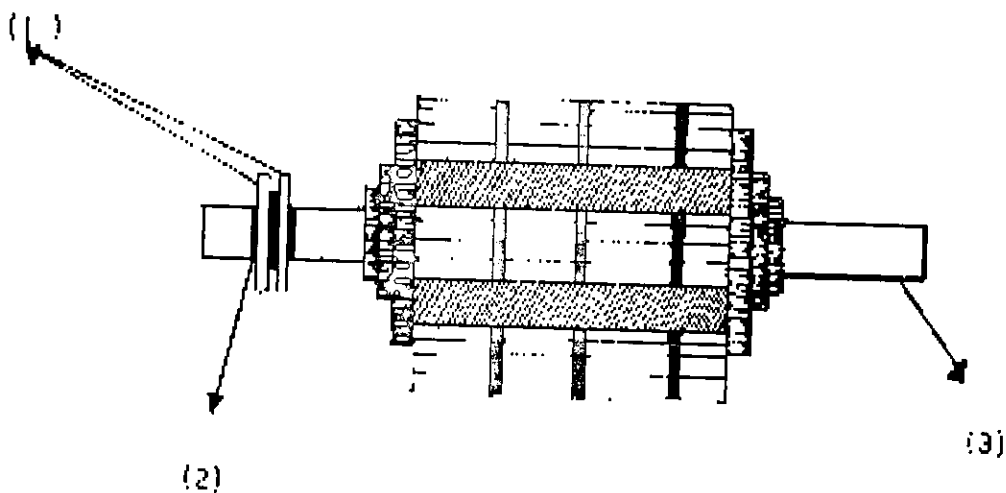


Figura 1.42. Diagrama de cómo se alimenta de C.D el devanado de campo del rotor, además de la alimentación de C.A del devanado de armadura del estator. Esta figura es una combinación de dos figuras obtenidas de los libros de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enríquez Harper; y "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

Los anillos colectores son aros metálicos que se montan en el eje o flecha del motor, al hacer esto es importante que entre los anillos y el eje no exista contacto alguno, es por eso que se coloca un aislante entre ambos, la fabricación de los anillos es a partir de cobre o bronce y deben ser capaces de resistir los esfuerzos mecánicos que se tienen como consecuencia de la fuerza centrífuga debido a la rotación.



- 1) Anillos colectores.
- 2) Aislamiento.
- 3) Eje o flecha.

Figura 1.43. Vista lateral de los anillos colectores en un rotor de polos salientes.

Las escobillas son las que tienen contacto con los anillos colectores mientras el rotor gira, normalmente están fabricadas de grafito eléctrico o de metal con grafito; la superficie de contacto que debe haber entre la escobilla con respecto al anillo colector depende de un término denominado densidad de corriente, ya que entre el anillo y la escobilla circula una corriente, como dato se sabe que para el grafito eléctrico se tiene una densidad de 5 a 15 amp/cm² y de 15 a 30 amp/cm² para el metal con grafito.

Al acoplar las escobillas de tal forma que estas tengan siempre contacto con los anillos colectores se debe tomar en cuenta la presión que ejerce la escobilla con respecto al anillo colector, ya que si dicha presión es grande provocará pérdidas y un aumento en estas, además de que se tienen desgastes importantes tanto en las escobillas como en los anillos colectores. Las escobillas se colocan sobre unos dispositivos denominados porta escobillas y que tiene la función de soporte y guía de dichas escobillas.

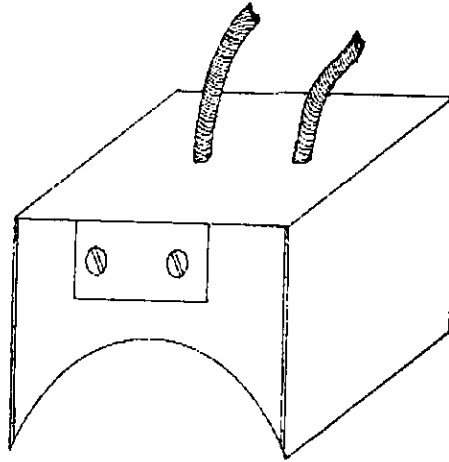


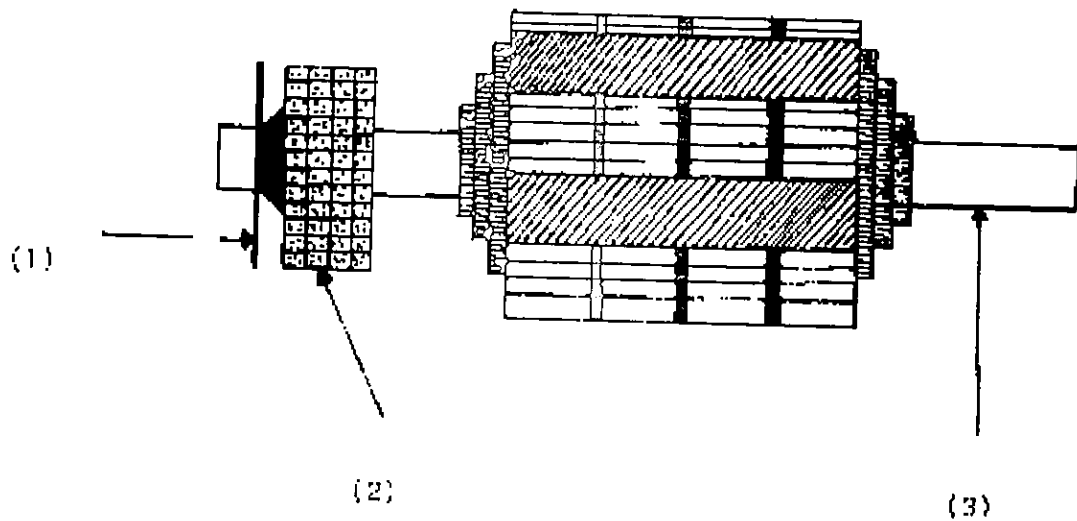
Figura 1.44. Vista de una escobilla, la cual hace contacto con los anillos colectores. Esta figura fue obtenida del libro de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enríquez Harper.

En el diseño de los anillos colectores y de las escobillas se deben tomar en cuenta: una densidad de corriente conveniente, además de una buena uniformidad de la superficie en los anillos, los cuales deben ser prácticamente indeformables y estar correctamente centrados con respecto a las escobillas. Un excelente diseño en estos elementos podrá evitar las vibraciones y el calentamiento excesivo que se tiene debido a la fricción entre ambos elementos.

Junto con los anillos colectores y las escobillas se tienen también los aislantes que tienen la función principal de soportar a estos, los aislantes utilizados deben tener buenas propiedades eléctricas además de una buena resistencia mecánica a la compresión, otro aspecto importante es que debe ser indeformable a las variaciones de temperatura; el uso más común de aislante es la *micanita*.

Este método empleado para alimentar de corriente al devanado de campo, no es del todo eficiente ya que tiene algunos inconvenientes como: la realización de un mantenimiento constante para revisar que no exista gran desgaste en los anillos colectores y en las escobillas; las pérdidas de potencia en el motor síncrono con grandes corrientes de campo debido a caídas de voltajes en las escobillas. Debido a los inconvenientes anteriores, este método de suministrar la corriente de campo al devanado de campo es menos costoso, por lo que sólo se utiliza en motores síncronos pequeños.

Otra forma de suministrar la corriente de C.D al devanado de campo es por medio de una excitatriz, este método es utilizado en motores síncronos de gran tamaño y consiste en un generador de C.A o excitatriz de pequeño tamaño, montado sobre el eje o flecha del rotor en la parte posterior. Esta excitatriz consta de un devanado de campo ubicado en el estator y de un devanado de armadura ubicado en el eje del rotor del motor síncrono.



- 1) Tablero del circuito rectificador.
- 2) Excitatriz.
- 3) Eje o flecha.

Figura 1.45. Vista lateral de la ubicación de la excitatriz en un motor síncrono con rotor de polos salientes.

La tensión trifásica producida por la excitatriz es rectificada por medio de un circuito rectificador, ubicado en el eje o flecha del rotor en la parte posterior (dicho circuito rectificador es montado sobre una tableta), a la salida de este circuito se tiene la corriente que necesita el devanado de campo, esto se puede observar mejor en la siguiente figura 1.46.

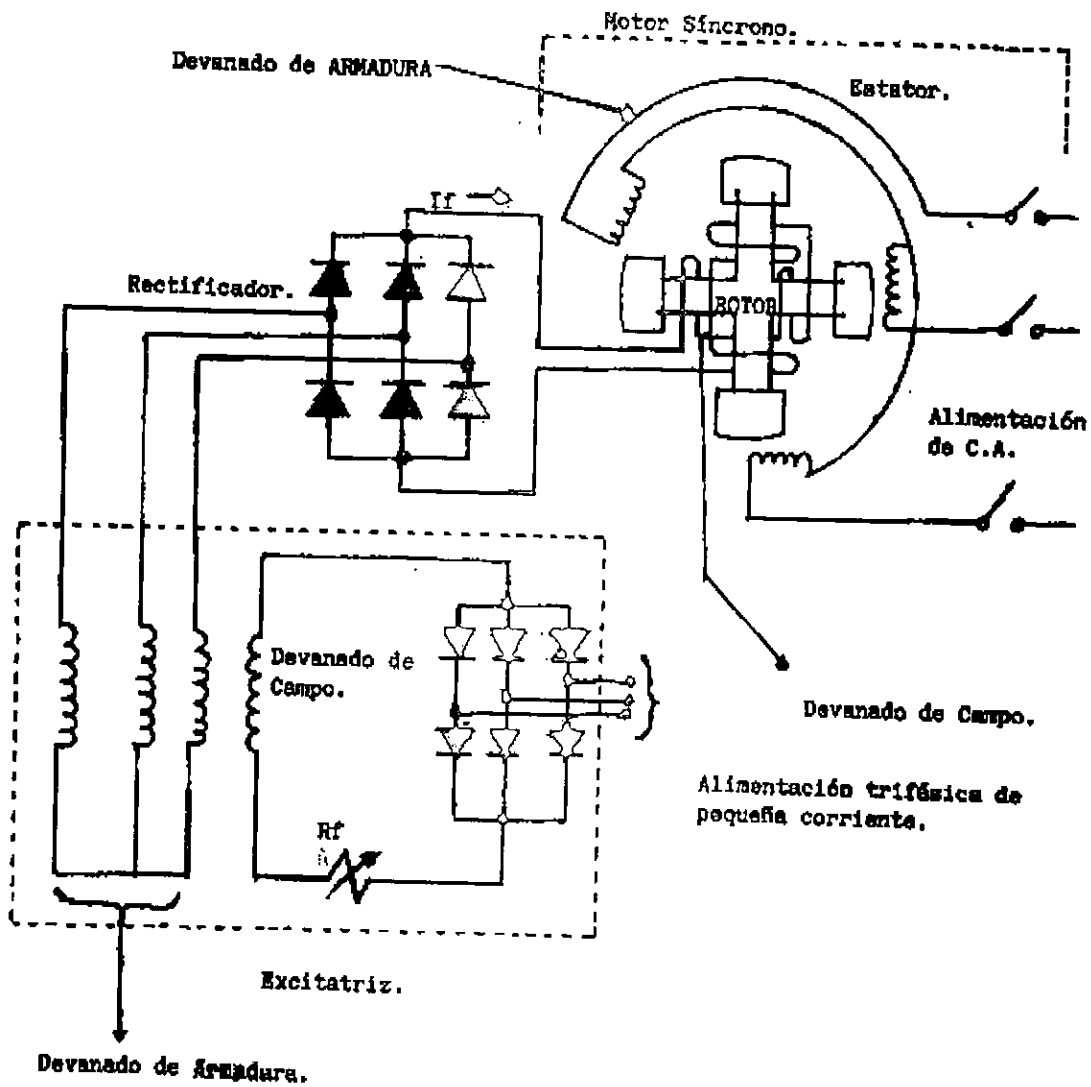


Figura 1.46. Esquema en el que se muestra como se alimenta de C.D al devanado de campo mediante una excitatriz. Esta figura es una combinación de dos figuras obtenidas de los libros de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enríquez Harper; y "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

En la figura anterior 1.46, se observa que la excitatriz para poder producir la corriente que necesita el devanado de campo una vez que haya pasado por el rectificador, necesita ser alimentada dicha excitatriz de una alimentación trifásica de pequeña corriente en su devanado de campo; esto se puede solucionar de dos formas, una es utilizando una fuente de energía externa que obviamente no es viable, por lo que se tiene una solución más apropiada y esa es utilizando otra excitatriz llamada "excitatriz piloto" o principal, esta excitatriz es montada también sobre el eje del rotor y consta de un conjunto de imanes permanentes montados sobre el eje del rotor además tiene un devanado trifásico de armadura en su estator; al igual que la excitatriz, la excitatriz piloto es también un pequeño generador de corriente alterna pero totalmente independiente, es decir, no requiere de ninguna fuente externa para operar, ya que lo hace por si mismo, esto se puede observar en la siguiente figura 1.47.

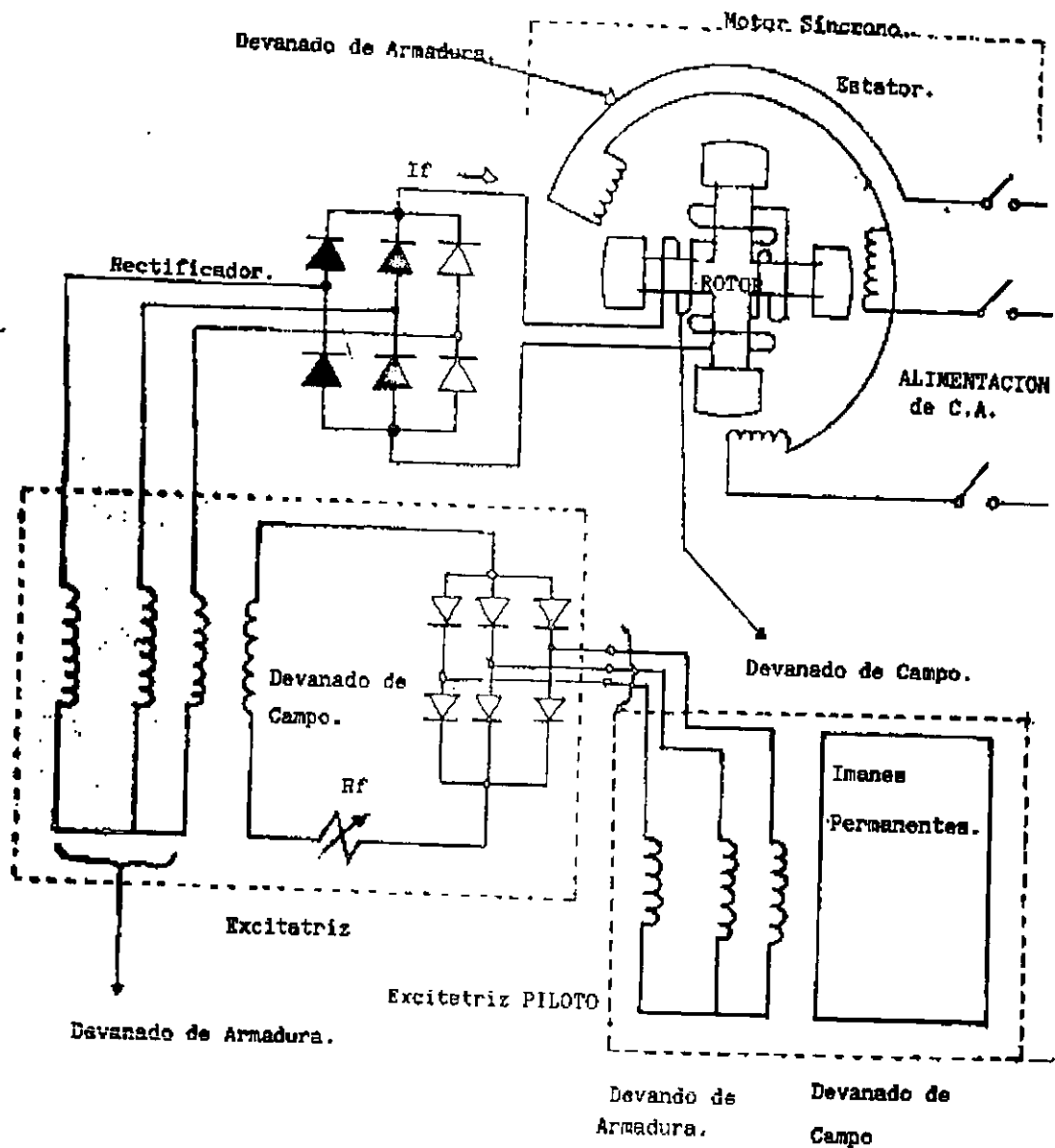
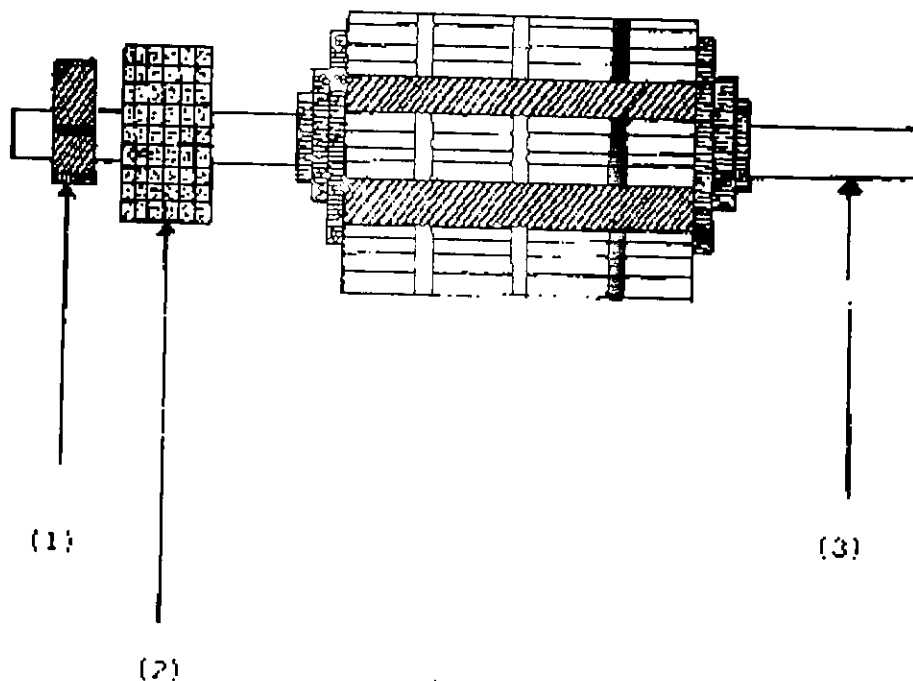


Figura 1.47. Esquema en el que se muestra como se alimenta de C.D al devanado de campo del rotor mediante la excitatriz con la adición de una excitatriz piloto. Esta figura es una combinación de dos figuras obtenidas de los libros de "Curso de Máquinas Síncronas" de Gilberto Enríquez Harper; y "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

En algunos motores síncronos además de la excitatriz incluyen los anillos colectores y las escobillas, esto se hace con el fin de que si llega a fallar uno de los dos métodos para proporcionar corriente al devanado de campo, entrara en funcionamiento el otro, por lo que así se tendrá un sistema adicional en casos de emergencia.



- 1) Excitatriz piloto.
- 2) Excitatriz.
- 3) Eje o flecha.

Figura 1.48. Vista lateral de la ubicación tanto de la excitatriz como de la excitatriz piloto en un motor síncrono con rotor de polos salientes.

Otros elementos auxiliares que se tienen son las chumaceras o valeros, los cuales sirven de soporte y guía al rotor, estos se encuentran montados en las tapas tanto frontales como posterior del motor; debido al trabajo excesivo por parte del motor se puede llegar a tener problema con los valeros, por lo que se les debe de dar mantenimiento y si es necesario cambiarlos por valeros nuevos.

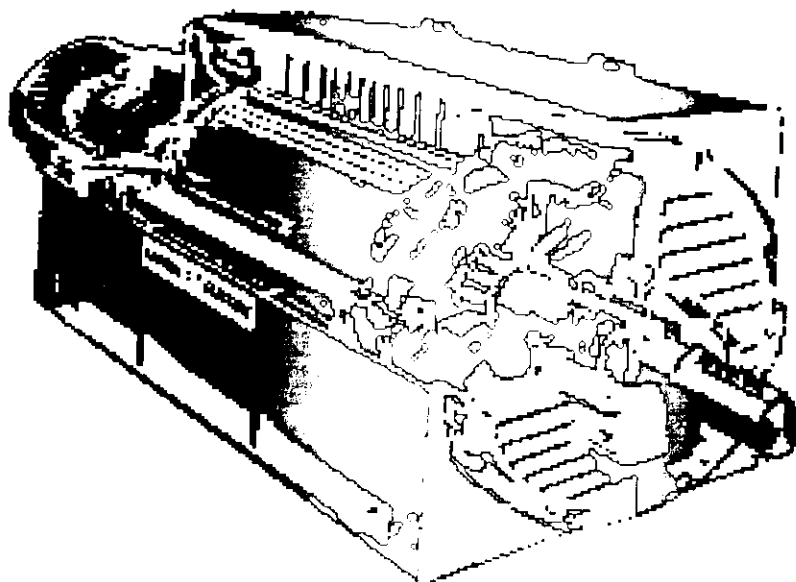


Figura 1.49. Apariencia de un motor síncrono con rotor de polos salientes. Esta figura fue obtenida del libro de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

CAPÍTULO

2

CONSIDERACIONES
BÁSICAS DE LOS
MOTORES DE INDUCCIÓN
Y SÍNCRONOS

CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentará el principio básico de funcionamiento tanto de un motor de inducción como de un motor síncrono, además de presentar los circuitos equivalentes respectivos a cada motor. Se presentarán y describirán algunas formulas que son esenciales en la operación y en el comportamiento de ambos motores. Al final de cada tema principal se darán algunas consideraciones básicas referente a dicho tema y en algunas ocasiones se aran comparaciones entre ambos motores.

2.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Si las terminales de un estator se conectan a un sistema trifásico de voltajes, habrá una circulación de corrientes trifásicas en los devanados del estator, y se producirá un campo magnético giratorio y constante que gira a una velocidad de sincronismo.

Posteriormente el campo magnético giratorio del estator, en el caso de un rotor jaula de ardilla, induce en los conductores del rotor una fuerza electromotriz inducida, de acuerdo con las leyes de inducción electromagnética.

La fuerza electromotriz inducida en el rotor produce una circulación de corriente, a su vez la corriente produce un campo magnético en el rotor, que al interactuar con el campo magnético giratorio se produce en el motor un par en sentido contra horario, por lo que el rotor se acelerará en esa dirección.

El sentido de rotación de un motor de inducción se puede invertir con sólo intercambiar dos de las tres fases que se conectan al estator.

En la siguiente figura se observa como el rotor gira en el mismo sentido en el que gira el campo magnético del estator.

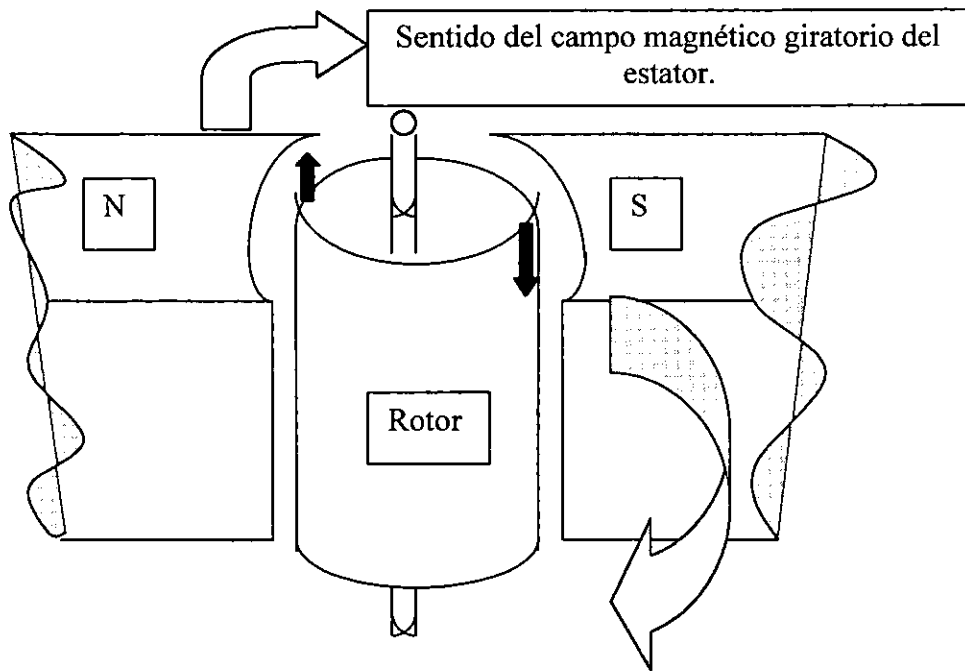


Figura 2.1. Figura obtenida de libro del “ABC de las máquinas eléctricas II de motores de corriente alterna”. En la figura se observa como el rotor se pone en rotación en el mismo sentido en el que gira el campo magnético del estator.

El rotor de un motor de inducción gira a una velocidad menor que la velocidad del campo magnético del estator, es decir, el rotor de un motor de inducción nunca girará a la velocidad síncrona, podrá estar muy cerca pero nunca la alcanzará.

¿Qué pasaría si el rotor gira a la velocidad síncrona? Para empezar las barras del rotor jaula de ardilla estarían alineadas con las líneas del campo magnético giratorio del estator, por lo que no habría fuerza electromotriz inducida en el rotor, por consecuencia no hay ni corriente en el rotor y por lo tanto tampoco se produce un campo magnético en el rotor. Si no hay campo magnético en el rotor el par producido es cero y el rotor se frenaría por la fricción.

La velocidad síncrona del campo giratorio se puede calcular por la siguiente expresión:

$$n_s = \frac{(120)f}{P} = (\text{rpm}) \dots\dots\dots (2-1)$$

Donde :

F = Es la frecuencia en Hz del sistema de alimentación trifásico.

P = Es el número de polos del motor, que forman parte de la naturaleza del devanado del estator.

120 = Para que un motor trifásico de inducción produzca un campo magnético giratorio constante, los devanados de cada fase deben estar defasados en el estator en 120°, por lo que las corrientes se defasan también en 120° en el tiempo.

Como la frecuencia de la red eléctrica en México es de 60Hz, la velocidad del campo magnético giratorio varía en proporción inversa al número de polos del motor

Se ha mencionado que el rotor gira a una velocidad menor con respecto a la velocidad síncrona del campo magnético giratorio del estator, debido a esto existe un término llamado deslizamiento, el cual se define como la diferencia entre la velocidad síncrona (n_s) y la velocidad del rotor (n_r).

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \dots\dots\dots (2-2)$$

Para expresar el deslizamiento (S) como un porcentaje de la velocidad síncrona, se divide la diferencia obtenida de n_s y n_r entre n_s y se multiplica por cien, como se observa en la siguiente expresión:

$$S\% = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \dots\dots\dots (2-3)$$

Para la velocidad en el eje del rotor simplemente se despeja la ecuación (2-2), quedando:

$$n_r = n_s (1 - S) \dots\dots\dots (2-4)$$

De la ecuación de deslizamiento (2-2), se puede ver que si el rotor gira a la velocidad síncrona, $S = 0$, y si el rotor no se mueve, $S = 1$; por lo que se puede decir que las velocidades desarrolladas en el eje del motor están dentro de estos dos parámetros.

De lo anterior se puede concluir que cuando disminuye la velocidad del rotor el deslizamiento aumenta; y cuando la velocidad del rotor aumenta casi hasta llegar a la velocidad síncrona el deslizamiento es pequeño, casi despreciable.

Por ultimo se presentarán algunas consideraciones básicas como:

- a) Se le llama motor de inducción debido a que el devanado del estator induce en el rotor una fuerza electromotriz inducida.
- b) Como el rotor nunca gira a la velocidad síncrona, los motores de inducción también se conocen como motores asíncronos.
- c) También son llamados motores de campo giratorio, por que el campo magnético generado en el estator es giratorio.
- d) Y la consideración más importante es que el motor trifásico de inducción arranca por sí mismo, sin necesidad de medios externos de arranque.

2.3 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO

Un motor síncrono no es capaz de arrancar por si sólo, por lo que necesita de ayuda externa para lograrlo. Así que para empezar se dará una explicación de porque el motor síncrono no puede arrancar por sí mismo.

Las terminales del estator se conectan a su sistema trifásico de voltajes, y el devanado de campo que se encuentra en el rotor se alimenta de corriente directa. Por lo que en un motor síncrono se requieren de dos fuentes de alimentación, una de corriente alterna para el estator y otra de corriente directa para el rotor.

La figura 2.2 servirá para la siguiente explicación:

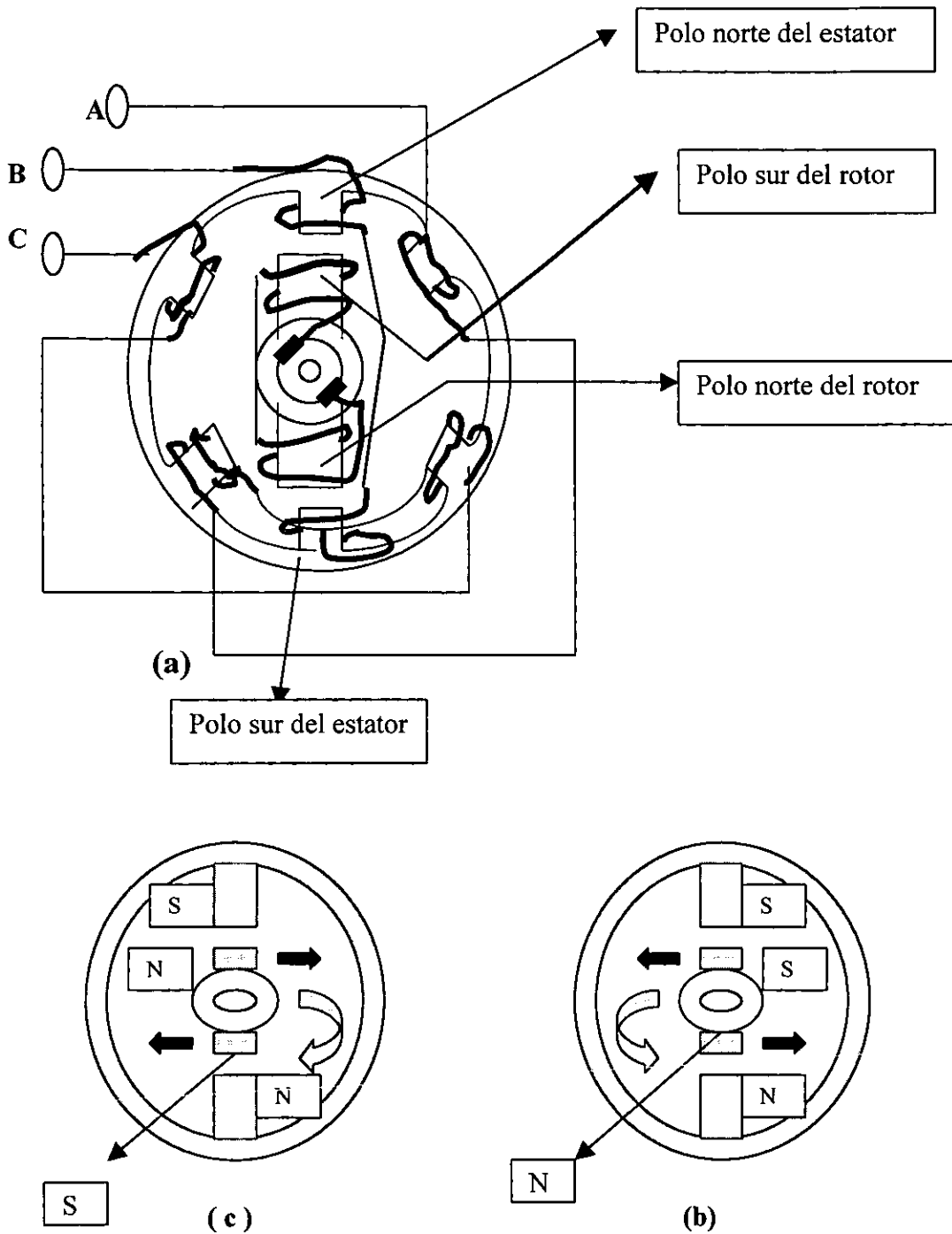


Figura 2.2. Figura obtenida del libro de “Curso de máquinas síncronas”. En el inciso (a) se muestra un motor síncrono de tres fases y dos polos; en el inciso (b) se presenta la situación en el motor en que el rotor gira en sentido contra horario a las manecillas del reloj; en el inciso (c) se presenta la situación en que el rotor gira en sentido de las manecillas del reloj.

En la figura se observa que hay polos tanto en el estator como en el rotor. Los polos del rotor mantendrán siempre la misma polaridad, ya que el devanado de campo del rotor se excita con corriente directa; en cambio los polos del estator cambiarán su polaridad continuamente, debido a que el devanado del estator se conecta a la corriente alterna. Ya que la corriente alterna cambia su polaridad cada medio período ($T/2$), los polos magnéticos del estator también cambiarán de polaridad cada medio período.

En el inciso (a) de la figura 2.2, se muestra la situación que ocurre durante la primera mitad del período, es decir, el rotor en la parte superior tiene un polo sur, el cual es atraído por el polo norte del estator, dando como consecuencia que el rotor gire en sentido de las manecillas del reloj.

Después de la primera mitad del período ($T/2$), se tiene la situación (b) de la figura 2.2, en donde la polaridad de los polos del estator ya se invirtió y en el rotor la polaridad de sus polos se conserva, ahora el polo sur del rotor es repelido por el polo sur del estator haciendo que el rotor gire en sentido contra horario a las manecillas del reloj.

Como el rotor tiende a moverse en un sentido y luego en otro, dichos movimientos se anulan entre sí, por lo cual el rotor no se mueve en ninguna dirección, por todo lo anterior se puede concluir que el motor síncrono no tiene par de arranque.

Ahora ya se sabe porque el motor síncrono no puede arrancar por sí sólo, para lograrlo necesita de ayuda externa, el proceso de arranque por medios externos se explicará a continuación.

Supóngase que el rotor gira en la dirección de las manecillas del reloj, siendo impulsado por medios externos; en sí el problema se tiene cuando el rotor gira en dirección contra horario, es decir, cuando en la segunda mitad del período la polaridad de los polos magnéticos del estator se invierten como se muestran en el inciso (b) de la figura 2.2. El problema se corrige si el rotor se hace girar por los medios externos, de tal forma que el polo sur del rotor quede bajo la acción del polo norte del estator como se observa en el inciso (c).

En el inciso (c) de la figura anterior, se puede ver que el rotor dio medio giro, para que ahora el polo norte se encuentre en la parte superior y el polo sur se encuentre ahora en la parte inferior; y así hacer que el polo sur del rotor sea atraído por el polo norte del estator, dando como consecuencia que el rotor gire en sentido de las manecillas del reloj. De esta forma se provocará que el rotor gire en un solo sentido con ayuda de los medios externos, provocando que el rotor siempre se encuentre de tal forma que los polos del estator tengan polaridad opuesta a los polos del rotor, provocando así la situación mostrada en el inciso (c) Y evitando por completo la situación del inciso (b) que era la que causaba el problema.

Ahora se provocará un par que es continuo en el motor síncrono y se podrá retirar el medio externo de arranque, ese par continuo hará que el rotor siga girando en sentido de las manecillas del reloj por sí mismo.

Para que sea posible obtener el par continuo en el motor síncrono, el rotor debe girar con la ayuda de los medios externos a la velocidad síncrona, velocidad con la que gira el campo magnético del estator.

Existen motores síncronos que para arrancar no necesitan de medios externos de arranque, ya que constan de los llamados devanados de amortiguamiento colocados en el rotor. Estos devanados son barras de cobre introducidas en los polos del rotor formando algo parecido a la jaula de ardilla, provocando que el motor síncrono arranque como un motor de inducción de jaula de ardilla.

Se había mencionado anteriormente que el motor síncrono requiere de dos fuentes de alimentación, una de corriente alterna para el estator y otra de corriente directa para el rotor. La forma de arrancar un motor síncrono con devanados amortiguadores es la siguiente:

- 1) “El devanado de campo del rotor debe desconectarse de la fuente de corriente directa y cortocircuitar ambas terminales”.(1)
- 2) “Al estator se le aplica un sistema de voltajes trifásicos, que producen un campo magnético giratorio en el estator, este campo induce una fuerza electromotriz inducida en los devanados de amortiguamiento, creando una corriente y posteriormente un campo magnético en el rotor, que al interactuar con el campo del estator hace que el rotor gire. Como se pudo observar es la forma en que arranca un motor de inducción jaula de ardilla y dicho procedimiento se utiliza para arrancar a los motores síncronos que constan de devanados de amortiguamiento”. (1)
- 3) “Cuando el rotor alcanza aproximadamente el 95% de la velocidad síncrona, se quita el cortocircuito del devanado de campo del rotor y las terminales se conectan a la fuente de corriente directa, haciendo que se produzca un campo magnético en el rotor, este campo será enganchado por el campo magnético giratorio del estator provocando que el motor opere a la velocidad de sincronismo”.(1)

Es importante que el motor síncrono se arranque sin carga en su eje o flecha, una vez que el motor alcancé su velocidad síncrona se puede acoplar la carga en su eje.

(1) Los tres puntos anteriores fueron obtenidos del libro de “Máquinas Eléctricas” de Stephen J. Chapman.

Se puede decir que la operación básica de un motor síncrono, es que al conectar las terminales del estator a un sistema trifásico de voltajes se producen corrientes trifásicas en los devanados del estator, dichas corrientes producen un campo magnético giratorio y constante, que gira a una velocidad dada por la ecuación (2-1):

$$n_s = \frac{(120) f}{P} \dots\dots\dots (2-1)$$

Es decir, el campo magnético del estator gira a la velocidad síncrona. Al conectar el devanado de campo del rotor a la corriente directa, se produce un campo magnético de estado estacionario en el rotor, debido a la circulación de la corriente de campo en el devanado de campo del rotor.

En el motor síncrono hay presentes dos campos magnéticos uno giratorio y el otro estacionario, por lo que el campo del rotor tenderá a alinearse (engancharse) con el campo del estator, para que así el rotor gire a la misma velocidad del campo magnético giratorio del estator, es decir, a la velocidad síncrona.

Por ultimo se presentarán algunas consideraciones básicas como:

- a) El motor síncrono en comparación con el motor de inducción sí ópera a la velocidad síncrona.
- b) En el motor síncrono se tiene una velocidad constante que no se puede variar, como se puede hacer en el motor de inducción de rotor devanado
- c) Los motores síncronos requieren de dos tipos de corriente para poder operar: alterna y directa, y los motores de inducción sólo de alterna.
- d) Los motores síncronos sin devanados de amortiguamiento no arrancan por sí mismo y los motores de inducción sí.
- e) Los motores síncronos con devanados de amortiguamiento arrancan como motores de inducción y operan como motores síncronos, es decir, tienen propiedades en el arranque de un motor de inducción y propiedades de motor síncrono al alcanzar la velocidad síncrona.
- f) Los motores síncronos no pueden arrancar con carga como lo puede hacer el motor de inducción.

2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Como el motor de inducción opera bajo el principio de inducción electromagnética, es decir, en base a la fuerza electromotriz inducida, a éste motor se le podría llamar transformador giratorio. Por lo que haciendo una analogía con el transformador, el circuito primario sería el devanado del estator y el circuito secundario sería el devanado del rotor.

De la relación anterior, se puede decir que el circuito equivalente de un motor de inducción debe ser muy similar al circuito equivalente de un transformador. Por lo que se empezará sabiendo como está constituido el circuito del rotor.

Como se sabe el campo magnético giratorio producido en el estator induce una fuerza electromotriz inducida en el devanado del rotor, esta fuerza electromotriz inducida se presenta en el rotor como una tensión inducida o voltaje inducido, esta tensión inducida en el rotor es proporcional al deslizamiento.

Se sabe que cuando disminuye la velocidad del rotor el deslizamiento aumenta hasta llegar a $S=1$; y cuando la velocidad del rotor aumenta casi hasta llegar a la velocidad síncrona "S" es casi cero.

Para que $S=1$, es necesario que el rotor esté quieto en pleno funcionamiento, para lograr esto el rotor se bloquea, de tal forma que el rotor no pueda girar. Por lo que cuando $S=1$ la tensión inducida en el rotor es máxima.

Cuando "S" es tan pequeño casi hasta llegar a cero, la velocidad del rotor aumenta casi hasta llegar a la velocidad síncrona, y por consecuencia la tensión inducida en el rotor es mínima, es decir, disminuye al aumentar la velocidad.

Se le denominará "ERB" a la máxima tensión inducida en el rotor, cuando dicho rotor esta bloqueado. Ahora para conocer la tensión inducida a cualquier velocidad a la que esté operando el rotor, simplemente se obtiene el deslizamiento "S" con la ayuda de la ecuación (2-2) y se multiplica por "ERB", por lo que:

$$E_R = (S) (E_{RB}) \dots\dots\dots (2-5)$$

Donde:

ER = Es la fuerza electromotriz inducida o tensión inducida en el rotor.

S = El deslizamiento que se tiene a una determinada velocidad del rotor.

ERB =Es la máxima tensión inducida en el rotor.

El voltaje inducido “ER” forma parte del circuito del rotor, además de otros elementos como:

RR = Que es la resistencia eléctrica del devanado del rotor, es de magnitud constante e independiente del deslizamiento.

LR = Que es la inductancia del devanado del rotor.

La inductancia propia del rotor, así como la frecuencia del rotor (FR) forman parte de la reactancia del rotor (XR) como se muestra en la siguiente expresión:

$$X_R = (W_R) (L_R) j = j (2\pi f_R) (L_R) \dots\dots\dots (2-6)$$

Se dijo al principio que el motor de inducción trabaja bajo el mismo principio que un transformador, incluso que se le podría llamar transformador giratorio, pero hay una diferencia entre ambos y esa es la frecuencia.

En un transformador la frecuencia que hay en el primario como en el secundario es la misma, pero en el motor de inducción si varía, es decir, la frecuencia que hay en el estator y que se obtiene del sistema trifásico de voltaje no es la misma que se tiene en el rotor. La única forma en que la frecuencia puede ser la misma tanto en el estator como en el rotor, es que el rotor se bloquee de tal forma que no pueda girar.

Si el rotor está bloqueado, el deslizamiento es uno (S=1) y la velocidad del rotor es cero (nr = 0) y la relación de frecuencias del estator y del rotor es :

$$f_E = f_R \dots\dots\dots (2-7)$$

Si el rotor gira a la velocidad síncrona, el deslizamiento es cero (S=0) y la frecuencia en el rotor es cero.

Para conocer la frecuencia en el rotor a cualquier velocidad a la que esté operando el rotor, simplemente se obtiene el deslizamiento “S” y se multiplica por “ fe “ que es la frecuencia del rotor, por lo que :

$$f_R = (S) (f_E) \dots\dots\dots (2-8)$$

Con esta nueva expresión, la ecuación (2-6) de la reactancia del rotor queda de la siguiente manera :

$$X_R = j (2\pi f_R) (L_R) \dots\dots\dots (2-6)$$

$$X_R = j [2\pi (S) (f_E)] (L_R) = j S [2\pi (f_E)] (L_R) \dots\dots\dots (2-9)$$

Tomando como “ X_{RB} “ que es la reactancia a rotor bloqueado y que es igual a $(2\pi f_E) (L_R)$, entonces la ecuación (2-9) queda :

$$X_R = j (S) (X_{RB}) \dots\dots\dots (2-10)$$

Así el modelo del circuito del rotor, en un motor de inducción es :

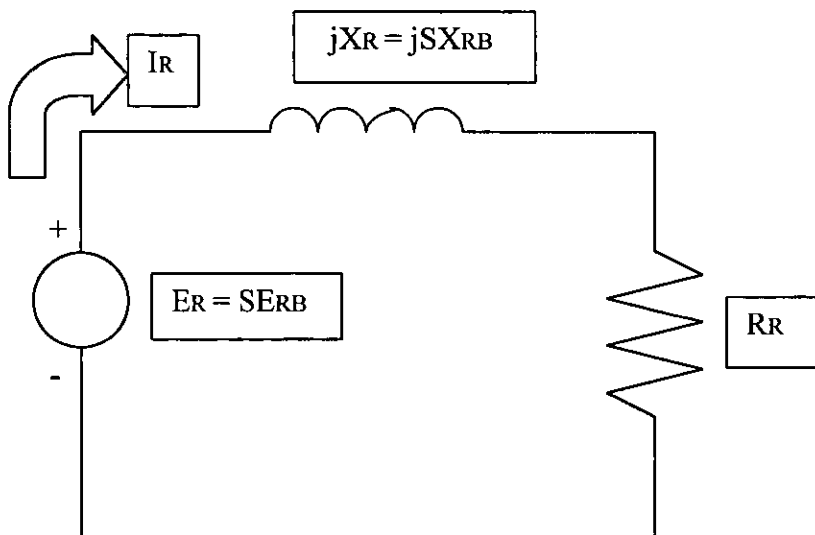


Figura 2.3. Modelo del circuito eléctrico del rotor de un motor de inducción, obtenido del libro de “Máquinas Eléctricas” de Stephen J. Chapman.

Para calcular la corriente presente en el rotor se aplica la ley de Kirchoff de voltajes al circuito anterior.

$$E_R = E_L + E_R$$

Sí : $E_L = (jX_R) (I_R)$
 $E_R = (R_R) (I_R)$

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Entonces : $E_R = (jX_R)(I_R) + (R_R)(I_R)$

Factorizando I_R : $E_R = I_R (R_R + jX_R)$

Despejando I_R : $I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \dots\dots\dots (2-11)$

Para conocer la corriente en el rotor a cualquier velocidad a la que esté operando el rotor, la ecuación anterior quedará :

$$I_R = \frac{SE_{RB}}{R_R + jSX_{RB}} \dots\dots\dots (2-12)$$

Dividiendo el numerador y el denominador entre el deslizamiento "S", la ecuación anterior queda :

$$I_R = \frac{E_{RB}}{\frac{R_R}{S} + jX_{RB}} \dots\dots\dots (2-13)$$

Y el circuito anterior del rotor, ahora quedará de la siguiente forma :

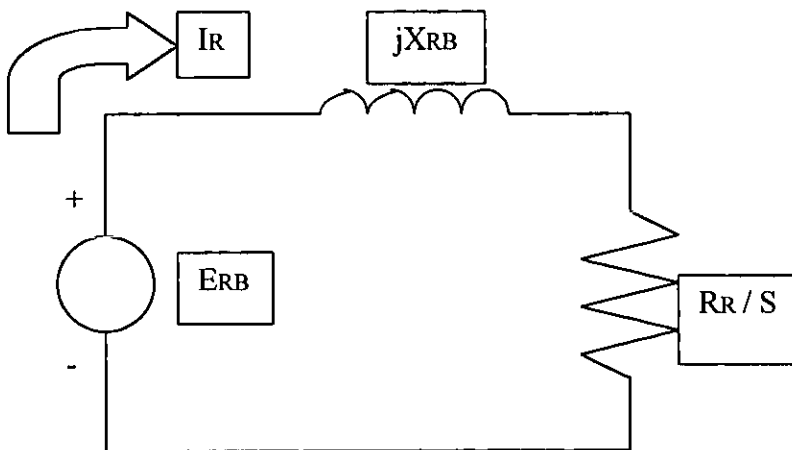


Figura 2.4. Modelo del circuito eléctrico del rotor de un motor de inducción, con el efecto del deslizamiento en la resistencia del rotor; circuito obtenido del libro de " Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

Donde :
$$Z_{eqR} = \frac{R_R}{S} + jX_{RB} \dots\dots\dots (2-14)$$

Z_{eqR} = Es la impedancia equivalente del circuito del rotor.

En el circuito, se puede observar que es alimentado por una fuente de voltaje “ E_{RB} ” (tensión inducida máxima que se tiene cuando el rotor está bloqueado); además de tener una reactancia constante “ X_{RB} ” (reactancia a rotor bloqueado); y se tiene presente también una resistencia que es variable, ya que es afectada por el deslizamiento.

En el circuito anterior se tiene una resistencia variable (R_R/S), pero anteriormente se había mencionado que la resistencia del rotor es de magnitud constante y que además es independiente del deslizamiento. Por lo que se puede concluir que el término (R_R / S) está formado por dos resistencias, una es la resistencia real del rotor y la otra es la resistencia de carga ficticia, como se muestra en la siguiente ecuación :

$$\frac{R_R}{S} = R_R + R_R \left(\frac{1 - S}{S} \right) \dots\dots\dots (2-15)$$

Donde :

R_R = Es la resistencia real del rotor, la que es de magnitud constante e independiente del deslizamiento.

$R_R \left(\frac{1 - S}{S} \right)$ = Es la resistencia de carga ficticia, la que en realidad varía según el deslizamiento.

Con este nuevo concepto el circuito anterior ahora quedara como :

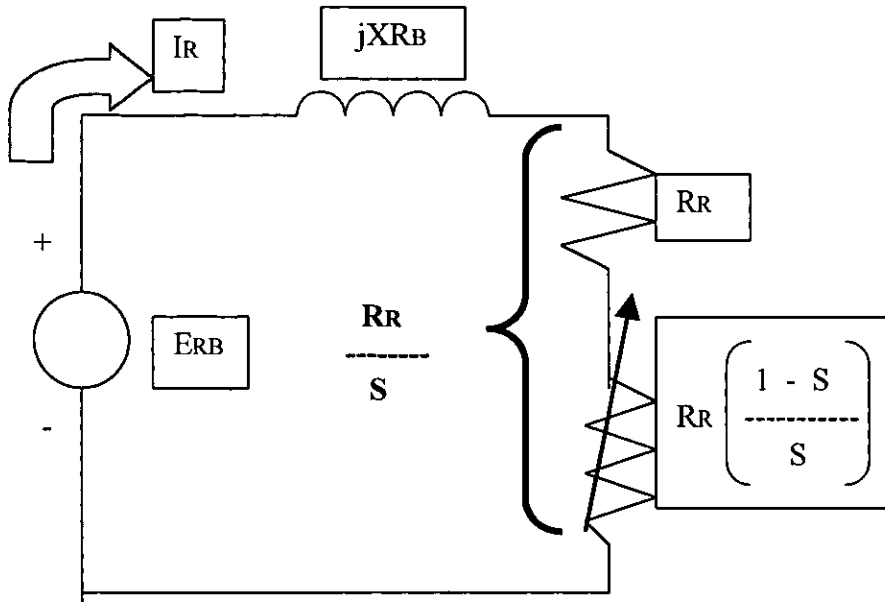


Figura 2.5. Circuito eléctrico definitivo del rotor de un motor de inducción en el que se tiene presente la resistencia del rotor “ R_R ” y la resistencia de carga ficticia $R_R [(1-S)/S]$, circuito obtenido del libro de “Máquinas Eléctricas y Transformadores” de Kosow L. Irving.

Por lo que este circuito representa verdaderamente al rotor; con una fuente de alimentación “ E_{RB} ” que es la tensión máxima inducida a rotor bloqueado; una reactancia “ X_{RB} ” que es la reactancia a rotor bloqueado; además de la resistencia fija del rotor “ R_R ” que es la que causa pérdidas en el rotor; y la resistencia variable $R_R [(1 - S) / S]$ que es la causante de desarrollar potencia en el rotor a fin de producir par.

Para poder obtener el circuito definitivo equivalente de un motor de inducción por fase, es necesario que el circuito del rotor sea referido al lado del estator, como se hace con los transformadores, en donde los voltajes, corrientes e impedancias del lado del secundario se pueden referir al lado del primario por medio de la relación de espiras del transformador.

En el caso del motor de inducción dicha relación de espiras está dada por a_{ef} , como se observa en el siguiente modelo del circuito de un transformador, que se utiliza para representar al estator y al rotor de un motor de inducción.

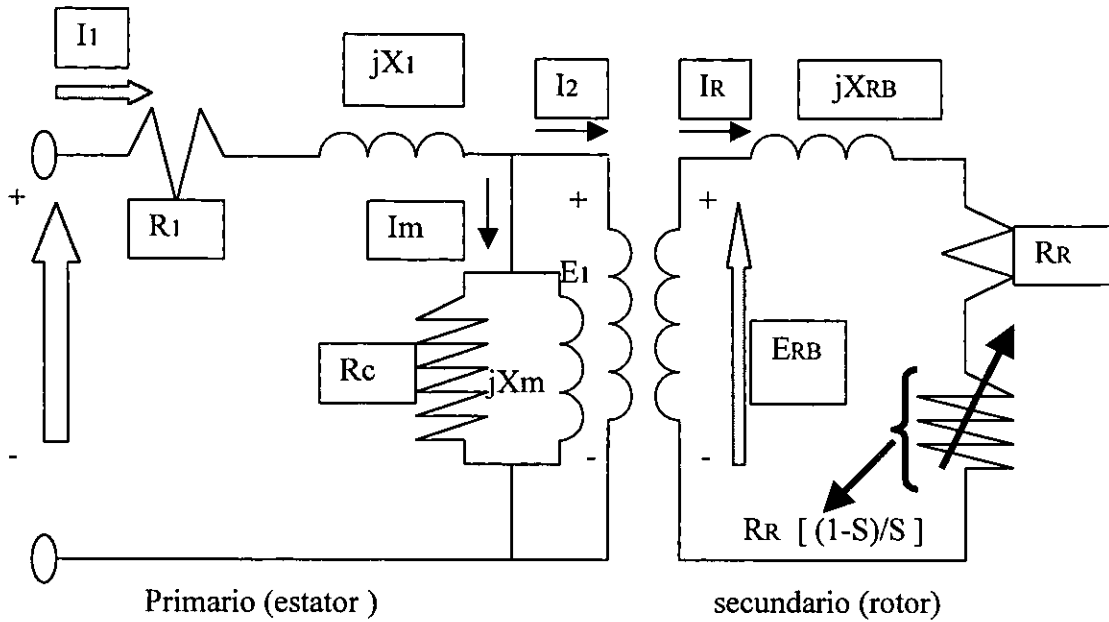


Figura 2.6. Modelo eléctrico de un transformador que servirá para representar el modelo eléctrico de un motor de inducción. En este modelo eléctrico del transformador se muestra una analogía con el circuito del estator y del rotor, los cuales se encuentran acoplados por medio de un transformador ideal con una relación de espiras de a_{ef} .

Con la relación de espiras a_{ef} en un motor de inducción :

El voltaje del rotor “ E_{RB} ” referido al lado del estator quedara :

$$E_1 = (a_{ef}) (E_{RB}) \dots\dots\dots (2-16)$$

La corriente del rotor “ I_R ” referida al lado del estator quedará :

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}} \dots\dots\dots (2-17)$$

La impedancia del rotor “ $Z_{eqR} = R_R + R_R \frac{1 - S}{S} + jX_{RB}$ ” referida quedará como :

$$Z_2 = (a_{ef})^2 \left(R_R + R_R \left(\frac{1 - S}{S} \right) + jX_{RB} \right)$$

En donde :

$$Z_2 = (a_{ef})^2 \left(\frac{R_R}{S} + jX_{RB} \right) \dots\dots\dots (2-18)$$

$$R_2 = (a_{ef})^2 [R_R] \dots\dots\dots (2-19)$$

$$X_2 = (a_{ef})^2 [jX_{RB}] \dots\dots\dots (2-20)$$

Por lo que ahora el circuito equivalente definitivo del motor de inducción es el siguiente :

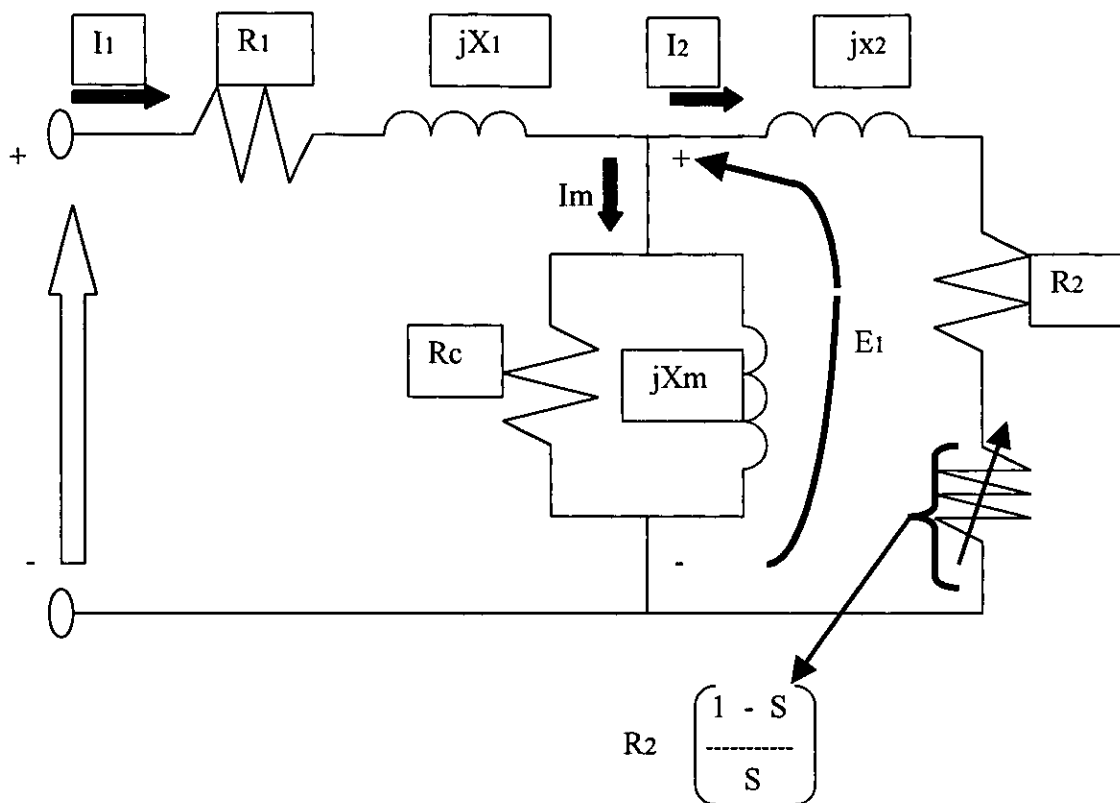


Figura 2.7. Circuito eléctrico equivalente por fase de un motor de inducción, circuito obtenido del libro de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

Por ultimo se presentarán algunas consideraciones básicas como :

- a) El funcionamiento de un motor de inducción depende de que el circuito del estator induzca una fuerza electromotriz inducida o tensión inducida en el circuito del rotor.
- b) La fuerza electromotriz o tensión inducida es proporcional al deslizamiento.
- c) Cuando la velocidad del rotor disminuye, el deslizamiento aumenta y también la fuerza electromotriz inducida o el voltaje inducido.
- d) Cuando la velocidad del rotor aumenta, el deslizamiento disminuye y también la fuerza electromotriz inducida o la tensión inducida.
- e) La máxima tensión inducida se obtiene cuando el rotor del motor de inducción se bloquea, es decir, se frena de tal forma que cuando se pone a funcionar el motor en condiciones normales de operación el rotor no se mueva.
- f) La frecuencia en el estator y en el rotor es igual sólo cuando :
 - El rotor está bloqueado.
 - En el momento del arranque antes de que el rotor comience a girar.
- g) La frecuencia del rotor es directamente proporcional a la frecuencia del estator con respecto al deslizamiento.
- h) En el circuito del rotor se tienen dos resistencias presentes
 - La resistencia real del rotor "RR".
 - La resistencia de carga ficticia.
- i) Como un motor de inducción trabaja bajo el mismo principio de voltajes inducidos igual que un transformador, los circuitos equivalentes son similares.

2.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR SÍNCRONO

Los motores síncronos son máquinas que necesitan de dos fuentes de energía eléctrica para su operación, como una fuente de corriente alterna trifásica para el estator y otra de corriente directa para el rotor.

El circuito del rotor está formado por una resistencia " R_f " que es la resistencia del devanado de campo del rotor, también consta de una inductancia " L_f " que es la inductancia del devanado de campo del rotor, además de una resistencia variable " R_{aj} " (reóstato) con la cual se puede manipular la corriente de campo " I_f ". Como el circuito de campo del rotor es alimentado de corriente directa, también está presente un voltaje " V_f ", como se observa en la siguiente figura :

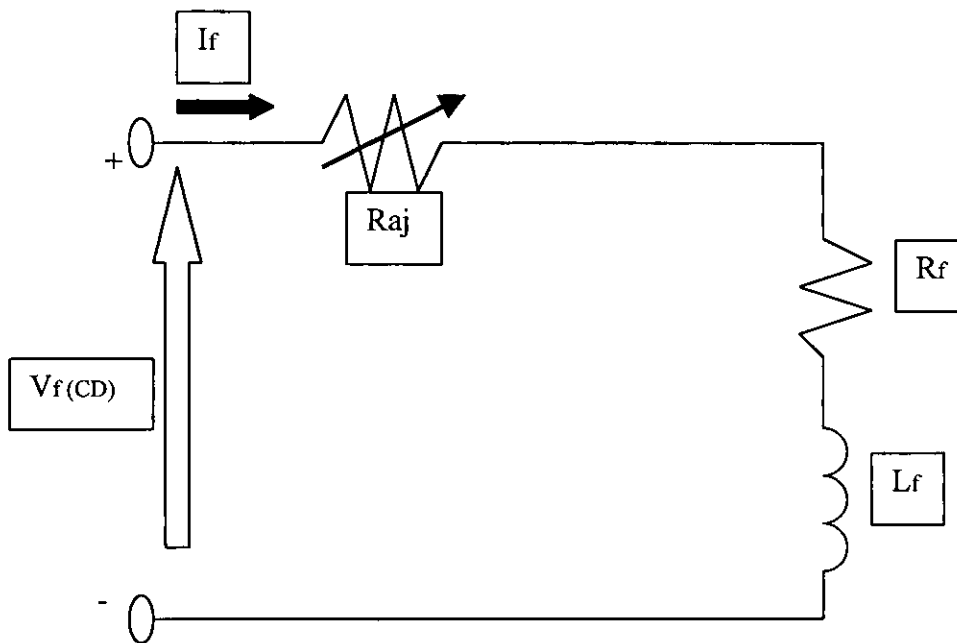


Figura 2.8. Circuito de campo del rotor de un motor síncrono, circuito obtenido del libro de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

Como el circuito de campo del rotor es un circuito de excitación independiente, se tiene presente un voltaje generado internamente " E_a ", esto quiere decir que cuando el rotor se ve obligado a girar teniendo en su circuito de campo el efecto de la corriente directa, se produce un campo magnético en el rotor el cual induce una fuerza electromotriz o un voltaje generado internamente " E_a " en el devanado del estator.

Así que en el circuito del estator está presente un voltaje generado “Ea”, también se tiene una resistencia “Ra” que es la resistencia del devanado del estator, conocida también como resistencia de armadura debido a que el devanado del estator es la armadura, y en consecuencia una “Xs” que es la reactancia síncrona de la máquina, por lo que el circuito del estator quedará como se muestra en la siguiente figura :

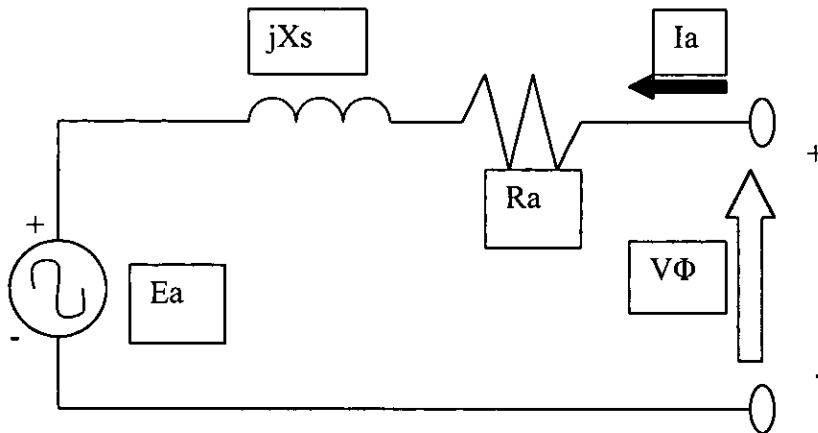


Figura 2.9. Circuito eléctrico del estator de un motor síncrono por fase, circuito obtenido del libro de “ Máquinas Eléctricas” de Stephen J. Chapman.

En el circuito se muestra un voltaje “VΦ” que es uno de los voltajes trifásicos que alimentan al estator, además de la circulación de una corriente de armadura “Ia” que se obtiene del sistema trifásico que se conecta a las terminales del estator.

Al aplicar la ley de Kirchhoff de voltajes al circuito se obtiene el voltaje de fase :

$$V\Phi = E_a + (jX_s)(I_a) + (R_a)(I_a) \dots\dots\dots (2-21)$$

Factorizando “Ia” la ecuación (2-21) quedará :

$$V\Phi = E_a + I_a (R_a + jX_s) \dots\dots\dots (2-22)$$

Despejando “Ia” de la ecuación anterior.

$$I_a = \frac{V\Phi - E_a}{R_a + jX_s} \dots\dots\dots (2-23)$$

Se obtiene una expresión para la corriente de armadura.

La expresión para el voltaje generado internamente es :

$$E_a = V\Phi - jX_s (I_a) - R_a (I_a)$$

$$E_a = V\Phi - I_a (R_a + jX_s) \dots\dots\dots (2-24)$$

Uniendo el circuito de campo del rotor y el circuito del estator por fase, se obtiene un circuito equivalente definitivo de un motor síncrono, como se muestra en la siguiente figura.

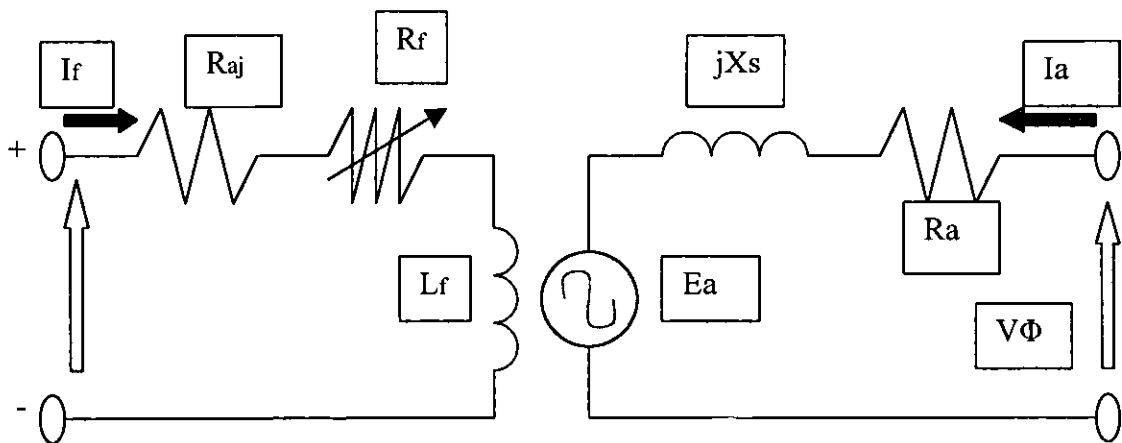


Figura 2.10. Circuito eléctrico equivalente por fase de un motor síncrono, obtenido del libro de “Máquinas Eléctricas” de Stephen J. Chapman.

Ahora se mostrará un circuito equivalente, pero a diferencia del anterior este circuito consta de las tres fases que alimentan al estator de un voltaje trifásico.

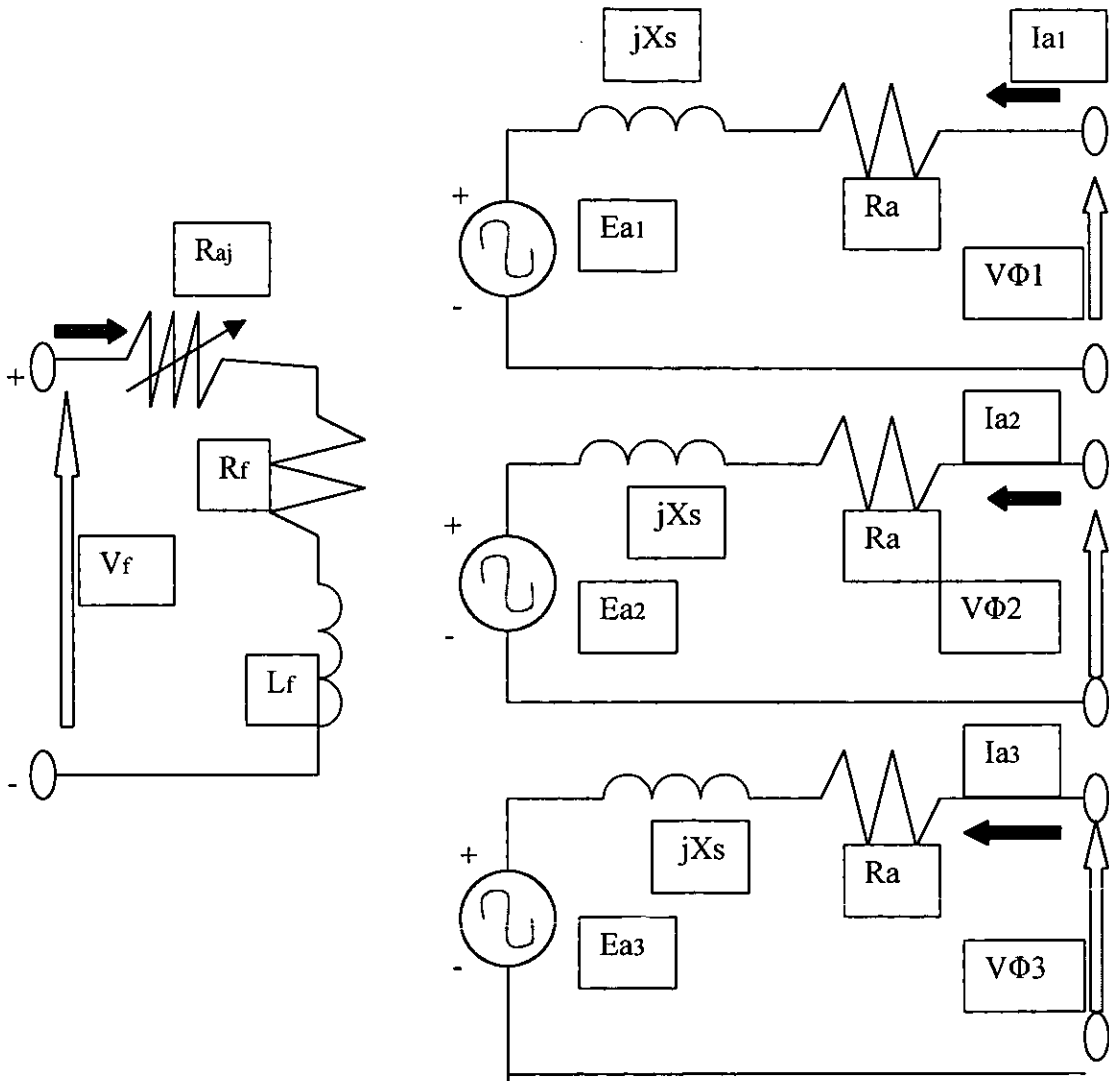


Figura 2.11. Circuito equivalente completo de un motor síncrono trifásico, obtenido del libro de “Máquinas Eléctricas” de Stephen J.Chapman.

Por ultimo se presentarán algunas consideraciones básicas como :

- a) Los motores síncronos son máquinas doblemente excitadas, ya que el circuito de campo del rotor se excita con corriente directa y el circuito del estator con corriente alterna.
- b) El circuito de campo del rotor induce una fuerza electromotriz, conocida como “Ea” voltaje generado internamente en el devanado trifásico del estator.
- c) La única frecuencia existente es la del estator “fe”, razón por la cual, la ecuación $(2-1) \quad n_s = [(120) f / P]$ relaciona la velocidad del rotor con la frecuencia eléctrica del estator, además es valida ya que el rotor gira a la misma velocidad del campo magnético del estator.
- d) El voltaje generado “Ea” depende de la corriente de campo “If”, la cual se puede variar con ayuda de una resistencia variable “ Raj” o reóstato.
- e) El reóstato y la fuente de corriente directa suelen ser externas.
- f) La “Xs” (reactancia síncrona) se obtiene de la suma de la reactancia de armadura y la auto inductancia de las bobinas que forman el devanado del estator.
- g) En el motor de inducción el estator induce una fuerza electromotriz o voltaje inducido en el devanado del rotor, pero en el motor síncrono la excitación del devanado de campo induce una fuerza electromotriz en el devanado del estator, es decir, ocurre la operación inversa en el motor síncrono con respecto al motor de inducción.
- h) Como el rotor de un motor síncrono gira a velocidad síncrona, misma velocidad del campo magnético giratorio del estator, por esto no existe el termino desplazamiento en el motor síncrono.

CAPÍTULO 3

PÉRDIDAS EN LOS
MOTORES DE INDUCCIÓN
Y SÍNCRONOS.

PÉRDIDAS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS

3.1 INTRODUCCIÓN

Una de las características fundamentales que poseen los motores eléctricos es la eficiencia, este termino nos dice que tan bueno es un motor para poder convertir la energía eléctrica a energía mecánica. En dicho proceso de conversión se tienen pérdidas las cuales evitan que el 100% de la energía eléctrica que el motor toma de la línea sea convertida en su totalidad a energía mecánica, este problema de las pérdidas hace que un motor no pueda tener una eficiencia del 100%, sin embargo es posible reducir las pérdidas que se tienen en el motor al llevar a cabo el proceso de conversión. Al reducir las pérdidas la eficiencia presente en el motor aumentará por lo que aprovechara más la energía eléctrica que toma de la línea, todo esto nos da una idea de lo importante que son las pérdidas en un motor, y es por eso que en este capítulo se darán descripciones de las pérdidas más comunes en los motores de inducción y síncronos, además de que se mostrara la forma en que dichas pérdidas se van presentando en cada uno de los motores, también se presentarán algunas formulas con las cuales es posible obtener las pérdidas por medio de un calculo numérico.

A fin de cada tema se darán algunas consideraciones básicas, referente a dicho tema con relación a un tipo de motor en particular y en algunas ocasiones se harán comparaciones entre ambos motores.

3.2 PÉRDIDAS EN LOS MOTORES

Como se sabe, un motor eléctrico es una máquina que sirve para convertir energía eléctrica tomada de la red de distribución a energía mecánica en el eje del motor, para así poder desarrollar un trabajo.

Cuando existe una conversión de energía, como en el caso del motor eléctrico se tienen pérdidas a lo largo del proceso, es por eso que la energía tomada de la línea no es convertida al 100% en energía mecánica, por lo que se puede decir que la diferencia entre la energía eléctrica tomada de la red y la energía mecánica obtenida en el eje del motor, son las pérdidas que se tienen en los motores eléctricos.

Las pérdidas en los motores eléctricos se deben a diversas causas, es por eso que cada pérdida tiene un nombre determinado, según la causa que la provoca. Las pérdidas se reflejan en el motor como : un incremento de temperatura y como reducción en su eficiencia.

Los diferentes tipos de pérdidas presentes en los motores eléctricos se describirán a continuación :

3.2.1 PÉRDIDAS MECÁNICAS.

En las pérdidas mecánicas se incluyen las llamadas pérdidas por fricción y ventilación que son causa de la fricción o el rozamiento en los valeros, así como en los anillos colectores y en las escobillas en el caso de motores eléctricos dotados con estos aditamentos, también la acción del aire en los ventiladores forma parte de este tipo de pérdidas, ya que dependen de la velocidad del rotor y de la turbulencia producida por las partes en movimiento.

3.2.2 PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO O EN EL HIERRO

Este tipo de pérdidas se producen en el circuito magnético del motor, y se deben a las alteraciones del campo magnético en el material activo del estator y el rotor por efecto de histéresis y de corrientes parásitas.

Las pérdidas en el núcleo o en el hierro se deben principalmente a la histéresis y a las corrientes parásitas.

Las pérdidas por histéresis se producen en los materiales magnéticos que son sometidos a remagnetización temporal o parcial, ya sea por la acción en la variación del flujo magnético o por la rotación de un campo magnético variable.

Las pérdidas por corrientes parásitas aparecen en los circuitos magnéticos, y se deben a la presencia de una fuerza electromotriz inducida.

3.2.3 PÉRDIDAS EN EL COBRE O POR EFECTO JOULE.

Se deben a la circulación de corriente eléctrica por los devanados del estator y del rotor y se manifiestan en forma de calor, produciendo un aumento de temperatura con respecto a la del ambiente.

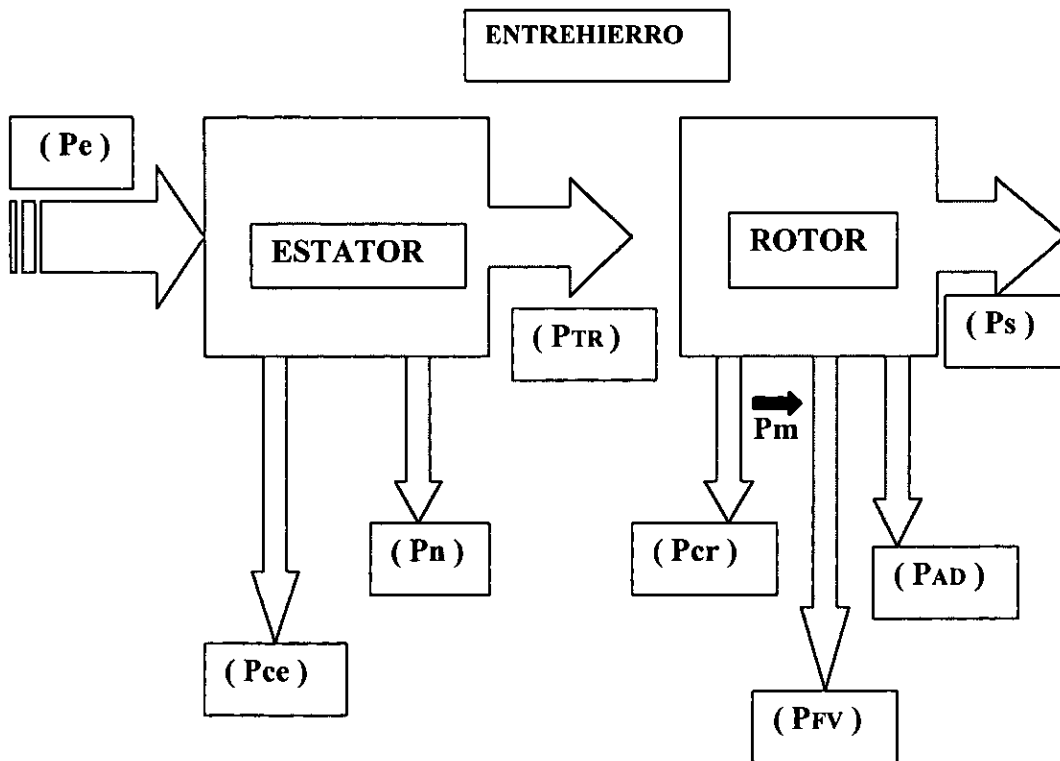
3.2.4 PÉRDIDAS ADICIONALES.

Existe otro tipo de pérdidas que se presentan de forma secundaria en los motores eléctricos, es decir, no tienen la misma importancia que las pérdidas mencionadas anteriormente, pero sin embargo existen y es inevitable no tomarlas en cuenta.

3.3 PÉRDIDAS EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN.

Anteriormente se dijo que cuando un motor convierte la energía eléctrica a energía mecánica existen pérdidas, estas pérdidas se dan en forma de potencia activa o real (P) y se presentan durante todo el proceso de conversión de la energía.

En el siguiente diagrama a bloques, se muestra la ubicación en la cual se van presentando los diferentes tipos de pérdidas en los motores de inducción.



Donde :

P_e = Potencia de entrada.

P_{ce} = Pérdidas en el cobre del estator.

P_n = Pérdidas en el núcleo.

P_m = Potencia mecánica.

P_{TR} = Potencia de entrehierro.

P_{cr} = Pérdidas en el cobre del rotor.

P_{FV} = Pérdidas por fricción y ventilación.

P_{AD} = Pérdidas adicionales.

P_s = Potencia de salida.

Figura 3.1. Diagrama a bloques que representa como se van presentando las pérdidas en un motor de inducción. Este diagrama a bloques es modificado del original encontrado en el libro de " Máquinas Eléctricas" de StephenJ. Chapman.

La descripción del diagrama a bloques es la siguiente :

- i. Como las terminales del estator se conectan a un sistema trifásico de voltajes, la potencia de entrada (P_e) es eléctrica y es la que se desea convertir a potencia mecánica.
- ii. La potencia eléctrica de entrada llega al devanado del estator, provocando las primeras pérdidas que se tienen en el motor y que son las pérdidas en el cobre (P_{ce}) o también denominadas pérdidas por efecto joule. Estas pérdidas se disipan en forma de calor en los devanados del estator.
- iii. Otra cantidad de potencia se pierde por los efectos de histéresis y de las corrientes parásitas en el estator, denominadas pérdidas en el núcleo del estator (P_n).

Las pérdidas en el núcleo o en el hierro se presentan tanto en el estator como en el rotor, pero debido a que el rotor opera a velocidades cercanas a la síncrona y por consecuencia con un deslizamiento pequeño las pérdidas en el núcleo ocurridas en el rotor son muy pequeñas en comparación con las pérdidas en el núcleo que se tienen en el estator, por lo que se puede decir que las pérdidas en el núcleo se ubican en el estator.

- iv. La potencia restante que se tiene hasta ahora en el estator, es transferida a través del entrehierro por inducción electromagnética al rotor. A ésta potencia se le conoce como potencia de entrehierro (P_{TR}) y es parte de la potencia eléctrica de entrada (P_e) que resta en este punto.
- v. La potencia transferida al rotor (P_{TR}) que es sólo una porción de la potencia total de entrada (P_e), sufre otra pérdida al llegar al rotor conocida como pérdidas en el cobre del rotor (P_{cr}), la cual se disipa como calor.
- vi. La potencia sobrante hasta ahora de la potencia de entrada, es convertida a potencia mecánica (P_m) la cual realiza un trabajo útil.
- vii. La potencia mecánica (P_m) sigue su flujo hasta llegar al eje del motor, pero antes de esto, sufre una pérdida en el rotor que es la pérdida por fricción y ventilación (P_{FV}).
- viii. Después de las pérdidas por fricción y ventilación, la potencia mecánica que sobra pierde otra pequeña porción de su potencia con las pérdidas adicionales (P_{AD}), una pérdida casi despreciable.
- ix. Por fin la potencia mecánica sobrante hasta ahora es la que se encuentra disponible en el eje del motor, capaz de realizar un trabajo útil y se le conoce como potencia mecánica de salida (P_s).

Ahora con la ayuda del circuito equivalente del motor de inducción, se pueden obtener las expresiones para las potencias de cada una de las pérdidas mostradas en el diagrama a bloques.

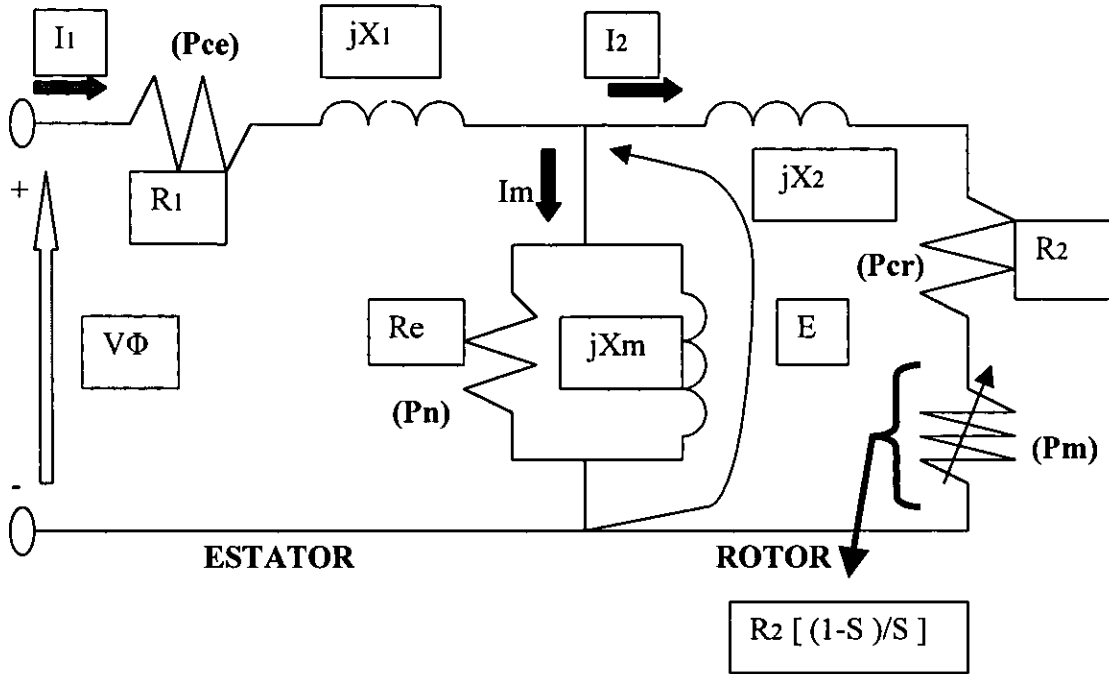


Figura 3.2. Circuito eléctrico equivalente por fase de un motor de inducción, este circuito fue mostrado en el capítulo 3, pero ahora se presentan las pérdidas que sufren los motores de inducción en dicho circuito eléctrico.

Para empezar, la potencia eléctrica de entrada (P_e) que se obtiene de un sistema trifásico de voltajes esta dada por la siguiente expresión :

$$P_e = \sqrt{3} (V_T)(I_L) \cos \theta \dots\dots\dots (3-1)$$

Donde :

- V_T = Es el voltaje trifásico que se obtiene de la línea.
- I_L = Corriente de línea que consume el motor.
- $\cos \theta$ = Es el factor de potencia al que está operando el motor.

Según el diagrama a bloques, la primera pérdida que se tiene es en el cobre (Pce) ubicada en el estator, su expresión esta dada por :

$$P_{ce} = 3 (I_1)^2 (R_1) \dots\dots\dots (3-2)$$

Con esta expresión se obtienen las pérdidas totales en el cobre del estator de las tres fases de dicho estator.

La segunda pérdida en el estator es en el núcleo y su expresión es :

$$P_n = \frac{3 (E_1)^2}{R_c} \dots\dots\dots (3-3)$$

Ahora la potencia del entrehierro (PTR) que es la llamada potencia transferida al rotor, la cual es igual a la potencia eléctrica de entrada menos las dos pérdidas que se dieron en el estator, por lo que :

$$PTR = P_e - P_{ce} - P_n \dots\dots\dots (3-4)$$

Otra forma de obtener "PTR" es observando el circuito equivalente del motor de inducción en la parte del rotor, ahí se puede ver que la única forma en que se pierde la potencia "PTR" es tanto en "R2" (resistencia real del rotor) y en " R2 [(1-S)/S]" (resistencia de carga ficticia), por lo que otra forma de obtener "PTR" es :

$$PTR = 3 (I_2)^2 \left(R_2 + R_2 \left(\frac{1 - S}{S} \right) \right)$$

$$PTR = 3 (I_2)^2 \left(\frac{R_2}{S} \right) \dots\dots\dots (3-5)$$

Ya en el rotor, la primera pérdida que se tiene es en el cobre (Pcr), aquí sólo “R2” es la única que causad pérdidas en el rotor por disipación de calor, por lo que la expresión para ésta pérdida es :

$$P_{cr} = 3 (I_2)^2 (R_2) \dots\dots\dots (3-6)$$

Obsérvese que cuando se despeja a “S” (desplazamiento) de la ecuación (3-5), de tal forma que los términos “PTR” Y “S” queden juntos, la ecuación quedará como :

$$(PTR) (S) = 3 (I_2)^2 (R_2)$$

Ahora se ve que el término “3(I2)² (R2)” es igual a “Pcr”, según la ecuación (3-6), por lo que la expresión anterior quedara :

$$(S) (PTR) = P_{cr}$$

o también :

$$P_{cr} = (S) (PTR) \dots\dots\dots (3-7)$$

De aquí se observa que las pérdidas en el cobre del rotor se hacen más significativas conforme el deslizamiento se hace más grande.

Posteriormente viene la conversión a potencia mecánica según el diagrama a bloques, por lo que se obtiene de la diferencia entre la potencia transmitida al rotor y la pérdida en el cobre del rotor, como se muestra en la siguiente expresión :

$$P_m = PTR - P_{cr} \dots\dots\dots (3-8)$$

Otra forma de obtener “Pm” es observando el circuito equivalente del motor de inducción, en la parte del rotor, se observa que la resistencia de carga ficticia es la causante de desarrollar potencia en el rotor capaz de producir par, por lo que :

$$\text{Si la resistencia de carga ficticia} = R_2 \left(\frac{1 - S}{S} \right)$$

Otra expresión para obtener “Pm” también es :

$$P_m = 3 (I_2)^2 R_2 \left(\frac{1 - S}{S} \right) \dots\dots\dots (3-9)$$

Una expresión más con la que se puede obtener la potencia mecánica “Pm” es la siguiente :
 utilizando la ecuación (3-7) y la ecuación (3-8) la nueva expresión para obtener la potencia mecánica “Pm” quedara como :

$$P_m = P_{TR} - P_{cr} \dots\dots\dots (3-8)$$

$$P_{cr} = (S) (P_{TR}) \dots\dots\dots (3-7)$$

sustituyendo (3-7) en (3-8)

$$P_m = P_{TR} - (S) (P_{TR})$$

Factorizando “PTR” :

$$P_m = P_{TR} (1 - S) \dots\dots\dots (3-10)$$

La ecuación (3-10) nos muestra que la potencia mecánica depende de la potencia transferida al rotor y del deslizamiento.

Conociendo las pérdidas por fricción y ventilación y las pérdidas adicionales, se puede proceder a determinar la potencia mecánica de salida, como :

$$P_s = P_m - P_{FV} - P_{AD} \dots\dots\dots (3-11)$$

Esta es la potencia mecánica disponible en el eje del motor.

Por ultimo se presentarán algunas consideraciones básicas como :

- a) Las pérdidas totales de un motor de inducción se obtienen por medio de la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida del motor.

$$\text{Pérdidas totales} = P_e - P_s$$

P_e = Es la potencia eléctrica que el motor toma de la línea de alimentación.

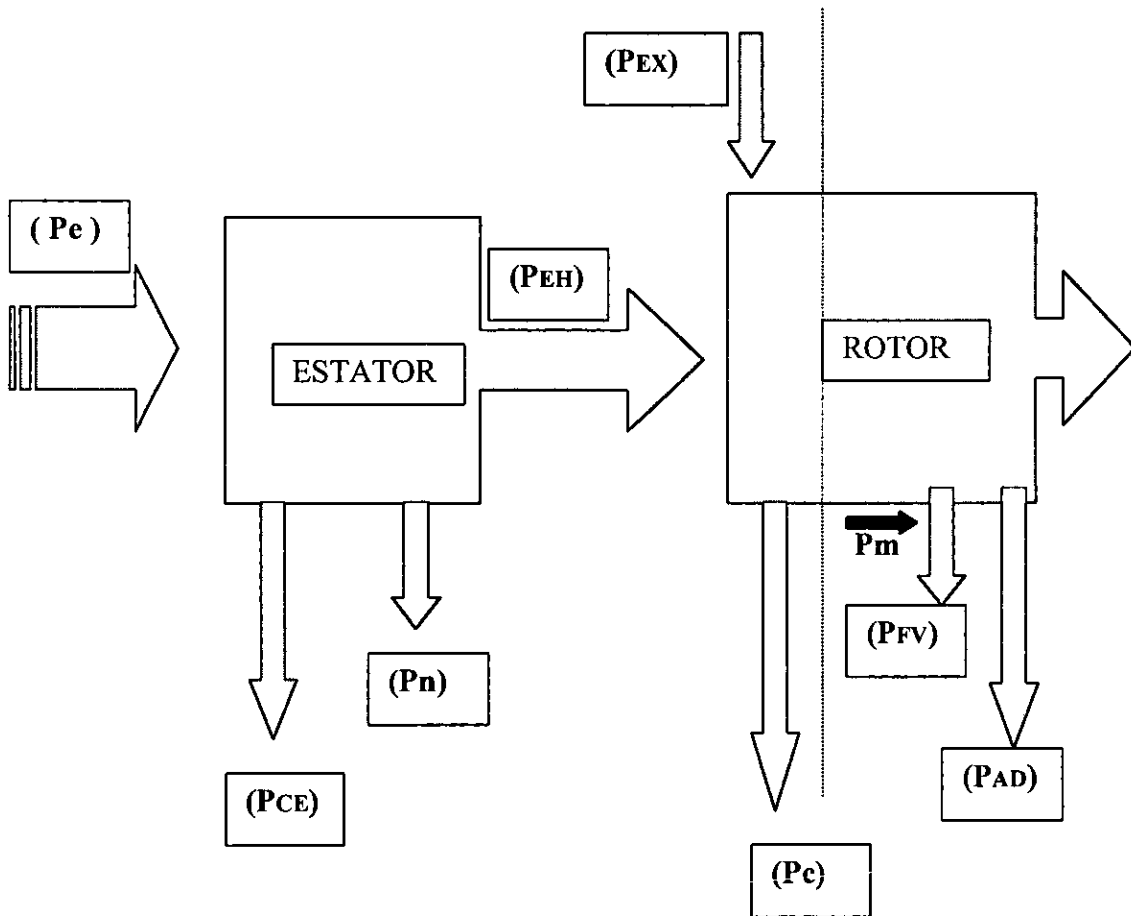
P_s = Es la potencia mecánica disponible en el eje del motor.

- b) La potencia nominal es la potencia de salida indicada en la pleca de datos del motor.
- c) Cuando el motor de inducción opera sin carga conectada a su eje, es decir, opera en vacío, las pérdidas en el cobre del estator son muy mínimas.
- d) Cuando al motor de inducción se le acopla la carga en su eje y dicha carga se va incrementando, la corriente que circula por el devanado del estator se incrementa y por lo tanto las pérdidas en el cobre del estator (P_{ce}) aumentan con el cuadrado de la corriente (RI^2).
- e) La circulación de una corriente muy elevada en el devanado del estator produce un incremento en la temperatura del motor, ya que la disipación de calor debido a las pérdidas en el cobre o por efecto joule en el estator se incrementan por la circulación de corriente.
- f) Como había mencionado antes los devanados del estator son impregnados de aislante (barniz), este aislante tiene un límite de temperatura que puede soportar y que no se debe sobrepasar, ya que dicho aislante se dañaría. Por lo que se debe de tener cuidado con el aumento de temperatura del motor que se provoca al aumentar la carga.
- g) El límite de temperatura que soporta un aislante obliga a fijar el concepto de potencia nominal en el motor de inducción. De tal forma que si un motor opera a potencias superiores a la nominal éste se sobrecalentara, provocando que el aislante se deteriore y disminuya su período de vida.
- h) En motores de inducción con rotor devanado es común el uso de anillos rozantes y escobillas, estos elementos no sólo provocan pérdidas por fricción, sino también pérdidas por efecto joule; debido a que las escobillas hacen contacto con los anillos rozantes existe una circulación de corriente entre ambos que producen las pérdidas por efecto joule que generalmente son despreciables

- i) Otra causa del contacto que existe entre los anillos rozantes y las escobillas es la caída de voltaje que en un momento dado puede provocar pérdidas significativas, debido al desgaste de ambos elementos.
- j) Las pérdidas por fricción y ventilación en su conjunto se obtienen por medio de una prueba conocida como prueba en vacío, que se le hace al motor de inducción precisamente para determinar las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación.
- k) Las pérdidas adicionales en los motores de inducción pueden ser de dos tipos :
 - Pérdidas adicionales en el cobre.
 - Pérdidas adicionales en el hierro.
- l) Las pérdidas en el cobre del rotor (P_{cr}) aumentan con el cuadrado de la carga, es decir, este tipo de pérdidas dependen de la carga.

3.4 PÉRDIDAS EN EL MOTOR SÍNCRONO

El siguiente diagrama a bloques, muestra la forma en que se van dando las pérdidas en el motor síncrono.



Donde :

Pe = Potencia eléctrica de entrada.
Pce = Pérdidas en el cobre.
Pn = Pérdidas en el núcleo.
PEH = Potencia de entrehierro.
Pm = Potencia mecánica.

PEX = Potencia de excitación.
Pc = Pérdidas por excitación.
PFV = Pérdidas por fricción y ventilación.
PAD = Pérdidas adicionales.

Figura 3.3. Diagrama a bloques que representa como se van presentando las pérdidas en un motor síncrono. Este diagrama a bloques es modificado del original encontrado en el libro de “ Máquinas Eléctricas” de StephenJ. Chapman.

Como se dijo anteriormente, un motor síncrono es una máquina doblemente excitada, ya que el devanado del estator se le alimenta con corriente alterna trifásica y al devanado del rotor con corriente directa; es por esta razón que en el diagrama a bloques anterior se tiene una potencia eléctrica de entrada (P_e) y una (P_{EX}) que es la potencia que proporciona la fuente de excitación de corriente directa para el rotor.

La descripción del diagrama a bloques es la siguiente:

- i. Como las terminales del estator se conectan a un sistema trifásico de voltajes, la potencia de entrada (P_e) es eléctrica y es la que se desea convertir a potencia mecánica.
- ii. La potencia eléctrica de entrada llega al devanado del estator, provocando las primeras pérdidas que se tienen en el motor y que son las pérdidas en el cobre (P_{ce}) o también denominadas pérdidas por efecto joule. Estas pérdidas se disipan en forma de calor en los devanados del estator.
- iii. Otra cantidad de potencia se pierde por los efectos de histéresis y de las corrientes parásitas en el estator, denominadas pérdidas en el núcleo del estator (P_n).

Debido a que en el motor síncrono la velocidad es constante e independiente de la carga, las pérdidas en el núcleo también son constantes, ya que dichas pérdidas son proporcionales a la velocidad.

- iv. La potencia restante que se tiene hasta ahora en el estator, es transferida a través del entrehierro por inducción electromagnética al rotor. A esta potencia se le conoce como potencia de entrehierro (P_{EH}) y es parte de la potencia eléctrica (P_e) de entrada que resta en este punto.
- v. Una vez que la potencia en el entrehierro (P_{EH}) llega al rotor, se topa con una pérdida denominada pérdida por excitación (P_c), en la cual se tienen las pérdidas por efecto joule y que es disipada en forma de calor en el devanado de campo del rotor. Esta pérdida se basa en la corriente de campo (I_f) la cual se obtiene de una fuente de corriente directa que en algunos casos es externa, debido a que el circuito de campo forma parte integral del motor síncrono las pérdidas que suceden aquí se incluyen en toda la cadena de pérdidas que se tienen hasta ahora.
- vi. La potencia sobrante que se tienen hasta ahora debido al efecto de las pérdidas, es convertida a potencia mecánica (P_m) la cual será capaz de realizar un trabajo útil.

- vii. La potencia mecánica (P_m) sigue su flujo hasta llegar al eje del motor, pero antes de esto, sufre una pérdida en el rotor que son las pérdidas por fricción y ventilación (P_{FV}).
- viii. Después de las pérdidas por fricción y ventilación, la potencia mecánica que sobra pierde otra porción casi despreciable de su potencia con las pérdidas adicionales (P_{AD}).
- ix. Por fin la potencia mecánica sobrante hasta ahora es la que se encuentra disponible en el eje del motor, capaz de realizar un trabajo útil y se le conoce como potencia mecánica de salida (P_s).

La potencia eléctrica de entrada (P_e) que se obtiene de un sistema trifásico de voltajes esta dada por la siguiente expresión :

$$P_e = \sqrt{3} (V_T) (I_L) \cos \theta \dots\dots\dots (3-12)$$

Donde :

V_T = Es el voltaje trifásico que se obtiene de la línea entre terminales.

I_L = Corriente de línea que consume el motor.

$\cos \theta$ = Es el factor de potencia al que opera el motor.

Otra expresión es :

$$P_e = 3 (V_{\Phi}) (I_a) \cos \theta \dots\dots\dots (3-13)$$

Donde :

V_{Φ} = Es el voltaje de fase que forma parte de un sistema trifásico de voltajes.

I_a = Es la corriente de armadura, la cual circula por cada uno de los devanados del estator.

$\cos \theta$ = Es el factor de potencia al que ésta operando el motor.

Las pérdidas sufridas en el devanado del estator por el efecto joule, se basan en la corriente de armadura y en la resistencia de armadura, como se observa en la siguiente expresión :

$$P_{ce} = 3 (R_a) (I_a)^2 \dots\dots\dots (3-14)$$

La (Ia) es la corriente de armadura que circula por cada fase del devanado trifásico del estator, la (Ra) es la resistencia por fase del devanado trifásico del estator. Es importante hacer notar que según el calentamiento del devanado del estator, la resistencia de armadura lleva una corrección de temperatura, basándose en la temperatura ambiente con respecto a la temperatura que alcance dicho devanado.

Las pérdidas en el núcleo se determinan mediante pruebas que se le realizan al motor síncrono operando en vacío, dichas pruebas proporcionan datos para un gráfico de pérdidas en el núcleo en función del voltaje y a partir de esto se obtienen las pérdidas correspondientes.

Las pérdidas por excitación en el devanado de campo, se basan en la corriente de campo y en la resistencia del devanado de campo (Rf), la resistencia de campo tiene una corrección de temperatura al igual que la resistencia de armadura. La expresión para las pérdidas por efecto joule en el devanado de campo esta dada por :

$$P_c = (R_f) (I_f)^2 \dots\dots\dots (3-15)$$

De las pérdidas anteriores se puede obtener la potencia en el entrehierro (PEH) como:

$$P_{EH} = P_e - P_n - P_{ce} \dots\dots\dots (3-16)$$

Posteriormente viene la conversión a potencia mecánica según el diagrama a bloques, por lo que se obtiene la diferencia entre la potencia del entrehierro (PEH) y las pérdidas por excitación en el devanado de campo (Pc), como se muestra en la expresión :

$$P_m = P_{EH} - P_c \dots\dots\dots (3-17)$$

Otras pérdidas que se tienen son debidas a la fricción y ventilación, como un motor síncrono opera a velocidad constante sin importar que su carga varíe, dichas pérdidas por fricción y ventilación se mantendrán constantes también.

Las pérdidas por fricción y ventilación se componen principalmente por las pérdidas que se tienen debido al efecto de fricción en las chumaceras o valeros, así como entre las escobillas y los anillos colectores, además de las pérdidas que se tienen por la acción en la ventilación.

La expresión con la cual podemos obtener las pérdidas por fricción en los valeros o chumaceras y pérdidas por ventilación, es la siguiente :

$$P_{fvl} = (C) (A) \sqrt{n}$$

Una segunda expresión con la que podemos encontrar las pérdidas por fricción entre escobillas y anillos colectores, es la siguiente :

$$P_{FEA} = 9.81 (f) (g) (S) (V)$$

Al agrupar las dos expresiones anteriores se obtiene una sola expresión, con la cual se puede obtener todas las pérdidas por fricción y ventilación que se producen en un motor síncrono, dicha expresión es la siguiente :

$$P_{FV} = P_{FV1} + P_{FE}$$

$$P_{FV} = (C) (A) \left[\sqrt{n} \right] + 9.81 (f) (g) (S) (V) \dots\dots\dots (3-18)$$

Donde :

C = Es un coeficiente según el tipo de rotor que tenga el motor, si el rotor es de polos lisos el valor del coeficiente es de 0.25 a 0.35, si el rotor es de polos salientes es de 0.5 a 0.6.

A = Es la potencia nominal del motor en KW.

n = Velocidad síncrona del motor en rpm

f = Coeficiente de fricción entre escobillas y anillos colectores, se toma entre 0.12 a 0.35.

g = Es la presión de la escobilla sobre el anillo colector y puede tener un valor entre 0.10 y 0.250 Kg/cm².

S = Es la superficie de contacto entre las escobillas y el anillo colector en cm².

V = Es la velocidad periférica del anillo colector en m/seg.

Las pérdidas por fricción y ventilación se pueden determinar también mediante pruebas hechas al motor síncrono.

Por ultimo se tiene la expresión con la cual se podrá obtener la potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor, tomando en cuenta las pérdidas adicionales, dicha expresión es la siguiente :

$$P_s = P_m - P_{FV} - P_{AD} \dots\dots\dots (3-19)$$

Para terminar se presentaran algunas consideraciones básicas como :

- a) Al igual que en el motor de inducción, para obtener las pérdidas totales en un motor síncrono se hace por medio de la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida del motor.

$$\text{Pérdidas totales} = P_e - P_s$$

P_e = Potencia de entrada del motor.

P_s = Potencia de salida del motor.

- b) La potencia nominal, es la potencia mecánica de salida indicada en la placa de datos del motor, normalmente en HP.
- c) En el motor síncrono como en el motor de inducción, hay algunas pérdidas que varían con la carga, mientras que otras no dependen directamente de ella.
- d) En ambos tipo de motores las pérdidas por efecto joule (P_{ce}) en el devanado del estator aumentan con el cuadrado de la corriente de carga, por lo que dependen directamente de ella.
- e) El aumento de carga en el motor síncrono, también provocara una circulación de corriente de armadura en el devanado del estator cada vez mayor, produciendo un incremento en la temperatura del motor, al igual que en el motor de inducción.
- f) En el motor síncrono se tiene una corriente de armadura máxima permitida, con el fin de proteger tanto al devanado de armadura como a su aislante del sobrecalentamiento que pudieran sufrir.
- g) El aislante utilizado para impregnar el devanado trifásico del estator tiene un límite de temperatura que puede soportar, si este límite se sobrepasa el aislante utilizado se daña.
- h) Al igual que en el motor de inducción, en el motor síncrono el límite de temperatura que soporta un aislante obliga a fijar el concepto de potencia nominal.
- i) Es importante hacer notar que desde el punto de vista del calentamiento del devanado del estator, el factor de potencia de la corriente de armadura no tiene importancia en dicho aumento de temperatura, sólo la magnitud en la corriente de armadura (I_a) la tiene.

- j) En el motor síncrono existen dos devanados, uno de armadura en el estator y otro de campo o de excitación en el rotor, por lo que ambos deben estar protegidos del sobrecalentamiento.
- k) Las pérdidas en el devanado de excitación de C.D son bastantes constantes con la carga y sólo pueden aumentar según la regulación requerida de la corriente de campo (I_f).
- l) En el devanado de campo de un motor síncrono, el máximo calentamiento permitido en dicho devanado fija la corriente de campo máxima en el motor, para poder evitar que el aislamiento que cubre el devanado de campo se dañe, además de evitar un sobrecalentamiento en el mismo.
- m) Para evitar el sobrecalentamiento en los devanados tanto de armadura (estator) y de campo (rotor), además del deterioro del aislamiento en los mismos, las corrientes de armadura y de campo son limitadas a corrientes de armadura y de campo máximas.
- n) En algunos motores síncronos es común el uso de anillos rozantes y escobillas, estos elementos no sólo provocan pérdidas por fricción sino también pérdidas por efecto joule; debido a que las escobillas hacen contacto con los anillos rozantes existen una circulación de corriente entre ambos, que producen las pérdidas por efecto joule, estas pérdidas aumentan en proporción directa a la carga.
- o) Todas las pérdidas eléctricas tienden a variar con el cuadrado de la corriente de carga a excepción de las pérdidas debido a la excitación de C.D ya que son independientes de la carga, por otro lado las pérdidas en las escobillas y los anillos rozantes varían en proporción a la carga.
- p) Las pérdidas mecánicas que normalmente están constituidas por otras pérdidas como: rozamiento con el aire en el rotor; rozamiento de las escobillas; rozamiento con el aire en el ventilador; mejor conocidas como pérdidas por fricción y ventilación. Estas pérdidas tanto en el motor síncrono como en el motor de inducción varían en proporción directa a las variaciones de velocidad, como el rotor del motor síncrono gira a una velocidad síncrona constante, las pérdidas por fricción y ventilación son constantes.
- q) Las pérdidas en el núcleo debido a la histéresis y a las corrientes parásitas, en un motor síncrono son constantes a velocidad constante y a flujo de excitación constante; en un motor de inducción varían en proporción a las variaciones de flujo y velocidad.

- r) En las pérdidas adicionales (PAD) en un motor síncrono se tienen las provocadas por :
 - i. Flujo de dispersión en el estator, los cuales crean las pérdidas adicionales en las superficies tanto del estator como del rotor y normalmente se les denominan pérdidas superficiales.
 - ii. Los armónicos del campo magnético original pérdidas superficiales en el rotor y el estator y pérdidas de pulsación debido a la oscilación longitudinal del flujo en los dientes tanto del estator como del rotor.
- s) Las pérdidas adicionales en motores síncronos con potencia de salida (Ps) menor a 200HP se consideran despreciables; para motores arriba de 200HP, las pérdidas adicionales en carga son de aproximadamente del 1% de la potencia de salida (Ps).
- t) Las pérdidas adicionales en carga son mayores en los motores de inducción que en los motores síncronos.

CAPÍTULO 4

**CARACTERÍSTICAS DE
OPERACIÓN DE LOS
MOTORES DE INDUCCIÓN
Y SÍNCRONOS**

CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se mostrara la forma en que las características propias tanto del motor de inducción como del motor síncrono se comportan bajo el efecto de la carga, dicho efecto comprende la variación de la carga desde una mínima hasta el valor de plena carga. También se presentaran algunas gráficas con las cuales es posible poder observar de una forma visual el comportamiento de las características propias del motor de inducción, en el caso del motor síncrono el comportamiento de sus características propias se mostraran por medio de diagramas fasoriales.

En otras palabras se mostrara el comportamiento que sufre cada motor al estar en funcionamiento bajo ciertas condiciones, así como las características que se van presentando en el motor en ese momento, de esta manera se podrá saber como se puede comportar cada uno de los motores bajo ciertas condiciones de operación y así poder aprovechar al máximo cada motor.

Se presentaran algunas ecuaciones con las cuales es posible obtener el par que desarrollan los motores a una determinada carga, aquí como en los capítulos anteriores se presentaran algunas consideraciones básicas al ultimo de cada tema referente a cada motor y en algunas ocasiones se harán comparaciones entre ambos motores.

4.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Se ha mencionada varias veces, que un motor toma potencia eléctrica de la línea para después convertirla a potencia mecánica disponible en el eje del motor. Un termino importante aquí es el “**par**” el cual se puede definir como la fuerza que se tiene disponible en el eje de motor para poder llevar a cabo un trabajo, lo anterior se puede observar mejor en la figura 4.1.

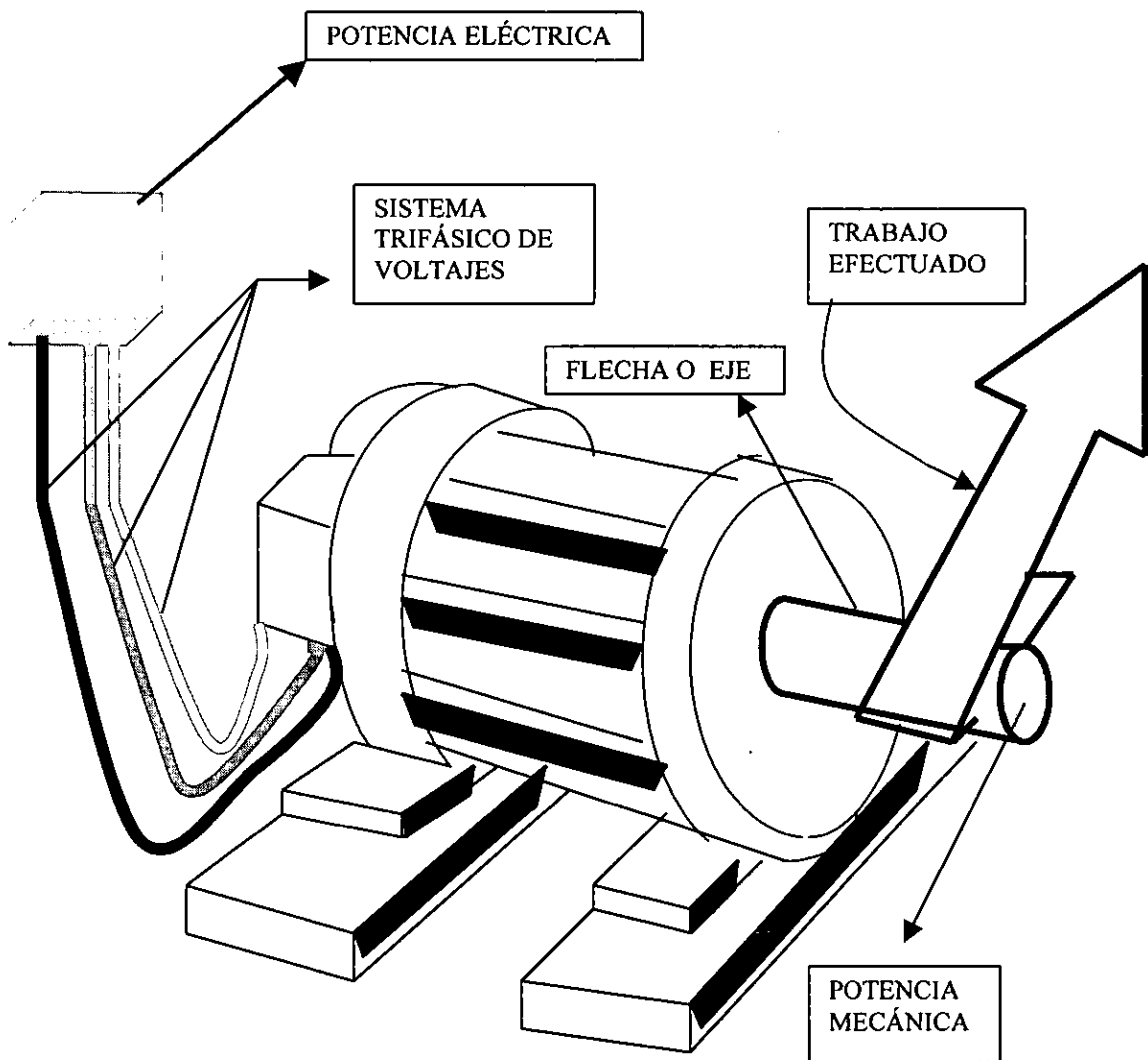


Figura 4.1. Esta figura muestra a un motor eléctrico conectado a un sistema de voltajes trifásicos, por lo cual se alimenta de potencia eléctrica a la entrada, el motor convierte esta potencia a potencia mecánica disponible en el eje del motor y la cual es capaz de realizar un trabajo útil. La figura mostrada aquí es una modificación de la original, la cual se obtuvo de una publicación denominada “Curso para la formación de consultores en diagnósticos energéticos de primer nivel” elaborado por CONAE y Energy Saving De México.

Como se menciona anteriormente en el capítulo 2 en el tema “principio de operación de un motor de inducción”, el par que se desarrolla en el motor se debe a la interacción que hay entre los campos magnéticos, tanto del estator (B_e) como del rotor (B_r). Por lo que el par dependerá de la intensidad de dichos campos.

Cuando un motor de inducción opera en vacío, es decir, sin ninguna carga acoplada a su eje, la velocidad a la que gira el rotor es muy cercana a la síncrona, esto hace que el deslizamiento sea muy pequeño, casi cero, y por consecuencia la fuerza electromotriz inducida en el rotor “ E_R ” también es mínima, lo que provocara que la corriente producida en el rotor “ I_R ” sea mínima, obviamente esto producirá un campo magnético en el rotor (B_r) muy pequeño.

La consecuencia de un campo magnético pequeño en el rotor, provocara que el par producido en el motor sea pequeño, lo suficiente para librar las pérdidas por fricción y ventilación.

Por otro lado la corriente que circula por el estator debe ser grande, para así poder producir un campo magnético es el estator (B_s), que sea capaz de crear la mayor parte de “ B_{net} ” (campo magnético neto) ya que “ B_r ” no puede contribuir plenamente a esto por ser muy pequeño.

Cuando se le acopla carga al motor y dicha carga va aumentando, la velocidad a la que gira el rotor va disminuyendo por el efecto de la carga, esto provocara que el deslizamiento aumente y por consecuencia la fuerza electromotriz inducida lo hará también, debido a esto la corriente en el rotor “ I_R ” será cada vez mayor, produciendo un incremento en el campo magnético del rotor “ B_r ”.

La consecuencia de un incremento en el campo magnético del rotor, provocara que el par producido en el motor se incremente también, para poder atender el efecto del incremento de carga que se le esta aplicando al eje del motor.

En la figura 4.2, se muestra como es que se desarrolla el par en un motor de inducción, la explicación a esto se dio en el tema de “principio de operación de un motor de inducción” del capítulo 2; anteriormente no se mostró esta figura, por lo que aquí si se hará, con una breve explicación.

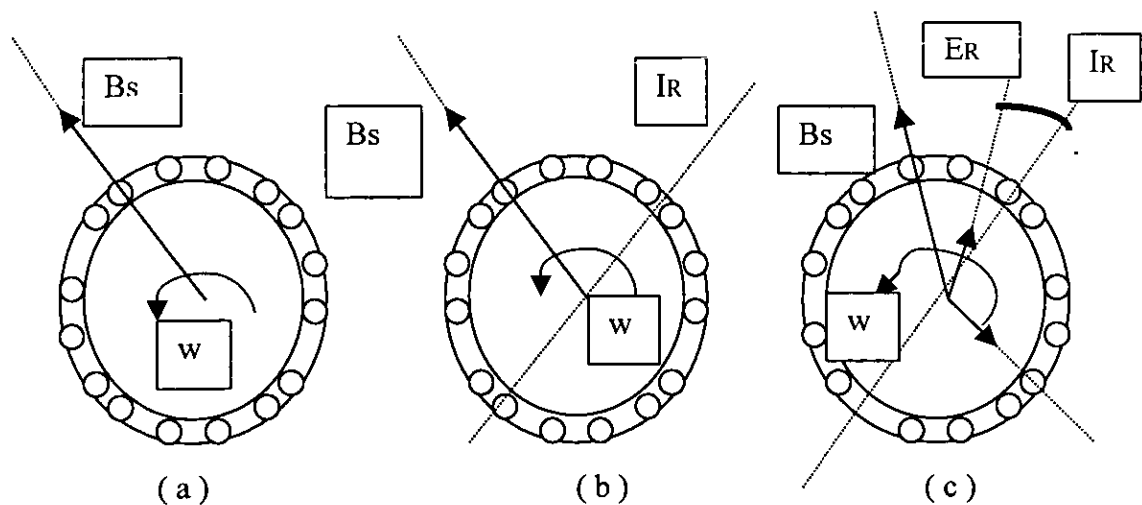


Figura 4.2. Muestra como se va desarrollando el par producido en un motor de inducción.

“En el inciso (a) se tiene que en el estator se produce un campo magnético que es giratorio y constante “ B_s ”, el cual induce una fuerza electromotriz en el rotor “ E_R ”; en el inciso (b) la presencia de “ E_R ” en el rotor, produce una corriente en el rotor “ I_R ” la cual se encuentra atrasada con respecto al voltaje por el efecto de la inductancia del rotor; en el inciso (c) la “ I_R ” produce un campo magnético en el rotor “ B_r ” que se encuentra atrasado 90° con respecto a la corriente; los campos “ B_s ” y “ B_r ” al interactuar forman un campo magnético neto “ B_{net} ” el cual produce el par en el motor, en sentido contra horario”.(2)

Ahora se mostraran unas figuras parecidas a las anteriores, en donde se presenta el caso de un motor que opera en vacío (a) y operando con carga (b).

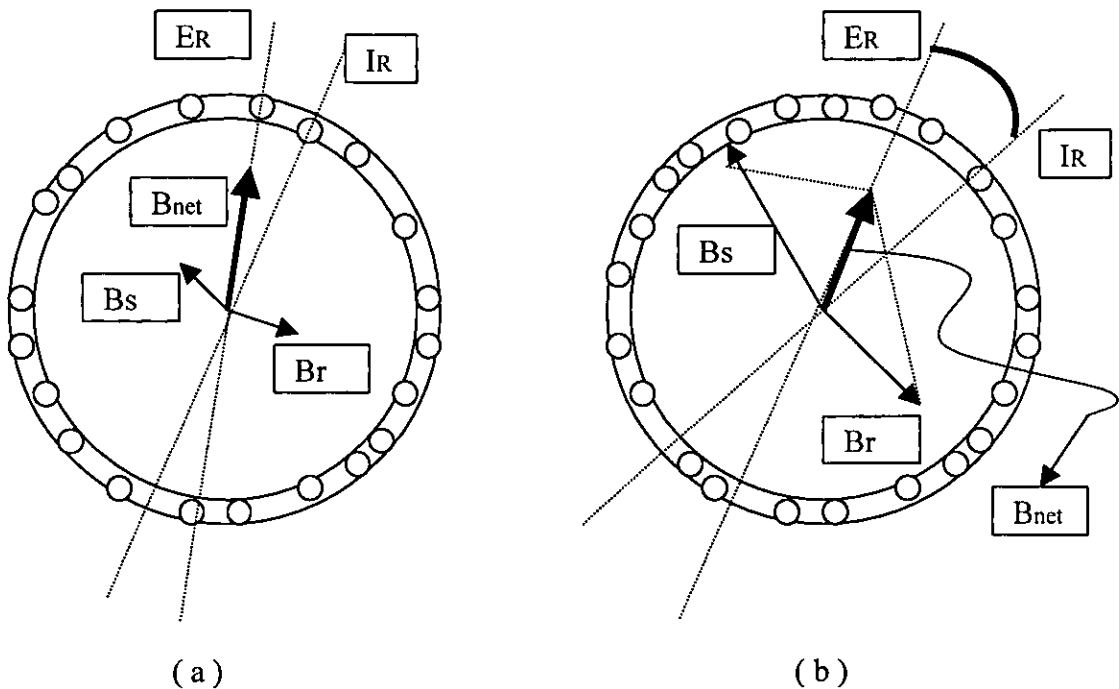


Figura 4.3. Se muestra en el inciso (a) el comportamiento de los campos magnéticos cuando un motor de inducción opera en vacío; en el inciso (b) se tiene el comportamiento de los campos magnéticos pero ahora cuando un motor de inducción opera con una carga pesada.

Un motor de inducción puede operar desde vacío, a media y plena carga, y más allá de la plena carga; cada uno de estos estados presentan ciertas características como las que se presentaran a continuación :

4.2.1 COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN OPERANDO EN VACÍO

Se dice que un motor se encuentra operando en vacío cuando al eje del motor no se le acopla ninguna carga.

- i. El deslizamiento es mínimo ya que la velocidad aquí es cercana a la síncrona.
- ii. Debido a que el deslizamiento es mínimo, la frecuencia del rotor, la reactancia en el rotor y la fuerza electromotriz inducida en el rotor también son mínimas.
- iii. La frecuencia en el rotor es mínima porque depende del deslizamiento, esto se puede observar en la siguiente ecuación.

$$f_r = (S) (f_e)$$

- iv. La reactancia del rotor es mínima porque depende del deslizamiento, esto se puede observar en la siguiente ecuación.

$$X_R = j (2\pi f_r) (L_R)$$

- v. La fuerza electromotriz inducida en el rotor es mínima porque depende del deslizamiento, esto se puede observar en la siguiente ecuación.

$$E_R = (S) (E_{RB})$$

- vi. La poca corriente en el rotor es suficiente para producir una “ B_r ” que al interactuar con “ B_s ” forman un “ B_{net} ” suficiente para producir el par necesario en vacío.
- vii. Cuando el motor opera en vacío el factor de potencia del mismo es extremadamente pequeño e inductivo.

4.2.2 COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN OPERANDO A MEDIA CARGA

Se dice que un motor se encuentra operando a media carga cuando al eje del motor se le coloca sólo la mitad de la carga, de una total denominada carga nominal, y para la cual está diseñado el motor.

- i. La velocidad del rotor disminuye ligeramente provocando que el deslizamiento aumente.

- ii. Debido a que el deslizamiento aumenta, también lo hacen : la frecuencia del rotor (f_R); la reactancia del rotor (X_R) y la fuerza electromotriz inducida (E_R).
- iii. Como la fuerza electromotriz inducida aumento, también lo hará la corriente del rotor (I_R), lo cual se traduce a un aumento en la corriente del estator, provocando que el motor consuma más corriente de la línea.
- iv. Aquí el factor de potencia a aumentado en comparación con el que se tenía en vacío.
- v. En esta situación el motor se ve obligado a producir más potencia mecánica “ P_m ” para poder atender el incremento de carga.
- vi. La situación del inciso anterior obliga al motor a consumir más potencia eléctrica de entrada.

4.2.3 COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN OPERANDO A PLENA CARGA

Se dice que un motor se encuentra operando a plena carga cuando en el eje del motor se le coloca la carga nominal para la cual fue diseñado el motor.

- i. De la situación anterior hasta llegar a plena carga, quiere decir que se le acoplo más carga mecánica al eje del motor.
- ii. Por lo anterior, el deslizamiento aumenta más, provocando el mismo efecto con los otros elementos antes mencionados : f_R , X_R , E_R , e I_R .
- iii. El deslizamiento llega a un valor tal que proporciona un equilibrio entre el par que ahora desarrolla el motor y la carga que se le esta aplicando a su eje (carga nominal).
- iv. Lo anterior indica que el motor a alcanzado el par nominal.
- v. Aquí la corriente del estator es grande en comparación con la corriente que se tenía cuando el motor operaba en vacío.
- vi. El factor de potencia desarrollado en este momento varía entre 0.8 en motores de inducción pequeños de 1HP hasta casi 0.9 y 0.95 en motores de inducción grandes de 150HP en adelante.

- vii. En esta situación el motor produce una potencia mecánica de salida que es la nominal.
- viii. Todo el rango normal de operación de un motor de inducción se encuentra en esta región.

4.2.4 COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN OPERANDO MÁS ALLA DE LA PLENA CARGA.

Se dice que un motor se encuentra operando más allá de la plena carga cuando en el eje del motor se le coloca más carga que la nominal, es decir, una carga que supere la nominal.

- i. Al aumentar más la carga, lo hace también el deslizamiento y por consecuencia también la frecuencia del rotor, la cual crea un incremento en la reactancia del rotor que produce una disminución en el factor de potencia del rotor.
- ii. El aumento en la reactancia del rotor produce un efecto de carga inductiva en el motor, provocando que también disminuya el factor de potencia principal del motor.
- iii. Aquí la corriente del rotor no crece tan rápidamente como en los casos anteriores.
- iv. La carga continua aumentando y por lo tanto el par que desarrolla el motor también, hasta llegar a un límite de estabilidad, en el cual el motor alcanza su par máximo.
- v. Al pasar este límite de estabilidad con un pequeño incremento de carga, provocará que el par máximo desarrollado en ese momento por el motor disminuya, provocando que se pierda la estabilidad en el motor.
- vi. Después del límite de estabilidad, el par máximo disminuye debido a que el aumento en la corriente del rotor es contrarrestada por el descenso en el factor de potencia del rotor, cuando se ha aumentado la carga.
- vii. El aumento en la corriente del rotor es contrarrestada por el descenso en el factor de potencia del rotor, debido a que la velocidad con la que disminuye el factor de potencia es mayor que la velocidad con la que aumenta la corriente.

En general se puede decir que un motor de inducción tiene su máxima eficiencia y el máximo factor de potencia, cuando éste opera a su potencia mecánica de salida nominal y al par nominal de plena carga.

Cuando se incrementa la carga el factor de potencia y la eficiencia comienzan a disminuir, pero el par que desarrolla el motor sigue aumentando del par nominal al par máximo llegando al límite de estabilidad en el motor.

Una vez que el motor está en el límite de estabilidad o par máximo, si se incrementa un poco la carga, el par que en ese momento desarrolla el motor empieza a disminuir, provocando inestabilidad en el motor.

La corriente de línea que consume el motor, continúa aumentando una vez que el motor pasa su par de plena carga hasta llegar al par máximo o límite de estabilidad. A diferencia del par que disminuye al pasar el límite de estabilidad, la corriente de línea sigue aumentando.

Un motor de inducción suele tener un par en el momento del arranque, llamado par de arranque que le permite arrancar con la carga nominal acoplada a su eje. Posteriormente el motor desarrolla un par nominal de plena carga, y el par puede seguir aumentando hasta llegar al par máximo normalmente el par máximo llega a ser del 200% o 250% el valor del par nominal de plena carga.

Como el par de arranque debe ser lo suficientemente grande como para poder arrancar con la carga nominal acoplada al eje del motor, su valor llega a ser del 150% del valor a plena carga. Por lo que se puede decir que el par de arranque es más grande que el par nominal de plena carga.

Ahora se muestra una gráfica con la curva característica par-velocidad de un motor de inducción en la figura 4.4.

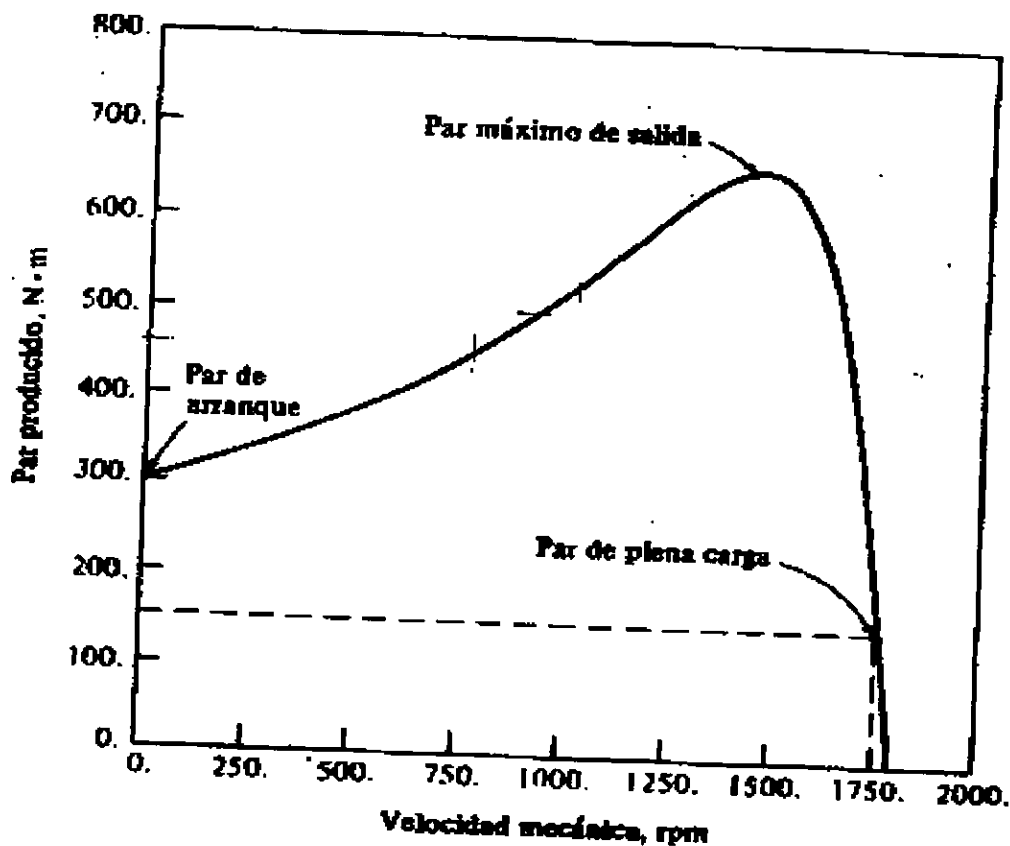


Figura 10-19 Curva característica par-velocidad de un motor de inducción.

Figura 4.4. Curva característica par-velocidad de un motor de inducción. Esta gráfica fue obtenida del libro de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

La curva anterior muestra el par desarrollado por un motor de inducción en función de la velocidad del rotor.

Se puede observar que a la velocidad síncrona el par es cero; también es notorio que entre vacío y plena carga la parte de la curva es lineal, por lo que la corriente del rotor, el campo magnético en el rotor y el par que desarrolla el motor aumentan linealmente, aquí la reactancia del rotor aumenta pero el valor de la resistencia del rotor es más predominante, como el deslizamiento aumenta la velocidad del rotor disminuye también linealmente.

En la grafica esta presente también el par máximo, el cual no debe sobrepasar el motor; en la región de par a plena carga al par máximo la reactancia del rotor a aumentado provocando una disminución en el factor de potencia, el aumento de dicha reactancia hace que sea del mismo orden de la magnitud de la resistencia.

También esta presente el par de arranque y se observa que es de magnitud mayor al par de plena carga, para que así el motor pueda arrancar arrastrando cualquier carga, incluyendo la nominal.

El par de arranque es notorio o ésta presente sólo cuando el motor arranca con carga acoplada al eje, cuando el motor arranca sin carga el motor sólo produce el par necesario para librar las pérdidas por fricción y ventilación.

4.2.5 OBTENCIÓN DEL PAR EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN

El par en un motor de inducción se obtiene mediante la relación de la potencia mecánica de salida entre la velocidad a la que gira el rotor.

$$T_s = \frac{P_s}{\omega_R} = (N - m) \dots\dots\dots (4-1)$$

Donde:

- T_s** = Es el par de salida disponible en el eje del motor (N – m).
- P_s** = Es la potencia mecánica de salida (Watts).
- ω_R** = Es la velocidad angular a la que gira el rotor (rad/seg).

Otro término es el par producido, el cual se obtiene mediante la relación de la potencia mecánica (P_m) entre la velocidad a la que gira el rotor.

$$T_p = \frac{P_m}{\omega_R} = (N - m) \dots\dots\dots (4-2)$$

Donde :

- T_p** = Es el par producido en el motor (N – m).
- P_m** = Es la parte sobrante de la potencia eléctrica de entrada (P_e), que llega al rotor y que después de sufrir pérdidas en el cobre del rotor (P_{cr}) se convierte en potencia mecánica (watts).
- ω_R** = Es la velocidad angular a la que gira el rotor (rad/seg).

La diferencia entre “Ts” y “Tp” son las pérdidas por fricción y ventilación y las pérdidas adicionales, que son tomadas en cuenta para la obtención de “Ts” únicamente.

Cuando se tenga la velocidad en (rpm) es necesario pasarla (rad/seg) de la siguiente manera :

$$\omega = (\text{valor en rpm}) \left(\frac{2\pi\text{rad}}{1 \text{ revolución}} \right) \left(\frac{1 \text{ mín.}}{60 \text{ seg.}} \right) = \text{rad/seg}$$

Otra expresión con la cual es posible calcular el par producido se obtiene de la siguiente manera :

Sabiendo que : $n_R = n_s (1 - S) \dots\dots\dots (2-3)$

Si se hace una analogía de la ecuación (2-3) con respecto a la velocidad angular se tiene la siguiente ecuación :

$$\omega_R = \omega_s (1 - S) \dots\dots\dots (4-3)$$

También se utilizará la siguiente ecuación :

$$P_m = P_{TR} (1 - S) \dots\dots\dots (3-10)$$

Si las expresiones (3-10) y (4-3) se sustituyen en la ecuación (4-2), dicha ecuación quedará de la manera siguiente :

$$T_p = \frac{P_m}{\omega_R} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$T_p = \frac{P_{TR} (1-S)}{\omega_s (1-S)} = \frac{P_{TR}}{\omega_s}$$

De esta manera se obtiene otra expresión para el par producido :

$$T_p = \frac{PTR}{\omega_s} \dots\dots\dots (4-4)$$

Donde :

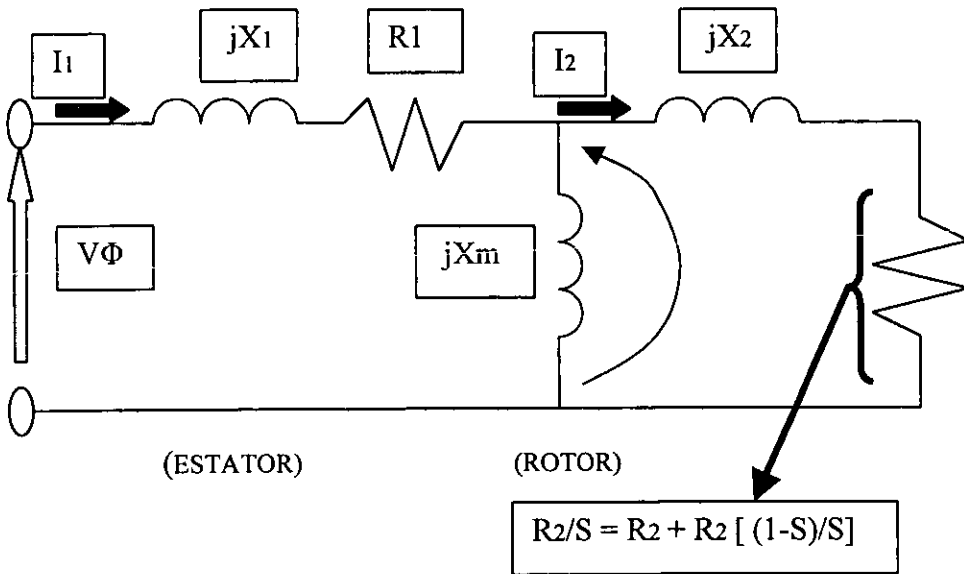
PTR = Es la potencia transferida al rotor a través del entrehierro por inducción electromagnética (watts).

ω_s = Es la velocidad angular síncrona (rad/seg)

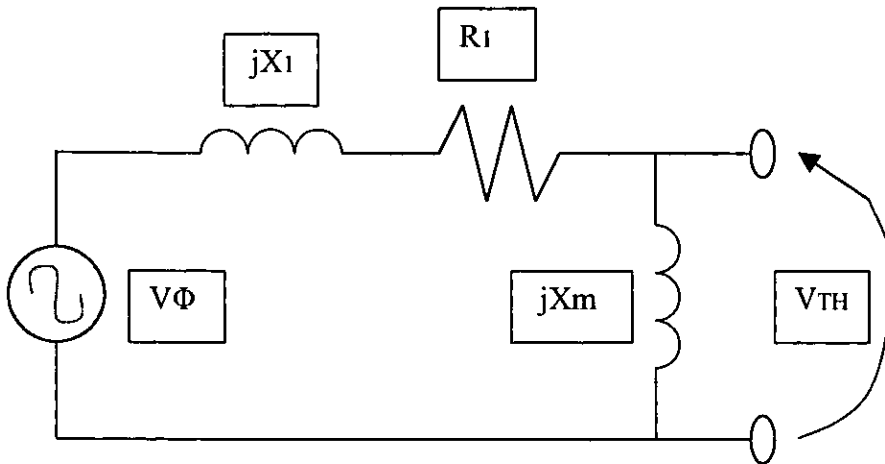
Con la ayuda del circuito equivalente de un motor de inducción y sabiendo que :

$$PTR = 3(I_2)^2 \left(\frac{R_2}{S} \right)$$

Se puede encontrar una expresión más detallada para el par producido, de la siguiente manera :



Primero se obtiene el voltaje Thevenin por medio de un divisor de voltaje.



$$V_{TH} = \left(\frac{jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m} \right) (V\Phi)$$

$$V_{TH} = \left(\frac{X_m}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X_m)^2}} \right) (V\Phi) \dots\dots\dots (4-5)$$

Con esta ecuación se obtiene la magnitud de V_{TH}

Con el mismo circuito anterior se obtiene la impedancia Thevenin Z_{TH} , como Z_1 y Z_m están en paralelo entonces :

$$Z_{TH} = \frac{j X_m (R_1 + jX_1)}{jX_m + (R_1 + jX_1)} = \frac{jX_m (R_1 + jX_m)}{R_1 + j (X_m + X_1)} = \frac{(Z_1) (Z_m)}{(Z_1) + (Z_m)}$$

La impedancia Thevenin esta compuesta por :

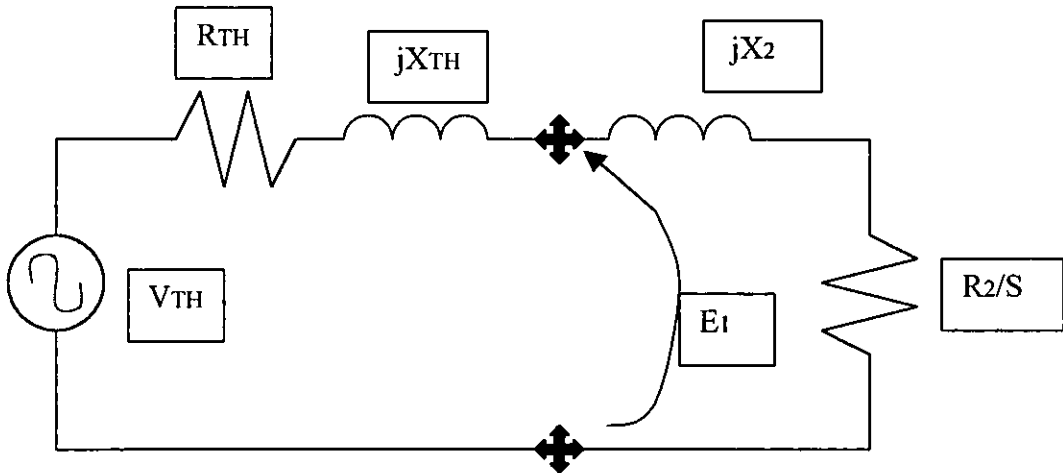
$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} \dots\dots\dots (4-6)$$

por lo que :

$$R_{TH} = R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 \dots\dots\dots (4-7)$$

$$y \quad X_{TH} \approx X_1 \dots\dots\dots (4-8)$$

De tal manera que el circuito quede :



Por lo que la corriente I₂ esta dada por :

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2}$$

Desarrollando

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + jX_{TH} + R_2/S + jX_2}$$

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_2/S + jX_{TH} + jX_2}$$

Por lo que la magnitud de I_2 esta dada por :

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/S)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \dots\dots\dots (4-9)$$

Ahora se sustituye I_2 de la expresión (4-9) en la expresión (3-5) de la potencia transferida al rotor y nos quedará :

$$P_{TR} = 3(I_2)^2 \left(\frac{R_2}{S} \right) \dots\dots\dots (3-5)$$

$$P_{TR} = (3) \left(\frac{R_2}{S} \right) \left(\frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/S)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \right)^2$$

$$P_{TR} = \frac{3V_{TH}^2 (R_2/S)}{(R_{TH} + R_2/S)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \dots\dots\dots (4-10)$$

Y sabiendo que el par producido esta dado por la expresión (4-4) :

$$T_p = \frac{P_{TR}}{\omega_s} \dots\dots\dots (4-4)$$

Ahora sustituyendo la expresión (4-10) de "PTR" en la expresión (4-4) del par producido se tiene :

$$T_p = \frac{3(V_{TH})^2 (R_2/S)}{[\ (R_{TH} + R_2/S)^2 (X_{TH} + X_2)^2 \]} \cdot \frac{\omega_s}{1}$$

$$T_p = \frac{3(V_{TH})^2 (R_2/S)}{(\omega_s) [(R_{TH} + R_2/S)^2 (X_{TH} + X_2)^2]} \dots\dots\dots (4-11)$$

La cual es la expresión del par producido en el motor.

Para obtener el par de arranque, se sabe que en el momento de dicho arranque el rotor no se mueve, por lo que en el arranque el deslizamiento es unitario (S=1), sustituyendo esto en la expresión (4-11), el par de arranque esta dado por :

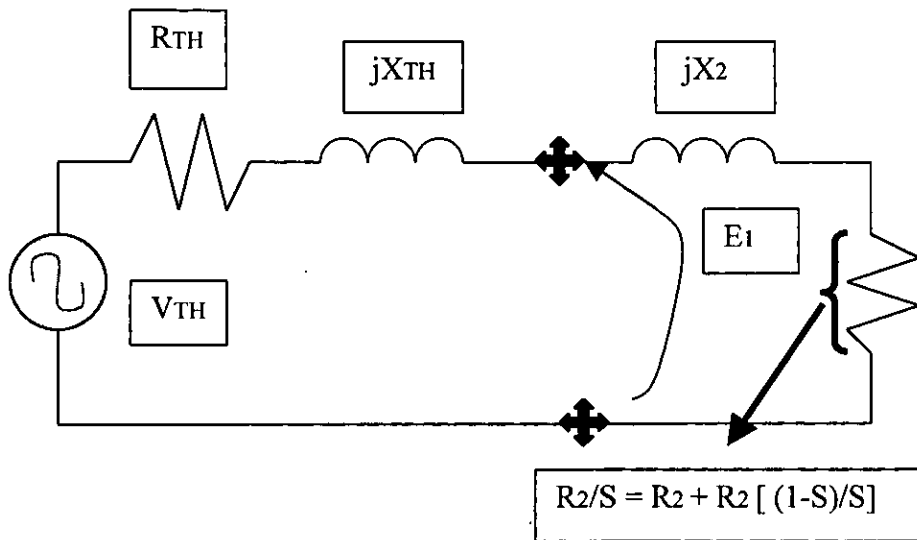
$$T_{arr} = \frac{3(V_{TH})^2 (R_2/S)}{(\omega_s) [(R_{TH} + R_2/S)^2 (X_{TH} + X_2)^2 \]} \dots\dots\dots (4-11)$$

$$T_{arr} = \frac{3(V_{TH})^2 (R_2/ (1))}{(\omega_s) [(R_{TH} + R_2/ (1))^2 (X_{TH} + X_2)^2 \]}$$

$$T_{arr} = \frac{3(V_{TH})^2 (R_2)}{(\omega_s) [(R_{TH} + R_2)^2 (X_{TH} + X_2)^2 \]} \dots\dots\dots (4-12)$$

Para obtener el par máximo, por consecuencia se necesita tener una potencia transferida al rotor (P_{TR}) máxima, dicha potencia al llegar al rotor es consumida tanto por " R_2 " (que se disipa en forma de calor " P_{cr} ") como por $R_2 [(1-S)/S]$ (que es la causante de desarrollar la potencia mecánica en el rotor a fin de producir el par), ambas forman a (R_2/S) , por lo que sí se desea tener un par máximo es necesario que la potencia consumida por (R_2/S) sea máxima.

La condición para obtener el par máximo es que la potencia que llega a (R_2/S) será máxima cuando la magnitud de su impedancia sea igual a la magnitud de la impedancia de la fuente, como se muestra a continuación.



La impedancia de la fuente es : $Z_F = R_{TH} + jX_{TH} + jX_2$

Así que la máxima potencia transferida se tiene cuando :

$$\frac{R_2}{S} = \sqrt{(R_{TH})^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

Por lo que el deslizamiento que se tiene en el momento en el que el motor desarrolla el par máximo, esta dado por :

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{R_2}{\sqrt{(R_{TH})^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (4-11) del par producido en el motor se obtiene una expresión para el par máximo.

$$T_{\text{máx}} = \frac{3(V_{\text{TH}})^2}{2 (\omega_s) [R_{\text{TH}} + \sqrt{(R_{\text{TH}})^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2}]} \dots\dots\dots (4-13)$$

4.2.6 EFECTOS QUE SE PRESENTAN AL VARIAR LA RESISTENCIA DEL ROTOR.

En la siguiente expresión del deslizamiento :

$$S_{\text{máx}} = \frac{R_2}{\sqrt{(R_{\text{TH}})^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2}}$$

Se puede observar que está presente la resistencia referida al rotor (R_2), por lo que se puede decir que el deslizamiento al cual se presenta el par máximo, depende originalmente de la resistencia del rotor.

Si se varia la resistencia en dicha resistencia del rotor, se logrará que el par máximo se obtenga a un deslizamiento deseado o a una determinada velocidad del rotor.

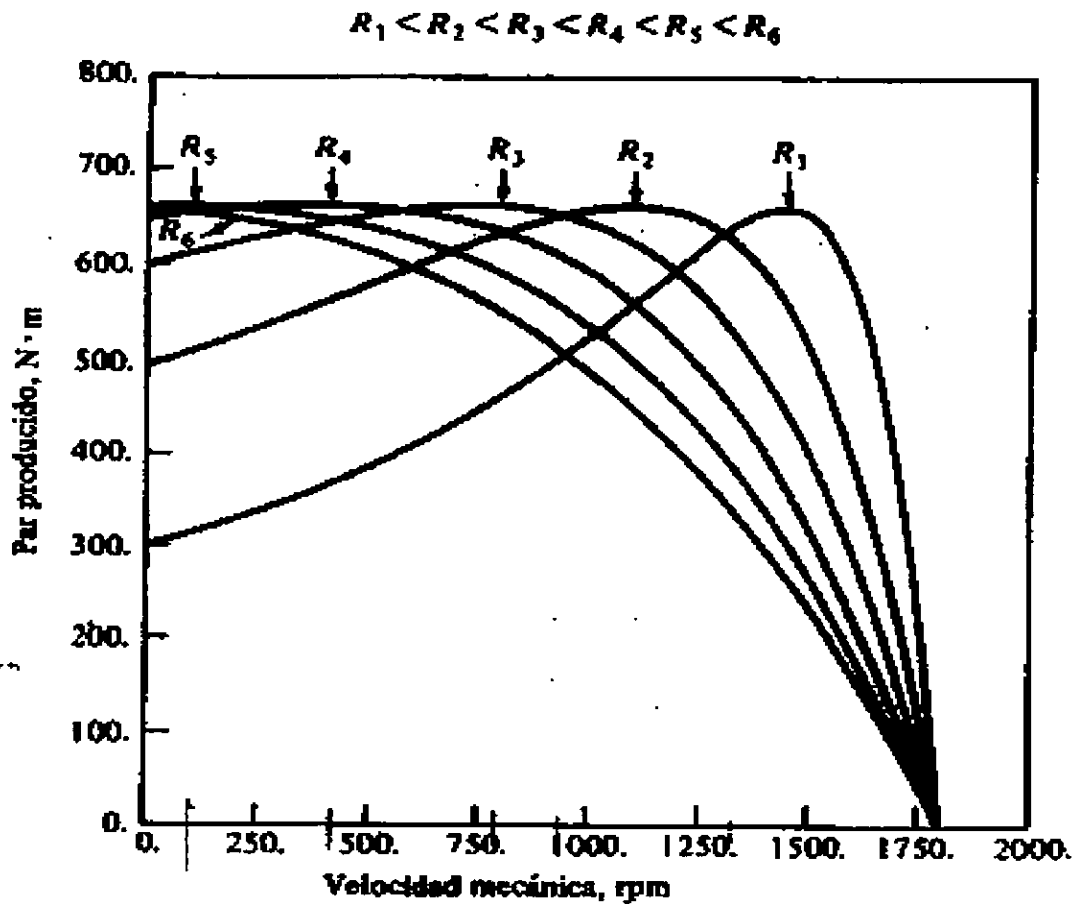


Figura 4.5. Efecto de la variación de la resistencia del rotor en la curva característica par-velocidad de un motor de inducción con rotor devanado. Esta gráfica fue obtenida del libro de “Máquinas Eléctricas” de Stephen J. Chapman.

En la figura 4.5 se observa lo que sucede con la curva característica par-velocidad del motor al aumentar la resistencia del rotor, al añadir resistencia a la del rotor, la velocidad a la que se produce el par máximo disminuye pero se observa que el par máximo se mantiene constante.

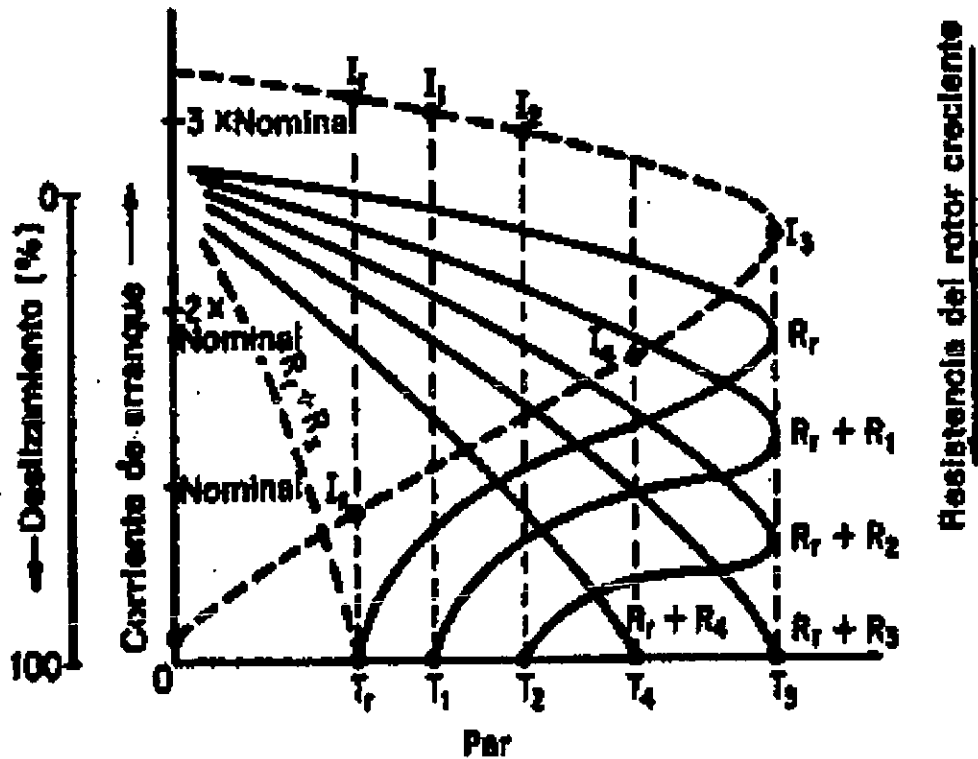
Se puede continuar añadiendo resistencia a la del rotor y en este procedimiento se muestra que el par de arranque también aumenta, este par seguirá aumentando hasta que en un momento dado el par máximo ocurra en condiciones de arranque, es decir, el par de arranque aumenta hasta el punto en el que alcance el par máximo.

En la siguiente figura 4.6, se muestran curvas par-deslizamiento para diferentes valores de resistencia del rotor, mostrando como se comporta el par de arranque (T_{arr}) y su respectiva corriente de arranque (I_{arr}).

Cuando se tiene la resistencia original del rotor o propia del rotor está presente un par de arranque "Tarr" el cual origina una corriente de arranque "Iarr", dicha corriente se muestra al interceptar una curva que es la que representa la corriente del estator, que se encuentra en la parte superior y esta punteada.

Al aumentar la resistencia del rotor (RR) el par de arranque aumentará de "Tarr" a T1, T2, T3, por consecuencia la corriente de arranque "Iarr" disminuirá de Iarr a I1, I2, I3 y así sucesivamente.

En la figura 4.6, se observa que al aumentar la resistencia del rotor hasta (RR + R3) hará que aumente el par de arranque hasta el punto en el que alcance el par máximo, si se aumenta la resistencia más allá de (RR + R3) el par de arranque disminuirá a T4, por lo que una vez teniendo el par máximo presente en el arranque ya no es necesario aumentar más la resistencia.



(a) Corriente de arranque en función del par.

Figura 4.6. Efecto de la variación de la resistencia del rotor sobre las características de arranque y de funcionamiento de un motor de inducción con rotor devanado en la curva de corriente de arranque en función del par. Esta gráfica fue obtenida del libro de "Máquinas Eléctricas Y Transformadores" de Kosow L. Irving.

En otras palabras, se puede decir que el efecto de variar la resistencia provoca que se pueda manipular la posición del par, de tal manera que se pueda tener el par máximo en el momento del arranque.

La posición en la que se encuentra el par de arranque no es otra cosa más que el deslizamiento, por lo que según lo anterior la resistencia se puede aumentar de tal manera que el par máximo se tenga a un deslizamiento alrededor del 100% o sea la unidad ($S=1$), es decir, casi en el momento del arranque.

Se debe tener en cuenta que el par máximo puede estar muy cerca de la unidad, pero nunca se podrá alcanzar.

En la figura 4.8, se puede observar el efecto de variar la resistencia, la cual provoca que se pueda manipular el deslizamiento para poder tener el par máximo en el momento del arranque.

La forma más común de variar la resistencia del rotor, es utilizando un motor de inducción con rotor devanado, ya que este consta de anillos rozantes y de escobillas las cuales hacen contacto con el exterior, para así poder insertar resistencias en el circuito de un rotor devanado, como se muestra en la figura 4.7.

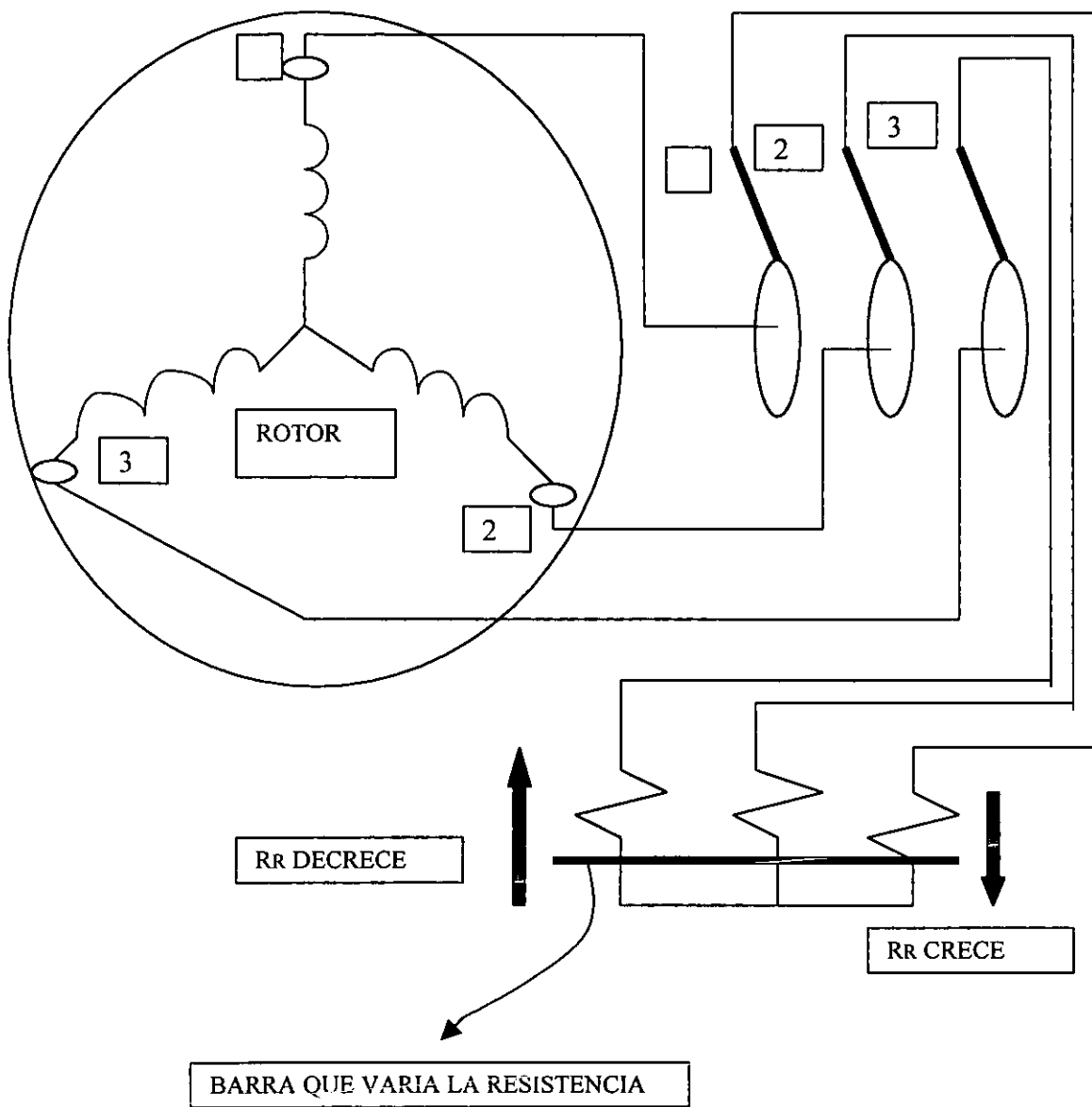


Figura 4.7. Sistema por medio del cual es posible variar la resistencia del rotor en un motor de inducción con rotor devanado. Para la realización de esta figura fue necesario basarse de dos esquemas o figuras mostradas en los libros de “El ABC De Las Máquinas Eléctricas II” de Gilberto Enríques Harper y de “Máquinas Eléctricas Y Transformadores” de Kosow L. Irving.

Con los motores de inducción con rotor devanado se les puede aumentar la resistencia del rotor para que el par máximo pueda ocurrir cerca de la condición de arranque para que así el motor pueda arrancar con carga muy pesada. Una vez que el rotor gire con la carga se le retira la resistencia que se le añadió a la resistencia del rotor, para que el par máximo se desplace a velocidades más cercanas a la síncrona, para operación normal.

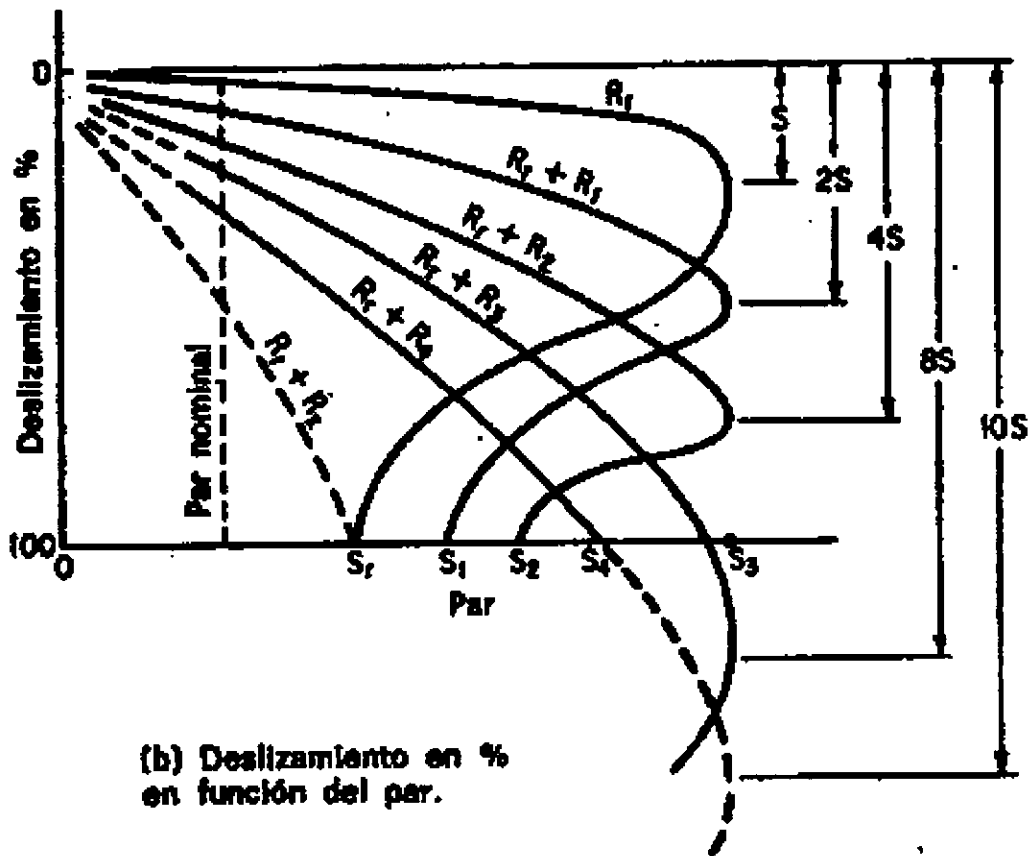
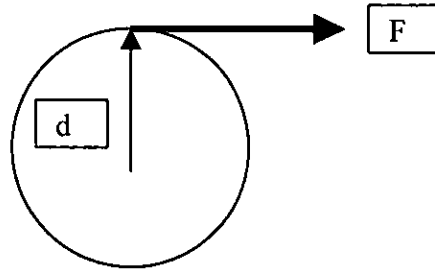


Figura 4.8. Efecto de la variación de la resistencia del rotor sobre las características de arranque y de funcionamiento de un motor de inducción con rotor devanado en la curva de deslizamiento en % en función del par. Esta gráfica fue obtenida del libro de "Máquinas Eléctricas Y Transformadores" de Kosow L. Irving.

Por ultimo se presentarán algunas consideraciones básicas como :

- a) Un motor eléctrico es una máquina que consume potencia eléctrica para después convertirla en potencia mecánica.
- b) El par es la fuerza que se tiene disponible en el eje del motor para poder mover una carga, y se expresa en Newton por metro, el Newton es de fuerza y los metros es por la distancia radial.



- c) Cuando un motor se dice que esta operando en vacío es porque el rotor gira libremente, es decir, no se le acopla a su eje ninguna carga.
- d) Cuando el motor opera en vacío, el par disponible en le eje del motor es el suficiente para librar las pérdidas por fricción y ventilación principalmente.
- e) Debido a que un motor de inducción es capaz de producir un par de arranque, puede arrancar con carga acoplada a su eje.
- f) La variación del deslizamiento afecta directamente a : la frecuencia, a la reactancia del rotor y a la fuerza electromotriz inducida.
- g) En vacío el factor de potencia es muy pequeño, a plena carga es el máximo y posteriormente disminuye al aumentar más la carga.
- h) La reactancia del rotor es menor que la resistencia del rotor en el rango entre vacío y plena carga; de plena carga al par máximo la resistencia es del mismo orden que la reactancia del rotor; pasando el par máximo la resistencia del rotor se hace despreciable comparada con la reactancia del rotor.
- i) Se tiene tres pares principales que el motor de inducción puede desarrollar : *el par de arranque, el par de plena carga o nominal y el par máximo o límite de estabilidad.*
- j) El par de arranque en un motor de inducción puede ser tan elevado incluso mayor que su valor a plena carga.

- k) Si el rotor del motor de inducción alcanzara la velocidad síncrona, el deslizamiento sería cero y por lo tanto el par también sería cero.
- l) Cuando el deslizamiento se incrementa por efecto de la disminución en la velocidad del rotor, debida al incremento de carga, el par aumenta hasta alcanzar su par máximo.
- m) Más allá del par máximo, el par disminuye por el aumento excesivo de la carga.
- n) Al aumentar la resistencia del rotor, el par máximo se puede obtener a un deslizamiento deseado.
- o) Al aumentar la resistencia, se obtienen pares de arranque elevados.
- p) Al aumentar la resistencia, se obtienen corrientes de arranque reducidas.
- q) Para la manipulación de la resistencia del rotor normalmente es común el uso de motores de inducción con rotor devanado, ya que consta de conexiones de los devanados del rotor a los anillos rozantes y estos a su vez con escobillas y éstas van hacia el exterior para poder colocar las resistencias, con las cuales se aumentara la resistencia propia del rotor.

4.3 CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO.

El motor síncrono como el motor de inducción son máquinas que consumen potencia eléctrica y la convierten a potencia mecánica disponible en su eje.

Un motor síncrono es usado en aplicaciones de baja velocidad y de gran potencia, es decir, son usados para cargas que requieren de baja velocidad y de gran potencia.

Como se sabe un motor síncrono se caracteriza por tener velocidad constante, por lo que suministra potencia a cargas que básicamente son de velocidad constante. La velocidad a la que gira el rotor (velocidad síncrona) esta fijada por la frecuencia eléctrica que el motor toma de la línea, y como ésta no varía, la velocidad del motor no variara tampoco, manteniendo una velocidad síncrona constante y que es totalmente independiente de la carga, es decir, al aumentar carga en el eje del motor no afectará su velocidad, como ocurría con el motor de inducción.

Según la cantidad de potencia que demanda el motor de la línea, el voltaje en terminales y la frecuencia se mantendrán constantes, pero la corriente que el motor consuma no, ésta variará junto con la potencia que el motor demande de la línea.

Anteriormente se había mencionado que un motor síncrono no tiene par de arranque propio, por lo que necesita ser accionado por algún medio externo, para poderlo llevar a una velocidad síncrona y así poder provocar que el motor desarrolle un par continuo.

Después de lo anterior el medio externo de arranque es retirado, por lo que ahora es posible fijar una carga al eje del motor; después de esto el motor desarrollará un par para poder atender el efecto de la carga sobre su eje.

Cuando un motor síncrono opera en vacío demanda una determinada potencia de la línea, que será suficiente para mantener la velocidad síncrona.

4.3.1 COMPORTAMIENTO DEL MOTOR SÍNCRONO CON CARGA VARIABLE A CORRIENTE DE EXCITACIÓN (I_f) CONSTANTE.

Por medio de los diagramas fasoriales se puede observar el comportamiento de un motor síncrono bajo el efecto de la carga. Existen tres tipos de diagramas fasoriales los cuales muestran diferentes condiciones de operación del motor síncrono, en dichos diagramas se desprecia la resistencia de armadura.

En las siguientes figuras se observan los tres diagramas fasoriales, de los cuales el del inciso (a) muestra que la corriente de armadura está en fase con el voltaje de fase ($V\Phi$) y por lo tanto el motor opera con un factor de potencia unitario; en el inciso (b) la corriente de armadura esta adelantada con respecto al voltaje de fase ($V\Phi$) y por lo tanto el motor opera con un factor de potencia adelantado; en el inciso (c) la corriente de armadura (I_a) esta atrasada con respecto al voltaje de fase ($V\Phi$) y por lo tanto el motor opera con un factor de potencia atrasado.

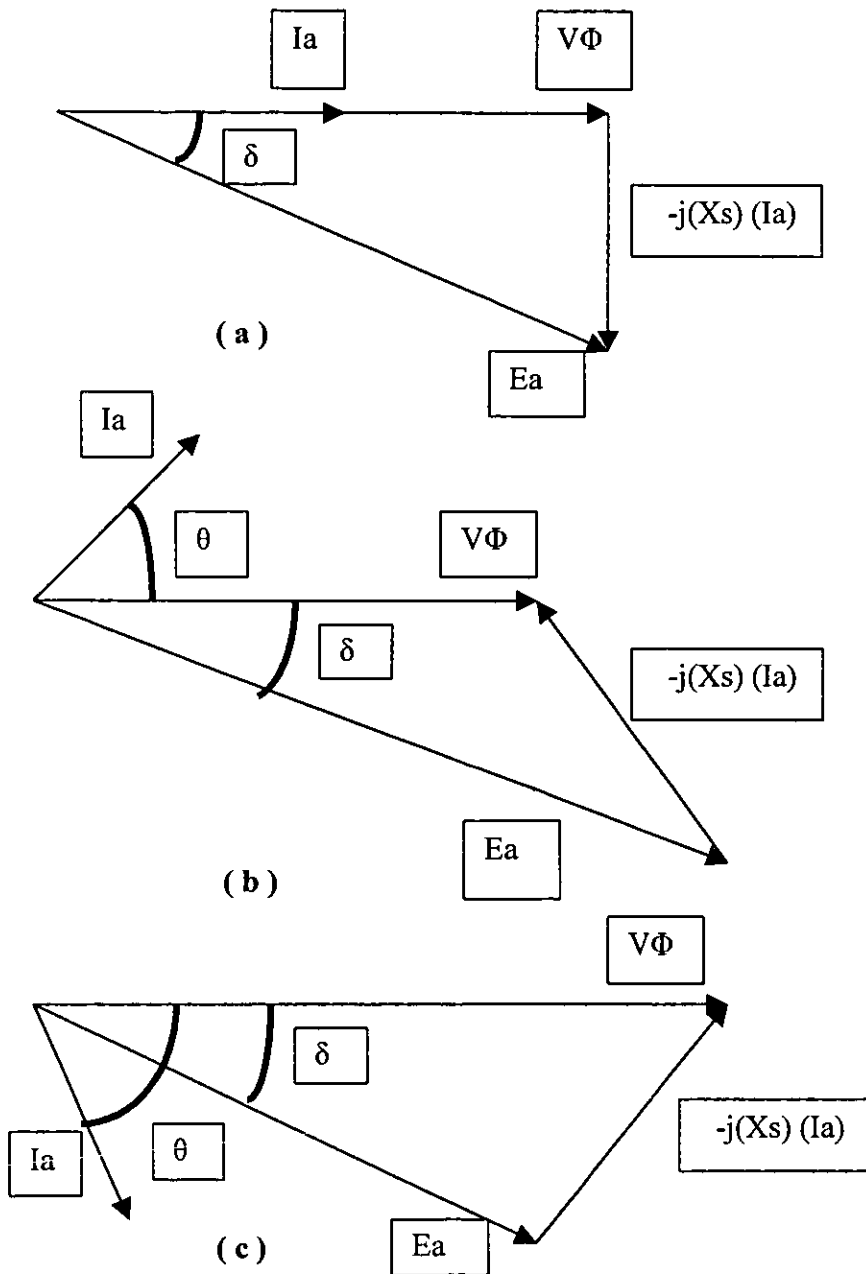


Figura 4.9. Se presentan tres diagramas fasoriales con los cuales es posible mostrar el comportamiento de un motor síncrono; en el inciso (a) se tiene el diagrama fasorial de un motor síncrono operando con factor de potencia unitario; en el inciso (b) se tiene el diagrama fasorial de un motor síncrono operando con factor de potencia en adelante; en el inciso (c) se tiene el diagrama fasorial de un motor síncrono operando con factor de potencia en atraso. Estos diagramas fueron obtenidos del libro de “Curso de Máquinas Síncronas” de Gilberto Enríques Harper.

Se utilizarán los diagramas fasoriales de los incisos (b) y (a) para observar el comportamiento de un motor síncrono al aumentar la carga en su eje, se usará principalmente el diagrama fasorial del inciso (b) que es cuando el motor opera a un factor de potencia adelantado, posteriormente se podrá observar el diagrama del inciso (a) que es cuando el motor opera a un factor de potencia unitario.

La siguiente figura 4.10, muestra el diagrama fasorial de un motor operando con factor de potencia adelantado antes de que la carga acoplada al eje aumente, al aumentar la carga el rotor baja su velocidad momentáneamente, provocando que el ángulo de par (δ) aumente y por consecuencia se incrementa el par para poder atender el efecto de la carga sobre su eje. El aumento de par acelera el rotor el cual volverá a girar a su velocidad síncrona.

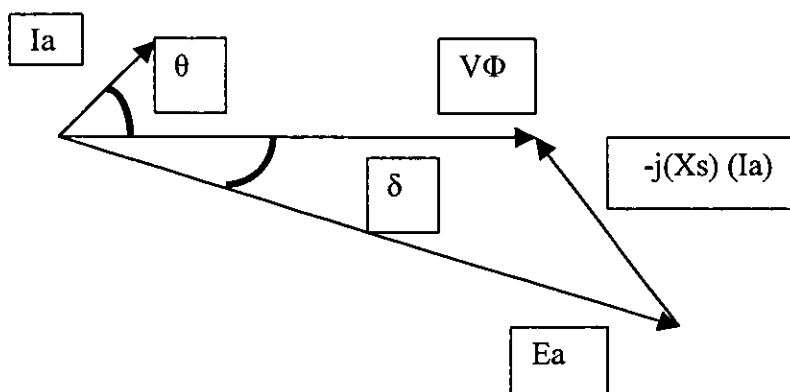


Figura 4.10.Diagrama fasorial de un motor síncrono operando con factor de potencia en adelanto, antes de que la carga conectada al motor se varíe.

En la figura 4.11, se observa que al aumentar la carga el ángulo de par aumenta de δ a δ_1 , pero la fuerza electromotriz inducida internamente (E_a) se mantiene constante, ya que sólo gira hacia abajo sobre su propio eje, pero no sólo es por eso que se mantiene constante si no porque la corriente de excitación o de campo (I_F) no se ha variado hasta ahora, y como ésta no cambia de valor tampoco lo hace (E_a).

El fasor ($-jX_s(I_a)$) también aumenta al aumentar la carga, por lo que la corriente de armadura (I_a) también aumenta y por consecuencia el motor demandará más corriente de línea, provocando que la potencia eléctrica que consuma el motor de la línea sea mayor.

Como la corriente de armadura (I_a) se incrementa, también lo hará su fasor, en la figura 4.11 se observa que dicho fasor se va atrasando con respecto de su posición original al aumentar la carga, provocando que el ángulo del factor de potencia disminuya de θ a θ_1 .

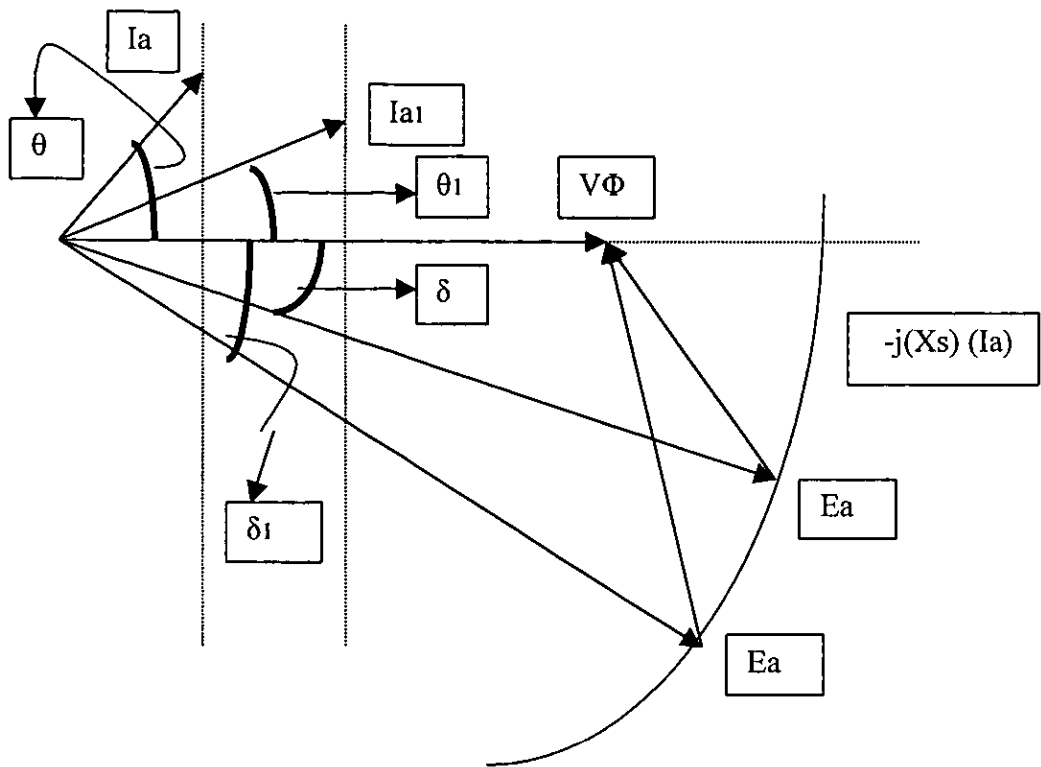


Figura 4.11. En esta figura se puede observar como se comporta el diagrama fasorial inicial de la figura 4.10 al aumentarle la carga al motor. Para la realización de este diagrama fue necesario basarse del original, el cual se encuentra en el libro de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

Si se vuelve a incrementar la carga otra vez (E_a) gira hacia abajo manteniéndose constante y provocando que el ángulo de par aumente de δ_1 a δ_2 ; el fasor $(-jX_s(I_a))$ también aumentará, provocando que la (I_a) aumente de I_{a1} a I_{a2} y por lo tanto su fasor se pondrá en fase con el voltaje de fase ($V\Phi$), esto hará que el ángulo del factor de potencia sea cero, por lo que el factor de potencia será unitario ya que : $\cos(0) = 1$.

Al suceder lo anterior con un segundo aumento de carga, se observa en la siguiente figura, que el diagrama al que se ha llegado es el de cuando el motor opera con factor de potencia unitario, el cual se observó en la figura 4.9 inciso (a).

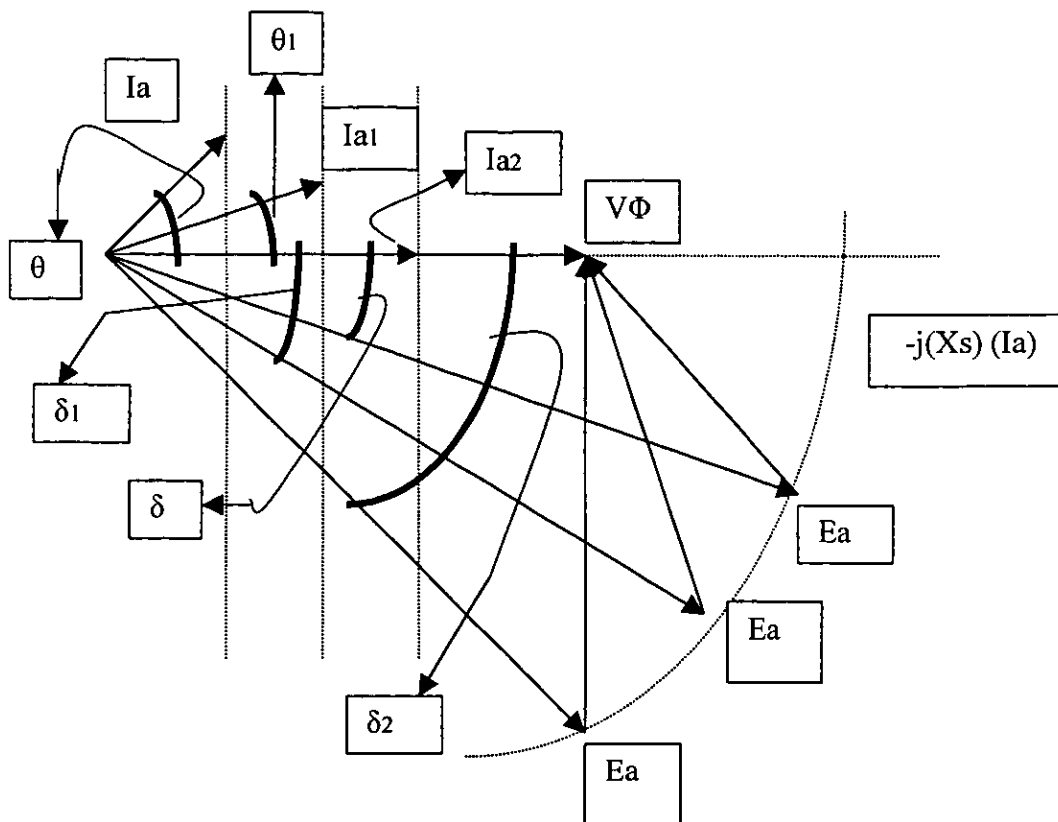


Figura 4.12. En esta figura se puede seguir observando como se comporta el diagrama fasorial inicial de la figura 4.10, después de un segundo aumento de carga en el motor. Para la realización de este diagrama fue necesario basarse del original, el cual se obtuvo del libro de “Máquinas Eléctricas” de Stephen J. Chapman.

Si se incrementa otra vez la carga, (E_a) volverá a girar hacia abajo manteniéndose constante ya que la corriente de excitación o dc campo (I_f) permanece constante; el que (E_a) siga girando hacia abajo, provoca que el ángulo de par aumente otra vez de δ_2 a δ_3 y por consecuencia el par que desarrolla el motor para atender el efecto de la carga sobre su eje también aumentará. El fasor $(-jX_s)(I_a)$ se incrementará, provocando que la (I_a) aumente de I_{a2} a I_{a3} y por lo tanto su fasor dejara de estar en fase con ($V\Phi$), por lo que dicho fasor se retrasará aún más con respecto a su posición original.

Al retrasarse el fasor (I_a) con respecto a (I_{a2}) el ángulo del factor de potencia aumenta otra vez, sólo que ahora se encuentra atrasado, por lo que el aumento de carga hace que el ángulo del factor de potencia pase de un ángulo igual a cero ($\theta_2 = 0$) a un ángulo θ_3 en atraso, como se puede observar en la figura 4.13.

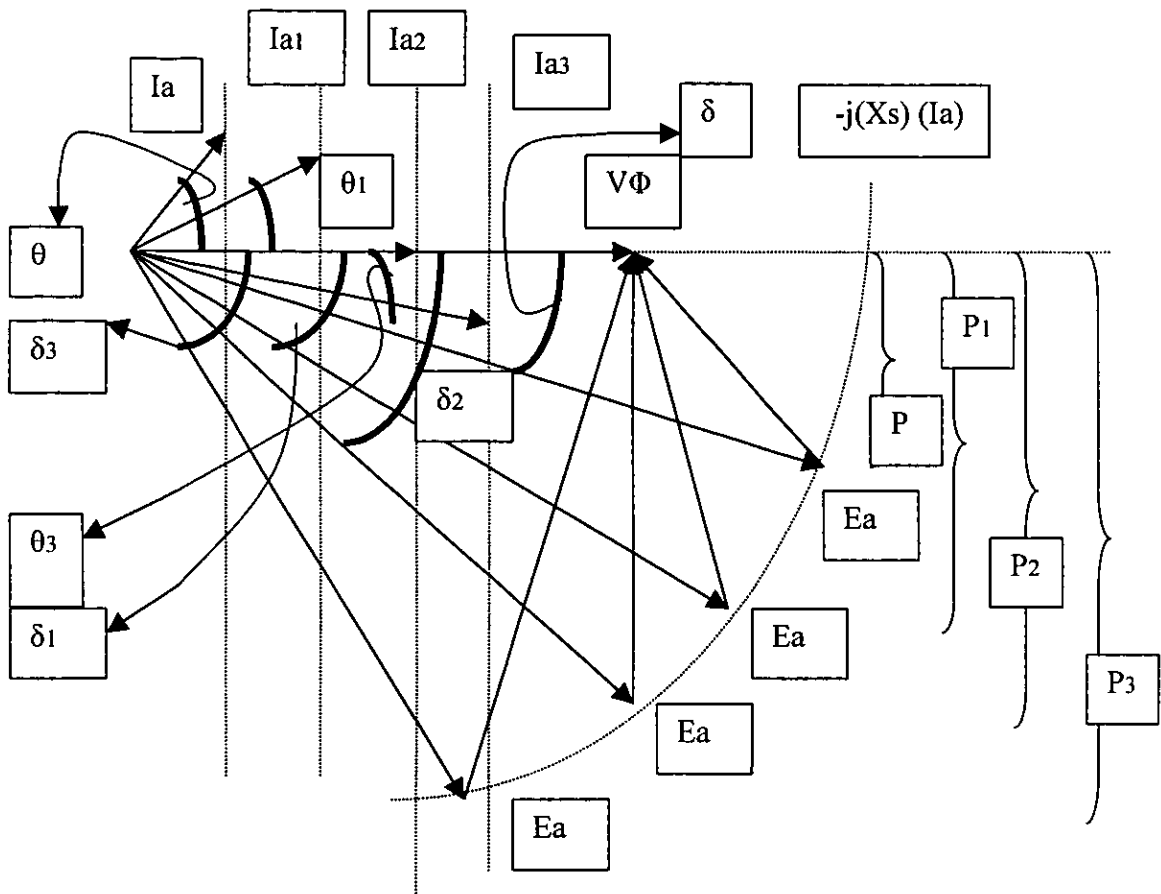


Figura 4.13. En esta figurase puede observar como queda el diagrama fasorial de la figura 4.10 después de un tercer y último aumento de carga. Para la realización de este diagrama fue necesario basarse del original, el cual se obtuvo del libro de “Máquinas Eléctricas” de Stephen J.Chapman.

Se puede concluir que un diagrama fasorial con factor de potencia en adelanto, al aumentar la carga se convierte en un diagrama fasorial con factor de potencia unitario; posteriormente con otro aumento de carga ambos diagramas fasoriales sufren cambios similares, como se pudo observar en la figura 4.13, es decir, (I_a) se sigue retrasando, el ángulo del factor de potencia (θ) también, (E_a) sigue constante pero sigue girando hacia abajo, provocando que el ángulo de par (δ) siga aumentando para poder desarrollar más par en el motor.

Por lo que se puede decir que los diagramas fasoriales tanto con factor de potencia unitario como de factor de potencia en adelanto sufren los mismos cambios, por el efecto debido al aumento de carga, sólo que uno empieza con su ángulo de factor de potencia (θ) igual a cero ya que (I_a) esta en fase con ($V\Phi$).

En la figura 4.13, se puede observar que un aumento de carga trae consigo un aumento en la potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor, razón por la cual el motor demandará más consumo de potencia eléctrica que toma de la línea, haciendo que la corriente de línea y por lo tanto la corriente de armadura aumente.

Ahora se observará el comportamiento del motor síncrono al aumentar la carga, por medio del diagrama fasorial cuando dicho motor opera con un factor de potencia atrasado.

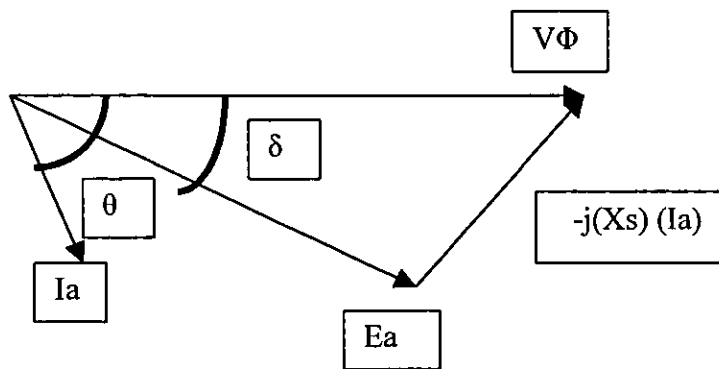


Figura 4.14. Diagrama fasorial de un motor síncrono operando con factor de potencia atrasado, antes de que la carga conectada al eje del motor se varié.

En la figura 4.14, se muestra un diagrama fasorial de un motor operando con factor de potencia atrasado, antes de que la carga acoplada al eje aumente. Al aumentar la carga el ángulo de par (δ) aumenta y por consecuencia se incrementa el par para poder atender el efecto de la carga sobre su eje.

En la figura 4.15 se observa que al aumentar la carga, el ángulo de par aumenta de δ a δ_1 , pero la fuerza electromotriz inducida internamente (E_a) se mantiene constante ya que sólo gira hacia abajo sobre su propio eje, pero no es por esto que se mantiene constante, si no porque la corriente de excitación o de campo (I_f) no varía al aumentar la carga y como no varía, el valor de E_a tampoco lo hace.

El fasor ($-jX_s (I_a)$) también aumentará, provocando que la (I_a) aumente de I_a a I_{a1} y hará que su fasor gire hacia arriba con respecto de su posición original al aumentar la carga, provocando que el ángulo del factor de potencia (θ) disminuya de θ a θ_1 .

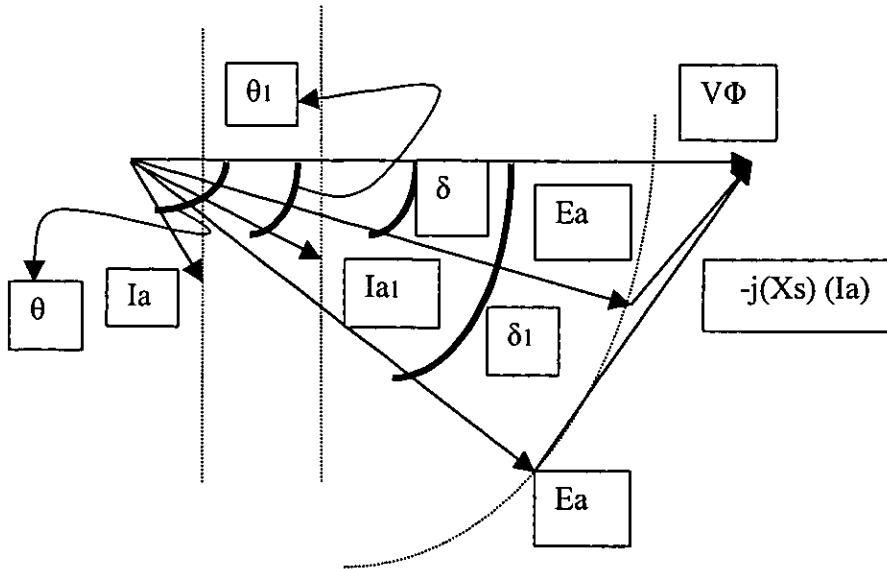


Figura 4.15. En esta figura se puede observar como se comporta el diagrama fasorial inicial mostrado en la figura 4.14 al aumentarle la carga al motor. Para la realización de este diagrama fue necesario hacer una analogía con respecto al diagrama 4.11, el cual representaba a un diagrama fasorial de un motor síncrono operando con factor de potencia en adelanto y ahora se tiene el caso inverso.

Si se vuelve a incrementar la carga otra vez, (E_a) seguirá girando hacia abajo manteniéndose constante y provocando que el ángulo de par aumente de δ_1 a δ_2 ; el fasor ($-jX_s(I_a)$) también aumentará, provocando que la (I_a) aumente de I_{a1} a I_{a2} y por lo tanto su fasor aumentara y girara hacia arriba otra vez de tal forma que casi este en fase con ($V\Phi$), esto hará que el ángulo del factor de potencia (θ) disminuya más, provocando que el factor de potencia este muy cercas de ser unitario. Por lo que se puede decir que al aumentar la carga el factor de potencia mejora, ya que llega a ser menos y menos atrasado y por consecuencia más y más adelantado.

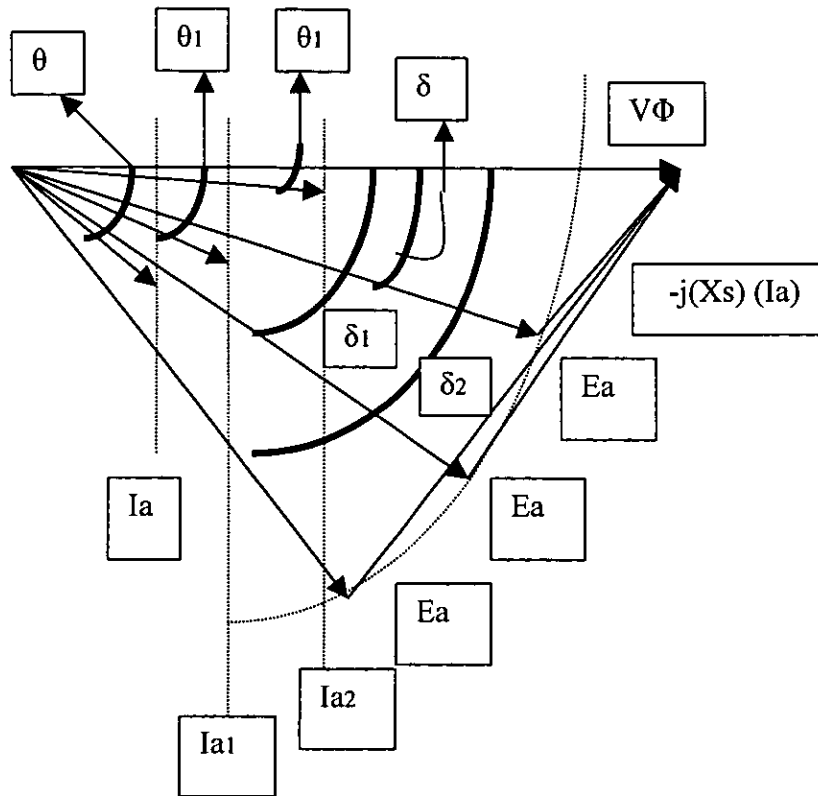


Figura 4.16. En esta figura se puede observar como queda el diagrama fasorial de la figura 4.14 después de un segundo y último aumento de carga. Para la realización de este diagrama fue necesario hacer una analogía con respecto al comportamiento de un diagrama fasorial del motor síncrono operando con factor de potencia en adelanto, de tal manera que en esta figura se presenta el caso inverso.

En general se puede decir que los efectos producidos en el motor síncrono, debido al aumento de carga bajo excitación constante (sin variar la corriente de excitación o de campo (I_F)), en los tres diferentes diagramas fasoriales son los siguientes :

- i. Al aumentar la carga en el eje del motor, la corriente de armadura (I_a) aumenta.
- ii. Si el motor síncrono opera con factor de potencia en adelanto o con factor de potencia en atraso, dicho factor de potencia tiende a aproximarse a la unidad, debido al aumento de carga que se le aplica al eje del motor.
- iii. Si el motor síncrono opera con factor de potencia unitario, dicho factor de potencia tenderá a retrasarse al aumentar la carga.

El efecto de la carga sobre el ángulo del factor de potencia y la corriente de armadura es la siguiente :

- i. Si el motor síncrono opera con factor de potencia en adelanto o con factor de potencia en atraso, el ángulo el factor de potencia tiende a variar más que la magnitud de la corriente de armadura.
- ii. Si el motor síncrono opera con factor de potencia unidad, el ángulo del factor de potencia tiende a variar menos que la magnitud de la corriente de armadura, es decir, la variación de dicha corriente es mayor.

Algo importante es que al aumentar la carga, el ángulo de par también aumenta, provocando un incremento en el par que desarrolla el motor; el motor síncrono así como el motor de inducción también consta de un par máximo, mejor conocido como "*Par de Desenganche*". Si el aumento de carga provoca que el motor desarrolle un par arriba del par de desenganche, el rotor no se podrá mantener alineado o enganchado con el campo magnético giratorio del estator, provocando que el rotor gire más despacio y como consecuencia el campo giratorio del estator lo traslapa varias veces, esto hace que la dirección del par producido se invierta en un sentido y luego en otro, provocando que el motor comience a vibrar severamente.

Por lo que el valor máximo de par que puede desarrollar un motor síncrono sin pérdidas de sincrónismo, se le llama par de desenganche, este par puede variar del 125% al 350% del valor a plena carga; el par de desenganche se alcanza cuando en los tres tipos de diagramas fasoriales, el valor del ángulo de par es igual a 90° , es decir, $\delta = 90^\circ$.

La pérdida de la sincronización después de que se excede el par de desenganche, se le conoce como "*polos deslizantes*".

En la siguiente figura 4.17 se observa la característica par-velocidad de un motor síncrono, se puede apreciar que la velocidad que desarrolla el rotor es constante desde vacío hasta el par de desenganche.

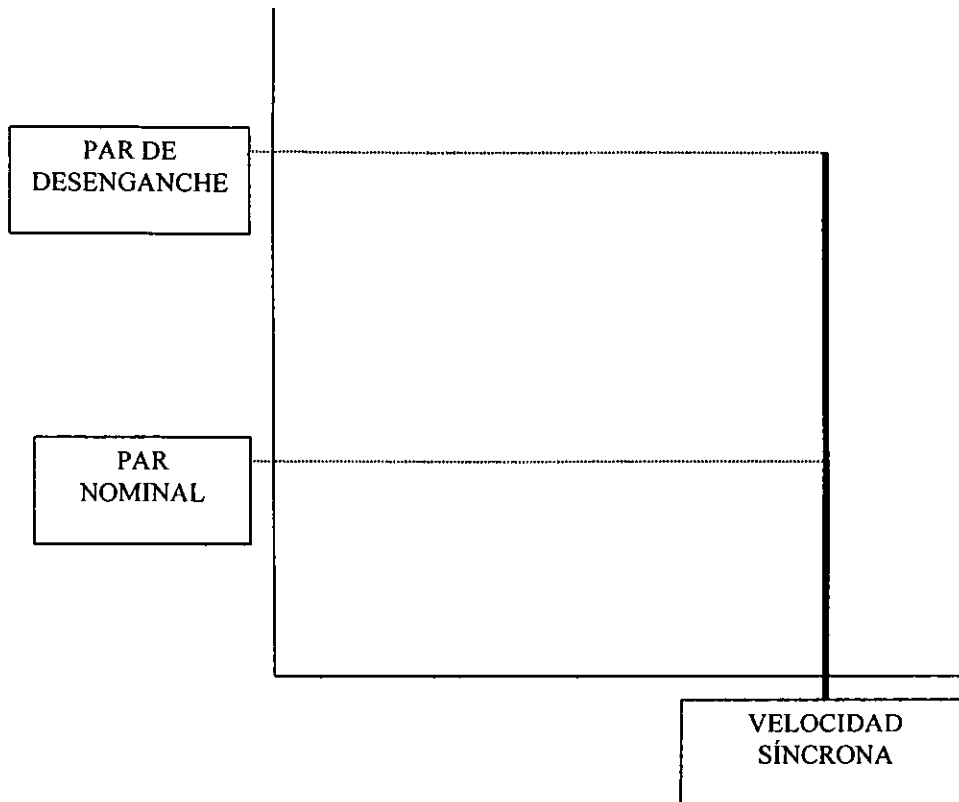


Figura 4.17. Característica par-velocidad de un motor síncrono. Esta figura fue obtenida del libro de “Máquinas Eléctricas” de Stephen J. Chapman.

4.3.2 COMPORTAMIENTO CON EXCITACIÓN VARIABLE Y CARGA CONSTANTE

Aquí se observará el comportamiento de un motor síncrono al variar su excitación de C.C o la corriente de campo (I_F), anteriormente se había variado la carga que se le aplicaba al eje del motor y se mantenía la corriente de excitación o de campo (I_F) constante; pero ahora se hará totalmente lo contrario, la carga se mantendrá constante y la corriente de excitación o de campo (I_F) se variara.

Como los efectos eran observados por medio de los diagramas fasoriales al aumentar la carga, aquí no será la excepción, ya que se utilizarán también para poder ver los efectos al variar la corriente de campo (I_F).

Originalmente se tendrá un diagrama fasorial con factor de potencia en atraso, como el mostrado en la siguiente figura 4.18.

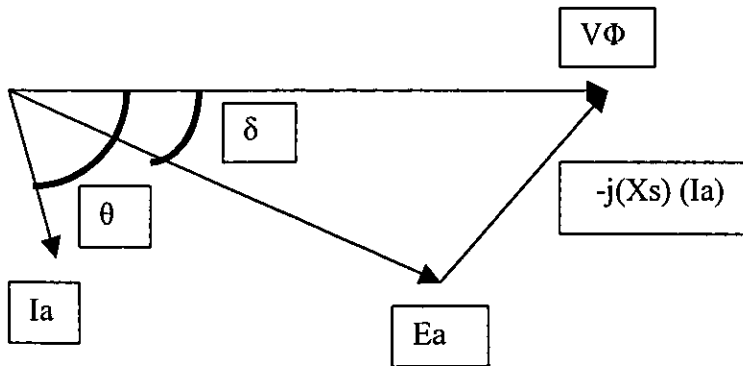


Figura 4.18. Diagrama fasorial de un motor síncrono operando con factor de potencia en atraso.

Al tener el primer aumento en la corriente de campo (I_F), el fasor (E_a) aumenta deslizándose sobre una línea horizontal hacia delante de E_a a E_{a1} ; el fasor (I_a) gira hacia arriba pasando de I_a a I_{a1} , es de notarse que su valor ha crecido y que además se encuentra en fase con ($V\Phi$) formando el diagrama fasorial con factor de potencia unitario; el ángulo del factor de potencia (θ) decreció hasta ser igual a cero, por lo que, si $\cos(\theta) = 1$ el factor de potencia aquí es unitario.

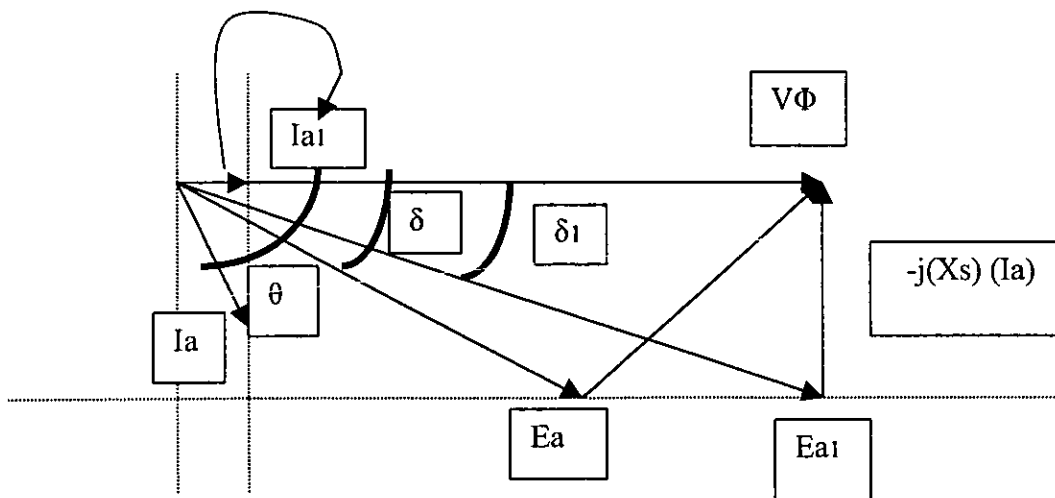


Figura 4.19. En esta figura se puede observar como se comporta el diagrama fasorial inicial de la figura 4.18 al aumentarle la corriente de excitación o de campo (I_F) al motor. Para la realización de este diagrama fue necesario basarse del original, el cual se obtuvo del libro de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J.Chapman.

Si la corriente decrece de I_a a I_{a1} , por consecuencia el fasor ($-jX_s(I_a)$) debe hacerlo también; el ángulo de par (δ) sufre también una pequeña disminución en su valor.

Al tener un segundo aumento en la corriente de campo (I_f), el fasor (E_a) aumenta otra vez deslizándose sobre una línea horizontal hacia delante pasando de E_{a1} a E_{a2} ; el fasor (I_a) sigue girando hacia arriba pasando de I_{a1} a I_{a2} , es de notarse que su valor a aumentado y que además se encuentra adelantado con respecto de su posición anterior, formando esta vez un diagrama con factor de potencia en adelanto; el ángulo del factor de potencia (θ) a aumentado de $\theta=0$ a θ_2 , el cual ahora esta adelantado.

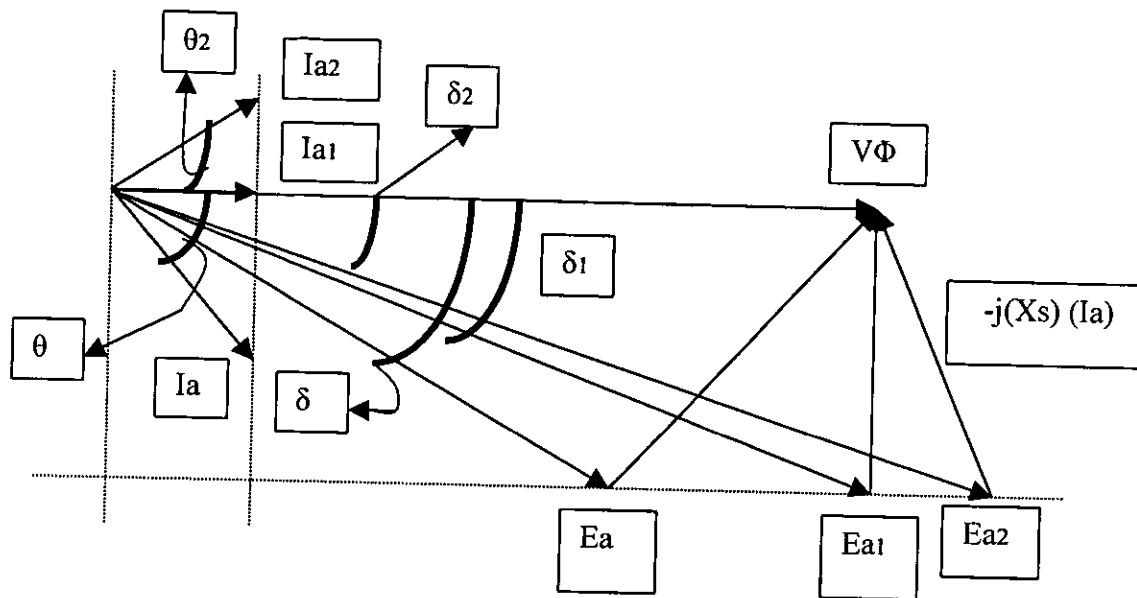


Figura 4.20. En esta figura se puede seguir observando como se comporta el diagrama fasorial inicial de la figura 4.18 después de un segundo aumento en la corriente de excitación o de campo (I_f) en el motor. Para la realización de este diagrama fue necesario basarse del original, el cual se obtuvo del libro de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

Si la corriente de armadura crece de I_{a1} a I_{a2} , por consecuencia el fasor ($-jX_s(I_a)$) debe hacerlo también, el ángulo de par (δ) sufre otra pequeña disminución con respecto a su valor anterior.

Al tener un tercer aumento en la corriente de campo (I_f), el fasor E_a aumenta otra vez deslizándose sobre una línea horizontal hacia delante, pasando de E_{a2} a E_{a3} ; el fasor (I_a) sigue girando hacia arriba pasando de I_{a2} a I_{a3} , su valor a aumentado con respecto a su valor anterior y sigue adelantándose más y más; el ángulo del factor de potencia (θ) sigue aumentando de θ_2 a θ_3 y haciéndose más adelantado.

Si la corriente de armadura crece otra vez de I_{a2} a I_{a3} , por consecuencia el fasor ($-jX_s(I_a)$) debe hacerlo también; el ángulo de par (δ) sufre otra de pequeña disminución.

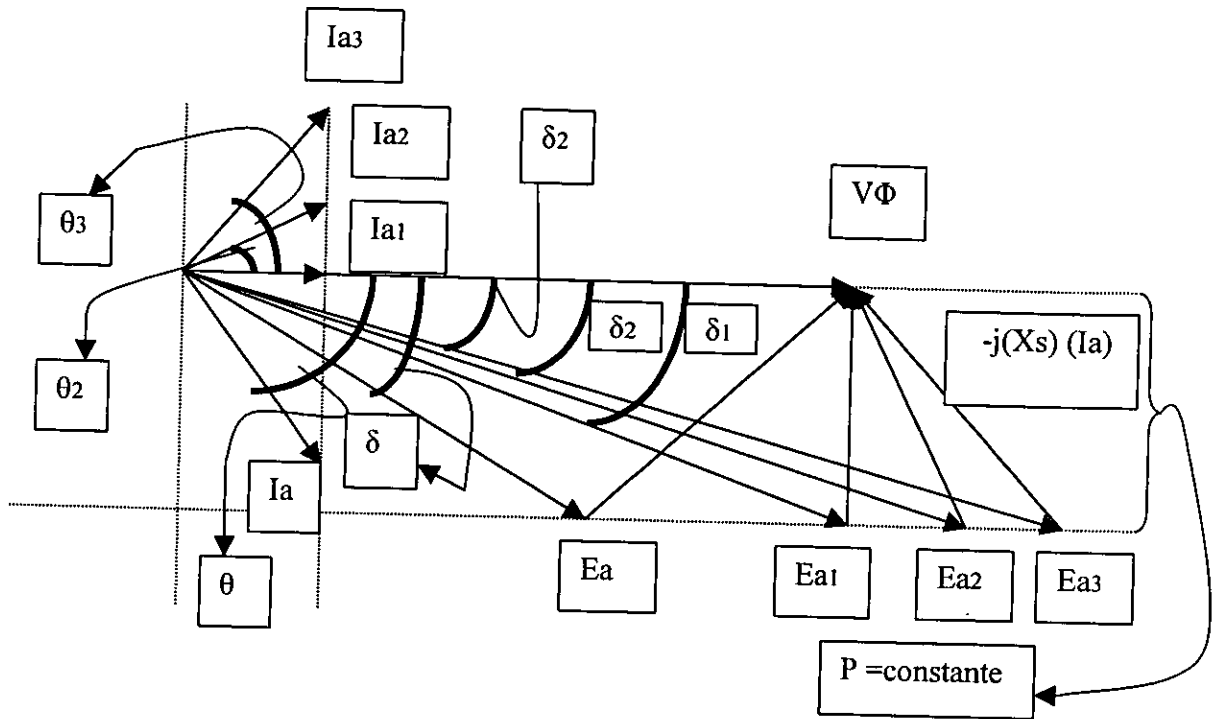


Figura 4.21. En esta figura se puede observar como queda el diagrama fasorial de la figura 4.18 después de un tercer y último aumento de la corriente de excitación o de campo (I_F) en el motor. Para la realización de este diagrama fue necesario basarse del original, el cual se obtuvo del libro de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

En la figura 4.21, se puede observar que al haber un incremento en la corriente de campo " I_F " la magnitud de " E_a " aumenta, por lo que puede decir que E_a depende de " I_F "; el incremento en la corriente de campo no afecta la potencia suministrada a la carga (potencia mecánica disponible en el eje) por lo que permanecerá constante.

La velocidad a la que gira el rotor se mantiene constante, así como también el voltaje de fase ($V\Phi$); como " E_a " depende de " I_F ", al aumentar la corriente de campo " E_a " aumenta, pero lo hace deslizándose a lo largo de una línea horizontal, la cual es la línea de potencia constante.

También se puede observar en la figura 4.21, que con E_a la corriente de armadura I_a se encuentra atrasada así como el ángulo de su factor de potencia, provocando que el motor se comporte como una carga inductiva para el sistema de potencia, provocando que el motor consuma potencia reactiva (+Q) de la línea o del sistema de potencia.

Con una E_{a1} la corriente de armadura se encuentra en fase con $V\Phi$, así el ángulo del factor de potencia es cero, por lo que su factor de potencia es unitario, provocando que el motor se comporte como una carga resistiva para el sistema de potencia, haciendo que el motor consuma en su mayoría potencia real (P) de la línea o del sistema de potencia.

Con una E_a2 la corriente de armadura se encuentra adelantada, así como el ángulo de su factor de potencia, provocando que el motor se comporte como una carga capacitiva para el sistema de potencia, haciendo que el motor consuma potencia reactiva negativa ($-Q$) de la línea o del sistema de potencia.

Como un motor es capaz de consumir tanto potencia reactiva (Q) como potencia real o activa (P), esto hará que cuando el motor se comporte como una carga inductiva en realidad se comportara como una carga inductiva-resistiva; cuando se comporte como una carga capacitiva en realidad será una carga capacitiva-resistiva.

Se puede decir que mediante el control de la corriente de campo " I_F " se puede manipular la posición del ángulo del factor de potencia, de tal manera que se pueda controlar el tipo de potencia que consuma el motor.

Se sabe que hay tres tipos de diagramas fasoriales y una vez que se sabe el efecto que produce en ellos el aumento de la corriente de campo " I_F ", se puede decir que :

- i. Si la corriente de armadura " I_a " esta en fase con respecto al voltaje " $V\Phi$ ", se dice que el motor opera a "*Excitación Normal*".

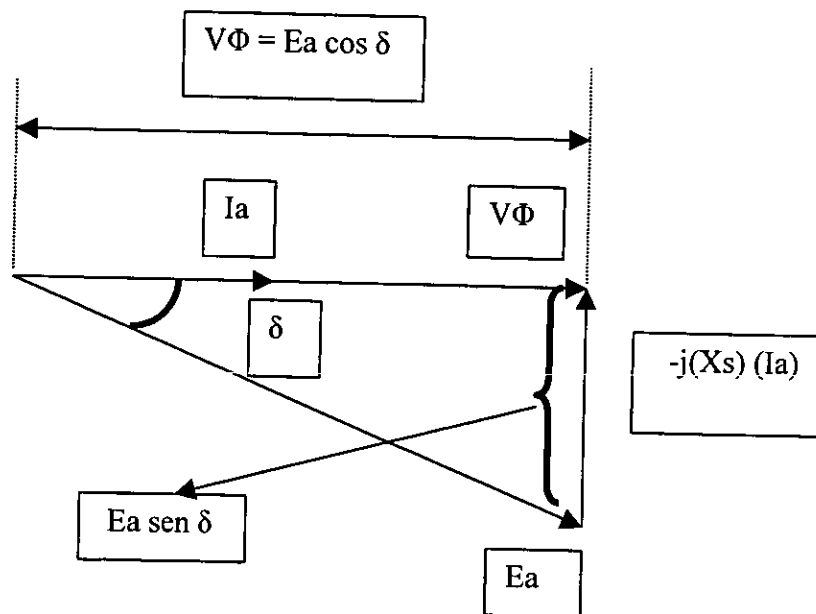


Figura 4.22. Diagrama fasorial a excitación normal (también denominado como diagrama fasorial de un motor síncrono operando con factor de potencia unitario). Para la realización de este diagrama fue necesario basarse de los diagramas fasoriales de sobre excitación y de subexcitación, los cuales se encuentran en el libro de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman.

- ii. Si la corriente de armadura " I_a " esta adelantada con respecto al voltaje $V\Phi$, se dice que el motor esta "*Sobreexcitado*", ya que la corriente de campo es grande.

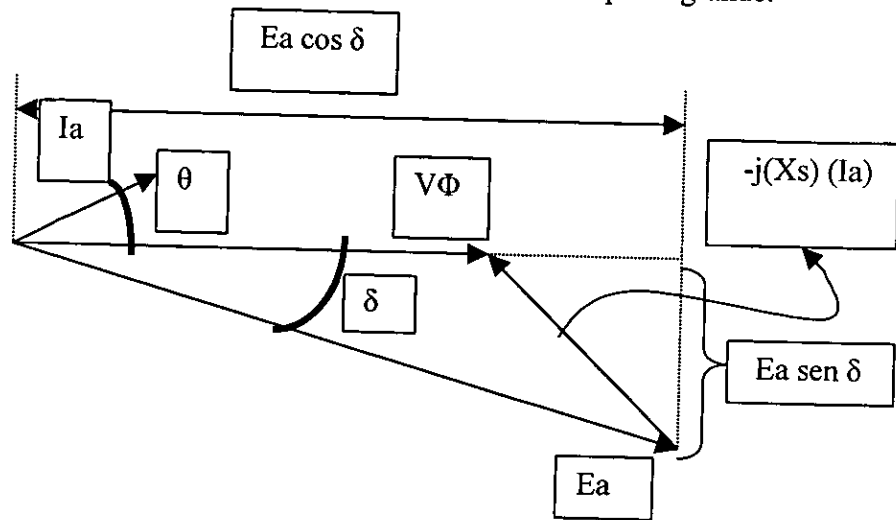


Figura 4.23. Diagrama fasorial a sobre excitación (también denominado diagrama fasorial de un motor síncrono operando con factor de potencia en adelanto). Para la realización de este diagrama fue necesario basarse de dos diagramas fasoriales, los cuales se obtuvieron de los libros de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J.Chapman y de "Máquinas Eléctricas y Transformadores" de Kosow L. Irving.

- iii. Si la corriente de armadura " I_a " esta atrasada con respecto al voltaje ($V\Phi$), se dice que el motor esta "*Subexcitado*", ya que la corriente de campo es pequeña.

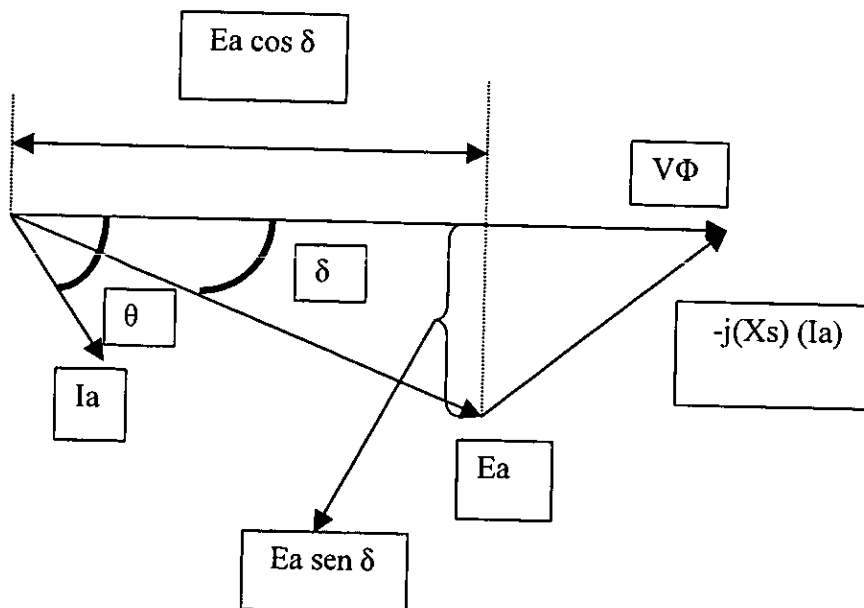


Figura 4.24. Diagrama fasorial a subexcitación (también denominado diagrama fasorial de un motor síncrono operando a factor de potencia en atraso). Para la realización de este diagrama fue necesario basarse de dos diagramas fasoriales, los cuales se obtuvieron de los libros de "Máquinas Eléctricas" de Stephen J. Chapman y de "Máquinas Eléctricas y Transformadores" de Kosow L. Irving.

Es de notarse en los diagramas anteriores que la magnitud de E_a es diferente, por lo que en el diagrama fasorial a excitación normal la proyección de E_a sobre $V\Phi(E_a \cos \delta)$ es igual a $V\Phi$; en el diagrama fasorial a sobreexcitación la proyección de E_a sobre $V\Phi(E_a \cos \delta)$ es más grande que $V\Phi$; en el diagrama fasorial a subexcitación la proyección de E_a sobre $V\Phi(E_a \cos \delta)$ es más corta que $V\Phi$; como se pudo observar en los diagramas anteriores.

4.3.3 OBTENCIÓN DEL PAR EN UN MOTOR SÍNCRONO.

El par en un motor síncrono se obtiene mediante la relación de la potencia mecánica de salida entre la velocidad a la que gira el rotor.

$$T_s = \frac{P_s}{\omega_s} = (N\text{-m}) \dots\dots\dots (4-14)$$

Donde :

T_s = Es el par de salida disponible en el eje del motor (N-m).

P_s = Es la potencia mecánica de salida en (watts).

ω_s = Es la velocidad angular síncrona a la que gira el rotor (rad/seg).

Otro termino es el par producido el cual se obtiene mediante la relación de la potencia mecánica (P_m) (sin considerar las pérdidas por fricción y ventilación y las pérdidas adicionales) entre la velocidad a la que gira el rotor.

$$T_p = \frac{P_m}{\omega_s} = (N\text{-m}) \dots\dots\dots (4-15)$$

Donde :

T_p = Es el par producido en el motor (N-m).

P_m = Es la potencia eléctrica convertida a potencia mecánica en el motor (watts).

ω_s = Es la velocidad angular síncrona a la que gira el rotor (rad/seg).

Para obtener la magnitud :

$$I_a \cos \theta = \frac{E_a \sin \delta}{X_s} \dots\dots\dots (4-16)$$

Sabiendo que la condición es que : $P_e = P_s$, ya que las pérdidas son despreciables, la expresión para la potencia de entrada obviamente eléctrica es :

$$P_e = 3 (V\Phi) (I_a) \cos \theta \dots\dots\dots (3-13)$$

Sustituyendo el valor de $(I_a \cos \theta)$ de la ecuación (4-16) en la expresión (3-13), ésta quedará como :

$$P_e = 3 (V\Phi) \left(\frac{E_a \sin \delta}{X_s} \right)$$

$$P_e = \frac{3 (V\Phi) E_a \sin \delta}{X_s} \dots\dots\dots (4-17)$$

Para obtener el par se sustituye la expresión la expresión (4-17) en la siguiente ecuación :

$$T = \frac{P_e}{\omega_s}$$

Sustituyendo:

$$T = \frac{\frac{3 (V\Phi) E_a \sin \delta}{X_s}}{\omega_s} = \frac{3 (V\Phi) E_a \sin \delta}{(\omega_s) (X_s)}$$

Por lo que la expresión para el par quedará como :

$$T = \frac{3 (V\Phi) E_a \text{ sen } \delta}{(\omega_s) (X_s)} \dots\dots\dots (4-18)$$

La ecuación (4-18) muestra como se puede obtener el par en un motor síncrono, despreciando las pérdidas que se producen en dicho motor, el par se basa en la potencia eléctrica de entrada la cual además de calcularse en función del voltaje de fase ($V\Phi$), la corriente de armadura (I_a) y el factor de potencia ($\cos \theta$), es posible obtener también la potencia eléctrica de entrada en función de la fuerza electromotriz inducida internamente (E_a), el ángulo de par (δ) y la reactancia síncrona (X_s).

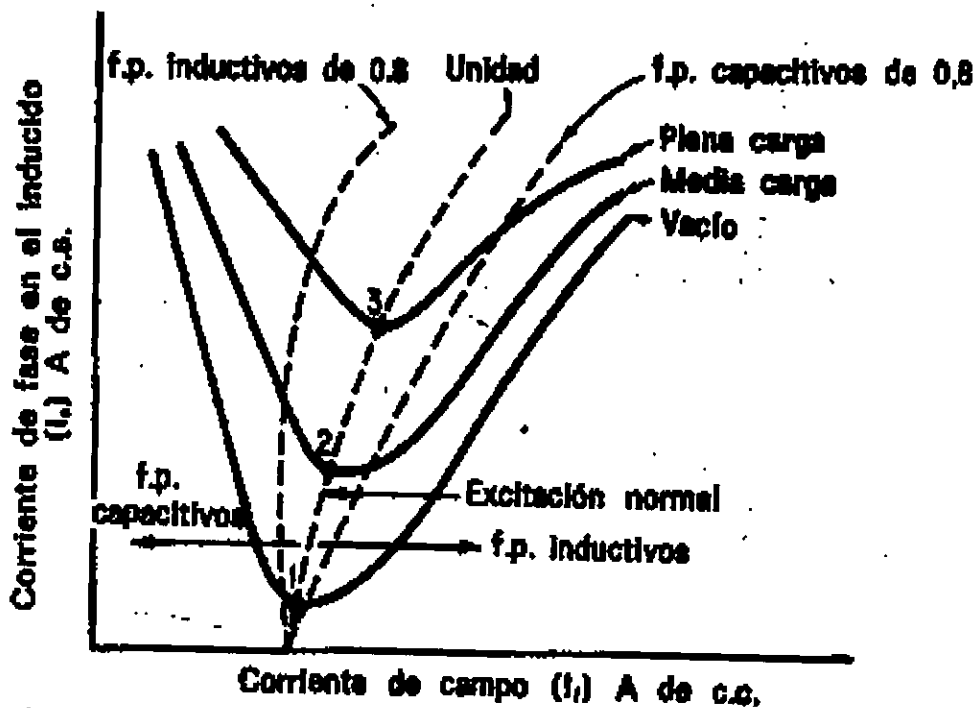
Por lo que la máxima potencia eléctrica de entrada que consume el motor se tiene cuando el ángulo de par es igual a 90° , ($\delta = 90^\circ$).

$$P_{e \text{ máx.}} = \frac{3 (V\Phi) E_a}{X_s} \dots\dots\dots (4-19)$$

4.3.4 CURVAS EN “V” DEL MOTOR SÍNCRONO.

Estas curvas muestran la relación entre la corriente de armadura (I_a) y la corriente de campo (I_F) para diferentes valores de potencia de entrada. Los diagramas fasoriales vistos anteriormente (excitación normal, sobreexcitación y subexcitación) se pueden plasmar gráficamente en las curvas en “V”; dado que su forma es como la letra “v” de ahí es de donde viene su nombre.

Las curvas en “V” se pueden obtener variando la corriente de campo (I_F) desde subexcitación hasta sobreexcitación, tomando a cada momento del proceso lecturas de corriente de armadura (I_a) así como de corriente de campo (I_F). Este proceso se efectúa en vacío, a media carga y a plena carga, como se puede observar en la siguiente figura.



(a) Relación entre la corriente en el Inducido y la corriente de excitación para varias cargas.

Figura 4.26. Familias de curvas en "V" para un motor síncrono, relación entre la corriente de armadura (I_a) y la corriente de excitación (I_f) para varias cargas. Esta gráfica fue obtenida del libro de "Máquinas Eléctricas Y Transformadores" de Kosow L. Irving.

En la figura anterior se puede observar que cuando al motor se le aplica carga pasando de vacío a media carga, la corriente de armadura aumenta de a' a b' , por consecuencia la corriente de campo debe incrementarse por medio de un reóstato externo el cual se conecta en el circuito de campo, para que así pase de "a" a "b"; la razón por la que debe de aumentarse la (I_f) es para que la curva se mantenga sobre la línea del factor de potencia unitario.

En los diagramas fasoriales esto se muestra como una variación en la posición del fasor I_a , el cual se encontraba en fase pero con el aumento de carga el fasor gira hacia abajo perdiendo así la posición de fase con $V\Phi$, por lo que para regresar el fasor I_a a su posición de fase otra vez con respecto a $V\Phi$, es necesario aumentar la corriente de campo (I_f), esto mismo sucede con la curva en "V" de vacío al pasar a la curva en "V" a media carga, si es que se desea mantener la curva sobre la línea del factor de potencia unitario.

Al aumentar la corriente de armadura I_a de la posición a' a b' , se consume más potencia real por parte del motor y como consecuencia éste desarrollara más potencia mecánica disponible en el eje, para que así el motor desarrolle el par necesario para atender el efecto del aumento de carga sobre el eje.

Sucede lo mismo cuando se aumenta la carga al motor, para pasar de la curva en "V" de media carga a la curva en "V" de plena carga.

En la figura 4.26, se observa una curva punteada que corta a las tres curvas en "V" por el centro, dividiendo a dichas curvas en dos regiones, una en la parte izquierda y otra en la parte derecha.

En la región izquierda de las curvas en "V" se tienen factores de potencia en atraso, por lo que es la región de subexcitación; en la región derecha se tienen factores de potencia en adelanto, por lo que es la región de sobreexcitación; en el centro de las curvas en "V", lugar en el cual la curva punteada corta a dichas curvas, se tiene un factor de potencia unidad, por lo que se tiene excitación normal, esto es en los puntos 1, 2 y 3 mostrados en la figura 4.26.

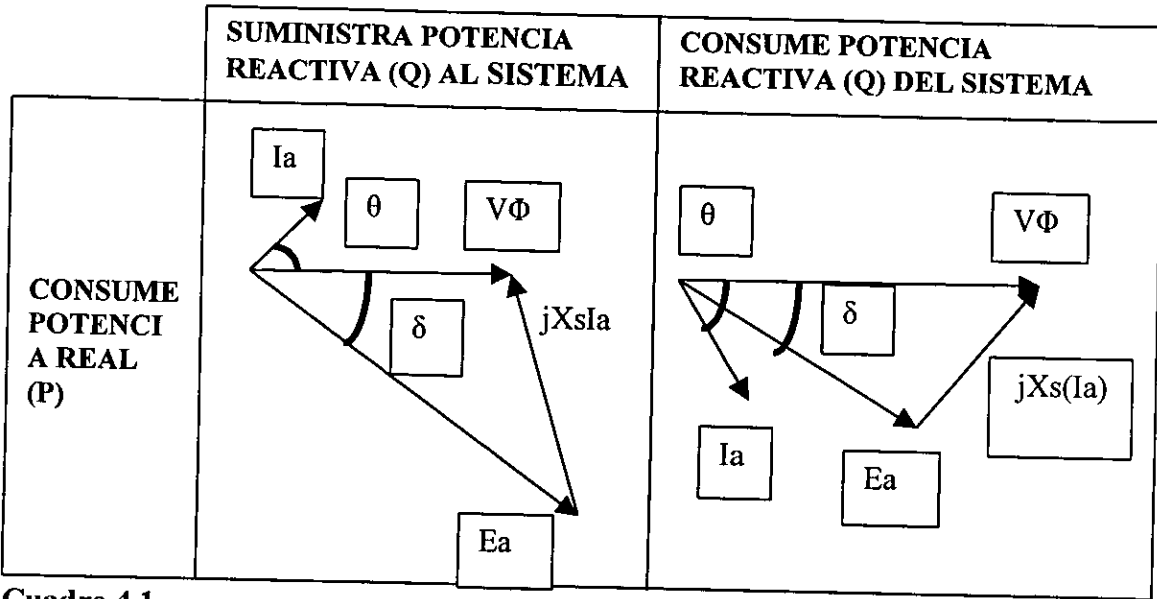
Es de notarse en la figura 4.26 que a valores bajos de corriente de campo, región de subexcitación, la corriente de armadura es grande y atrasada, por lo que el motor es una carga inductiva para el sistema de potencia, es decir, el motor actúa como una carga inductiva-resistiva, por lo que el motor consume de la línea potencia reactiva Q además de potencia real (P).

Conforme la corriente de campo va aumentando el factor de potencia se aproxima a la unidad y la corriente de armadura se reduce hasta su mínimo valor, una vez de que dicha corriente de armadura llega a su valor mínimo el factor de potencia es unitario y la corriente de campo que se tiene es de excitación normal, por lo que el motor se comporta como una carga resistiva para el sistema de potencia, de esta manera el motor sólo consume potencia real o activa (P) de la línea.

Cuando la corriente de campo aumenta más allá de su corriente de excitación normal, la corriente de armadura aumenta otra vez pero ahora está adelantada y se esta en la región de sobreexcitación, aquí el motor se comporta como una carga capacitiva, por lo que el motor actuara como una combinación capacitiva-resistiva, ya que consume de la línea potencia reactiva negativa ($-Q$) y potencia real (P); aquí se dice también, que el motor suministra potencia reactiva (Q) al sistema de potencia o a la línea, o si se prefiere como se mencionó antes consume potencia reactiva negativa ($-Q$).

Las curvas en "V" tienen cierta relación con los diagramas fasoriales antes vistos, para distintas condiciones de carga, factor de potencia y corriente de excitación.

Ahora se sabe que un motor síncrono por medio de la variación de su corriente de campo, puede consumir potencia real (P) de un sistema de potencia, además de consumir o suministrar potencia reactiva (Q) a dicho sistema de potencia. A continuación se presentara un cuadro mostrando esto, por medio de diagramas fasoriales.



Cuadro 4.1

Los diagramas fasoriales anteriores muestran el consumo por parte del motor, tanto de potencia real (P) como de potencia reactiva (Q) o simplemente suministro de potencia reactiva al sistema de potencia. El diagrama fasorial a excitación normal no se plasmó en este cuadro, debido a que sólo consume potencia real (P), es por eso que tiene un factor de potencia unitario.

Por último se presentarán algunas consideraciones básicas como :

- a) En un motor síncrono se pueden variar dos elementos : la carga que se le acopla a su eje y la corriente de campo o de excitación.
- b) Un motor síncrono mantiene su velocidad constante desde vacío hasta la máxima carga posible, por lo que dicha velocidad es totalmente independiente de la carga.
- c) Para observar el comportamiento del motor síncrono con corriente de excitación constante pero con carga variable, se utilizan los diagramas fasoriales con factor de potencia unitario atrasado o adelantado.
- d) Para observar el comportamiento del motor síncrono con carga constante pero con corriente de excitación variable, se utilizan también los diagramas fasoriales llamados de excitación normal, sobreexcitación y subexcitación.
- e) Si un motor síncrono opera con factor de potencia adelantado con corriente de excitación constante, al aumentar la carga se tiene que :
 - i. Su factor de potencia tiende a aproximarse a la unidad.
 - ii. El ángulo del factor de potencia disminuye de manera más rápida que el aumento de la corriente de armadura, por lo que el motor se ajusta a los aumentos de carga esencialmente por la disminución del ángulo del factor de potencia.
- f) Si un motor síncrono opera con factor de potencia atrasado a corriente de excitación constante, al aumentar la carga se tiene que :
 - i. Su factor de potencia tiende a aproximarse a la unidad.
 - ii. El ángulo del factor de potencia disminuye de manera más rápida que el aumento de la corriente de armadura, por lo que el motor se ajusta a los aumentos de carga esencialmente por la disminución en el ángulo del factor de potencia.
- g) Si un motor síncrono opera con factor de potencia unidad a corriente de excitación constante, al variar la carga se tiene que :
 - i. Su factor de potencia tiende a ser cada vez más inductivo
 - ii. La corriente de armadura aumenta de manera más rápida que el ángulo del factor de potencia, por lo que el motor se ajusta a los aumentos de carga esencialmente por el aumento de corriente de armadura.

- h) Al aumentar la carga, de motor debe desarrollar un par suficiente para poder atender dicho aumento de carga, para esto se necesita tener un aumento en la potencia mecánica disponible en el eje, por lo que el motor se verá obligado a consumir más potencia real de la línea.
- i) La potencia real que el motor toma de la línea está dada por $3V\Phi I_a \cos\theta$, por lo que en algunas situaciones el aumento en la potencia real de entrada vendrá dada por el predominio ya sea de la corriente de armadura (I_a) o del factor de potencia ($\cos\theta$), según los casos mostrados en los incisos (e), (f) y (g).
- j) Si a un motor síncrono se le mantiene la carga constante pero se le varía su corriente de campo (I_f), por medio de la cual es posible manipular el ángulo del factor de potencia, se puede conseguir que el motor consuma o suministre potencia reactiva a la línea o simplemente consuma pura potencia real.
- k) Cuando se varía la corriente de campo la potencia real que el motor consume de la línea $3V\Phi I_a \cos\theta$ permanece casi constante y esto es debido a la variación que existe en la corriente de armadura y al factor de potencia del motor.
- l) Es de notarse que al tener la corriente de armadura en fase con $V\Phi$ la corriente que el motor consume de la línea es mínima.
- m) El motor de inducción tanto como el motor síncrono son máquinas eléctricas que son capaces de convertir la potencia eléctrica tomada de la línea a potencia mecánica disponible en su eje.
- n) El motor de inducción es capaz de producir un par de arranque, para poder arrancar con carga acoplada a su eje, esto el motor síncrono no lo puede hacer ya que no consta de par de arranque.
- o) Un motor de inducción desarrolla velocidades cercanas a la síncrona por lo que consta de un deslizamiento y como el motor síncrono si alcanza la velocidad de sincronismo no tiene deslizamiento.
- p) El factor de potencia en un motor de inducción, se aproxima a la unidad cuando éste opera a plena carga, más allá del valor de plena carga el factor de potencia disminuye; en un motor de inducción variando la corriente de excitación se puede controlar un valor deseado de factor de potencia a cualquier carga. Por lo que se puede decir, que en un motor de inducción el factor de potencia máximo depende de que el motor opere a plena carga y el motor síncrono no depende de esta condición.

- q) Cuando en el motor de inducción se sobre carga y pasa su par máximo, dicho par comienza a disminuir debido al excesivo aumento de carga aplicada a su eje y el rotor se empieza a detener; en el motor síncrono se tienen un par de desenganche, el cual si es sobrepasado el motor tendrá un efecto conocido como "*polos deslizantes*", en el cual el rotor no puede permanecer enganchado con el campo magnético giratorio del estator, por lo que dicho rotor pierde su velocidad síncrona al quedar desenganchado con dicho campo, por esto el motor al perder el sincronismo sufre fuertes vibraciones.
- r) Es una ventaja para los motores de inducción el poder contar con un par de arranque, ya que al variar la resistencia del rotor se puede manipular la posición del par máximo, de tal manera que se pueda tener dicho par en el arranque, esto hace que un motor de inducción pueda arrancar con cargas muy pesadas, característica que el motor síncrono no tiene.
- s) En un motor síncrono el factor de potencia se puede variar a un valor deseado, por lo que puede ser usado para la corrección del factor de potencia.
- t) Un motor síncrono es mucho más eficiente operando a factor de potencia unitario que un motor de inducción de la misma potencia y voltaje nominal.
- u) Los motores síncronos no pueden ser usados en aplicaciones en donde se requiera de una velocidad variable
- v) El motor síncrono a diferencia del motor de inducción, requiere de una fuente de excitación de corriente directa que debe ser en algunos casos externa.

CAPÍTULO 5

EFICIENCIA EN LOS
MOTORES DE INDUCCIÓN
Y SÍNCRONOS

EFICIENCIA EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS

5.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se tratará un tema que es de gran importancia en cualquier motor eléctrico. La "eficiencia", ya que con este es posible saber que tan bueno es un motor para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea de alimentación a potencia mecánica disponible en su eje, y la cual es capaz de realizar un trabajo útil. Sin embargo, como se sabe, un motor nunca podrá operar a una eficiencia del 100%, debido a que en el proceso de conversión se tienen presentes pérdidas (las cuales se presentaron en el capítulo tres); así que entre más secas este un motor de operar a una eficiencia del 100% será mucho mejor.

Aquí se empezara por la eficiencia en los motores de inducción trifásicos, así como los elementos que ayudan a mejorar a dicha eficiencia, por lo que también se hablará sobre los motores de inducción trifásicos de alta eficiencia, además de presentar unas tablas en las que será posible observar las eficiencias de los motores de inducción trifásicos que se pueden encontrar en el mercado.

Por otro lado, también se hablará sobre la eficiencia en los motores síncronos trifásicos y del comportamiento del factor de potencia en este tipo de motores así como también en los motores de inducción trifásicos, ya que esta característica de los motores los hace más eficientes mientras su factor de potencia se encuentre cerca de la unidad. Debido a lo anterior, en el último apartado de este capítulo se hablará sobre el comportamiento de la eficiencia y del factor de potencia en ambos tipos de motores.

5.2 EFICIENCIA EN LAS CLASES DE DISEÑO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.

Una de las características del motor de inducción, es que se le puede añadir resistencia a la resistencia propia del rotor, con lo cual es posible aumentar el par de arranque y hacer que el par máximo se presente a bajas velocidades y a deslizamientos altos, incluso obtener el par máximo en el arranque. Esto trae algunas consecuencias en la eficiencia, ya que si el rotor tiene una alta resistencia el motor presentara un gran par de arranque además de que cuando opere a condiciones normales se tendrá un deslizamiento alto, el cual afectará directamente a la potencia del entrehierro haciendo que la potencia que es convertida a potencia mecánica sea menor, por lo que la eficiencia del motor disminuirá; así que podemos concluir que cuando un rotor tenga una alta resistencia tendrá un buen par de arranque, pero una eficiencia baja.

En el caso en el que un rotor tenga una baja resistencia, se tendrá un par de arranque bajo en comparación con el caso anterior, el par máximo se presentará a velocidades cercanas a la síncrona y a deslizamientos muy bajos, por lo que aquí podemos decir que cuando un rotor tenga una baja resistencia se tendrá un bajo par de arranque, pero una eficiencia alta cuando el motor se encuentre operando a condiciones normales.

Como se pudo observar ambos casos presentan tanto ventajas como desventajas, por lo que lo ideal en un motor de inducción sería tener un alto par de arranque y una eficiencia alta. Esto es posible obtenerlo en un motor de inducción que conste de un rotor devanado, ya que de esta manera se le puede añadir una resistencia a la resistencia propia del rotor de forma externa, para que de esta manera se pueda tener un gran par de arranque. Cuando el motor ya haya arrancado se le retira la resistencia adicional externa para que así el motor pueda tener una alta eficiencia cuando opere a condiciones normales.

Esto es posible lograrlo con un rotor devanado ya que constan de anillos colectores y de escobillas, medios por los cuales es posible conectar una resistencia externa para adicionársela a la resistencia propia del rotor, sin en cambio este método tiene algunos problemas ya que los motores que constan de un rotor devanado son muy costosos en comparación con los rotores de jaula de ardilla; además de que el rotor devanado necesita de constante mantenimiento a los anillos colectores y a las escobillas; un motor con rotor devanado requiere de circuitos automáticos de control mucho más complejos que los motores con rotor de jaula de ardilla; por esto y algunas otras cosas es necesario buscar otro método para poder obtener las condiciones de alto par de arranque y eficiencia alta, que se necesitan en un motor de inducción.

Una solución a lo anterior, es el rotor de jaula de ardilla, puesto que con algunas modificaciones en su estructura se puede adaptar para una gran variedad de aplicaciones en la industria, dichas modificaciones se hacen con el fin de poder obtener el par de arranque deseado, además de una buena eficiencia.

Al tener modificaciones en este tipo de rotor es obvio que se tienen que normalizar dichos cambios, por lo que la "NEMA" en los Estados Unidos y la "IEC" en Europa son organizaciones que se encargan de la normalización de dichos cambios en los rotores jaula de ardilla. Estas organizaciones han establecido cuatro clases principales de diseño, que se contabilizan por las cuatro primeras letras del alfabeto, es decir, clase de diseño "A", clase de diseño "B", clase de diseño "C" y la clase de diseño "D". Las características básicas de estos tipos de diseño se describirán a continuación.

5.2.1 CLASE DE DISEÑO "A".

El principal cambio que sufre un rotor jaula de ardilla en su estructura es en las laminaciones que lo conforman, además de las barras que forman la llamada jaula de ardilla, estos cambios en dichos elementos son en su forma física, en la siguiente figura se observa una lamina usada en los rotores jaula de ardilla de diseño clase "A".

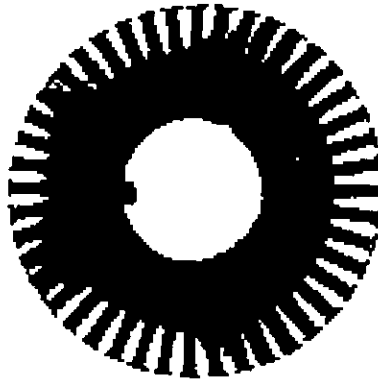


Figura 5.1. Lamina típica de un rotor jaula de ardilla de diseño clase "A".

En este tipo de diseño las barras utilizadas en la formación de la jaula de ardilla son grandes con respecto a su área transversal por lo que la resistencia del rotor es baja; aquí las barras son colocadas en la parte superior de la ranura, por lo que se puede decir que dichas barras están colocadas cerca de la superficie del rotor, esta ubicación de las barras proporciona una reactancia de dispersión baja.

La reactancia de dispersión se debe a las líneas de flujo del rotor las cuales no alcanzan a enlazarse con los devanados del estator, de esta manera se puede decir que cuando las barras están colocadas en el rotor de tal forma que queden alejadas del estator la reactancia de dispersión será mayor, por otra parte cuando las barras son colocadas en el rotor de tal forma que queden cerca del estator la reactancia de dispersión será menor.

Debido a que en esta clase de diseño se tiene una resistencia pequeña, el par de arranque en este tipo de motores es pequeño y tiene valores de 1.5 a 1.75 veces el par nominal de plena carga; el par máximo se presenta cuando el rotor opera a velocidades cercanas a la síncrona; pero la eficiencia que tendrá el motor es alta.

De lo anterior se puede decir que las características del motor en esta clase de diseño son las de un motor de inducción típico, es decir, constan de un par de arranque normal, una corriente de arranque normal, y opera a deslizamientos bajos en condiciones normales. Haciendo una analogía con un motor de inducción con rotor devanado, se puede decir que las características típicas en un motor con rotor jaula de ardilla con clase de diseño "A" corresponden a las de un motor con rotor devanado sin ninguna resistencia adicional.

Los motores que pertenecen a esta clase de diseño tiene un par máximo del 200 a 300 por ciento del par nominal de plena carga y como se había mencionado anteriormente se presenta a deslizamientos bajos; también se había mencionado que el par de arranque es pequeño y que tiene valores de 1.5 a 1.75 veces el par nominal de plena carga, como mínimo el par de arranque puede ser igual al par nominal de plena carga.

Esta clase de diseño presenta el problema de que los motores consumen grandes corrientes de la línea al momento del arranque, dichas corrientes oscilan entre los 500 y 800 por ciento de la corriente nominal, por lo que motores pertenecientes a esta clase de diseño "A" no son muy apropiados para arrancarlos directamente, principalmente motores de gran potencia, sin en cambio los motores pequeños los cuales son menores a 5HP si pueden ser arrancados directamente sin consumir corrientes de la línea de demasiado grandes.

Hubo un tiempo en que los motores de diseño clase "A" fueron muy populares para varias aplicaciones desde los 5HP hasta los 200HP, pero debido a la aplicación de otras clases de diseño su uso sólo se ha reservado a algunas aplicaciones tales como: el uso en ventiladores; en bombas; en tornos y en varias máquinas herramientas.

5.2.2 CLASE DE DISEÑO "B".

Las laminaciones usadas en el rotor jaula de ardilla para los motores de la clase de diseño "B" es de la siguiente forma:

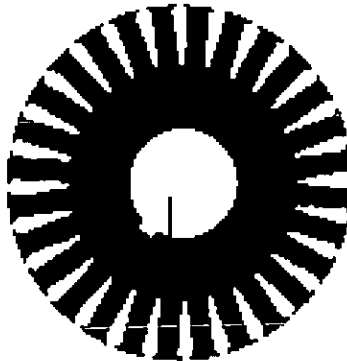


Figura 5.2. Laminación típica de un rotor jaula de ardilla para un diseño clase "B".

En este tipo de diseño las barras utilizadas en la formación de la jaula de ardilla son barras grandes con respecto a su sección transversal y colocadas en la parte profunda de la ranura, esta ubicación de las barras provocará que se presenten dos fenómenos: uno de ellos es que a deslizamientos bajos la corriente que fluye por las barras lo hace por la parte superior de dicha barra, esto hará que la corriente que circule en esa parte esté cerca del estator, por lo que la reactancia de dispersión en esta región es pequeña, además de que como la superficie transversal de la barra es grande la resistencia del rotor es pequeña, por lo tanto se puede obtener en el motor una buena eficiencia a bajos deslizamientos, es decir, cuando el rotor opera a velocidades cercanas a la síncrona a condiciones normales de operación.

El otro fenómeno que se lleva a cabo es a deslizamientos altos, es decir, en condiciones de arranque, aquí la corriente fluye por la parte inferior de la barra profunda por lo que su reactancia de dispersión será mayor y esto hará que la corriente que circula por las barras lo haga por la parte de menor reactancia, es decir, por la parte superior de dicha barra al suceder esto el área transversal efectiva de la barra es menor provocando que la resistencia del rotor sea mayor que antes y con esto se lograra tener en el momento del arranque un par de arranque mayor con una corriente de arranque menor en comparación con la clase de diseño "A".

Con todo lo anterior se puede decir que debido a las características que se presentan en la clase de diseño "B" se tiene un rotor de resistencia variable, con sólo utilizar barras profundas. Por lo que en esta clase de diseño se tiene un par de arranque normal además de consumir una corriente de línea al momento del arranque menor que en la clase de diseño anterior; otro aspecto es que cuando el motor opera a condiciones normales se tiene una buena eficiencia.

A pesar de que en esta clase de diseño se tiene un par de arranque normal, comparado con la clase de diseño anterior, dicho par es ligeramente menor pero sin en cambio la corriente de arranque en la clase "B" es menor que en la clase "A", las corrientes de arranque que se presentan en la clase de diseño "B" son del orden de 4.5 a 5 veces la corriente nominal; para motores arriba de 5HP es necesario usar un sistema de reducción de estas corrientes, sin en cambio los motores con diseño clase "B" son más preferidos que los de clase "A", debido a que la corriente de arranque es 25% menor.

El par máximo en un motor clase "B" es del orden del 200 por ciento del par nominal a plena carga, puede ser igual o estar ligeramente arriba del 200%. Este par máximo es menor que el que se tiene en un motor clase de diseño "A" pero a condiciones normales de operación el rotor de un motor de inducción clase "B" tiene un deslizamiento bajo en comparación con la clase de diseño anterior.

Las aplicaciones para los motores de clase de diseño "B" son similares a los de la clase de diseño "A", pero debido a su baja corriente de arranque se prefieren más los motores con clase de diseño "B".

5.2.3 CLASE DE DISEÑO “C”.

Las laminaciones usadas en el rotor jaula de ardilla para los motores de la clase de diseño “C” es de la forma siguiente:

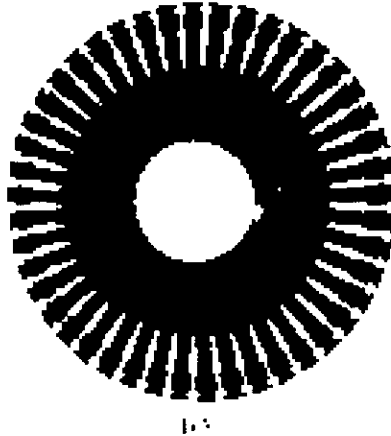


Figura 5.3. Laminación típica para un rotor jaula de ardilla, para un diseño clase “C”.

En esta clase de diseño los rotores son de doble jaula, la cual consta de dos tipos de barras, uno de esos tipos de barras son de área transversal grande y colocadas en la parte profunda de la ranura, por lo que son barras profundas, dichas barras pueden ser de cobre de baja resistencia o de aluminio fundido, debido a que las barras son de área transversal grandes y profundas el rotor tendrá baja resistencia; el otro tipo de barras que se tienen son de área transversal pequeña y colocadas en la parte superior de la ranura, por lo que son barras superficiales, dichas barras pueden ser de cobre de alta resistencia, debido a que las barras son de área transversal pequeña y superficiales el rotor tendrá alta resistencia.

Por todo lo anterior se sabe que este tipo de rotores de clase de diseño “C” constan de dos jaulas de ardilla, una formada por barras de área transversal grandes y profundas y la otra formada por barras de área transversal pequeña y superficiales.

Con la jaula construida a base de las barras pequeñas y superficiales se tiene un par de arranque grande, ya que en el momento del arranque al trabajar únicamente las barras pequeñas y superficiales el rotor tiene una resistencia considerablemente alta la cual producirá que el par de arranque sea grande; cuando el motor se encuentra operando a condiciones normales ambas jaulas trabajan simultáneamente provocando que la resistencia del rotor sea muy pequeña, provocando que a condiciones normales el motor tenga una buena eficiencia aún que su par máximo sea ligeramente menor al par máximo que se tiene en un motor de clase de diseño “B”.

Con todo lo anterior se puede decir que debido a las características presentadas en la clase de diseño “C” se tiene un rotor de resistencia variable al igual que en la clase de diseño “B”, sólo que aquí el comportamiento a bajos y altos deslizamientos es de forma más exagerada.

Un motor perteneciente a la clase de diseño "C" tiene un alto par de arranque, que es de 2 a 2.5 veces el par nominal, dicho par de arranque es mucho mayor que en las clases de diseño "A" y "B"; la corriente de arranque que consume de la línea este tipo de motores es pequeña y es del orden de 3.5 a 5 veces la corriente nominal, menor que en los motores de clase de diseño "B", ya que un motor de clase "C" consta de un alto par de arranque que le permitirá acelerar rápidamente sin embargo esto provocará que el motor tienda a sobrecalentarse si es arrancado frecuentemente, por lo que es un motor más apropiado para arrancar con grandes cargas pero de poca inercia.

El par máximo en motores de clase "C" es menor que el que se presenta en las clases de diseño "A" y "B", con esta clase de motores se tiene un rotor de resistencia variable con la cual se tiene características de alto par de arranque consumiendo una baja corriente de la línea al momento del arranque, además de tener alta eficiencia y un bajo deslizamiento a condiciones normales de operación, por lo que es mejor que los motores de clase de diseño "B".

Los motores con doble jaula o de clase de diseño "C" normalmente son más costosos que los otros tipos de clases de diseño, pero comparados con los motores con rotor devanado son más baratos, además de que es una ventaja el no tener anillos rozantes ni escobillas, ya que en el rotor devanado se les debe de dar mantenimiento constante a dichos elementos.

Los motores de la clase de diseño "C" son usados en aplicaciones tales como: bombas cargadas, compresores y bandas transportadoras, ya que son sistemas de cargas que requieren de alto par de arranque.

5.2.4 CLASE DE DISEÑO "D".

Las laminaciones usadas en el rotor jaula de ardilla para los motores de clase de diseño "D", son de la forma siguiente:

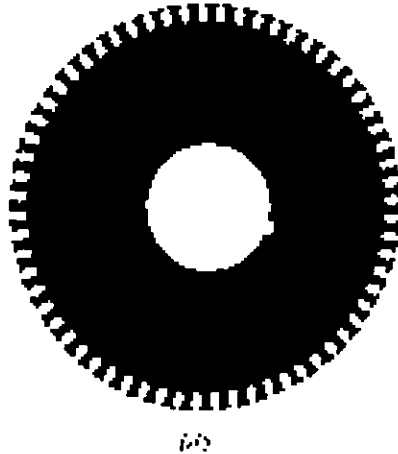


Figura 5.4. Laminación típica para un rotor jaula de ardilla de diseño clase "D".

En esta clase de diseño las barras utilizadas en la formación de la jaula de ardilla, son barras de pequeña área transversal y colocadas muy cercas de la superficie del rotor, debido a que la forma de las ranuras se lo permiten ya que no son profundas. Al ser las barras de pequeña área transversal la resistencia que se tiene en el rotor es alta, por lo que se puede hacer una analogía y decir que esta clase de diseño en un motor es como si se tuviera un motor con rotor devanado con una resistencia adicional.

Como la resistencia es alta en estos motores de clase de diseño "D" por consecuencia se tendrá un alto par de arranque, mucho mayor que en las clases de diseño anteriores, dicho par de arranque es hasta tres veces el par nominal de plena carga; la corriente que este tipo de motores llega a consumir de la línea en el momento del arranque es de 3 a 8 veces la corriente nominal, la cual se puede considerar como una corriente pequeña.

En esta clase de motores el par máximo se presenta a altos deslizamientos, es decir, a velocidades muy bajas por lo que es posible que dicho par se presente en el momento del arranque, este par máximo es mayor que en las clases de diseño anteriores. Cuando estos motores se encuentran operando a plena carga el deslizamiento es grande por lo que su eficiencia no es muy buena. En esta clase de diseño se puede decir que se tienen las características de alto par de arranque, baja corriente de arranque, pero una mala eficiencia y deslizamientos altos.

Los motores de la clase de diseño "D" son utilizados en donde se requieren servicios de arranque pesado, ya que es necesario acelerar cargas con inercias muy altas, estos motores también tienen el problema de que si son arrancados frecuentemente suelen sobrecalentarse. Estos motores tienen su aplicación en sierras, prensas de punzado, taladros y cizallas, en donde se requieren pares de arranque grandes para poder arrancar con dichas cargas.

En la siguiente figura 5.5 se pueden observar las diferentes curvas par-velocidad de las diferentes clases de diseño, en donde se muestran las características de par de arranque, par máximo y las velocidades a las que este par se presenta.

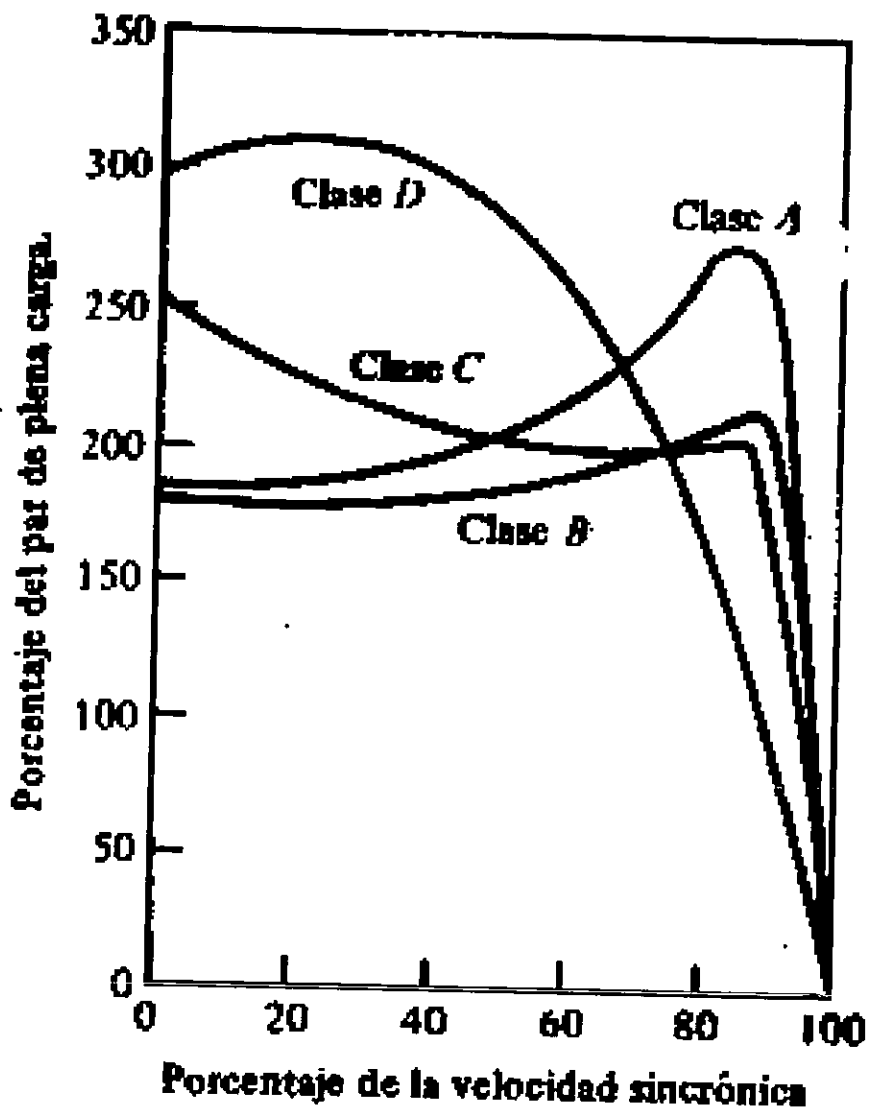


Figura 5.5. Curvas típicas par-velocidad de las diferentes clases de diseño.

5.3 CARACTERÍSTICAS ESPECIFICAS DE LA EFICIENCIA EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.

Anteriormente se había mencionado que un motor al consumir potencia eléctrica de la línea y convertirla a potencia mecánica disponible en el eje, se tenían pérdidas, por lo que la eficiencia dependía de las pérdidas que se presentarán en el motor. La forma de poder obtener la eficiencia en un motor por medio de una expresión, con la cual se puedan relacionar tanto la potencia eléctrica de entrada como la potencia mecánica de salida es la siguiente:

$$\eta = \left(\frac{P_s}{P_e} \right) \times 100 \dots\dots\dots (5-1)$$

Donde: **P_s** = Potencia de salida.
P_e = Potencia de entrada.
η = Eficiencia.

Tomando en cuenta la expresión anterior la eficiencia se define como la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada del motor, normalmente la expresión se multiplica por cien para expresar la eficiencia en un porcentaje, otras expresiones con las cuales se puede obtener la eficiencia son las siguientes:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de entrada} - \text{pérdidas}}{\text{Potencia de entrada}} \times 100 \dots\dots\dots (5-2)$$

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de salida} + \text{pérdidas}} \times 100 \dots\dots\dots (5-3)$$

Los motores de inducción de acuerdo a su eficiencia los hay de eficiencia estándar y de alta eficiencia, un motor de eficiencia estándar es un motor de inducción común y corriente, pero un motor de alta eficiencia no lo es, ya que para poder mejorar dicha eficiencia necesita de ciertas modificaciones en su fabricación con respecto al motor de inducción estándar, dichas modificaciones son las siguientes:

- a) Utilizar más cobre en los devanados del estator para reducir las pérdidas en el cobre (P_{ce}).
- b) Aumentar la longitud de los núcleos tanto del estator como del rotor para reducir la densidad del flujo magnético en el entrehierro del motor. Esto reducirá la saturación magnética del motor provocando que se reduzcan las pérdidas en el hierro o núcleo (P_n).

- c) Utilizar más acero en la fabricación del estator del motor, permitiendo así una mayor transferencia de calor hacia el exterior del motor, con esto se reduce la temperatura de operación por lo que ahora es posible rediseñar los ventiladores del rotor de tal forma que se puedan reducir las pérdidas por fricción y ventilación (PFV).
- d) Referente al punto anterior, el acero utilizado en el estator es un acero especial con alta graduación eléctrica y con muy pocas pérdidas por histéresis.
- e) En las laminaciones del estator se utiliza acero de calibres especiales y delgados, además de una resistividad interna muy alta. Esto reducirá las pérdidas por corrientes parásitas en el motor
- f) Los rotores se maquinan cuidadosamente para producir un entrehierro uniforme, con lo que se logra reducir las pérdidas adicionales (PAD) en el motor.

Como se pudo observar en los puntos anteriores, la mejora en la eficiencia esta en reducir en un mínimo las pérdidas que se tienen en el motor, debido a la conversión de potencia eléctrica a potencia mecánica. Una vez reducidas las pérdidas se tiene por consecuencia un aumento en la eficiencia, por lo que a estos motores se les denominan motores de alta eficiencia.

Los motores de inducción tanto estándares como de alta eficiencia los hay abiertos y cerrados, es decir, un motor abierto tiene aberturas para ventilación las cuales permiten el paso del aire exterior sobre y a través del embobinado del motor; mientras que un motor cerrado es un motor cuya armazón o carcasa impide el intercambio libre del aire entre el interior y el exterior de este, sin llegar a ser totalmente hermético.

La eficiencia en los motores de inducción, es un termino que suele incluirse en la placa de datos del motor, se tiene una eficiencia nominal y también se tiene una cierta eficiencia mínima garantizada.

La eficiencia nominal representa una eficiencia promedio obtenida de un gran número de motores del mismo diseño y es la eficiencia que se tendrá cuando el motor opere a plena carga, la eficiencia mínima representa el mínimo valor permisible de eficiencia para un motor de un diseño determinado, por lo que cada eficiencia nominal tendrá una eficiencia mínima especificada en la placa de datos.

Enseguida se presentará una tabla, en la cual se muestran valores de la eficiencia nominal con su respectivo valor de la eficiencia mínima garantizada; en la tabla se presentan los valores de la eficiencia nominal en la columna "A" y se empieza a partir de una eficiencia del 99% tomando en cuenta pérdidas del 10%, los valores de la eficiencia mínima de la columna "B" se obtienen incrementando las pérdidas en un 20%.

COLUMNA "A" EFICIENCIA NOMINAL (EN %)	COLUMNA "B" EFICIENCIA MÍNIMA (EN %)
99.0	98.8
98.9	98.7
98.8	98.6
98.7	98.5
98.6	98.4
98.5	98.2
98.4	98.0
98.2	97.8
98.0	97.6
97.8	97.4
97.6	97.1
97.4	96.8
97.1	96.5
96.8	96.2
96.5	95.8
96.2	95.4
95.8	95.0
95.4	94.5
95.0	94.1
94.5	93.6
94.1	93.0
93.6	92.4
93.0	91.7
92.4	91.0
91.7	90.0
91.0	89.5
90.2	88.5
89.5	87.5
88.5	86.5
87.5	85.5
86.5	84.0
85.5	82.5
84.0	81.5
82.5	80.0
81.5	78.5
80.0	77.0
78.5	75.5
77.0	74.0
75.5	72.0
74.0	70.0
72.0	68.0

Tabla 1. Esta tabla fue obtenida de la Norma Oficial Mexicana 016 de enero de 1997 (NOM-016-ENE-1997).

Las organizaciones encargadas de establecer normas para la eficiencia son: la *National Electrical Manufactures Association (NEMA)* la cual introdujo la eficiencia nominal en las placas de características de los motores de inducción de las clases A, B, C, D; la norma inglesa (*IEC*) *International Electrical Comisión* y la norma japonesa (*JEC-37*) *Japan Electric Comisión*, las normas anteriores son las más importantes, entre cada norma existen diferencias una de ellas es que la forma para medir la eficiencia en los motores de inducción es diferente en cada organización de normalización, pero a pesar de esto la norma más confiable para la obtención de la eficiencia es la presentada por la NEMA de Estados Unidos.

Ahora se presentarán unas tablas en las que se muestra la eficiencia nominal, que los fabricantes de motores de inducción deben poner en las placas de datos de dicho motor, según la potencia nominal en HP del motor, así como su número de polos y enclaustramiento (si el motor es abierto o cerrado) la eficiencia nominal marcada en la placa de datos por el fabricante debe ser igual o mayor que la eficiencia mostrada en las tablas 2 a 5.

POTENCIA NOMINAL (HP)	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS
1.0	74.0	75.5	75.5	72.0
1.5	77.0	80.0	78.5	75.5
2.0	80.0	81.5	78.5	75.5
3.0	81.5	81.5	80.0	75.5
5.0	82.5	84.0	81.5	82.5
7.5	84.0	86.5	82.5	84.0
10	85.5	86.5	84.0	85.5
15	85.5	87.5	85.5	85.5
20	86.5	87.5	86.5	86.5
25	86.5	89.5	86.5	86.5
30	87.5	90.2	87.5	87.5
40	88.5	90.2	88.5	88.5
50	88.5	91.0	88.5	89.5
60	89.5	91.7	89.5	89.5
75	89.5	91.7	90.2	89.5
100	90.2	92.4	90.2	90.2
125	91.0	92.4	91.0	91.0
150	91.0	92.4	91.0	91.7
200	91.7	93.0	91.7	91.7

Tabla 2. Esta tabla fue obtenida de la Norma Oficial Mexicana 016 de enero de 1997 (NOM-016-ENE-1997), dicha tabla muestra los valores de eficiencia nominal cuando el motor opera a plena carga, para motores de inducción cerrados de eficiencia estándar.

POTENCIA NOMINAL (HP)	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS
1.0	72.0	72.0	72.0	72.0
1.5	72.0	74.0	74.0	74.0
2.0	74.0	75.5	75.5	75.5
3.0	80.0	81.5	80.0	78.5
5.0	80.0	81.5	80.0	80.0
7.5	81.5	82.5	81.5	81.5
10	82.5	82.5	82.5	82.5
15	84.0	84.0	84.0	84.0
20	84.0	84.0	84.0	84.0
25	86.5	86.5	86.5	86.5
30	87.5	88.5	87.5	87.5
40	88.5	89.5	88.5	88.5
50	89.5	89.5	89.5	89.5
60	90.2	90.2	90.2	90.2
75	90.2	90.2	90.2	90.2
100	90.2	91.0	90.2	90.2
125	91.0	92.4	91.0	91.0
150	91.0	92.4	91.0	91.0
200	91.7	93.0	91.7	91.7

Tabla 3. Esta tabla fue obtenida de la Norma Oficial Mexicana 016 de enero de 1997 (NOM-016-ENE-1997), dicha tabla muestra los valores de eficiencia nominal cuando el motor opera a plena carga, para motores de inducción abiertos de eficiencia estándar.

POTENCIA NOMINAL (HP)	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS
1.0	75.5	82.5	80.0	74.0
1.5	82.5	84.0	85.5	77.0
2.0	84.0	84.0	86.5	82.5
3.0	85.5	87.5	87.5	84.0
5.0	87.5	87.5	87.5	85.5
7.5	88.5	89.5	89.5	85.5
10	89.5	89.5	89.5	88.5
15	90.2	91.0	90.2	88.5
20	90.2	91.0	90.2	89.5
25	91.0	92.4	91.7	89.5
30	91.0	92.4	91.7	91.0
40	91.7	93.0	93.0	91.0
50	92.4	93.0	93.0	91.7
60	93.0	93.6	93.6	91.7
75	93.0	94.1	93.6	93.0
100	93.6	94.5	94.1	93.0
125	94.5	94.5	94.1	93.6
150	94.5	95.0	95.0	93.6
200	95.0	95.0	95.0	94.1

Tabla 4. Esta tabla fue obtenida de la Norma Oficial Mexicana 016 de enero de 1997 (NOM-016-ENE-1997), dicha tabla muestra los valores de eficiencia nominal cuando el motor opera a plena carga, para motores de inducción cerrados de alta eficiencia.

POTENCIA NOMINAL (HP)	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS
1.0	-----	82.5	80.0	74.0
1.5	82.5	84.0	84.0	75.5
2.0	84.0	84.0	85.5	85.5
3.0	84.0	86.5	86.5	86.5
5.0	85.5	87.5	87.5	87.5
7.5	87.5	88.5	88.5	88.5
10	88.5	89.5	90.2	89.5
15	89.5	91.0	90.2	89.5
20	90.2	91.0	91.0	90.2
25	91.0	91.7	91.7	90.2
30	91.0	92.4	92.4	91.0
40	91.7	93.0	93.0	91.0
50	92.4	93.0	93.0	91.7
60	93.0	93.6	93.6	92.4
75	93.0	94.1	93.6	93.6
100	93.0	94.1	94.1	93.6
125	93.6	94.5	94.1	93.6
150	93.6	95.5	94.5	93.6
200	94.5	95.0	94.5	93.6

Tabla 5. Esta tabla fue obtenida de la Norma Oficial Mexicana 016 de enero de 1997 (NOM-016-ENE-1997), dicha tabla muestra los valores de eficiencia nominal cuando el motor opera a plena carga, para motores de inducción abiertos de alta eficiencia.

De todo lo anterior se puede decir que la eficiencia o rendimiento de un motor eléctrico es la habilidad, que este tiene de convertir la potencia eléctrica que toma de la línea a potencia mecánica útil, disponible en el eje del motor; sin embargo en dicho proceso de conversión se presentan pérdidas, por lo que obviamente no toda la potencia eléctrica que recibe el motor se convierte en potencia mecánica, y debido a esto la eficiencia de un motor nunca será del 100%. Así que un motor eficiente es aquel que transforma prácticamente toda la potencia eléctrica que consume en la mayor cantidad de potencia mecánica útil disponible en el eje del motor.

Debido a los elevados costos de los energéticos a nivel mundial, los fabricantes de motores eléctricos han prestado más atención a la eficiencia, por lo que además de los motores estándares, se fabrican motores de alta eficiencia con rendimientos de hasta un 96%, estos motores son más costosos que los estándares, pero se tiene un mayor ahorro en el consumo de energía, por lo que en el futuro el gasto hecho por un motor de alta eficiencia en lugar de un estándar será recompensado.

En lo que se refiere a las pérdidas, estas siempre se encuentran presentes en el proceso de conversión que realiza el motor, por ejemplo si se tiene un motor de inducción de 100HP y se sabe que toma de la línea una potencia de 87.76 Kw su eficiencia será:

Los 100HP se convertirán a Kw

$$100\text{HP} \left(\frac{0.746 \text{ Kw}}{1\text{HP}} \right) = 74.6 \text{ Kw}$$

Ahora se calcula la eficiencia:

$$\eta = \frac{\text{Potencia mecánica de salida}}{\text{Potencia eléctrica de entrada}} \times 100$$

$$\eta = \frac{74.6 \text{ Kw}}{87.76 \text{ Kw}} \times 100 = 85\%$$

Con lo que se puede decir que el motor convierte a potencia mecánica sólo el 85% de la potencia eléctrica que consume de la línea, por consecuencia el motor pierde el 15% en el proceso de conversión, por lo que este 15% se le atribuye a las pérdidas.

Como se sabe hay pérdidas que son casi constantes y hay otras que no lo son a diferentes niveles de carga, por ejemplo las pérdidas por fricción y ventilación además de las pérdidas en el núcleo varían muy poco con la carga que se le aplica al motor, es decir, se pueden considerar constantes para cualquier carga; las pérdidas causadas por efecto joule (pérdidas en los devanados del estator y en algunos casos en el rotor), estas pérdidas crecen con relación a la carga que se le aplica al motor, por lo que son las más predominantes.

Un motor de inducción debe ser operado siempre a su plena carga si es que se requiere obtener de él su máxima eficiencia, no es adecuado usar los motores por debajo del 80% de su carga nominal debido a que causará un bajo factor de potencia en la red de alimentación.

Los motores eléctricos pueden reducir su eficiencia debido a las reparaciones a las que son sometidos, si dicho motor llegará a fallar, por ejemplo si un motor llegará a quemarse de su embobinado, se pensaría que es más factible mandarlo a rebobinar que comprar uno nuevo, ya que resultaría más económico hacer esto, sin embargo la eficiencia del motor rebobinado ya no será la misma que cuando era nuevo.

La reparación de un motor trae consigo un incremento en las pérdidas, además de la reducción en su factor de potencia, por lo que conducirá a una disminución en la eficiencia del motor. Un motor al que se le hace una buena reparación de sus devanados sus pérdidas aumentan en un orden del 6 al 12%, una mala reparación en los devanados trae consigo un aumento de las pérdidas en un orden mayor del 12 % al 20%.

Algunas razones por las que un motor disminuye su eficiencia al rebobinarlo, debido a que sufrió un desperfecto en sus devanados, son las siguientes:

- a) Calentamiento desmedido del hierro al quitar el devanado dañado.
- b) Daños en las ranuras al quitar el devanado dañado y montar el nuevo.
- c) Diferente calidad y calibre del alambre que se utilizará para fabricar los devanados.
- d) Diferente número de vueltas en los embobinados.
- e) Daños a los cojinetes, valeros o chumaceras y mal alineamiento.
- f) Mayor tiempo de secado final.

Debido a los puntos anteriores es necesario que las reparaciones las hagan personas que estén calificadas para esto, ya que así se garantizara que la reparación sea buena, además de que se utilicen materiales de la misma o mejor calidad de los que traía el motor.

Si un motor es mal reparado, al ser reinstalado a su trabajo habitual consumirá más energía eléctrica debido a que su eficiencia ya no es buena, por lo que resultaría más conveniente sustituir al motor dañado por uno nuevo, que mandarlo a rebobinar. Si el caso es comprar uno nuevo, entonces se debe pensar en la posibilidad de adquirir uno de alta eficiencia en vez de un estándar (esto es en el caso de los motores de inducción).

Con todo lo anterior es necesario analizar cuidadosamente las consecuencias de las reparaciones de un motor, en especial cuando se trate de un rebobinado.

Por ultimo se tiene un elemento que es característico en la eficiencia de un motor de inducción y que es su factor de potencia, ya que con este se podrá saber que tan bueno es un motor para aprovechar al máximo la energía eléctrica que toma de la línea. Este aspecto no se tratara ahora, sino más adelante en el apartado referente al factor de potencia.

5.4 EFICIENCIA EN LOS MOTORES SÍNCRONOS.

Como se ha mencionado anteriormente un motor es tan eficiente tanto como pueda convertir la mayor parte de la potencia eléctrica que toma de la línea a potencia mecánica disponible en el eje para poder realizar un trabajo útil. Si hay algo que afecte a la eficiencia en este proceso son las pérdidas que se van presentando durante dicho proceso de conversión, entre mayor sean menor será la eficiencia y entre menos sean mayor será dicha eficiencia, otro aspecto que es característico en la eficiencia de un motor síncrono es su factor de potencia, ya que este nos indica que tanto aprovecha un motor la energía eléctrica que consume de la línea para llevar a cabo una determinada actividad.

En el motor síncrono como en el motor de inducción, también se utiliza la siguiente expresión para la obtención de la eficiencia, utilizando la potencia de entrada y la potencia de salida.

$$\eta = \left(\frac{P_s}{P_e} \right) \times 100 \dots\dots\dots (5-1)$$

Donde: P_s = Potencia de salida.
 P_e = Potencia de entrada.
 η = Eficiencia.

Otra forma para la obtención de la eficiencia es tomando en cuenta las pérdidas que se presentan en el proceso de conversión de potencia eléctrica a potencia mecánica, por lo que la expresión es la siguiente:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de entrada} - \text{pérdidas}}{\text{Potencia de entrada}} \times 100 \dots\dots (5-2)$$

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de salida} + \text{pérdidas}} \times 100 \dots\dots (5-3)$$

5.4.1 EFICIENCIA QUE OFRECE LA MANIPULACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN UNMOTOR SÍNCRONO.

Una de las características del motor síncrono que lo hace eficiente es la manipulación de su factor de potencia, característica que no tiene el motor de inducción.

Un motor síncrono además de utilizarse para accionar cargas mecánicas es utilizado también para la corrección del factor de potencia, para que el motor síncrono logre realizar esta tarea necesita estar sobreexcitado, es decir, que el motor debe consumir de la línea una corriente capacitiva para que así dicho motor pueda suministrar potencia reactiva “Q” al sistema al cual pertenece dicho motor síncrono y mejorar así el factor de potencia del sistema. Por lo que sí un motor síncrono al estar sobreexcitado mejorar el factor de potencia de la red eléctrica a la que esta conectado.

Debido a lo anterior un motor síncrono puede ser utilizado para operar con carga y al mismo tiempo corregir el factor de potencia, esto sólo bajo ciertas condiciones. Sin embargo existe un tipo de motor síncrono para la corrección del factor de potencia llamado *condensador síncrono*, este nombre se debe a que al operar en vacío y al estar sobreexcitado dicho motor se comporta como una carga capacitiva para el sistema de potencia, por lo que se dice que el motor "flota" sobre la línea de alimentación al no tener carga mecánica y operar como si fuera un capacitor estático.

El condensador síncrono tiene ciertas diferencias constructivas con respecto a un motor síncrono común, las principales son:

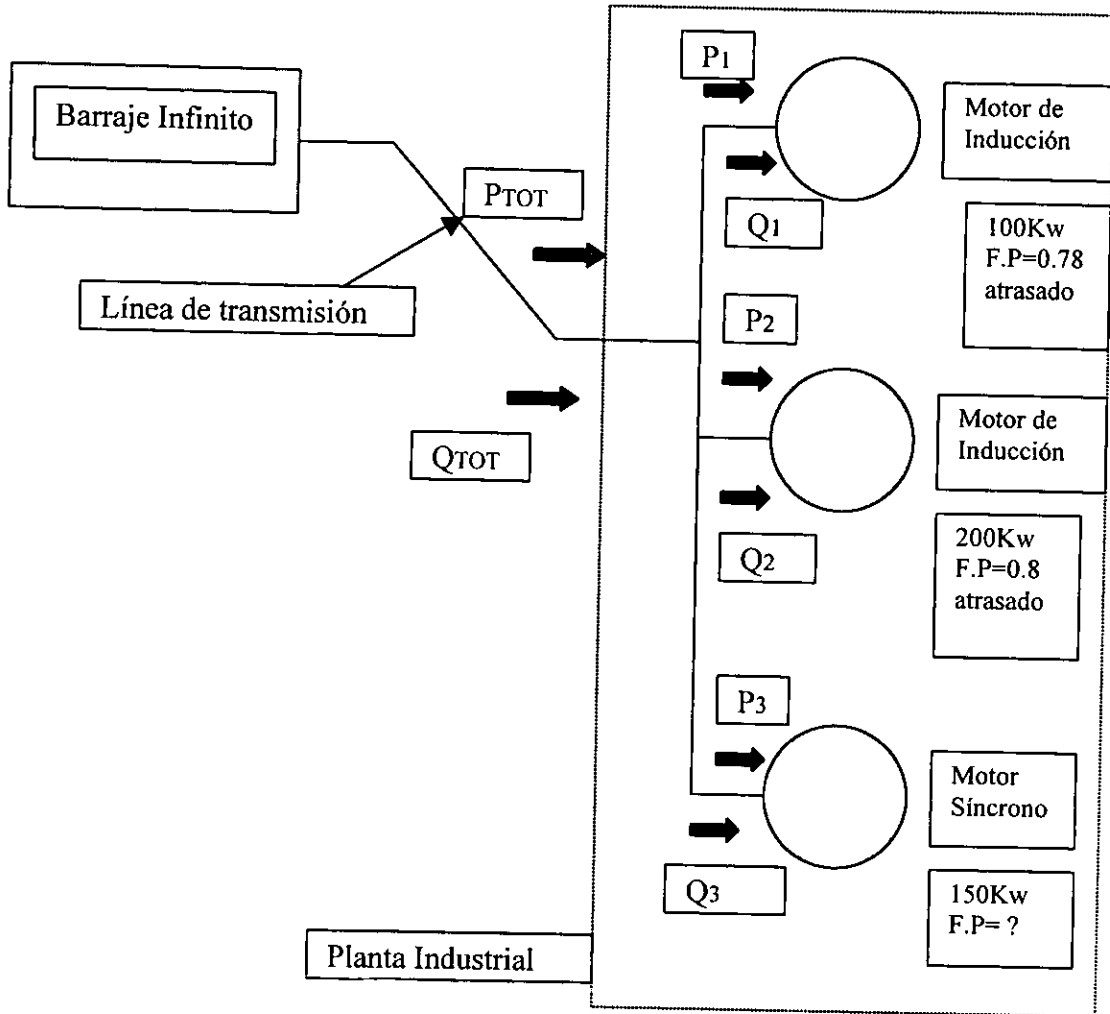
- a) No requieren de devanados amortiguadores ya que arrancan y funcionan sin carga.
- b) La flecha en estos motores suele ser pequeña, es decir, no tienen un eje muy extenso debido a que no son diseñados para ser acoplados a cargas mecánicas, sino para la corrección del factor de potencia únicamente.
- c) Debido al inciso (b) las chumaceras o valeros utilizados en los condensadores síncronos son menos robustos.
- d) Ya que un condensador síncrono debe operar sobreexcitado para poder corregir el factor de potencia, necesita de más cobre en el devanado de campo para poder soportar y conducir el incremento de la corriente de campo.

Gracias a la característica de corregir el factor de potencia, los motores síncronos son mejores que los motores de inducción. Sin embargo actualmente es más común en las industrias el uso de condensadores fijos (banco de capacitores) que el de los condensadores síncronos, debido a que normalmente un condensador fijo es más económico en su costo que un condensador síncrono. Es posible encontrar condensadores síncronos operando para corregir el factor de potencia actualmente, pero sólo en plantas industriales viejas. Sin embargo ahora es posible fabricar condensadores síncronos para potencias y tensiones nominales extremadamente altas y ser menos caros que los condensadores fijos.

Enseguida se presentará un ejemplo, en el que se mostrará la ventaja de tener operando un motor síncrono sobreexcitado, para la corrección del factor de potencia.

(Este ejemplo fue obtenido del libro de máquinas eléctricas de Stephen J. Chapman).

Ejemplo :



En la figura anterior se presenta un barraje infinito cuya salida se conecta a una planta industrial, por medio de una línea de transmisión. Dentro de la planta industrial se tienen tres cargas para el sistema de potencia, dos de dichas cargas son motores de inducción con factores de potencia en atraso y la tercera carga es un motor síncrono con la posibilidad de poder variar su factor de potencia.

El barraje infinito en la figura anterior opera a un voltaje de 480V, la carga uno es un motor de inducción que consume de la línea una potencia real o activa (P) de 100Kw y opera con un factor de potencia en atraso de 0.78, la carga dos es un motor de inducción que consume de la línea una potencia real o activa (P) de 200Kw y opera con un factor de potencia en atraso de 0.8, la carga tres es un motor síncrono que consume de la línea una potencia real o activa de (P) de 150Kw y que opera con factores de potencia variables. Ahora se tienen los siguientes incisos:

- Si se ajusta el motor síncrono para operar con un factor de potencia en atraso de 0.85, ¿Cuál es la corriente en la línea de transmisión?
- Si se ajusta el motor síncrono para operar con un factor de potencia en adelanto de 0.85, ¿Cuál es la corriente en la línea de transmisión?
- Si las pérdidas en la línea de transmisión están dadas por la ecuación: $P_{PL}=3(I_L)^2R_L$ calcule las pérdidas en la línea de transmisión en los incisos (a) y (b).

Solución:

Para el caso del inciso (a):

La carga uno, es decir, el primer motor de inducción consume de la línea una potencia real o activa $P_1 = 100\text{Kw}$, por lo que la potencia reactiva (Q) que este motor consumirá de la línea de transmisión será de:

$$Q_1 = P_1 \tan\theta$$

$$Q_1 = (100\text{Kw}) \tan [\cos^{-1} (0.78)]$$

$$Q_1 = 80.22814281 \text{ kVAR}$$

La carga dos, es decir, el segundo motor de inducción consume de la línea una potencia real o activa $P_2 = 200\text{Kw}$, por lo que la potencia (Q) que este motor consumirá de la línea de transmisión será de:

$$Q_2 = P_2 \tan\theta$$

$$Q_2 = (200\text{Kw}) \tan [\cos^{-1} (0.8)]$$

$$Q_2 = 150 \text{ kVAR}$$

La carga tres, es decir, el motor síncrono consume de la línea una potencia real o activa $P_3 = 150\text{Kw}$, por lo que la potencia (Q) que este motor consumirá de la línea de transmisión será de:

$$Q_3 = P_3 \tan\theta$$

$$Q_3 = (150\text{Kw}) \tan [\cos^{-1} (0.85)]$$

$$Q_3 = 92.96165076 \text{ kVAR}$$

Ahora obtendremos la potencia total real o activa que la planta industrial consume de la línea de transmisión:

$$P_{TOT} = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_{TOT} = 100\text{Kw} + 200\text{Kw} + 150\text{Kw}$$

$$P_{TOT} = 450 \text{ Kw}$$

También obtendremos la potencia total o reactiva que la planta industrial consume de la línea de transmisión:

$$Q_{TOT} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{TOT} = 80.22814281 \text{ Kvar} + 92.96165076 \text{ Kvar} + 150 \text{ Kvar}$$

$$Q_{TOT} = 323.1897936 \text{ Kvar}$$

Con la potencia real total (P_{TOT}) y con la potencia reactiva total (Q_{TOT}), podemos obtener el factor de potencia al cual opera la planta industrial.

$$F.P = \cos \theta = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{Q_{TOT}}{P_{TOT}} \right) \right)$$

$$F.P = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{323.1897936 \text{ Kvar}}{450 \text{ Kw}} \right) \right)$$

$$F.P = 0.812227206 \text{ atrasado}$$

Ahora se calculará la corriente en la línea de transmisión que será consumida por la planta industrial.

$$I_L = \frac{P_{TOT}}{\sqrt{3} (V_L) \cos \theta}$$

$$I_L = \frac{450 \text{ kW}}{\sqrt{3} (480 \text{ V}) (0.812227206)}$$

$$I_L = 666.397128 \text{ amp}$$

Para el caso del inciso (b):

Las potencias tanto real (P_1) y reactiva (Q_1) en el motor uno no cambia en nada, así como la (P_2) y (Q_2) en el motor dos tampoco cambian. Sólo hay que calcular la potencia reactiva (Q_3).

Para este caso el motor síncrono se ajusta de tal forma que opere con un factor de potencia en adelanto de 0.85, por lo que en lugar de consumir potencia reactiva de la línea (Q) la suministra al sistema al cual esta conectado, es decir, a la planta industrial.

$$Q_3 = P_1 \tan \theta$$

$$Q_3 = (150 \text{ Kw}) \tan [- \cos^{-1} (0.85)]$$

$$Q_3 = -92.96165076 \text{ Kvar}$$

Q_3 es negativo debido a que en lugar de consumirla la suministra al sistema al cual el motor esta conectado, es decir, a la planta industrial.

Como las potencias reales P_1 , P_2 Y P_3 son las mismas entonces la potencia total es la misma.

$$P_{TOT} = 450 \text{ Kw}$$

Pero la potencia reactiva total ahora es de:

$$Q_{TOT} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{TOT} = 80.22814281 \text{ Kvar} - 92.96165076 \text{ Kvar} + 150 \text{ Kvar}$$

$$Q_{TOT} = 137.2664921 \text{ Kvar}$$

Por lo que ahora el factor de potencia al cual opera la planta industrial será de:

$$F.P = \cos \theta = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{Q_{TOT}}{P_{TOT}} \right) \right)$$

$$F.P = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{137.2664921 \text{ Kvar}}{450 \text{ Kw}} \right) \right)$$

$$F.P = 0.956490169 \text{ atrasado}$$

Ahora se calculará la corriente en la línea de transmisión que será consumida por la planta industrial.

$$I_L = \frac{P_{TOT}}{\sqrt{3} (V_L) \cos \theta}$$

$$I_L = \frac{450 \text{ kW}}{\sqrt{3} (480 \text{ V}) (0.956490169)}$$

$$I_L = 565.887549 \text{ amp}$$

Por último se obtendrán las pérdidas en la línea de transmisión para el inciso (a) y para el inciso (b).

Pérdidas en la línea de transmisión para el inciso (a):

$$P_{PL} = 3 (I_L)^2 (R_L)$$

$$P_{PL} = 3 (666.397128 \text{ amp})^2 (R_L)$$

$$P_{PL} = 1332255.397 \text{ RL}$$

Ahora se obtendrán las pérdidas en la línea de transmisión para el inciso (b)

$$P_{PL} = 3 (I_L)^2 (R_L)$$

$$P_{PL} = 3 (565.887549 \text{ amp})^2 (R_L)$$

$$P_{PL} = 960686.1543 \text{ RL}$$

Con este ejemplo se pudo observar que cuando el motor síncrono opera con factor de potencia adelantado, este suministra potencia reactiva (Q) los dos motores de inducción que operan con factor de potencia atrasado, con esto se evita que la planta industrial consuma demasiada potencia reactiva (Q) de la línea proveniente de la planta generadora de electricidad, de este modo se logra mejorar el factor de potencia a la que opera la planta, además de que la corriente que circula por la línea de transmisión se reduce y por consecuencia se reducen las pérdidas que se tienen en dicha línea de transmisión.

También se pudo observar que cuanto menor sea el factor de potencia al cual opera la planta industrial, la corriente que circula por la línea de transmisión será grande en comparación con la corriente de línea que se tiene cuando dicha planta industrial opera a factor de potencia adelantado, sin embargo en ambos casos se tiene la misma potencia real o activa (P) como se pudo observar en el ejemplo, por lo que podemos decir que no es conveniente hacer que la planta industrial opere a factor de potencia atrasado, ya que la corriente que circula por la línea de transmisión será mayor para alimentar la misma potencia real o activa que se tiene cuando la planta opera a factor de potencia adelantado, la ventaja en este caso es que se consume de la línea menos corriente.

El problema que se tiene al circular una gran corriente por la línea de transmisión para poder alimentar cargas de bajo factor de potencia, es que se tienen grandes caídas de tensión y mayores pérdidas en la línea de transmisión, así como también grandes pérdidas y un bajo rendimiento en el equipo de generación de energía eléctrica, el cual aumenta a la planta industrial. Es debido a esto último que se penalizan los bajos factores de potencia en las plantas industriales, y la energía se factura a tarifas mayores que en los factores de potencia mayores.

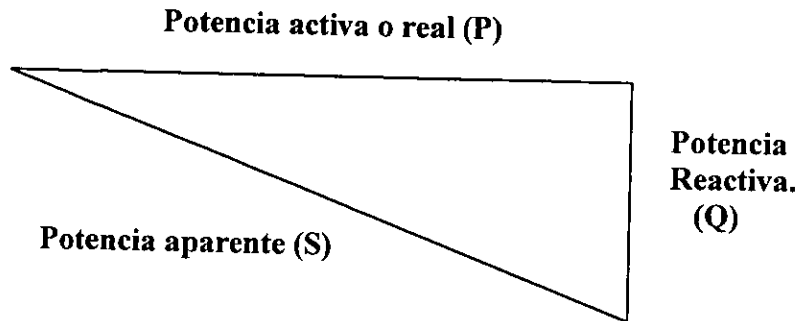
Debido a todo lo anterior un motor síncrono ofrece la habilidad de poder corregir el factor de potencia de un sistema, es por eso que es conveniente pensar en la posibilidad de adquirir motores síncronos en una planta industrial, cuando se tengan que hacer una ampliación en el número de motores o para sustituir motores viejos por nuevos, ya que estos pueden sobreexcitarse para poder operar a factores de potencia adelantados y a la vez poder accionar una carga mecánica. Económicamente un motor síncrono es más caro que un motor de inducción, pero debido a la habilidad que presenta el motor síncrono para corregir el factor de potencia de un sistema. A futuro se ahorrará dinero debido a la baja facturación de la energía eléctrica que se obtendrá al mejorar el factor de potencia, es debido a esto que bajo ciertas condiciones es más conveniente preferir un motor síncrono sobre uno de inducción.

Aquí se presentaron algunos aspectos básicos del factor de potencia en un motor síncrono, pero más adelante en el apartado relacionado al factor de potencia se abordara este tema, pero de una forma más formal, empezando por saber que es el factor de potencia y como se comporta junto con la eficiencia de un motor síncrono.

5.5 FACTOR DE POTENCIA (F.P).

Se puede decir que el factor de potencia es la medida de la eficiencia con la cual se aprovecha la energía eléctrica.

En los motores de corriente alterna se suelen tener presentes tres diferentes tipos de potencias, las cuales se pueden relacionar gracias al factor de potencia por medio de un triángulo de potencia, el cual se muestra a continuación:



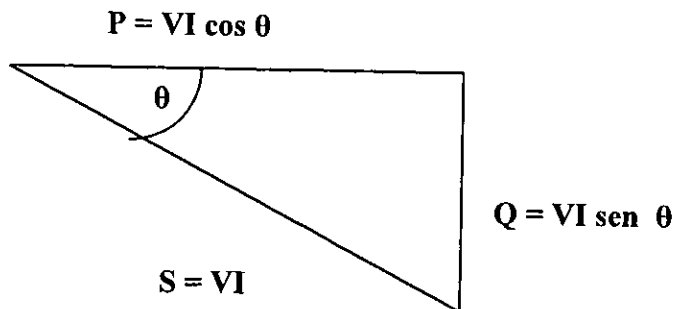
La potencia activa o real (P): Es la potencia eléctrica que se convierte a potencia mecánica y la cual realiza un trabajo útil, y se puede obtener por medio de un wattímetro.

La potencia aparente (S): Es la que se obtiene con el producto del voltaje por la corriente que un motor consume de un sistema trifásico de potencia.

La potencia reactiva (Q): Esta potencia no efectúa ningún trabajo útil, excepto que crea el campo magnético del motor.

Generalmente las unidades para las potencias: aparente, activa y reactiva son: VA, W y Var, respectivamente, sin embargo resultan impropias para las cantidades que se manejan en los sistemas eléctricos, por lo que se prefiere usar KVA, KW y Kvar, en cada una de dichas potencias.

El triángulo de potencia anterior también puede ser presentado de la siguiente forma:



Aquí las tres potencias están representadas en función del voltaje y de la corriente que consume el motor de la línea. En un sistema trifásico cada potencia debe ir multiplicada por la raíz de tres si es que tanto el voltaje como la corriente son de línea.

En este diagrama el factor de potencia es el coseno del ángulo teta, es decir, $F.P = \cos \theta$.

Por medio del teorema de Pitágoras en un triángulo rectángulo es posible saber que:

La potencia aparente también se puede obtener como:

$$S = \sqrt{(P)^2 + (Q)^2} \dots\dots\dots (5-6)$$

El factor de potencia también se puede obtener como:

$$\text{Cos } \theta = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (5-7)$$

El valor que se podrá obtener del factor de potencia en la expresión anterior será de "1" a cero.

Según lo anterior los motores de corriente alterna toman potencia reactiva de la línea de alimentación para crear el campo magnético que necesitan. Además estos motores toman también potencia real, siendo la mayor parte de esta convertida en potencia mecánica, en tanto que el resto se disipa en forma de calor y alimenta a otras pérdidas existentes en un motor.

Para un sistema de potencia existen tres diferentes tipos de carga: *la resistiva, la inductiva y la capacitiva*, en el caso de los motores estos representan ya sea una carga *inductiva-resistiva, capacitiva-resistiva* o simplemente *resistiva*. Esto se debe a que no puede ser una carga inductiva pura o capacitiva pura, ya que los conductores con los que están contruidos los devanados presentan una cierta resistencia al paso de la corriente eléctrica.

En el caso de una **carga resistiva** la potencia real y la aparente son iguales, por lo que el factor de potencia en una carga resistiva es unitario (el máximo), así que la potencia reactiva es cero.

En una **carga inductiva-resistiva**, la potencia aparente es notablemente mayor que la potencia real o activa, por lo que el factor de potencia en una carga inductiva-resistiva es bajo y atrasado, provocando que se tenga presente una potencia reactiva.

En una **carga capacitiva-resistiva**, también la potencia aparente es apreciablemente mayor que la potencia real, provocando que se tenga presente una potencia reactiva pero negativa, aquí el factor de potencia también es bajo pero adelantado.

De lo anterior se debe tomar en cuenta que cuando existe potencia reactiva, la potencia aparente (S) es mayor que la potencia real (P). La potencia reactiva (Q) puede ser inductiva o capacitiva. En la mayoría de los dispositivos electromecánicos, la potencia reactiva es inductiva-resistiva debido a la inductancia que representan las bobinas y a la resistencia que tienen los conductores (con los cuales están formadas dichas bobinas) al paso de la corriente eléctrica.

5.5.1 EL FACTOR DE POTNCIA EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.

En un motor de inducción cuando se encuentra operando en vacío su factor de potencia es bajo y su eficiencia también, debido a que la mayor parte de potencia que consume de la línea es reactiva, con el sólo fin de poder crear el campo magnético para mantener girando al rotor, también consume una pequeña potencia real que es convertida a potencia mecánica únicamente para poder librar las pérdidas por fricción y ventilación. Pero si se le aplica carga al motor este se ve obligado a tomar más potencia real de la línea para poderla convertir a potencia mecánica y así poder atender el aumento de la carga, haciendo que la potencia reactiva disminuya. Conforme el motor se va aproximando a su carga nominal su factor de potencia y su eficiencia mejoran, ya que en este punto el factor de potencia se aproxima a la unidad y su eficiencia es la máxima. Si el motor llegará a pasar este punto de carga nominal, entonces su eficiencia y su factor de potencia disminuirán. Debido a esto, es que si a un motor de inducción se le quiere obtener el máximo provecho, se le debe de tener operando a su plena carga.

5.5.2 EL FACTOR DE POTENCIA EN UN MOTOR SÍNCRONO.

Como se menciona anteriormente, se necesita una potencia reactiva positiva para crear el campo magnético en un motor trifásico de corriente alterna. Esta potencia reactiva tiene la desventaja de producir un bajo factor de potencia. Una de las razones principales por las que es indeseable un bajo factor de potencia es que debido a los valores nominales de los generadores, transformadores y circuitos de abastecimientos de energía eléctrica están limitadas, por la capacidad que tienen para llevar corriente. Esto significa que la potencia real en kilowatts que pueden entregar es directamente proporcional al factor de potencia de las cargas que alimentan, es decir, si una determinada carga opera a un factor de potencia de 0.7 entonces el sistema de potencia sólo le proporcionará el 70% de la potencia real en kilowatts de un total de una potencia real del 100% que se obtendría si su factor de potencia fuera unitario.

Al igual que el motor de inducción, el motor síncrono utiliza un campo magnético giratorio, pero a diferencia del motor de inducción, el par desarrollado no depende de las corrientes que son inducidas en el rotor, sino por la corriente de campo. Debido a esto el rotor forma su propio campo magnético totalmente independiente del campo magnético que produce el estator, así que el motor síncrono está construido de tal manera que cuando estos dos campos magnéticos reaccionan entre sí, el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético giratorio, es decir, a velocidad síncrona.

En un motor síncrono se requiere una considerable potencia reactiva cuando este opera en vacío sin ninguna excitación, es decir, sin corriente de campo aplicada al rotor. Actúa como una carga inductiva-resistiva trifásica en una línea de potencia. Cuando al rotor se le aplica corriente de campo, es decir, que el rotor se excita, se produce parte del magnetismo dentro del motor, dando como resultado que el estator tiene que proporcionar una menor cantidad de campo magnético por lo que la potencia reactiva obtenida de la línea de alimentación disminuya. Si el rotor se sigue excitando más (es decir que se aumenta más la corriente de campo) hasta que produce todo el magnetismo, la línea de alimentación sólo tendrá que proporcionar potencia real al estator y al factor de potencia será igual a la unidad. En lo que respecta a la línea de alimentación, el motor síncrono se comporta ahora como una carga resistiva trifásica.

En el caso de que se excite más todavía al rotor, tendiendo a crear más magnetismo que el que requiere el motor, entonces la línea de potencia comienza a proporcionar una potencia reactiva negativa al estator a fin de mantener constante el flujo total. Sin embargo, la potencia reactiva negativa corresponde a un capacitor y el motor síncrono actúa entonces como una carga capacitiva-resistiva trifásica con relación a la línea de potencia. Es debido a esto que cuando un motor síncrono se usa en el mismo sistema de potencia junto con motores de inducción, mejora el factor de potencia general del sistema.

Con lo anterior se puede concluir que en un motor síncrono su factor de potencia se puede variar cuando el motor se encuentre operando ya sea en vacío o a plena carga, variando sólo la corriente de campo que se le aplica al rotor. Aunque el factor de potencia del motor se mantiene normalmente cerca del 100% (o sea la unidad), se puede sobreexcitarlo con una corriente de campo de C.D a fin de mejorar el factor de potencia general de un sistema eléctrico grande.

Cuando en el mismo sistema eléctrico, los motores síncronos operan con motores de inducción u otros dispositivos que funcionan a factores de potencia atrasados, entonces los kilovars adelantados de la potencia reactiva que proporcionan los primeros, compensan a los kilovars atrasados de los motores de inducción u otros dispositivos, dando como resultado un mejoramiento en el factor de potencia general del sistema eléctrico.

Por ultimo se sabe que un motor síncrono puede operar subexcitado a excitación normal y sobreexcitado, esto según la magnitud de corriente de campo que se le aplique al devanado del rotor.

Pues bien, si tenemos un motor síncrono que se encuentra “**subexcitado**” es porque su corriente de campo es mínima, así que en este estado de operación el motor representa una carga “**inductiva-resistiva**” para el sistema eléctrico de potencia, por lo que dicho motor consumirá una potencia reactiva grande, una potencia real pequeña y una potencia aparente de magnitud mayor a la potencia real, provocando que se tenga un factor de potencia bajo y atrasado, todo esto conlleva a que la eficiencia del motor síncrono a subexcitación sea mala.

Si se aumenta la corriente de campo de tal manera que el motor síncrono consuma su mínima corriente de armadura, entonces el motor se encuentra operando a “**excitación normal**”, aquí el motor representa una carga “**resistiva**” para el sistema de potencia, así que en este estado se tiene un consumo mínimo de potencia reactiva (casi cero) y un consumo de potencia aparente de igual magnitud que la potencia real, provocando que se tenga un factor de potencia unitario (el máximo). En este estado se tienen las pérdidas normales por parte del motor, por lo que dicho motor alcanza su máxima eficiencia (cerca del 100%) a excitación normal.

Si al motor síncrono se le sigue aumentando más la corriente de campo que se le aplica al devanado del rotor, de tal forma que sea mayor a la que se tiene a excitación normal, entonces el motor estará **“sobree excitado”**, condición que hará que el motor síncrono represente una carga **“capacitiva-resistiva”** para el sistema eléctrico de potencia, por lo que el motor consumirá de la línea una potencia reactiva negativa provocando así que el motor síncrono suministre potencia reactiva positiva al sistema en el cual se tiene conectado a dicho motor; en este estado el consumo de potencia activa es de mayor magnitud que el consumo de la potencia real, de tal manera que la corriente de línea que consume el motor es grande en comparación con la que consumía dicho motor cuando se encontraba operando a excitación normal, provocando que se tengan pérdidas considerables en el devanado del estator por efecto joule, debido al aumento en la corriente de armadura, en el caso del aumento de la corriente de campo también provocará pérdidas en el devanado del rotor por efecto joule, la notoria presencia de estas pérdidas dará como consecuencia que la eficiencia del motor síncrono disminuya en comparación con la eficiencia máxima que se tenía a excitación normal, pero aún así la eficiencia que se tenga a sobreexcitación será mayor que la obtenida a subexcitación.

Con el aumento de la corriente de campo, para poder hacer que el motor síncrono pase de excitación normal a sobreexcitación, no sólo la eficiencia del motor disminuye, si no también su factor de potencia, pero a diferencia del factor de potencia que se tiene cuando el motor esta subexcitado, el factor de potencia a sobreexcitación es adelantado. Si al motor síncrono se le sobreexcita más todavía, entonces su factor de potencia será bajo pero adelantado.

El tema del factor de potencia se incluyo en este capítulo de la eficiencia, debido a que es un elemento adicional que hace más eficiente a un motor, ya sea de inducción o síncrono con respecto al aprovechamiento de la energía eléctrica que estos consumen de la línea.

CAPÍTULO 6

METODOLOGÍA DEL
DIAGNÓSTICO
ENERGÉTICO PARA EL
AHORRO DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EN MOTORES
DE INDUCCIÓN Y
SÍNCRONOS

METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

6.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se tubo la oportunidad de conocer los principales aspectos tanto de los motores de inducción como de los motores síncronos, ahora estos aspectos nos serán útiles en este capítulo para poder evaluar si cualquiera de ambos tipos de motores están siendo operados correcta o incorrectamente, o si se tiene un buen o mal funcionamiento en los mismos. Un inadecuado funcionamiento o una mala operación en un motor provocará desperdicios en su consumo de energía eléctrica y esto representará una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica, para poder detectar dichas oportunidades y dar una posible solución para corregir el desperdicio de la energía eléctrica que se tenga es necesario aplicar una metodología de diagnóstico energético.

En sí una metodología de diagnóstico energético tiene el propósito fundamental de localizar problemas de desperdicio en el consumo de la energía eléctrica, así como dar una posible solución a dicho problema, todo esto es con el fin de poder obtener ahorros en la energía eléctrica, los cuales se verán reflejados principalmente en la explotación moderada de los recursos naturales no renovables los cuales son utilizados para producir la energía eléctrica que consumimos, así como también obtener ahorros económicos por parte de las plantas industriales al tener un uso adecuado de la energía eléctrica.

Elaborar una metodología de diagnóstico energético es el tema principal de este capítulo, por lo que aquí se propondrá una metodología que estará constituida por una sucesión de pasos que también son propuestos y los cuales serán explicados cada uno más adelante.

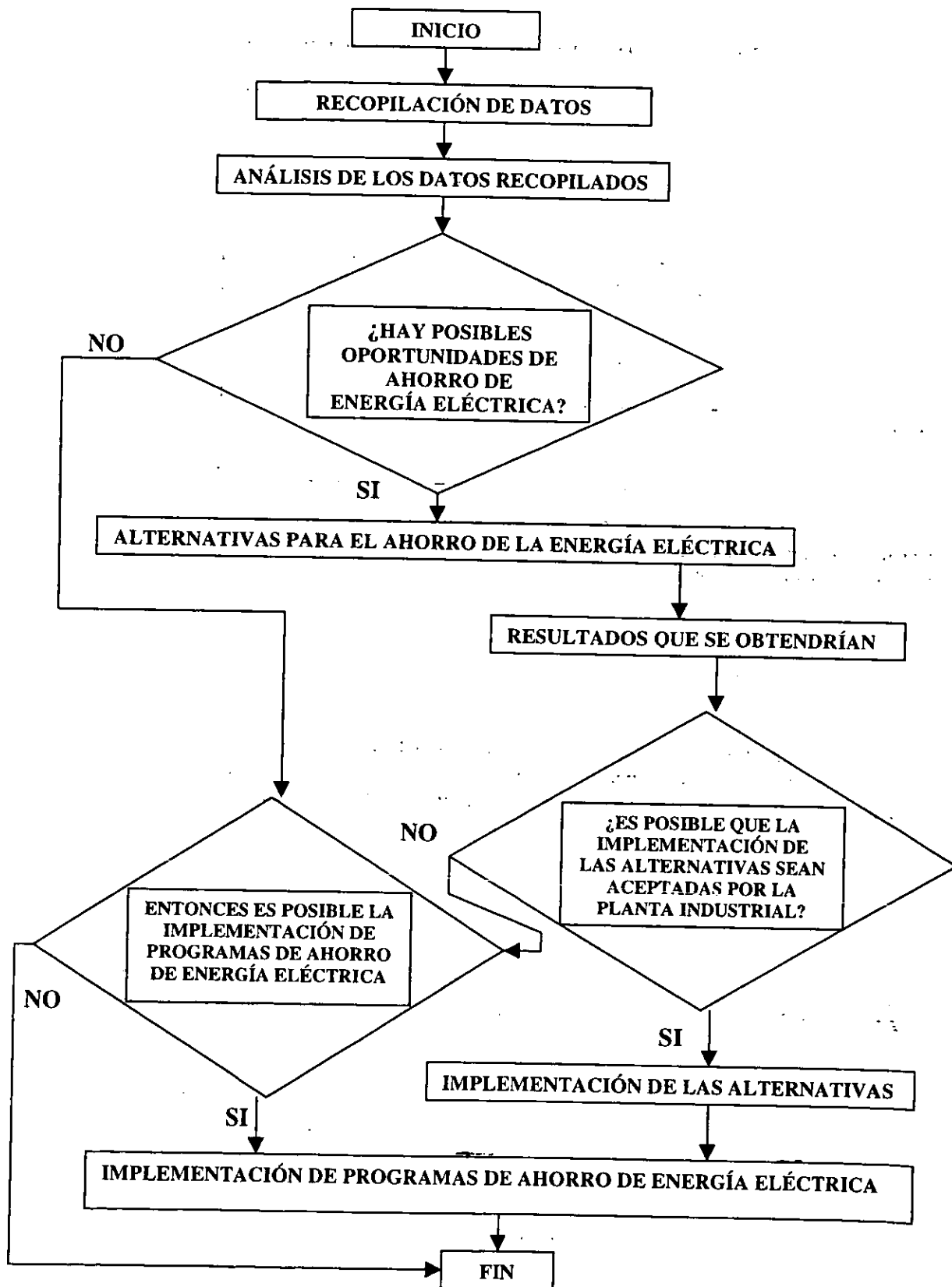
6.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

Como una metodología consta de un conjunto de pasos, entonces es necesario elaborar un diagrama con el fin de mostrar el orden y la secuencia que tendrán todos los pasos o elementos que componen a una metodología.

El diagrama que aquí se utilizará es el denominado diagrama de flujo, este diagrama contiene todos los pasos o elementos necesarios que se requieren para poder llevar a cabo la aplicación de la metodología del diagnóstico energético, con el fin de poder obtener mejoras en el ahorro de la energía eléctrica en motores eléctricos trifásicos (de inducción y síncronos).

Para la elaboración de la metodología aquí propuesta se tomaron en cuenta sólo los elementos más útiles y necesarios para poder presentar en este capítulo una metodología completa, practica y fácil de seguir. Una vez teniendo los pasos o elementos son colocados en orden en un diagrama de flujo, posteriormente se analizara la secuencia que tendrán todos los pasos, esto se hace con el propósito de poder intercalar bloques de decisión entre los pasos o elementos, en los cuales será posible tomar decisiones de sí o no según sea el caso que se tenga al estar implementando la metodología, esto hará que el diagrama de flujo tenga varias alternativas para poder direccionar una determinada información desde el inicio del diagrama de flujo hasta el final del mismo.

El diagrama de flujo que representa a la metodología de diagnostico energético (para el ahorro de energía eléctrica en motores trifásicos de inducción y síncronos) se presenta a continuación.



Una vez presentado el diagrama de flujo se dará una explicación sobre el funcionamiento del mismo, para poder saber como se llevará a cabo la aplicación de la metodología.

En el diagrama de flujo anterior, se puede observar el primer bloque de instrucciones que es el de **recopilación de datos**, esto quiere decir que se llevara a cabo un levantamiento de datos, para saber el estado actual en el que están operando los motores.

Posteriormente se tiene el bloque de **análisis de datos recopilados**, en el cual se realiza un análisis con los datos obtenidos en el bloque anterior para poder identificar las posibles oportunidades de ahorro de energía eléctrica en los motores.

Enseguida se presenta un bloque de decisión, en el cual se pregunta *¿si hay posibles oportunidades de ahorro de energía eléctrica?*, aquí se tienen dos posibles alternativas y se presentan a continuación:

- 1) Si no las hay se sigue a un segundo bloque de decisión, en el cual se propone **si entonces es posible la implementación de programas de ahorro de energía eléctrica**, aquí también se tienen dos posibles alternativas y se presentan a continuación:

- Si no es posible, entonces se dirige al fin del diagrama de flujo.

- Pero si es posible, se dirige a un bloque de instrucciones en el que se elaboraran como un complemento programas de ahorro de energía eléctrica en los motores como parte de un programa integral de ahorro de energía y posteriormente se dirigirá al fin del diagrama de flujo.

- 2) En el caso de que la respuesta hubiera sido "si", entonces se pasará al bloque de instrucciones de **alternativas para el ahorro de la energía eléctrica**, en este bloque se propondrán y evaluarán las posibles alternativas de ahorro de energía eléctrica así como su factibilidad de implementación.

Enseguida se pasará a otro bloque de instrucciones que es el de **resultados que se obtendrían**, en el cual se presentarán los resultados que se podrían obtener en el ahorro de energía eléctrica con la implementación de dichas alternativas.

Posteriormente se pasara a un bloque de decisiones más, en el que se pregunta *¿es posible que la implementación de las alternativas sean aceptadas por la planta industrial o cualquier otro lugar en donde se este llevando a cabo la aplicación de la metodología?*, aquí como en los otros bloques de decisiones se tienen dos posibles alternativas y se presentan a continuación:

- 1) Si no es posible se pasará a otro bloque de decisiones en donde se propone **si entonces es posible la implementación de programas de ahorro de energía eléctrica**, por ser bloque de decisiones se tienen dos posibles alternativas y se presentan a continuación:

- Si no es posible entonces se dirige al fin del diagrama de flujo.
 - En el caso de que si sea posible entonces se dirige a un bloque de instrucciones que es el de **implementación de programas de ahorro de energía eléctrica**, en el que se elaboraran como un complemento programas de ahorro de energía eléctrica en los motores como parte de un programa integral de ahorro de energía y posteriormente se dirigirá al fin del diagrama de flujo.
- 2) En el caso de que la respuesta hubiera sido "sí", entonces se pasará a un bloque de instrucciones que es el de implementación de las alternativas, en el cual se realizará la implementación de las alternativas como una medida de ahorro de energía eléctrica.

Posteriormente se pasará al último bloque de instrucciones en el que se elaborarán también como un complemento programas de ahorro de energía eléctrica en los motores, como parte de un programa integral de ahorro de energía y finalmente se pasara al fin del diagrama de flujo.

La explicación anterior se dio para que se tenga una idea fundamental sobre como se llevará a cabo la metodología ayudándonos de un diagrama de flujo, sin embargo para una explicación muchos más completa es necesario analizar cada uno de los elementos que componen a la metodología de diagnóstico energético que aquí se propone, con el fin de poder obtener ahorros de energía eléctrica en los motores trifásicos de inducción y síncronos. Es por esta razón que ahora se explicarán cada uno de los pasos que componen a dicha metodología.

6.3 RECOPIACIÓN DE DATOS

Este primer paso de la metodología consiste única y exclusivamente en recabar información, pero al hacerlo se tendrá una diversidad de información que recopilar, por lo que aquí se escogerá y organizara solamente la información necesaria para llevar a cabo el resto de la metodología, así que a continuación se presentará la información requerida en este apartado de recopilación de datos.

6.3.1 DATOS BÁSICOS (ANTECEDENTES)

La información aquí recabada es sobre el lugar en el cual se aplicara la metodología de diagnóstico energético y se empezara por lo siguiente:

- a) Por el nombre.
- b) Por la ubicación.
- c) Por la actividad que realiza.

La segunda parte de la información que se necesita se puede obtener de las facturaciones pagadas a luz y fuerza del centro, por lo que será necesario pedir las al encargado de la planta industrial o al encargado de cualquier lugar en el cual se este llevando a cabo la metodología; la información requerida es la siguiente:

- d) Tipo de tarifa que se tiene.

Para este inciso se debe saber que existen 18 diferentes tipos de tarifas, por lo que sólo se aceptarán tres de ellas, que son aplicables a medianas y pequeñas industrias, estas tarifas son:

- 1) **La tarifa 03:** es para servicios de baja tensión y que es aplicable para quienes demandan más de 25Kw.
- 2) **La tarifa OM:** es para servicios de media tensión y que es aplicable para quienes tienen una demanda menor a los 100Kw.
- 3) **La tarifa HM:** es para servicios de media tensión y que es aplicable para quienes demandan 100Kw o más.

El siguiente inciso que se necesita para completar la información es el siguiente:

- e) Facturaciones pagadas a luz y fuerza del centro durante el período de un año.

En este inciso se presentan tres tablas que deben ser llenadas con la información que se pide en ellas, esto es con el fin de poder saber la situación en la que se encuentra el lugar en el cual se está aplicando la metodología, en cuestión al consumo de energía eléctrica, así como el pago monetario que se tiene por dicho consumo.

Ya que la información que se obtendrá aquí es durante un año, por consecuencia la cantidad de períodos de consumo serán 12, debido al número de meses que tiene un año. De esta manera las tablas están estructuradas de la forma siguiente:...

TABLA 1. PARA LA TARIFA 03 (PARA SRVICIO GENERAL EN BAJA TENSIÓN, CON DEMANDA MAYOR DE 25Kw).

PERIODO DE CONSUMO	DEMANDA MÁXIMA MEDIDA EN Kw.	ENERGÍA CONSUMIDA EN KWh	F.P	CARGO	BONIFICACIÓN	PAGO REALIZADO \$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

F.P= Es el valor del factor de potencia.

RECARGO O BONIFICACIÓN = Es el cargo o bonificación que se tiene por un bajo o alto factor de potencia respectivamente.

TABLA 2. PARA LA TARIFA OM (TARIFA ORDINARIA PARA SERVICIO GENERAL EN MEDIA TENSIÓN CON DEMANDA MENOR A 100KW).

PERÍODO DE CONSUMO	CARGO POR DEMANDA MÁXIMA MEDIDA EN KW	CARGO POR ENERGÍA CONSUMIDA EN KWh	F.P	CARGO	BONIFICACIÓN	CARGO POR MEDICIÓN EN BAJA TENSIÓN	PAGO REALIZADO \$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

F.P= Es el valor del factor de potencia.

RECARGO O BONIFICACIÓN = Es el cargo o bonificación que se tiene por un bajo o alto factor de potencia respectivamente.

TABLA 3. PARA LA TARIFA HM (TARIFA HORARIA PARA SERVICIO GENERAL EN MEDIA TENSIÓN, CON DEMANDA DE 100KW O MÁS).

PERIODO DE CONSUMO	CARGO POR DEMANDA FACTURABLE EN KW	CARGO POR ENERGÍA DE PUNTA, INTERMEDIA Y DE BASE CONSUMIDA EN KWh	F.P	CARGO	BONIFICACIÓN	CARGO POR MEDICIÓN EN BAJA TENSIÓN	PAGO REALIZADO \$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

F.P= Es el valor del factor de potencia.

RECARGO O BONIFICACIÓN = Es el cargo o bonificación que se tiene por un bajo o alto factor de potencia respectivamente.

Como en el caso del inciso (d), la información requerida para llenar las tablas anteriores se obtendrá también de las facturaciones pagadas a luz y fuerza el centro y que deberán ser facilitadas por el encargado del lugar en el cual se está llevando a cabo la metodología de diagnóstico energético.

Por último se tiene el inciso (f) que es un complemento a la información requerida en este apartado de antecedentes, así que el siguiente inciso es:

e) Datos sobre las subestaciones.

En este inciso se tendrá que obtener la información siguiente:

- 1) El número de subestaciones.
- 2) La ubicación de las subestaciones.
- 3) Datos del transformador como:

- Los KVA.
- Voltaje en el lado del primario.
- Voltaje en el lado del secundario.

4) A que servicios alimentan las subestaciones.

6.3.2 DATOS SOBRE LOS MOTORES

Debido a que la metodología aquí propuesta es para el ahorro de la energía eléctrica en motores trifásicos de inducción y síncronos, entonces es necesario la recopilación de datos que ayuden a lograr tal fin, es por esto que en este apartado se presentará la información que será necesario recopilar sobre los motores trifásicos de inducción y síncronos. A continuación se mostrará un listado de la información requerida.

- a) El número de motores tanto de inducción como síncronos.
- b) Los datos de placa en ambos tipos de motores.
- c) La ubicación de ambos tipos de motores.
- d) Las tareas que desarrollan ambos tipos de motores.
- e) Condiciones actuales de operación en ambos tipos de motores.
- f) El tiempo de operación en ambos tipos de motores, así como el historial de reparaciones de los mismos.
- g) El horario de operación en ambos tipos de motores.
- h) La eficiencia actual en ambos tipos de motores.

Una vez presentado el listado de la información requerida, se procederá a explicar en que consiste cada uno de los incisos antes mencionados, para conocer con más detalle los datos que serán necesarios recopilar.

6.3.2.1 EL NÚMERO DE MOTORES TRIFÁSICOS TANTO DE INDUCCIÓN COMO SÍNCRONOS.

En este inciso se tomarán los datos sobre la cantidad de motores trifásicos de inducción y de motores trifásicos síncronos que se encuentren funcionando en el lugar en el cual se está llevando a cabo la metodología. Estos datos se colocarán en la siguiente tabla.

TABLA 4. CANTIDAD DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONOS.

	MOTORES DE INDUCCIÓN	MOTORES SÍNCRONOS
CANTIDAD		
PORCENTAJE		

NOTA: Sólo se tomarán en cuenta los motores que se encuentren conectados a la toma de energía eléctrica que sean utilizados durante un largo o corto período de tiempo, incluso si se llegan a utilizar ocasionalmente, en el caso de que se encuentren motores que no se utilicen para nada, entonces no será necesario tomarlos en cuenta.

En la tabla 4 se añadió el termino porcentaje con el fin de poder saber además de la cantidad, el porcentaje que representan ambos tipos de motores en el lugar donde se está llevando a cabo la metodología.

Con respecto a los motores de inducción se sabe que de acuerdo con su eficiencia se clasifican en: *motores de eficiencia estándar y de alta eficiencia*, además de que de acuerdo con su enclaustramiento se clasifican en: *motores abiertos y motores cerrados*. Por lo que para hacer la información más completa se representará la siguiente tabla.

TABLA 5: CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN QUE SE TENGAN DE ACUERDO A SU TIPO DE EFICIENCIA Y DE ENCLAUSTRAMIENTO.

TIPO DE ENCLAUSTRAMIENTO	MOTOR DE INDUCCIÓN DE EFICIENCIA ESTÁNDAR	MOTOR DE INDUCCIÓN DE ALTA EFICIENCIA
ABIERTO		
CERRADO		
TOTAL		
PORCENTAJE		

Con la tabla 5 se podrá obtener más información sobre los motores de inducción, ya que aquí se presentan características más específicas sobre dichos motores.

La tabla anterior será llenada con la cantidad de motores que se encuentren y que cumplan con las características que se piden en dicha tabla. Revisando la placa de datos que traen consigo los motores es posible saber que todo tipo de eficiencia tienen; además de saber el tipo de enclaustramiento del motor, esta característica también es visible a simple vista.

6.3.2.2 DATOS DE PLACA EN AMBOS TIPOS DE MOTORES

Los motores de inducción así como los motores síncronos constan de una placa de datos, la cual utilizaremos para tomar la información ahí descrita y colocarla posteriormente en las tablas 6 y 7. Primero se mostrará la tabla 6, en la que se anotará la información obtenida de la placa de datos de los motores de inducción, después se presentará la tabla 7, en donde se anotara la información obtenida de la placa de datos de los motores síncronos.

TABLA 6. DATOS DE PLACA DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

CARACTERÍSTICAS	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I _n
MARCA					
MODELO					
TIPO DE ENCLAUSTRAMIENTO					
TIPO DE EFICIENCIA					
NÚMERO DE FASES					
NÚMERO DE POLOS					
FACTOR DE SERVICIO					
ARMAZÓN					
CLASE DE DISEÑO SEGÚN NEMA					
CLASE DE AISLAMIENTO					
TEMPERATURA MÁXIMA AMBIENTE					
POTENCIA (HP)					
VOLTAJE EN (V)					
CORRIENTE (AMP)					
FRECUENCIA (HZ)					
VELOCIDAD (RPM)					
FACTOR DE POTENCIA					
EFICIENCIA NOMINAL					

MOTOR I₁ = Motor de inducción uno y así sucesivamente.

La tabla 6 esta conformada por las características más importantes que se obtienen de la placa de datos de los motores de inducción, así como el número de motores a los cuales se les tomarán los datos y que se identifican en la tabla como: motor I1, motor I2 y así sucesivamente, hasta un determinado número de motores de inducción que se hayan encontrado en el lugar en donde se esta llevando a cabo la metodología.

TABLA 7. DATOS DE PLACA DE LOS MOTORES SÍNCRONOS TRIFASICOS.

CARACTERÍSTICAS	MOTOR S1	MOTOR S2	MOTOR S3	MOTOR Si
MARCA					
MODELO					
TIPO DE MANUFACTURA					
DESIGNACIÓN DE LA ESTRUCTURA					
TEMPERATURA DE ELEVACIÓN					
POTENCIA (HP)					
FACTOR DE POTENCIA					
POTENCIA APARENTE (KVA)					
VELOCIDAD (RPM)					
NÚMERO DE POLOS					
NÚMERO DE FASES					
FRECUENCIA (HZ)					
VOLTAJE (V)					
CORRIENTE (AMP)					
CORRIENTE DE CAMPO (AMP)					
VOLTAJE DE EXCITACIÓN (V)					
FACTOR DE SERVICIO					
EFICIENCIA					

MOTOR S1 : motor síncrono uno y así sucesivamente.

En la tabla 7 se presentan las principales características que se pueden obtener de la placa de datos de un motor síncrono. Dicha tabla esta compuesta por la información que se obtendrá de la placa de datos, como ya se ha mencionado anteriormente, además de contar con columnas para el determinado número de motores síncronos con los que se cuente, la nomenclatura usada es la siguiente "motor S1" que significa motor síncrono uno y así sucesivamente.

6.3.2.3 UBICACIÓN DE AMBOS TIPOS DE MOTORES.

Para este inciso será necesario únicamente la realización de un plano del lugar en el cual se está llevando a cabo la metodología, y en el que se muestre la ubicación que tienen cada uno de los motores de inducción y síncrono, para que así sea posible detectar fácil y rápidamente de manera visual la posición que tiene cada uno de ambos tipos de motores.

El plano deberá cumplir con las siguientes características:

- 1) Acotación de todas sus medidas.
- 2) El nombre de cada área que conforma al plano.
- 3) El motor síncrono será representado por:

- Motor síncrono operado para realizar un trabajo útil.

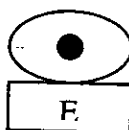


- Motor síncrono operado como condensador síncrono.

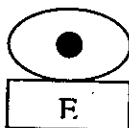


- 4) El motor de inducción será representado por:

- Motor abierto de eficiencia estándar.



- Motores cerrados de eficiencia estándar.



- Motor abierto de alta eficiencia.



- Motor cerrado de alta eficiencia.



- 5) Debajo de cada símbolo que representa a cada motor se pondrá la denominación que se le hizo a cada motor en las tablas 6 y 7, esto se hace con el fin de poder detectar los motores en el plano, a los cuales se les tomaron la información de la placa de datos, y que por lo tanto se encuentran registrados en las tablas 6 y 7.

6.3.2.4 TAREAS QUE DESARROLLAN AMBOS TIPOS DE MOTORES.

La finalidad de que un motor eléctrico convierta la energía eléctrica tomada de la línea a energía mecánica disponible en el eje del motor es para que dicha máquina realice un trabajo útil, de esta forma se convierte en una herramienta necesaria para el hombre en diversas actividades.

Para este inciso será necesario describir la actividad que realizan cada uno de los motores, ya sea que formen parte de todo un proceso o no. Si un motor forma parte de un proceso entonces se explicará la actividad que se lleva a cabo en dicho proceso y para que es utilizado el motor ahí, en el caso de que un motor no forme parte de todo un proceso entonces sólo se explicará la tarea que desarrolla el motor, es decir, para que sirve o para que es utilizado.

Como un complemento se proponen las tablas 8 y 9, en las cuales es posible identificar de una manera más rápida que actividad realiza cada motor así como "si" forma o "no" parte de un proceso; la tabla 8 es para los motores de inducción y la tabla 9 es para los motores síncronos.

TABLA 8. ACTIVIDAD QUE REALIZAN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

CARACTERÍSTICA	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I _n
TAREA O ACTIVIDAD QUE REALIZA					
FORMA PARTE DE UN PROCESO					

MOTOR I₁ : Motor de inducción uno.

TABLA 9. ACTIVIDAD QUE REALIZAN LOS MOTORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS.

CARACTERÍSTICA	MOTOR S ₁	MOTOR S ₂	MOTOR S ₃	MOTOR S _n
TAREA O ACTIVIDAD QUE REALIZA					
FORMA PARTE DE UN PROCESO					

MOTOR S₁ : motor síncrono uno.

6.3.2.5 CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN EN AMBOS TIPOS DE MOTORES.

En este inciso se llevará a cabo la recopilación de información sobre el estado actual en el que se encuentran operando tanto los motores de inducción como los motores síncronos. Por lo que será necesario tomar en cuenta sólo los aspectos básicos como los que se presentan a continuación:

- 1) Información sobre el lugar en el cual se encuentran los motores.
 - Las dimensiones.
 - La temperatura.
 - La ventilación.

- 2) Información sobre los motores.
 - Estado de limpieza en el que se encuentran.
 - Condición en la que se encuentra la ventilación.
 - La temperatura el motor.
 - Condición en la que se encuentran los valeros, chumaceras o cojinetes.
 - Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor.
 - Condición en la que se encuentran las escobillas y anillos rozantes o colectores, según sea el caso.

- 3) Información sobre la carga que acciona el motor.
 - Que tipo de carga es la que mueve el motor.
 - Que tipo de acoplamiento es el que tiene el motor con la carga.
 - Condición en la que se encuentra el acoplamiento.

A cada uno de los motores que se encuentren en el lugar en el cual se está llevando a cabo la metodología se les aplicarán cada uno de los tres puntos mencionados anteriormente, con el propósito de poder conocer el estado en el cual se encuentran operando los motores, en el instante en el que se recopilan los datos.

6.3.2.6 EL TIEMPO QUE TIENEN OPERANDO AMBOS TIPOS DE MOTORES, ASÍ COMO SU HISTORIAL DE REPARACIONES.

En este inciso se tendrá que obtener la información sobre el tiempo que llevan de operar cada uno de los motores, si es posible saber el año en el que fue adquirido el motor será mucho mejor, pero si no, entonces sólo será necesario conocer un tiempo estimado en el que el motor ha estado operando.

Otro punto de la información que es importante conocer es el historial de reparaciones que ha tenido cada motor, aquí será necesario saber si desde que se adquirió el motor ha sido reparado, cuantas veces y de que ha sido reparado, así como cuanto tiempo ha pasado desde su última reparación.

En el caso de conocer el tiempo que llevan operando los motores será necesario recopilar la información en las tablas 10 y 11, para el caso del historial de reparaciones también se utilizarán las tablas 10 y 11, pero cuando se tenga que explicar de qué se ha reparado cada motor se tendrá que realizar un informe, en el que se explique con detalle dicha información, esto se hará por cada uno de los motores que hayan sido reparados:

TABLA 10. TIEMPO DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN E HISTORIAL DE REPARACION DE LOS MISMOS.

	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I _n
TIEMPO QUE LLEVA OPERANDO				
HA SIDO REPARADO				
CUANTAS VECES HA SIDO REPARADO				
CUANDO FUE SU ÚLTIMA REPARACIÓN				

MOTOR I₁ : Motor de inducción uno.

TABLA 11. TIEMPO DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS E HISTORIAL DE REPARACION DE LOS MISMOS.

	MOTOR S ₁	MOTOR S ₂	MOTOR S _n
TIEMPO QUE LLEVA OPERANDO				
HA SIDO REPARADO				
CUANTAS VECES HA SIDO REPARADO				
CUANDO FUE SU ÚLTIMA REPARACIÓN				

MOTOR S₁ : motor síncrono uno.

Como información adicional se averiguará si a cada motor se le realiza mantenimiento preventivo y si es así, entonces cada cuando se le realiza. Para esto se presenta la tabla 12 y 13, en la cual hay que colocar la información obtenida tanto para los motores de inducción como a los motores síncronos.

TABLA 12. MANTENIMIENTO PREVENTIVO REALIZADO A LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I _n
SE REALIZA MANTENIMIENTO PREVENTIVO					
CUANDO FUE SU ÚLTIMO MANTENIMIENTO					

MOTOR I₁ : Motor de inducción uno.

TABLA 13. MANTENIMIENTO PREVENTIVO REALIZADO A LOS MOTORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS.

	MOTOR S ₁	MOTOR S ₂	MOTOR S ₃	MOTOR S _n
SE REALIZA MANTENIMIENTO PREVENTIVO					
CUANDO FUE SU ÚLTIMO MANTENIMIENTO					

MOTOR S₁ : Motor síncrono uno.

6.3.2.7 HORARIO DE OPERACIÓN EN AMBOS TIPOS DE MOTORES.

En este inciso se deberá recopilar la información sobre el horario en el que operan cada uno de los motores, esto se hará con el fin de saber cuantas horas operan al día, a la semana, al mes y por consecuencia al año, además de saber si los motores son de operación continua o si son operados ocasionalmente, es decir, de vez en cuando.

Aquí se presentaran las tablas 14 y 15. En las que se registrará el horario en el que operan los motores de inducción y los motores síncronos respectivamente, dichas tablas nos servirán para poder obtener el total de horas que operan a la semana, y posteriormente por medio de cálculos se sabrá el tiempo de operación al mes y por lo tanto también al año.

En el caso de que se requiera conocer el tiempo de operación al mes y al año, los cálculos se harán basándose en la actividad de operación que se acostumbre en el lugar en el cual se esta realizando la metodología, tomando en cuenta los días no laborables en los que no hay ninguna actividad en el lugar. Para esto será necesario conseguir el calendario de actividad laborables de dicho lugar.

Además de las tablas 14 y 15 se presentan otras dos tablas las 16 y 17 que tienen un fin similar a las primeras, sólo que en estas se colocarán las horas totales de operación por cada mes, al final de la tabla con dicha información disponible se obtendrá el tiempo de operación al año en horas por cada uno de los motores, ya sean de inducción o síncrono.

TABLA 14. HORARIO DE OPERACIÓN A LA SEMANA DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES	SABADO	DOMINGO	TOTAL DE HORAS A LA SEMANA
MOTOR I ₁								
MOTOR I ₂								
MOTOR I ₃								
.								
.								
.								
MOTOR I _n								

MOTOR I₁ : Motor de inducción uno.

TABLA 15. HORARIO DE OPERACIÓN A LA SEMANA DE LOS MOTORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS.

	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES	SABADO	DOMINGO	TOTAL DE HORAS A LA SEMANA
MOTOR S ₁								
MOTOR S ₂								
MOTOR S ₃								
.								
.								
.								
MOTOR S _n								

MOTOR S₁ : Motor síncrono uno.

TABLA 16. HORARIO DE OPERACIÓN AL AÑO DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I _n
MES UNO					
MES DOS					
MES TRES					
MES CUATRO					
MES CINCO					
MES SEIS					
MES SIETE					
MES OCHO					
MES NUEVE					
MES DIEZ					
MES ONCE					
MES DOCE					
TOTAL DE HORAS AL AÑO					

MOTOR I₁ : Motor de inducción uno.

TABLA 17. HORARIO DE OPERACIÓN AL AÑO DE LOS MOTORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS.

	MOTOR S ₁	MOTOR S ₂	MOTOR S ₃	MOTOR S _n
MES UNO					
MES DOS					
MES TRES					
MES CUATRO					
MES CINCO					
MES SEIS					
MES SIETE					
MES OCHO					
MES NUEVE					
MES DIEZ					
MES ONCE					
MES DOCE					
TOTAL DE HORAS AL AÑO					

MOTOR S₁ : Motor síncrono uno.

En las siguientes tablas se presentará el tipo de operación que tienen cada uno de los motores, es decir, si son de operación continua u ocasional, esto se puede saber gracias a la información obtenida en las tablas 14, 15, 16 y 17.

TABLA 18. TIPO DE OPERACIÓN QUE TIENEN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I _n
TIPO DE OPERACIÓN					

MOTOR I₁ : Motor de inducción uno.

TABLA 19. TIPO DE OPERACIÓN QUE TIENEN LOS MOTORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS.

	MOTOR S ₁	MOTOR S ₂	MOTOR S ₃	MOTOR S _n
TIPO DE OPERACIÓN					

MOTOR S₁ : Motor síncrono uno.

6.3.2.8 EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA ACTUAL EN AMBOS TIPOS DE MOTORES.

OBTENCIÓN DE LA EFICIENCIA EN UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN.

Finalmente en este último inciso de la recopilación de datos en motores, se calculará la eficiencia actual que tienen cada uno de los motores trifásicos de inducción en plena operación, es decir, cuando se encuentran trabajando en un día normal de labores. Para esto será necesario obtener por medio de aparatos de medición los parámetros requeridos para el cálculo de la eficiencia, así que dichos parámetros que se necesitan son los siguientes:

- 1) El voltaje trifásico de línea (V_L) en volts.
- 2) Corriente de línea que consume el motor (I_L) en ampers.
- 3) El factor de potencia (F.P) al cual opera el motor.
- 4) La frecuencia (F) de la línea eléctrica en Hertz.
- 5) La velocidad en (rpm) a la que gira el eje del motor en plena operación.

Según los parámetros anteriores será necesario contar con:

- Un multímetro para medir voltajes.
- Un amperímetro de gancho para medir corrientes.
- Un medidor del factor de potencia.
- Un medidor de frecuencia.
- Un tacómetro para medir las rpm del eje del motor.

Como un requisito indispensable los aparatos de medición que serán utilizados, deben estar bien calibrados y en buenas condiciones, estas características deberán ser respaldadas por empresas que se dediquen a la calibración y mantenimiento de aparatos de medición. Por lo tanto los aparatos que sean utilizados aquí para la obtención de la eficiencia deberán ser aprobados por alguna empresa o institución del ramo, esto con el fin de poder tomar buenas lecturas:

Una forma de obtener la eficiencia de un motor trifásico de inducción que se encuentra en plena operación en alguna empresa o planta industrial de una manera práctica, sencilla y confiable es por medio de la siguiente fórmula:

$$\eta = \left[\frac{(0.746) (P_{msde})}{\sqrt{3} (V_L) (I_L) (F.P)} \right] \times 100 \dots\dots\dots (6-1)$$

Donde:

0.746 = Es un factor de conversión, para convertir HP a Kw.

P_{msde} = Es la potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor.

V_L = Es el voltaje trifásico de la línea en volts.

I_L = Es la corriente de línea que consume el motor en amperes.

F.P = Es el factor de potencia del motor (F.P = cos θ).

De la expresión (6-1) se puede determinar que:

$$PENTRADA = \sqrt{3} (V_L) (I_L) (F.P)$$

Y la potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor "P_{msde}" se obtendrá con la siguiente expresión:

$$P_{msde} = \left[\frac{n_s - n_{nom}}{n_s - n_{pc}} \right] (P_{sn}) \dots\dots\dots (6-2)$$

Siempre y cuando: n_{nom} sea de un valor mayor que el valor de n_{pc} ($n_{nom} > n_{pc}$)

Donde:

n_s = Es la velocidad síncrona en (rpm) y se obtiene con la ecuación (2-1).

n_{nom} = Es la velocidad nominal en (rpm) que se encuentra en la placa de datos.

n_{pc} = Es la velocidad en (rpm) a la que gira el eje del motor a plena carga y se mide con el tacómetro.

P_{sn} = Es la potencia nominal de salida que se encuentra en la placa de datos en (HP).

Nota:

En el caso de que la velocidad nominal que se encuentra en la placa de datos (n_{nom}) sea de valor menor al valor de la velocidad a la que gira el eje del rotor a plena carga (por cualquier modificación que haya sufrido el motor o simplemente por depreciación de sus características de operación) se utilizará la siguiente expresión:

$$P_{msde} = \left(\frac{n_s - n_{ma}}{n_s - n_{me}} \right) (P_{sn})$$

Donde:

n_s = Es la velocidad síncrona en (rpm) y se obtiene con la ecuación (2-1).

n_{ma} = (Es la velocidad de operación mayor) esta es la lectura de velocidad (medida con un tacómetro) se refiere a que debe ser tomada cuando la máquina a la que pertenece un determinado motor es encendida, pero no lleva a cabo ninguna actividad, por lo que se puede decir que es cuando al motor casi no se le aplica carga (es decir que se tiene al motor operando en vacío).

n_{me} = (Es la velocidad de operación menor) esta es la lectura de velocidad (medida con un tacómetro) se refiere a que debe ser tomada cuando la máquina a la que pertenece un determinado motor es utilizada para llevar a cabo una actividad, que es cuando al motor realmente se le aplica carga.

P_{sn} = Es la potencia nominal de salida que se encuentra en la placa de datos en (HP).

La " n_s " se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$n_s = \frac{(120) (F)}{P} = (\text{rpm}) \quad (2-1)$$

Donde:

F = Es la frecuencia de línea eléctrica a la cual está conectado el motor.

P = Es el número de polos del motor.

Con todo lo anterior es conveniente empezar por calcular "Ns" con la ecuación (2-1), posteriormente se obtiene "Pmsde" con la ecuación (6-2) y finalmente sustituir todo lo necesario en la ecuación (6-1) para que así podamos conocer la eficiencia de un motor trifásico de inducción que se encuentra en plena operación.

Una vez que se obtuvo la eficiencia en cada motor se procederá a llenar la siguiente tabla:

TABLA 20. TABLA DE COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS OBTENIDAS EN CADA MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN.

	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I _n
EFICIENCIA NOMINAL					
EFICIENCIA CALCULADA					

EFICIENCIA NOMINAL = Eficiencia presentada en la placa de datos.

EFICIENCIA CALCULADA = Eficiencia obtenida con la ecuación (6-1).

OBTENCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA (F.P) EN UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN.

Como un dato adicional pero importante se deberá obtener el factor de potencia al cual está operando un determinado motor trifásico de inducción, ya que con esto se podrá saber que tanto está aprovechando el motor la energía eléctrica que consume de la línea.

Si se cuenta con un aparato de medición que tenga la habilidad de poder mostrar el valor del factor de potencia, entonces simplemente se tomará la lectura ahí mostrada y se anotará en la tabla 21. En el caso de que no se tenga un aparato que pueda dar el factor de potencia; será necesario obtenerlo por medio de un cálculo, para esto se necesita conocer la potencia real o activa (P) que consume el motor de la línea, así como la potencia aparente (S).

Para la obtención de la potencia real o activa simplemente se tomó la lectura de un aparato de medición llamado "wattmetro", que nos da la potencia real en watts. Para el caso de la potencia aparente sólo se necesitan tomar lecturas de un "voltímetro" y de un "amperímetro", los cuales nos darán el voltaje y la corriente respectivamente que obtiene un motor trifásico de inducción de la línea de alimentación, dichas lecturas se colocan en la ecuación (6-3) y se obtiene así la potencia aparente trifásica.

$$S = \sqrt{3} (V_L) (I_L) \dots\dots\dots (6-3)$$

Donde:

V_L = Voltaje trifásico de la línea en volts.

I_L = Corriente de línea que consume el motor en amperes.

S = Potencia aparente trifásica en volt-ámper.

Una vez que se tenga la potencia real o activa en kilowatts y la potencia aparente en kilovolt-ámper, se colocan en la ecuación (6-4) y se obtiene así el factor de potencia al cual opera un determinado motor de inducción.

$$F.P. = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (6-4)$$

Donde:

F.P. = Es el factor de potencia al cual opera un motor trifásico de inducción.

P = Es la potencia real trifásica medida en kilowatts (kw).

S = Es la potencia aparente trifásica en kilovolts-ampers (KVA).

Ya que se obtuvo el factor de potencia de un motor trifásico de inducción este se anotará en la siguiente tabla, la cual compara el valor nominal del factor de potencia al cual debe operar un motor de inducción, si es que se le quiere sacar el máximo provecho, con el factor de potencia del motor que se obtuvo en la medición, cuando dicho motor se encontraba en plena operación.

TABLA 21. TABLA DE COMPARACIÓN DE FACTORES DE POTENCIA.

	MOTOR I ₁	MOTOR I ₁	MOTOR I ₁	MOTOR I ₁
FACTOR DE POTENCIA NOMINAL					
FACTOR DE POTENCIA OBTENIDO					

FACTOR DE POTENCIA NOMINAL = Factor de potencia presentado en la placa de datos.

FACTOR DE POTENCIA CALCULADO = Factor de potencia obtenido ya sea por medición o por cálculo mediante la relación entre la potencia real (P) y la potencia aparente (S).

OBTENCIÓN DE LA EFICIENCIA EN UNMOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO.

Para la obtención de la eficiencia en un motor síncrono, que se encuentra en plena operación, sólo se requiere de lo siguiente:

- 1) El voltaje trifásico de línea (VL) en volts.
- 2) La corriente de línea que consume el motor (IL) en ampers.
- 3) La potencia real o activa trifásica (Pe) que obtiene el motor de la línea de alimentación en Watts.

Según los parámetros anteriores será necesario contar con:

- Un voltímetro o un multímetro para medir voltajes.
- Un amperímetro de gancho para medir corrientes.
- Un wattmetro trifásico para medir la potencia real.

Una vez que se tengan los parámetros necesarios se utilizará la expresión (6-5), con la cual será posible obtener la eficiencia que tiene un determinado motor síncrono, cuando este se encuentra en plena operación.

$$\eta = \frac{\sqrt{3} (V_L) (I_L)}{P_e} \times 100 \dots\dots\dots (6-5)$$

Donde:

VL = Es el voltaje trifásico de línea en volts.

IL = Es la corriente de línea en ampers.

Pe = Potencia de entrada (potencia real o activa trifásica) en watts.

η = Eficiencia en por ciento.

Ahora se presentará la tabla 22, en la cual será posible hacer una comparación entre la eficiencia nominal y la eficiencia obtenida por medio de la expresión (6-5) en un determinado motor síncrono.

TABLA 22. TABLA DE COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS OBTENIDAS EN CADA MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO.

	MOTOR S1	MOTOR S2	MOTOR S3	MOTOR Sn
EFICIENCIA NOMINAL					
EFICIENCIA CALCULADA					

EFICIENCIA NOMINAL = Eficiencia presentada en la placa de datos.

EFICIENCIA CALCULADA = Eficiencia obtenida con la ecuación (6-5).

OBTENCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA (F.P) EN UN MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO.

Por último para el caso de la obtención del factor de potencia se seguirá el mismo procedimiento usado para el motor de inducción, es decir, la expresión (6-3) y la expresión (6-4) se tomarán en cuenta para calcular el factor de potencia en un motor síncrono, esto sólo si no se cuenta con un aparato de medición que nos pueda dar la lectura del factor de potencia.

Una vez obtenido el factor de potencia de un determinado motor síncrono, este se colocará en la tabla 23 de comparación de factores de potencia.

TABLA 23. TABLA DE COMPARACIÓN DE FACTORES DE POTENCIA.

	MOTOR S ₁	MOTOR S ₁ '	MOTOR S ₁	MOTOR S ₁
FACTOR DE POTENCIA NOMINAL					
FACTOR DE POTENCIA OBTENIDO					

FACTOR DE POTENCIA NOMINAL = Factor de potencia presentado en la placa de datos.

FACTOR DE POTENCIA CALCULADO = Factor de potencia obtenido ya sea por medición o por calculo mediante la relación entre la potencia real (P) y la potencia aparente (S).

6.4 ANALISIS DE LOS DATOS RECOPIRADOS.

En este segundo paso de la metodología se realizará un análisis a los datos recopilados, esto con el sólo fin de poder saber si hay o no hay posibles oportunidades de ahorro de energía eléctrica en los motores de inducción y síncrono. Es de hacerse entender que aquí no se buscara otra cosa, más que el de detectar si en el lugar en el cual se esta llevando a cabo la metodología, realmente representa un potencial en el ahorro de la energía eléctrica.

En seguida se presentarán algunos de los puntos presentados en el apartado de recopilación de datos que tendrán que ser analizados, para así poder dar una respuesta a la pregunta ¿Hay posibles oportunidades de ahorro de energía eléctrica?.

- e) Condiciones actuales de operación en ambos tipos de motores.
- f) El tiempo de operación en ambos tipos de motores, así como el historial de reparaciones de los mismos.
- g) El horario de operación en ambos tipos de motores.
- h) Eficiencia y factor de potencia actual en ambos tipos de motores.

Los cuatro puntos anteriores contienen la información necesaria para poder dar una respuesta a sí hay o no posibles oportunidades de ahorro de energía eléctrica, así que ahora se procederá a mostrar como es que por medio de analizar cada inciso se puede saber si existen o no dichas oportunidades.

El análisis realizado a cada punto es sólo de manera básica, sin necesidad de adentrarse demasiado en el tema de cada inciso.

6.4.1 CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN EN AMBOS TIPOS DE MOTORES.

En este punto se analizará primero la información obtenida sobre el lugar en el cual se encuentran los motores, una vez que se conocen las características del lugar, tales como: sus dimensiones, su temperatura y su ventilación, entonces es posible pronosticar varios casos derivados de las características antes mencionadas, uno de esos casos es el siguiente:

Si un motor se encuentra operando en un lugar muy pequeño y con escasa ventilación, es obvio saber que la temperatura de dicho lugar aumentará conforme lo haga la temperatura del ambiente, y debido a que el motor también sufre de un calentamiento al estar operando, esto traerá consigo un sobrecalentamiento en dicho motor, lo que se traduce en una disminución en su eficiencia y un motor con una mala eficiencia provocará desperdicios en su consumo de energía eléctrica, por lo que bajo estas circunstancias se podría decir que si hay una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Como se pudo observar la temperatura del lugar depende tanto de las dimensiones como de la ventilación de dicho lugar, por lo que la temperatura se verá afectada según las circunstancias en las que se encuentren estas dos características.

Se pueden presentar diversos casos parecidos al anterior y con el mismo resultado de desperdicio en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, tal vez en menor o mayor proporción, esto según los datos que se hayan obtenido en la recopilación realizada al lugar en el cual se encuentre operando un determinado motor. Por lo que lo ideal para no tener una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica, sería que dicho lugar sea lo suficientemente espacioso y que además cuente con un buen sistema de ventilación que logre mantener el lugar a una buena temperatura, para que así no afecte demasiado a la temperatura que el motor genera al estar operando, evitando de esta manera un sobrecalentamiento en el mismo.

El segundo punto por analizar es él referente a la información sobre los motores, debido a que aquí se cuenta con varias características, será conveniente presentarlas primero y posteriormente analizarlas una por una.

- a) Estado de limpieza en el que se encuentran.
- b) Condición en la que se encuentra la ventilación.
- c) La temperatura del motor.
- d) Condición en la que se encuentran los valeros, chumaceras o cojinetes.
- e) Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor.
- f) Condición en la que se encuentran las escobillas y los anillos rozantes o colectores, según sea el caso.

6.4.1.1 ESTADO DE LIMPIEZA EN EL QUE SE ENCUENTRAN.

El problema básico en este punto vendría si es que el motor se encuentra sucio exteriormente, ya que esto provocará que las rendijas de ventilación con las que cuenta el motor sean obstruidas por dicha suciedad, lo cual haría que dicho motor sufra de un sobrecalentamiento. Esto traería consigo principalmente una baja en la eficiencia, por lo que se tendría un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, provocando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso de que el motor se encuentre libre de polvo y de objetos extraños que impidan su óptimo funcionamiento, entonces será obvio darse cuenta que aquí no se tiene ninguna oportunidad potencial de ahorro de energía eléctrica.

6.4.1.2 CONDICIÓN EN LA QUE SE ENCUENTRA LA VENTILACIÓN.

Aquí se presentarán dos de las posibles formas más comunes de dar ventilación a un motor, una de ellas es por medio de rendijas en la carcasa del motor para que penetre aire del medio ambiente hacia el interior del motor; la segunda consiste en que el motor conste de un sistema de ventilación interno o simplemente tener presente en un motor ambas alternativas de ventilación.

En el inciso anterior se presentó el problema que causaría el exceso de suciedad exterior en la ventilación del motor por medio de rendijas en la carcasa. Por lo que ahora se analizará el caso de la ventilación interna en un motor.

Normalmente aquí se tiene un ventilador colocado en la parte posterior del motor acoplado al rotor, de tal manera que cuando este gira también lo hace el ventilador, provocando así que se tenga una circulación de aire dentro del motor, con el fin de evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores (pérdidas por efecto joule) del motor y dañar los aislamientos, trayendo como una probable consecuencia que el motor se queme.

En este caso, además de tener presentes las pérdidas por efecto joule, en el caso en el que el ventilador no funcione adecuadamente, también se tienen las pérdidas por fricción y ventilación, las cuales son provocadas por el mal alineamiento del ventilador en el rotor, lo que provocará que se tengan roces por parte del ventilador con otros componentes internos del motor. El acumulación de estas dos pérdidas traerán consigo una disminución en la eficiencia, por lo que el motor desperdiciará la energía eléctrica que consume en las pérdidas, presentándonos así una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

6.4.1.3 CONDICIÓN EN LA QUE SE ENCUENTRAN LOS BALEROS, CHUMACERAS O COJINETES.

Estos elementos auxiliares que forman parte de un motor, suelen desgastarse por el uso excesivo de dicho motor y debido a esto se provocan las pérdidas por fricción y ventilación que afectan directamente a la eficiencia, provocando que esta disminuya.

En el caso particular de que un motor conste de cojinetes en lugar de baleros o chumaceras, si estos se encuentran en mal estado físico o si su lubricación no es buena (insuficiente o excesiva) entonces pueden ser causa de pérdidas por fricción y ventilación, trayendo como consecuencia también una disminución en la eficiencia del motor.

Si se llegaran a presentar problemas iguales o similares a los antes mencionados en los elementos auxiliares, entonces se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

6.4.1.4 CONDICIÓN EN LA QUE SE ENCUENTRA EL EJE O FLECHA DEL MOTOR.

Si la información recopilada aquí nos indica que el eje del motor no está en buenas condiciones, debido a una sobrecarga o simplemente al mal uso del mismo, entonces esto provocará pérdidas por fricción y ventilación, además de que como consecuencia dañaría los baleros o chumaceras o en otro caso los cojinetes si es que el motor consta de éstos.

Con el incremento de las pérdidas por fricción y ventilación más allá de lo normal a consecuencia de tener el eje de un motor dañado, se tendría obviamente una disminución en la eficiencia del motor, por lo que una parte de la energía eléctrica que el motor consume se irá hacia las pérdidas por fricción y ventilación en vez de formar parte de la potencia mecánica y ayudar a realizar un trabajo útil, y con esto se presenta una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

6.4.1.5 CONDICIÓN EN LA QUE SE ENCUENTRAN LAS ESCOBILLAS Y LOS ANILLOS ROZANTES O COLECTORES SEGÚN SEA EL CASO.

Estos también forman parte de los elementos auxiliares y solamente algunos motores constan de ellos como: los motores de inducción con rotor devanado y los motores síncronos que requieren de una fuente de corriente de campo externa. Para aquellos motores que cuenten con estos aditamentos se suelen tener problemas entre las escobillas y los anillos colectores o rozantes, debido a una mala alineación del uno con el otro o simplemente por un desgaste de ambos elementos debido a la fricción que suelen tener. Estos problemas provocan sobrecalentamiento en el motor a causa de la caída de tensión que se tiene entre las escobillas y los anillos colectores al tener un desgaste, lo cual acarreará entre otros, un incremento en la corriente lo que conllevará al sobrecalentamiento y a una disminución de la eficiencia.

En otras palabras también se tienen pérdidas eléctricas y de fricción y ventilación, convirtiéndose así en otra causa de la disminución de la eficiencia en un motor, por lo que se tendrá una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

El último punto por analizar en este apartado es el referente a la información sobre la carga que acciona el motor, por lo que aquí será posible conocer el tipo de carga que mueve el motor, así como el tipo de acoplamiento que se tiene entre el motor y su carga, además de la condición en la que se encuentra dicho acoplamiento. Normalmente los problemas más comunes que suelen presentarse aquí y que por consecuencia suelen presentar una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica son los siguientes:

Si un motor presenta una mala alineación con respecto a su carga entonces se presentarán esfuerzos de torsión en la flecha del motor, lo que provocará pérdidas por fricción y ventilación en los valeros o chumaceras, produciendo que el motor no opere a su máxima eficiencia, además de esto se puede presentar el caso extremo de que una mala alineación cause daños mayores en el motor e inciso en la carga.

Si los elementos que componen al sistema de acoplamiento tales como: poleas, engranes, bandas y cadenas no se encuentran en buenas condiciones o simplemente están mal alineadas, entonces pueden ocasionar daños severos al motor, además de representar una carga inútil para dicho motor. Provocando así desperdicios en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, sufriendo también un acortamiento en su periodo de vida.

Si un motor es acoplado a una carga, la cual se encuentra arriba o por debajo de la potencia nominal de salida del motor, es decir, si el motor opera sobrecargado o a carga reducida, entonces la eficiencia en el motor cae por debajo de su eficiencia nominal, además de que el factor de potencia del motor también se ve afectado, provocando así un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica, lo que se traduce en una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

6.4.2 EL TIEMPO DE OPERACIÓN EN AMBOS TIPOS DE MOTORES, ASÍ COMO EL HISTORIAL DE REPARACIONES DE LOS MISMOS.

Al conocer la información sobre el tiempo que llevan operando los motores, será posible saber si se tiene o no una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica. Si la información que se tiene indica que hay en operación motores antiguos, entonces se debe tomar en cuenta que estos motores han tenido un uso intenso durante años y que por consecuencia sus características de operación se han depreciado notablemente, por lo que su rendimiento no es tan bueno como solía serlo cuando eran nuevos, con esto se tiene una potencial oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso de que se tengan operando motores que hayan sido reparados, se debe tomar en cuenta que una reparación inadecuada en un motor puede ocasionar un incremento en las pérdidas y más en los motores de corriente alterna, además de una reducción en el factor de potencia, y por consecuencia todo esto conlleva a una disminución de su eficiencia. Por lo que en este caso también se tiene una buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Otro aspecto importante es de que si a los motores que se encuentran en operación no se les ha dado un mantenimiento preventivo desde que se adquirieron, entonces su funcionamiento no será muy óptimo, ya que como se menciono anteriormente el acumulamiento de polvo y de objetos extraños, además de un desgaste de sus elementos auxiliares conllevan a este problema. Por lo que el no darles un mantenimiento preventivo a los motores traerá como consecuencia una disminución en su eficiencia, dando así una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

6.4.3 HORARIO DE OPERACIÓN EN AMBOS TIPOS DE MOTORES.

Una vez que se conocen ~~en los horarios en los que operan los motores~~, se podrá saber si es posible tener algunos inconvenientes que afecten el buen consumo de la energía eléctrica por parte de la planta industrial, en la cual se encuentran operando los motores; uno de esos inconvenientes que se pueden presentar, es de que si la mayoría de los motores son arrancados al mismo tiempo se suele tener un recargo en el recibo del consumo de la energía eléctrica por "demanda máxima", esto también pasa cuando la mayoría de los motores se encuentran operando al mismo tiempo junto con otros equipos eléctricos dentro del período de punta, es decir, en la parte del día en el cual normalmente se tiene el más alto consumo en la energía eléctrica (normalmente este periodo de punta se presenta de las 18:00 hrs a las 22:00 hrs).

En el caso de que la operación de un motor sea de servicio continuo o simplemente que sufra de frecuentes arranques y de paros, entonces es muy probable que sufra de una depreciación de sus características de operación y de su eficiencia, además de que como consecuencia el aislamiento con el que están impregnados los devanados se daña debido a la elevación de la temperatura del motor por consecuencia de los paros y arranques constantes.

Los inconvenientes presentados aquí en este apartado y que es posible localizarlos por medio del horario en el que operan, representan una potencial oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

6.4.4 EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA ACTUAL EN AMBOS TIPOS DE MOTORES.

La eficiencia es un elemento que nos ayuda a saber que tanto esta aprovechando un motor la potencia eléctrica que obtiene de la línea para convertir la mayor parte a potencia mecánica, la cual sirve para llevar a cabo un trabajo útil. En la medida en que un motor convierta más potencia eléctrica a mecánica será más eficiente y en caso contrario será menos eficiente, y esto se puede saber, conociendo la eficiencia a la cual opera un determinado motor ya sea de inducción o síncrono.

Con un simple vistazo a la magnitud de la eficiencia que se obtuvo de un determinado motor y que se encuentra en el apartado de **recopilación de datos**, es posible determinar si un motor está sufriendo de problemas, ya que estos afectan directamente a su eficiencia cuando se encuentra en plena operación. Los problemas más comunes que suelen afectar a la eficiencia de un motor ya se han mencionado en los temas anteriores, por lo que aquí únicamente se dejará en claro que si un motor ya sea de inducción o síncrono, se les obtiene una eficiencia menor que la nominal, es decir, menor que la que se encuentra en la placa de datos, entonces esto quiere decir que un determinado motor no está operando adecuadamente o simplemente sufre de ciertos problemas que obviamente se traducen en una disminución de la eficiencia, provocando así una buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Además de la eficiencia, otro término importante en los motores de inducción y síncronos es el factor de potencia, con el cual es posible saber que tan eficientemente se consume la energía eléctrica sin causar pérdidas en las líneas de alimentación. Como se ha mencionado anteriormente el máximo factor de potencia que se puede obtener es unitario, es decir, el 100 por ciento del mismo, con esto un motor no causaría pérdidas en las líneas de suministro de energía eléctrica, sin embargo en México se pueden considerar buenos factores de potencia entre 0.9 y la unidad. Un factor de potencia menor a 0.9 significa energía eléctrica desperdiciada y afecta a la adecuada utilización del sistema eléctrico, además de que se imponen cuotas a manera de multas en la tarifa eléctrica. Por lo que un bajo factor de potencia en un motor, que afecte el buen funcionamiento del sistema eléctrico al cual está conectado, representa una buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

6.5 ALTERNATIVAS PARA EL AHORRO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

Una vez que se sabe si en el lugar en el cual se está llevando a cabo la metodología, se tienen oportunidades de ahorro de energía eléctrica, entonces habrá que darles una posible solución a dichos problemas, con el fin de poder corregir el desperdicio de energía eléctrica que se tiene. Por lo que este será el tema principal a tratar en este tercer paso de la metodología.

En el paso anterior de la metodología se mostraron los problemas más comunes que suelen presentarse en los motores trifásicos tanto de inducción como en los síncronos, y que obviamente afectaban a la eficiencia y al factor de potencia de los motores, provocando así las posibles oportunidades de ahorro de energía eléctrica. Por lo que ahora en este apartado se darán recomendaciones para corregir los problemas antes mencionados; además de que como un complemento también se presentan algunas posibles soluciones a otros problemas que suelen afectar el buen funcionamiento de un motor.

Para empezar es de notarse el hecho de que los motores eléctricos, suministran en su mayor parte, la energía mecánica 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 la 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 un motor y su carga operan a su máxima eficiencia.

En este apartado se presentarán útiles recomendaciones para optimizar el consumo de energía eléctrica en instalaciones con motores eléctricos, dichas recomendaciones fueron obtenidas de publicaciones hechas por el Fideicomiso Para El Ahorro De Energía Eléctrica (FIDE), ya que es un organismo creado para promover acciones que induzcan y fomenten el ahorro de energía eléctrica.

Debido a que el desperdicio de la energía eléctrica nace en problemas que afectan directamente a la eficiencia y al factor de potencia, será conveniente dar primeramente una introducción sobre cada uno de estos dos elementos, que son fundamentales para que un motor aproveche al máximo la energía eléctrica que consume, para posteriormente presentar las recomendaciones generales que ayudaran a optimizar el buen consumo de la energía eléctrica.

6.5.1 EN LA EFICIENCIA.

La eficiencia o rendimiento de un motor eléctrico es una medida de su habilidad para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea en potencia mecánica útil. Como se ha estado mencionado anteriormente no toda la energía eléctrica que un motor recibe se convierte a energía mecánica. En el proceso de conversión, se presentan pérdidas, por lo que la eficiencia nunca será del 100%. Si las condiciones de operación de un motor son incorrectas o este tiene algún desperfecto, la magnitud de las pérdidas, puede superar con mucho las de diseño, con la consecuente disminución de la eficiencia.

Por otro lado, la reparación inadecuada de un motor puede ocasionar un incremento en las pérdidas y adicionalmente en los motores de corriente alterna, otro aspecto es la reducción del factor de potencia, ya que todo esto conduce a una disminución de su eficiencia.

Por ejemplo un motor que sufrió un desperfecto en su devanado y que por ello hay que rebobinarlo, puede disminuir su eficiencia considerablemente, si durante el proceso de reparación se presenta:

- Calentamiento desmedido del hierro al quitar el devanado.
- Daños en las ranuras al quitar el devanado dañado y montar el nuevo.
- Diferente calidad y calibre del alambre.
- Diferente número de vueltas.
- Daños a los cojinetes y mal alineamiento.
- Mayor tiempo de secado final.

Por esto es importante que cuando un motor sea reparado, los trabajos los efectúe personal calificado para garantizar que la compostura sea realizada correctamente y que los materiales empleados sean de calidad igual o superior a los originales.

La misma atención se debe prestar a las partes eléctricas del motor, como a los componentes mecánicos, tales como los cojinetes, el eje y el sistema de ventilación o enfriamiento. Ya que con frecuencia los daños que sufren los devanados tienen su origen en desperfectos mecánicos.

Un motor mal reparado al ser instalado nuevamente, gastará más energía que antes. Cuando los daños sean mayores puede resultar más económicos sustituir un motor que componerlo. Por lo que hay que evaluar técnica y económicamente la posibilidad de hacerlo y si se decide, pues entonces habrá que utilizar motores de alta eficiencia.

Otro aspecto importante son las tarifas eléctricas que se aplican a la industria, ya que además del cargo por consumo de energía (KWh), se hace un cargo por demanda máxima (KW), que es importante en la facturación. Dicha demanda máxima es registrada por un medidor conforme la potencia que consumen motores, lámparas y otros aparatos eléctricos, se encuentren funcionando simultáneamente durante un lapso de 15 minutos.

Por lo que al evitar el arranque y la operación simultánea de los motores y otros equipos eléctricos, sobre todo en el período de punta (de las 18 a las 22 hrs) se traduce en ahorros significativos en la cuenta de electricidad.

Otra opción es la de extender los turnos de trabajo, repartiendo la operación de los motores y otros equipos en más horas de labores, fuera el período de punta.

Los cargos por consumo de energía eléctrica pueden ser prácticamente iguales pero por demanda máxima pueden reducirse de manera importante.

6.5.2 EN EL FACTOR DE POTENCIA.

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

$$\text{Factor de Potencia} = \frac{\text{Kw}}{\text{KVA}} \times 100$$

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

Los motores de inducción por su simplicidad de construcción, su velocidad prácticamente constante, su robustez y su costo relativamente bajo, son los motores más utilizados en la industria. Sin embargo, tienen el inconveniente de que aún en óptimas condiciones, consumen potencia reactiva (Kvar) por lo que son una de las causas principales del bajo factor de potencia en las instalaciones industriales.

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

- Selección justa del tipo, potencia y velocidad de los motores que se instalan.
- Empleo de motores trifásicos en lugar de monofásicos.
- Aumento de la carga de los motores a su potencia nominal.
- Evitar el trabajo prolongado en vacío de los motores.
- Reparación correcta y de alta calidad de los motores.
- Instalación de capacitores de potencia en los circuitos con mayor número de motores o en los motores de mayor capacidad.

A continuación se hará una breve descripción de algunos de los puntos antes mencionados.

6.5.2.1 SELECCIÓN CORRECTA DEL TIPO DE MOTOR.

Los motores de alta velocidad y gran potencia poseen un mayor factor de potencia, como se puede observar en las curvas típicas que se muestran en la figura 6.1. Lo mismo ocurre con los motores trifásicos respecto a los monofásicos y con los motores abiertos en comparación de los cerrados.

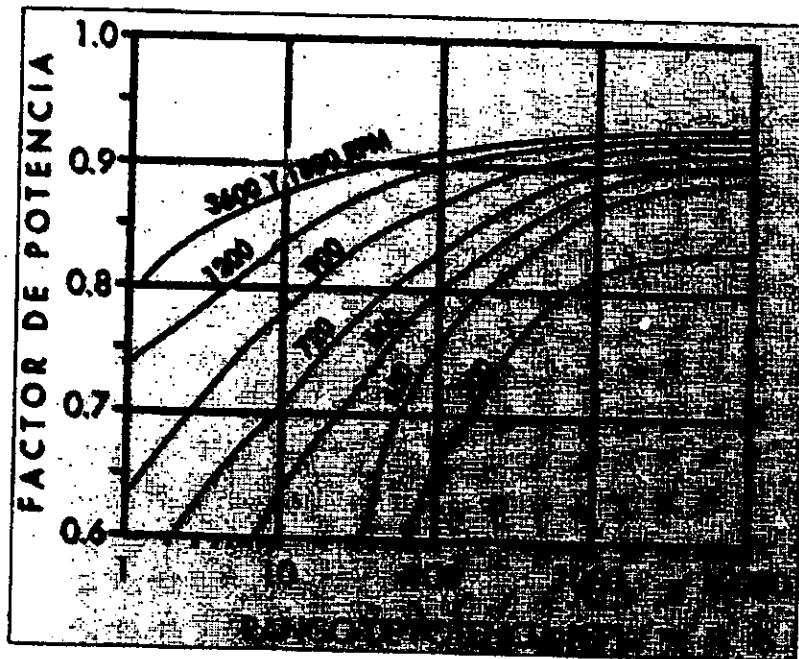


Figura 13

Figura 6.1. Curvas típicas de motores trifásicos donde se observa la variación del factor de potencia, con respecto a la velocidad síncrona (rpm) y a la potencia del motor en caballos de potencia (HP). Figura obtenida de la publicación de aspectos básicos del factor de potencia del FIDE.

6.5.2.2 PREFERIR MOTORES TRIFÁSICOS.

Los motores trifásicos ofrecen grandes ventajas de ahorro de energía en relación con aquellos de una sola fase.

Existen varias razones para ello:

- Los motores trifásicos no requieren de circuitos especiales de arranque, mientras que los monofásicos sí.
- Los motores monofásicos están especialmente diseñados para operar con cargas de baja potencia.
- Tratándose de motores de similar potencia, los monofásicos son mucho más costosos que los trifásicos.

- La eficiencia de los motores trifásicos, esto es, la relación entre los caballos de fuerza (HP) en el eje y los Kw de entrada, y es superior a la de los motores monofásicos.

6.5.2.3 AUMENTO DE LA CARGA DE LOS MOTORES A SU POTENCIA NOMINAL.

Los motores que operan con cargas por debajo de la carga nominal, disminuyen su factor de potencia. Por esto es importante adecuar la capacidad de los motores a sus cargas reales y evitar su operación prolongada en vacío. En la figura 6.2 se tiene una curva característica para un motor jaula de ardilla trifásico de 1800 rpm. Nótese cómo el factor de potencia decrece sensiblemente para cargas por debajo del 50% de su potencia nominal.

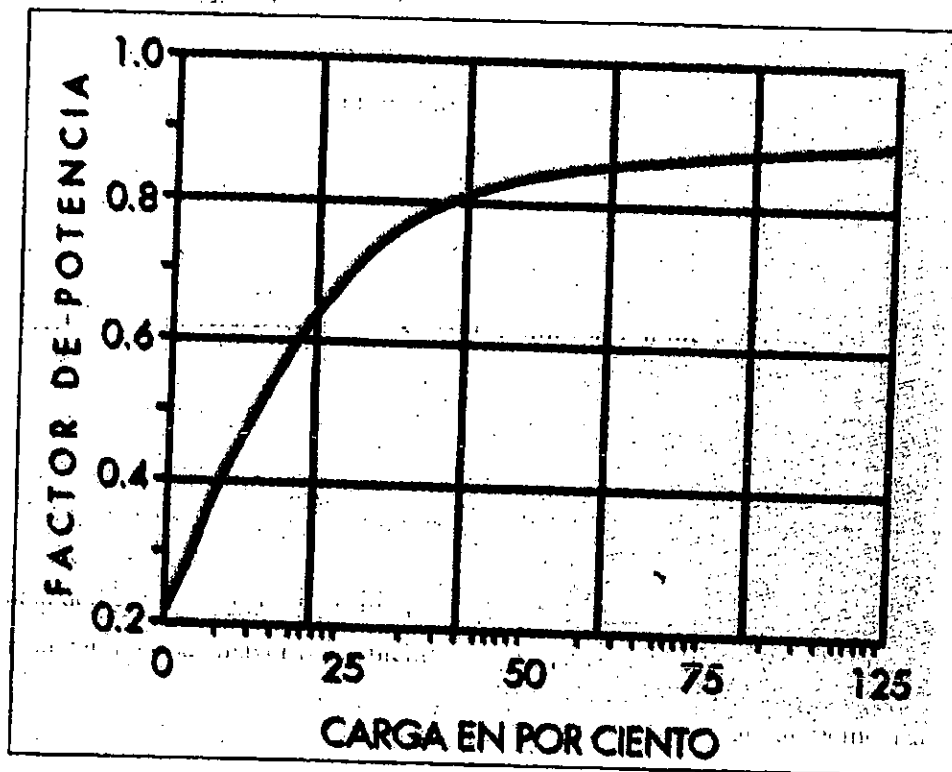


Figura 6.2. Variación del factor de potencia con la carga en un motor de inducción. Figura obtenida de la publicación de "Aspectos Básicos Del Factor De Potencia" del FIDE.

6.5.2.4 REPARACIÓN CORRECTA Y DE ALTA CALIDAD DE LOS MOTORES.

Una reparación deficiente, en muchos casos debido al empleo de materiales diferentes o de menor calidad que los de fábrica, puede provocar una disminución del factor de potencia en los motores. Es necesario que la reparación la realice personal calificado para garantizar la compostura.

6.5.2.5 EMPLEO DE MOTORES SÍNCRONOS EN LUGAR DE MOTORES DE INDUCCIÓN.

Cuando se requieren motores de gran potencia y baja velocidad, la instalación de motores síncronos debe ser considerada. Compitiendo en costo con los motores de inducción y operando sobreexcitados, contribuyen a mejorar el factor de potencia.

Con todo lo anterior se puede decir que corregir el bajo factor de potencia en una instalación es un buen negocio, no sólo porque se evitarán los cargos en la facturación que esto origina, sino porque los equipos operan más eficientemente, reduciendo los costos por consumo de energía.

6.5.3 RECOMENDACIONES GENERALES.

- 1) Elegir correctamente la potencia del motor. El rendimiento máximo se obtiene cuando éste opera entre el 75% y el 95% de su potencia nominal y cae bruscamente para cargas reducidas o cuando trabaja sobrecargado. Adicionalmente los motores de inducción a cargas bajas o en vacío tienen un factor de potencia muy bajo.
- 2) Emplear motores de mayor eficiencia, reduce las pérdidas y los costos de operación.
- 3) Seleccionar el motor de acuerdo con su ciclo de trabajo. Ya que operar un motor para servicio continuo, en accionamientos de operación intermitente, con frecuentes arranques y paros, ocasiona una depreciación de sus características de operación y eficiencia. Además de que se puede dañar el aislamiento de los devanados por la elevación de la temperatura.
- 4) Seleccionar el armazón del motor, de acuerdo con el ambiente en que va a estar trabajando. Los motores abiertos son más sencillos y por lo tanto menos costosos, además de operar con mayor factor de potencia. Sin embargo, en condiciones adversas del medio, los motores cerrados son recomendados.
- 5) Seleccionar correctamente la velocidad del motor. Sin la carga lo permite prefiera motores de alta velocidad, son más eficientes y si se trata de motores de corriente alterna, trabajan con un mejor factor de potencia.
- 6) Utilizar motores de inducción trifásicos en lugar de monofásicos. En motores de potencia equivalente, su eficiencia es de 3 a 5% mayor y su factor de potencia mejora notablemente.
- 7) Utilizar motores síncronos en lugar de motores de inducción. Cuando se requieren motores de gran potencia y baja velocidad la elección de un motor síncrono debe ser considerada. Compite en costo con uno de inducción de características similares, su eficiencia es de 2 a 3% mayor, su velocidad es constante y contribuye a mejorar el factor de potencia de la instalación.
- 8) Sustituir los motores antiguos o de uso intenso. Los costos de operación y mantenimiento de motores viejos o de motores que por su uso han depreciado sus características de operación, pueden justificar su sustitución por motores normalizados y de alta eficiencia.

- 9) Efectuar correctamente la instalación eléctrica y el montaje de los motores y su carga. Las normas técnicas de instalaciones eléctricas en su capítulo referente a motores, y las recomendaciones de los fabricantes son consulta obligada para asegurar el funcionamiento adecuado de los equipos.
- 10) Realizar en forma correcta la conexión a tierra de los motores. Una conexión defectuosa o la ausencia de esta, puede poner en peligro la vida de los operarios si se presenta una falla a tierra. Además de ocasionar corrientes de fuga que no son liberadas por el equipo de protección con un dispendio de energía.
- 11) Evitar concentrar motores en locales reducidos o en lugares que puedan dificultar su ventilación. Un sobrecalentamiento del motor se traduce en una disminución de su eficiencia.
- 12) Corregir la caída de tensión en los alimentadores. Una tensión reducida en las terminales del motor, acarreará entre otros, un incremento de la corriente, sobrecalentamiento y disminución de su eficiencia. Las normas permiten una caída máxima del 3% (o del 15% en la combinación de alimentador y circuito derivado) pero es recomendable que no rebase el 1%.
- 13) Balancear la tensión de alimentación en los motores trifásicos de corriente alterna. El desequilibrio entre fases no debe excederse en ningún caso del 5%, pero mientras menor sea el desbalance, los motores operarán con mayor eficiencia.
- 14) Compensar la energía reactiva demandada por los motores de corriente alterna más importantes o con mayor número de horas de funcionamiento, mejorando el factor de potencia de la instalación, con lo que se reducen las pérdidas de la potencia y de la tensión en los conductores.
- 15) Procurar que los motores síncronos funcionen con un factor de potencia cercano a la unidad para mejorar el factor de potencia de la instalación.
- 16) Evitar hasta donde sea posible el arranque y la operación simultánea de motores, sobre todo los de mediana y gran capacidad, para disminuir el valor máximo de la demanda.
- 17) Utilizar arrancadores a tensión reducida, en aquellos motores que realicen un número elevado de arranques. Con esto se evita un calentamiento excesivo en los conductores y se logra disminuir las pérdidas durante la aceleración.
- 18) Utilizar arrancadores estrella-delta o de devanado partido, como alternativa de los arrancadores a tensión reducida cuando la carga impulsada no requiera de alto par de arranque. Son más económicos y eficientes en términos de energía, pero tienen el inconveniente de que el par de arranque se reduce notoriamente.
- 19) Sustituir en los motores de rotor devanado, los reguladores con resistencia para el control de la velocidad, por reguladores electrónicos más eficientes. En las resistencias se llega a consumir hasta un 20% de la potencia que el motor toma de la red.

- 20) Sustituir motores con engranes, poleas, bandas u otro tipo de transmisión, para reducir la velocidad del motor, por motores de velocidad ajustable con reguladores electrónicos.
- 21) Instalar motores de velocidad ajustable con reguladores electrónicos, en aquellos accionamientos, en donde la carga sea variable y se pueda controlar ajustando la velocidad. Por ejemplo en sistemas de bombeo o compresión que deben suministrar caudales variables y que para hacerlo utilicen válvulas u otros dispositivos de control. La eficiencia total del motor y su carga se eleva notablemente con ahorros importantes de energía.
- 22) Evaluar la posibilidad de conectar la ventilación solamente durante las bajas velocidades, en aquellos motores de velocidad ajustable y ventilación separada provista por equipos auxiliares. Con esto se puede reducir el consumo de energía en el sistema de ventilación.
- 23) Preferir el acoplamiento individual, en accionamientos con un grupo de motores, así se consigue mejor que cada motor trabaje lo más cercas posible de su máxima carga.
- 24) Acoplar directamente el motor a la carga siempre que el accionamiento lo permita. Con esto se evitan las pérdidas en el mecanismo de transmisión.
- 25) Instalar acoplamientos flexibles en aquellos motores sometidos a un número elevado de arranques súbitos. Con esto se pueden atenuar los efectos de una alineación defectuosa, reducir los esfuerzos de torsión en la flecha del motor y disminuir las pérdidas por fricción.
- 26) Instalar equipos de control de la temperatura del aceite de lubricación de cojinetes de motores de gran capacidad a fin de minimizar las pérdidas por fricción y elevar la eficiencia.
- 27) Mantener en buen estado y correctamente ajustados los equipos de protección contra sobrecalentamientos o sobrecargas en los motores. Los protegen de daños mayores y evitan que operen con baja eficiencia.
- 28) Revisar periódicamente las conexiones del motor, junto con las de su arrancador y demás accesorios. Conexiones flojas o mal realizadas con frecuencia originan un mal funcionamiento del motor y ocasionar pérdidas por disipación de calor.
- 29) Mantener en buen estado las porta escobillas, escobillas, conmutadores y anillos colectores en motores síncronos y de rotor devanado. Un asentamiento incorrecto de las escobillas sobre el conmutador en los anillos colectores, provoca sobrecalentamientos y pérdidas de energía.
- 30) Mantener en óptimas condiciones los sistemas de ventilación y enfriamiento de los motores, para evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores del motor y dañar los aislamientos.
- 31) Verificar periódicamente la alineación del motor con la carga impulsada. Una alineación defectuosa puede incrementar las pérdidas por rozamiento y en caso extremo ocasionar daños mayores en el motor y en la carga.

- 32) Reparar o cambiar los ejes del motor y de la transmisión, si se han doblado por sobrecarga o por mal uso. Un eje en mal estado incrementa las pérdidas por fricción y puede ocasionar daños severos sobre todo en los cojinetes del motor.
- 33) Mantener en buen estado los medios de transmisión entre el motor y la carga, tales como: poleas, engranes, bandas y cadenas. Si estos no se encuentran en condiciones apropiadas o su instalación es incorrecta, pueden ocasionar daños importantes, además de representar una carga inútil para el motor.
- 34) Mantener en óptimas condiciones los cojinetes del motor. Una cantidad considerable de energía se pierde en cojinetes en mal estado o si su lubricación es inadecuada (insuficiente o excesiva). Por lo que hay que repararlos o sustituirlos si se tiene algún desperfecto y siga las instrucciones del fabricante para lograr una correcta lubricación.
- 35) Realizar la inspección periódica del motor, incluyendo lecturas de corriente, potencia (Kw), velocidad (rpm), resistencia de aislamiento, etc., con objeto de verificar si se mantienen en condiciones apropiadas de funcionamiento y eficiencia, y poder tomar acciones correctivas, cuando se requieran.
- 36) Efectuar rutinariamente la limpieza del motor, con el propósito de eliminar la suciedad, el polvo y objetos extraños, que impidan su óptimo funcionamiento. La regularidad con que ésta se realice dependerá de las condiciones en las que el motor este trabajando, pero es recomendable demostrarlo al menos una vez al año para realizar la limpieza completa de todos sus componentes.
- 37) Mantener actualizados los manuales de operación de los motores, incorporando en éstos las modificaciones que tengan lugar.
- 38) Colocar carteles con instrucciones concretas para los operarios, con la finalidad de que los motores operen con la mayor seguridad y eficiencia.
- 39) Analice cuidadosamente el costo de la reparación de sus motores eléctricos, sobre todo cuando se trate de un rebobinado.
- 40) Establecer una campaña permanente de ahorro de energía en sus instalaciones, dentro de la cual es fundamental concientizar a su personal. Motívelo a que participen activamente y tome en cuenta sus opiniones y sugerencias. Muchas de ellas pueden presentar verdaderas oportunidades de ahorro.
- 41) Es conveniente contar con un especialista que supervise los trabajos de instalación, reparación y operación de los motores y así lograr su óptimo funcionamiento.

Como se pudo observar en este apartado, se presentaron las principales recomendaciones que ayudaran a solucionar problemas que causen la disminución tanto del factor de potencia como de la eficiencia, provocando de esta manera que los motores aprovechen adecuadamente la energía eléctrica que consumen.

6.6 RESULTADOS OBTENIDOS.

En este cuarto paso de la metodología se presentarán cálculos con los cuales será posible saber que tantos beneficios a futuro traería la aplicación de las recomendaciones antes mencionadas, con el fin de poder mejorar la eficiencia y el factor de potencia de un motor, trayendo como consecuencia obviamente el ahorro de la energía eléctrica.

Es de notarse que el principal objetivo en este apartado, es de que se puedan observar los beneficios que se obtendrán sin necesidad de aplicar todavía las recomendaciones antes citadas para mejorar la eficiencia y el factor de potencia. Una vez estudiando y analizando los resultados de dichos cálculos, se podrá tomar la decisión de instalar o no (en el lugar en el cual se está llevando a cabo la aplicación de la metodología) dichas recomendaciones.

Se empezará primeramente por la eficiencia, tomando en cuenta que un motor eficiente es aquel que transforma prácticamente toda la energía eléctrica que consume en la mayor cantidad de energía mecánica útil en el eje del motor, por lo que se puede decir que un motor eficiente redundará en ahorros de energía y de dinero. Por consecuencia al emplear motores de mayor eficiencia se reducen las pérdidas y los costos de operación.

En el siguiente subtema se mostrará un cálculo en el cual se observará el ahorro de energía que traería un motor de mayor eficiencia con respecto a uno de eficiencia menor, esto es aplicable a motores de inducción y a motores síncronos.

6.6.1 AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON LA UTILIZACIÓN DE MOTORES DE MAYOR EFICIENCIA.

Para poder hacer esto más entendible, se propondrá un ejemplo, para esto ya se debió de haber obtenido anteriormente la eficiencia actual de un determinado motor en plena operación.

El ejemplo mostrado a continuación fue obtenido de una de las publicaciones del FIDE referente a "como ahorrar energía eléctrica".

Ejemplo 6.6A

Suponga que actualmente se tiene operando un motor, al cual se le obtuvo una eficiencia del 85.5% y se desea reemplazarlo por otro de una eficiencia del 91%, es decir, por otro más eficiente; tomando en cuenta también que el motor trabaja 15 horas diarias, 5 días a la semana, 50 semanas al año y que por consecuencia el motor que se desea reemplazar también deberá operar bajo estas condiciones, como dato adicional ambos motores son de 10 HP de potencia mecánica disponible en el eje de cada motor.

Solución:

Pues bien, la potencia ahorrada se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$PA \text{ (Kw)} = 0.746 \text{ (HP)} \left(\frac{100}{\eta_1} - \frac{100}{\eta_2} \right) \dots\dots\dots (6-6)$$

Donde:

PA = Potencia ahorrada en kilowatts.

0.746 = Factor de conversión de caballos de fuerza a kilowatts.

HP = Caballos de fuerza del motor.

η_1 = Eficiencia del motor de menor rendimiento.

η_2 = Eficiencia del motor de mayor rendimiento.

Otro término es el ahorro de energía eléctrica (AEE) en por ciento y que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$AEE = 1 - \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right) \times 100 \dots\dots\dots (6-7)$$

Donde:

AEE = Ahorro de energía eléctrica.

η_1 = Eficiencia del motor de menor rendimiento.

η_2 = Eficiencia del motor de mayor rendimiento.

Para empezar se obtendrá la cantidad de potencia ahorrada que se tendrá al reemplazar el motor menos eficiente por el motor de mayor eficiencia.

$$PA \text{ (Kw)} = 0.746 \text{ (HP)} \left(\frac{100}{\eta_1} - \frac{100}{\eta_2} \right) \dots\dots\dots (6-6)$$

$$PA \text{ (Kw)} = 0.746 \text{ (10 HP)} \left(\frac{100}{85.5\%} - \frac{100}{91\%} \right) = 0.527344001 \text{ kW}$$

PA (Kw) = 0.527344001 Kw. Es la potencia que se ahorraría al instalar el motor más eficiente.

Sabiendo que ambos motores trabajan 15 horas diarias, 5 días a la semana y 50 semanas por año, esto equivale a 3750 horas al año. Por lo que la energía ahorrada anualmente sería de:

$$\text{Energía Ahorrada Al Año} = (PA) \cdot (\text{Horas de operación al año}) \dots\dots\dots (6-8)$$

$$\text{Energía Ahorrada Al Año} = (0.527344001 \text{ Kw}) (3750 \text{ horas / año}) = 1977.540004 \text{ Kwh}$$

Energía Ahorrada Al Año = 1977.540004 Kwh Es la energía que se ahorraría al año al instalar el motor de mayor eficiencia.

Ahora al multiplicar esta cantidad de kilowatts-hora (Kwh) por el costo de la tarifa que corresponda al servicio que se tenga, se obtendrá el ahorro monetario por año al utilizar el motor de mayor eficiencia.

Suponiendo que el precio por un kilowatt-hora sea de \$0.1397, entonces el ahorro económico de utilizar el motor más eficiente será de:

$$\text{Ahorro Económico Al Año} = (\text{Energía Ahorrada Al Año}) (\text{Precio de 1Kwh}) \dots\dots (6-9)$$

$$\text{Ahorro Económico Al Año} = (1977.540004 \text{ Kwh}) (\$0.1397) = \$276.2623386$$

Ahorro Económico Al Año = \$276.2623386 Es la cantidad de dinero que se ahorraría al año por utilizar el motor más eficiente.

Este resultado obtenido es tomando únicamente el cargo por consumo de energía (Kwh) que se hace al recibo de consumo de energía eléctrica. Por otro lado se sabe que en dicho recibo se hace también un cargo por demanda máxima (Kw), por lo que para saber cual es la cantidad de dinero real que se ahorraría será necesario hacer lo siguiente:

Suponiendo que el precio por un kilowatt de demanda máxima sea de \$23.778, entonces el ahorro real económico que se obtendría al utilizar el motor más eficiente será de:

Importe del ahorro de energía eléctrica por año (IAEE).

$$\text{IAEE} = (\text{Ahorro económico al año}) + \left[(PA) (\text{Precio de 1Kw por demanda máxima}) (12 \text{ meses al año}) \right]$$

$$\text{IAEE} = (\$276.2623386) + \left[(0.527344001 \text{ Kw}) (\$23.778) (12) \right] = \$426.7325665$$

IAEE = \$ 426.7325665 Es la cantidad de dinero real que se ahorraría al año por utilizar el motor más eficiente.

Ahora si suponemos que el motor de mayor eficiencia que se desea reemplazar tiene un costo de \$1493.5 , y sabiendo que este dará un importe de ahorro de energía eléctrica de \$ 426.7325665, entonces la recuperación de la inversión hecha por año al adquirir el motor más eficiente será de:

$$\text{Recuperación de la inversión} = \frac{\text{Costo del motor más eficiente}}{\text{IAEE}} \dots\dots\dots (6-11)$$

$$\text{Recuperación de la inversión} = \frac{\$ 1493.5}{\$426.7325665} = 3.499 \text{ Años}$$

El resultado anterior quiere decir que se tardaran 3.499 años en recuperar la inversión hecha al adquirir el motor más eficiente, gracias al ahorro económico que se obtendría al poner en operación a dicho motor.

Por último para determinar el ahorro de energía eléctrica (AEE) que se obtendría al utilizar el motor más eficiente, se usará la ecuación (6-7).

$$AEE = 1 - \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right) = 1 - \left(\frac{85.5\%}{91\%} \right) \times 100 = 6.04395604\%$$

Es decir que con el motor más eficiente se obtendrá un ahorro de energía eléctrica del 6.04395604% con respecto al que se desea reemplazar.

Debido a los incrementos que han experimentado el costo de los energéticos a nivel mundial, han orientado a los fabricantes de motores a lograr principalmente motores de alta eficiencia, con rendimientos de hasta un 96% y cuyo costo adicional sobre los convencionales se puede pagar rápidamente con los ahorros que se tienen en el consumo. Vale la pena considerar su utilización.

Para tomar una decisión se debe tomar en cuenta que un motor bien diseñado puede tener un precio de compra elevado, pero generalmente tendrá una mayor eficiencia que el de los motores de procedencia ignorada. Además de que es necesario erradicar el hábito del rebobinado de motores quemados ya que en algunas ocasiones, el gasto de energía extra analizada de un motor mal embobinado se equipara a la inversión inicial de la adquisición de un motor de alta eficiencia o de mayor eficiencia.

6.6.2 CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

Un bajo factor de potencia significa energía desperdiciada y afecta a la adecuada utilización del sistema eléctrico. Por esta razón en las tarifas eléctricas, se ofrece una reducción en la factura de electricidad en instalaciones con un factor de potencia mayor al 90% y también se imponen cuotas a manera de multas si el factor de potencia es menor que la cifra señalada. En las expresiones (6-12) y (6-13) se muestran las expresiones para calcular los porcentajes de bonificación y recargo, que por factor de potencia, se aplican a los cargos por consumo y demanda máxima de energía y que no excederán los porcentajes máximos que ahí se indican. En las fórmulas el factor de potencia está expresado en por ciento.

$$\text{Bonificación} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{\text{F.P.}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (6-12) \quad \text{\% Máximo Aplicable} \quad 2.5$$

$$\text{Recargo} = \frac{3}{5} \left(\frac{90}{\text{F.P.}} - 1 \right) \times 100 \dots\dots\dots (6-13) \quad 120$$

Enseguida se presentaran unas tablas en las que se pueden observar el porcentaje de penalidad o de bonificación a diferentes valores del factor de potencia.

TABLA DE BONIFICACIÓN POR FACTOR DE POTENCIA SUPERIOR AL 90%

FACTOR DE POTENCIA ACTUAL	% DE BONIFICACIÓN
91	0.3
92	0.5
93	0.8
94	1.1
95	1.3
96	1.6
97	1.8
98	2.0
99	2.3
100	2.5

TABLA DE PENALIDAD POR FACTOR DE POTENCIA INFERIOR AL 90%

FACTOR DE POTENCIA ACTUAL	% DE PENALIDAD
89	0.7
88	1.4
87	2.1
86	2.8
85	3.5
84	4.3
83	5.1
82	5.9
81	6.6
80	7.5
79	8.4
78	9.2
77	10.1
76	11.1
75	12.0
74	13.0
73	14.0
72	15.0
71	16.1
70	17.1
69	18.3
68	19.4
67	20.6
66	21.8
.	.
.	.
.	.
30	120

De acuerdo con la tabla anterior, un usuario que opera con un factor de potencia del 80% (valor que se encuentra con frecuencia en instalaciones industriales), tiene que pagar un recargo del 7.5% sobre el monto de su cuenta de electricidad. Este recargo puede alcanzar la cantidad de 120% en el caso extremo de tener un factor de potencia del 30%.

Es importante recalcar que un bajo factor de potencia, provoca un incremento de intensidad de corriente en la línea proveniente de los generadores, esto origina pérdidas por efecto Joule (RI^2), además de fuertes caídas de tensión, obligando a los distribuidores de energía eléctrica a aumentar la potencia de sus plantas generadoras, transformadores y líneas. Por estas razones, se autoriza al distribuidor de energía a cobrar una penalidad a su usuario, de acuerdo con el criterio de la tarifa en vigor.

Por ejemplo, en México, de acuerdo a la tarifa y al Diario Oficial, del día 13 de Noviembre de 1991, cuando el factor de potencia tenga un valor inferior al 90% aparecerá en el recibo correspondiente un valor en el renglón que dice *cargo por bajo factor de potencia (F.P)*.

Al corregir el factor de potencia de cada uno de los motores, por consecuencia se mejorará también el factor de potencia de toda la instalación eléctrica a la cual están conectados, y es aquí en donde caen los recargos o las bonificaciones por bajo o alto factor de potencia respectivamente. Por lo que se convierte en un punto muy importante el mejoramiento del factor de potencia general de todo el circuito eléctrico, debido a esto se presentarán a continuación aspectos importantes que serán útiles para poder corregir dicho factor de potencia.

Los siguientes aspectos fueron obtenidos de una publicación realizada por el FIDE que tiene por nombre "Aspectos Básicos del Factor de Potencia Orientados al Ahorro de Energía Eléctrica".

6.6.2.1 MÉTODOS DE CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

El primer paso para corregir el bajo factor de potencia en una instalación es el de prevenirlo, para lo cual, se debe evitar en lo posible la demanda excesiva de potencia reactiva (Q). Por ejemplo, adecuando la capacidad de los motores y transformadores a sus cargas reales. Sin embargo, con frecuencia esto no es suficiente y se deben emplear equipos auxiliares para corregirlo. Estos equipos de naturaleza capacitiva, toman una corriente en adelanto con respecto al voltaje, en el caso ideal a 90° , que se opone a la corriente inductiva de las cargas de la instalación, como se observa gráficamente en la figura 6.3, donde I_L se ve disminuida por la corriente capacitiva I_C con la consiguiente reducción del ángulo θ y de la corriente total I .

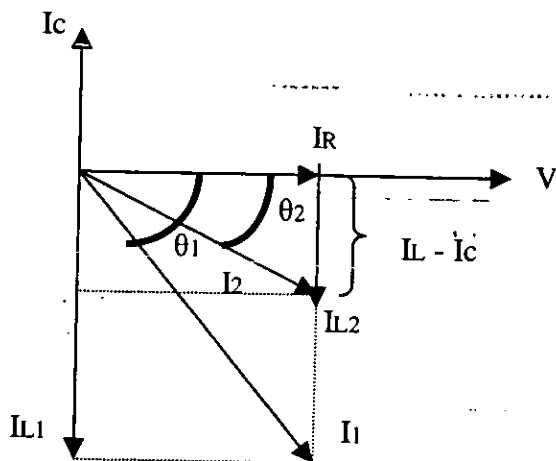


Figura 6.3. Efecto de una corriente capacitiva sobre una corriente inductiva. Figura obtenida de una publicación del FIDE llamada "Aspectos Básicos del Factor de Potencia Orientados al Ahorro de Energía Eléctrica".

Otra manera de mostrar el efecto descrito es a través de las relaciones de potencia (figura 6.4) donde la potencia reactiva capacitiva $Kvarc$, reduce el requerimiento de potencia reactiva inductiva $KVarL$, disminuyendo tanto el ángulo θ como la potencia aparente KVA .

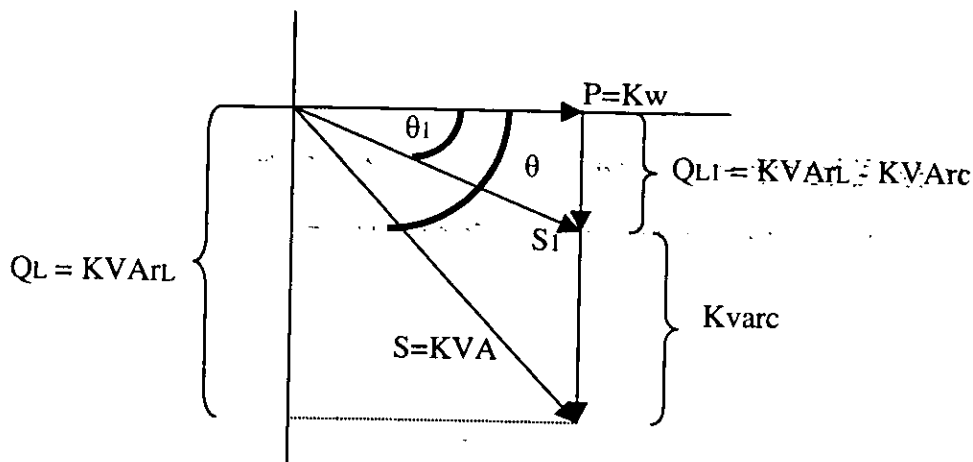


Figura 6.4. Efecto de la potencia reactiva capacitiva sobre la potencia de una carga predominantemente inductiva. Figura obtenida de una publicación del FIDE llamada "Aspectos Básicos del Factor de Potencia Orientados al Ahorro de Energía Eléctrica".

Es conveniente hacer notar que por ningún motivo se debe sobre compensar la carga, ya que un exceso de $Kvarc$, es tan perjudicial como la falta de ellos. En la práctica, principalmente por razones económicas, los $KVarL$ no se cancelan totalmente, sino se les mantiene dentro de valores aceptables.

Los equipos que se utilizan para compensar la potencia reactiva y así corregir el factor de potencia son básicamente: motores síncronos, capacitores síncronos y capacitores de potencia.

a) MOTORES SÍNCRONOS.

Estos motores pueden proporcionar un trabajo mecánico y al mismo tiempo comportarse como una carga capacitiva, en caso de operar sobreexcitado. Aunque pueden considerarse como una ayuda para mejorar el factor de potencia, no constituye una forma de compensación fácilmente controlable. Se llegan a justificar cuando se requieren motores nuevos y de tamaño considerable con respecto a la instalación.

b) CAPACITORES SÍNCRONOS.

Son motores diseñados exclusivamente para corregir el factor de potencia. Generalmente, son de gran tamaño y capaces de proporcionar potencia reactiva, tanto de índole capacitivo como inductivo. Sin embargo, son equipos cuyo empleo implica una fuerte inversión inicial y un mantenimiento costoso, por lo que raramente son utilizados en plantas industriales.

c) CAPACITORES DE POTENCIA.

Debido a su bajo costo, fácil instalación, pérdidas insignificantes, mantenimiento casi nulo y la gran cantidad de combinaciones en que se pueden ensamblar, hacen de los capacitores, la forma más práctica y económica para mejorar el factor de potencia.

Además, la inversión inicial en capacitores es rápidamente recuperable, tan sólo por los ahorros que se tendrían, al evitar pagar los recargos que por bajo factor de potencia, se hacen en la cuenta de electricidad.

Los capacitores se agrupan en unidades o bancos, fijos o desconectables y se instalan en paralelo con las cargas inductivas, para compensar la potencia reactiva requerida por ésta. Comercialmente se encuentran en diversos rangos; por ejemplo, en baja tensión en 240 y 480V, en unidades de 5 a 120kvar; y en alta tensión de 2.4 a 20 KV, en unidades de 30 a 360kvar y aún mayores.

Cuando la potencia reactiva de una instalación presenta variaciones importantes, la corrección del factor de potencia frecuentemente involucra bancos de capacitores automáticos con unidades desconectables, que permiten adecuar de manera permanente, la potencia de los bancos a las necesidades cambiantes de la carga.

6.6.2.2 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA INDUSTRIAL.

El factor de potencia se puede evaluar en forma instantánea o en promedio para un intervalo. En conocimiento periódico de valores instantáneos, sobre todo en condiciones de demanda máxima, permite conocer su comportamiento y ofrece una perspectiva para controlarlo. En instalaciones donde la carga no este sujeta a grandes variaciones durante las horas de trabajo, un factor de potencia promedio puede ser considerado.

Existen varios métodos para definir y medir el factor de potencia, entre los cuales se tienen los que se mencionan a continuación:

- Con un wattímetro, un voltímetro y un amperímetro. Las lecturas de potencia activa (Kw), voltaje (V) y corriente (A) de esos instrumentos, dan el factor de potencia al sustituirse en las siguientes expresiones: la primera cuando la instalación es monofásica y la segunda cuando es trifásica.

$$F.P = \frac{Kw}{(V)(A)}$$

$$F.P = \frac{Kw}{\sqrt{3} (V)(A)}$$

- Con un indicador de factor de potencia y un wattímetro. En este caso, el indicador de factor de potencia (factorímetro) proporciona en forma directa el valor de $\cos \theta$. Adicionalmente la medición de la potencia real o activa (P), servirá para estimar la potencia capacitiva reactiva necesaria para corregirlo.
- Con un wathorímetro y varhorímetro. El factor de potencia promedio durante un período, se puede calcular a partir de las lecturas de los medidores de energía real (Kwh) y reactiva (KVArh) mediante la siguiente fórmula:

$$F.P = \frac{KWh}{\sqrt{(Kwh)^2 + (KVArh)^2}} \dots\dots\dots (6-14)$$

En este caso la potencia real promedio (Kw), se determina dividiendo los Kwh medidos entre el número de horas que abarca el período considerado.

Precisamente el factor de potencia promedio durante el ciclo de facturación, es empleado para la bonificación o recargo que por este concepto, hacen las compañías eléctricas en la cuenta de electricidad y es el valor que aparece en el recibo.

6.6.2.3 CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA CAPACITIVA QUE SE NECESITA PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA POR MEDIO DE LOS CAPACITORES DE POTENCIA.

En una instalación cuya carga demanda una potencia real de magnitud Kw, con un factor de potencia $\cos \theta_1$, la potencia reactiva de los capacitores para corregirlo a un nuevo valor de $\cos \theta_2$, se puede calcular aplicando la siguiente expresión, derivada de las relaciones del triángulo rectángulo de potencia, que es representativo de las potencias aparente real y reactiva.

$$Kvarc = Kw (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

Con objeto de simplificar los cálculos, los fabricantes de capacitores han preparado material auxiliar, como el que se tiene en la siguiente tabla de corrección de factores de potencia, en la que se puede encontrar rápidamente el valor del multiplicador $(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$. El factor de potencia que se desea corregir, esta mostrado como ordenada y el factor de potencia deseado como la abscisa. La magnitud del multiplicador es leído en la intersección.

Por ejemplo, si se tiene un factor de potencia actual de 85% o 0.85 y se desea mejorarlo a 0.9 o del 90%, ubique en la tabla su factor de potencia original (0.85) y su factor de potencia deseado (0.9), en el cruce de las columnas se encontrará el multiplicador 0.135. Una vez obtenido el multiplicador se aplica la siguiente fórmula.

$$K_{\text{varc}} = (\text{Multiplicador}) (\text{Potencia real en Kw}) \dots\dots\dots (6-15)$$

Donde:

K_{varc} = Es la potencia reactiva capacitiva que se necesita para mejorar el factor de potencia.

Multiplicador = Es el valor que se encuentra en el cruce del factor de potencia original y el factor de potencia deseado.

Potencia Real = Es la potencia real o activa en Kw que consume una determinada planta industrial.

Suponiendo que la planta industrial en la cual se quiere mejorar el factor de potencia, tiene un consumo de 100 Kw. Esto nos dará los K_{varc} necesarios para mejorar el factor de potencia gracias a la expresión (6-15).

$$K_{\text{varc}} = (0.135) (100 \text{ Kw}) = 13.5 \text{ Kvarc}$$

Esta energía reactiva capacitiva, nos indica cuantos capacitores son necesarios para elevar el bajo factor de potencia. Como los capacitores se venden en múltiplos de 5 o 6, en este caso serán necesarios tres capacitores de 5 Kvarc trifásicos para tener 15 Kvarc y así llegar al factor de potencia deseado; otra operación es adquirir un solo capacitor de 15 Kvarc, el cual este fabricado de tal manera que contenga a los tres capacitores de 5 Kvarc.

Para asegurar que, bajo cualquier condición de carga se tenga como mínimo un factor de potencia de 90%, se recomienda calcular el multiplicador de potencia ligeramente mayor a este valor.

Ahora se presentara un ejemplo, en el que se podrá observar los ahorros de energía y económicos que trae consigo el mejoramiento del factor de potencia.

Ejemplo 6.6B

Considérese una empresa que utiliza el servicio de energía eléctrica en media tensión, y que por lo tanto la tarifa aplicada a dicha empresa es la "OM" (que se factura cada mes). Esta empresa cuanta con los siguientes datos:

- Demanda máxima = 82 Kw
- Energía consumida = 34400 Kwh
- Factor de potencia = 0.85 y se desea mejorarlo a 0.92
- Precio por 1 Kwh = \$0.1397

- Precio por 1 Kw de demanda máxima = \$ 23.778
- Horas de operación de la empresa en un mes = 419.5121951 horas al mes.

Solución:

Procedimiento para determinar el costo a pagar:

Cargo por demanda máxima medida = (costo por Kw demandado) (demanda máxima medida)(6-17)

$$\text{Cargo por demanda máxima medida} = (\$23.778) (82 \text{ Kw}) = \underline{\$1949.796}$$

Cargo por consumo = (costo por Kwh) (consumo registrado en Kwh) (6-18)

$$\text{Cargo por consumo} = (\$0.1397) (34400 \text{ Kwh}) = \underline{\$ 4805.68}$$

$$\text{Cargo por medición en baja tensión} = \left(\begin{array}{l} \text{cargo por demanda} \\ \text{Máxima medida.} \end{array} + \begin{array}{l} \text{cargo por} \\ \text{consumo} \end{array} \right) (0.02) \dots\dots\dots (6-19)$$

$$\text{Cargo por medición en baja tensión} = (\$1949.796 + \$4805.68) (0.02) = \underline{\$135.10952}$$

Recargo por bajo factor de potencia:

$$\text{Recargo} = \frac{3}{5} \left(\frac{90}{\text{F.P}} - 1 \right) \times 100 \dots\dots\dots (6-13)$$

$$\text{Recargo} = \frac{3}{5} \left(\frac{90}{85\%} - 1 \right) = 0.0352941174$$

$$\text{Recargo} = \left(\begin{array}{l} \text{Cargo por demanda} \\ \text{máxima medida.} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Cargo por} \\ \text{consumo.} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Cargo por bajo} \\ \text{Factor de Potencia.} \end{array} \right) \dots\dots (6-20)$$

$$\text{Recargo} = (\$1949.796 + \$4805.68) (0.0352941174) = \underline{\$238.428563}$$

$$\text{Facturación Total} = \left(\begin{array}{l} \text{Cargo por} \\ \text{demanda} \\ \text{Máxima} \\ \text{Medida.} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Cargo por} \\ \text{consumo} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Cargo por} \\ \text{medición} \\ \text{en baja tensión.} \end{array} + \text{Recargo.} \right) \dots (6-21)$$

$$\text{Facturación total} = (\$1949.796 + \$4805.68 + \$135.10952 + \$238.400748) = \underline{\underline{\$7129.014}}$$

Este valor es sin agregar el I.V.A., y es la cantidad que se deberá de pagar por tener un factor de potencia de 0.85.

Ahora como el factor de potencia se desea mejorar de 0.85 a 0.92, se calculará el valor de Kvarc, con el cual será posible saber cuantos capacitores serán necesarios para elevar el factor de potencia.

$$\text{Kvarc} = (\text{Multiplicador}) (\text{Potencia real en Kw}) \dots (6-15)$$

$$\text{Kvarc} = (0.193) (82 \text{ Kw}) = \underline{\underline{15.826 \text{ Kvarc}}}$$

Por lo que será necesario usar un capacitor de potencia de 20 Kvar, o cuatro capacitores de 5 Kvar cada uno.

Para continuar, será necesario saber cuanto potencia reactiva (Q) consume la empresa al operar con un factor de potencia de 0.85.

$$\text{F.P} = \frac{\text{P}}{\text{S}} \dots (5-7)$$

$$\text{S} = \sqrt{(\text{P})^2 + (\text{Q})^2} \dots (5-6)$$

Sustituyendo (5-6) en (5-7) y despejándola de tal manera que se pueda obtener la potencia reactiva, dicha ecuación quedará como:

$$\text{Q} = \sqrt{\left(\frac{\text{P}}{\text{F.P}} \right)^2 - (\text{P})^2}$$

$$\text{Q} = \sqrt{\left(\frac{82 \text{ Kw}}{0.85} \right)^2 - (82 \text{ Kw})^2} = \underline{\underline{50.81903575 \text{ KVARL}}}$$

Se sabe que la potencia reactiva capacitiva (Kvarc) de los capacitores de potencia reduce el requerimiento de la potencia reactiva inductiva (Q). Por lo que se obtendrá la nueva potencia reactiva inductiva (Q1) que la empresa consumirá al operar con un factor de potencia de 0.92.

$$Q_1 = Q - K_{varc} \dots\dots\dots (6-22)$$

$$Q_1 = 50.81903575 \text{ KVA}_{rL} - 15.826 \text{ Kvarc} = \underline{\underline{34.99303575 \text{ KVA}_{rL}}}$$

Utilizando la expresión (5-4) podemos saber cuanta potencia real se consume a un factor de potencia de 0.92.

$$Q_1 = P_1 \tan \theta \dots\dots\dots (5-4)$$

Despejando a P1:

$$P_1 = \frac{Q_1}{\tan \theta}$$

Como el F.P = cos θ, el ángulo "θ" será igual a: $\theta = \cos^{-1} (\text{F.P})$

$$P_1 = \frac{Q_1}{\tan [\cos^{-1} (\text{F.P})]} = \frac{34.99303575 \text{ KVA}_{rL}}{\tan [\cos^{-1} (0.92)]}$$

$$\underline{\underline{P_1 = 81.9999 \text{ Kw} \approx 82 \text{ Kw}}}$$

Con el resultado obtenido de P1 se puede decir que el consumo de potencia real (demanda máxima) se mantiene constante, al mejorar el factor de potencia.

Debido al resultado anterior, la energía consumida será de:

$$\text{Energía Consumida} = (81.9999 \text{ Kw}) (419.5121951 \text{ horas al mes}) = 34399.95805 \text{ Kwh}$$

$$\underline{\underline{34399.95805 \text{ Kwh} \approx 34400 \text{ Kwh}}}$$

Por lo que también se consume la misma cantidad de energía.

Ahora se determinará el costo a pagar al haber mejorado el factor de potencia.

Debido a que la demanda máxima y la energía consumida son las mismas:

- El cargo por demanda máxima es el mismo = \$1949.796
- El cargo por consumo también es el mismo = \$4805.68
- El cargo por medición en baja tensión = \$135.10952

Bonificación por factor de potencia superior al 90%

$$\text{Bonificación} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{\text{F.P.}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (6-12)$$

$$\text{Bonificación} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{92\%} \right) = \underline{0.005434782}$$

$$\text{Bonificación} = (\$1949.796 + \$4805.68) (0.005434782) = \underline{\$36.71453937}$$

$$\text{Facturación total} = (\$1949.796 + \$4805.68 + \$135.10952 + \$36.71453937)$$

$$\text{Facturación total} = \underline{\$6927.300059}$$

Este valor es sin agregar el I.V.A.

En este ejemplo se pudo observar que al tener un factor e potencia de 0.85 se tiene por pagar una cantidad de \$7129.014 y que al mejorar dicho factor de potencia a 0.92 se reduce dicha cantidad a \$6927.300059, dando como consecuencia un ahorro económico en la facturación al mes de \$201.713941.

Otro aspecto importante de este ejemplo 6.6B, es que al mejorar el factor de potencia sólo se logrará reducir la cantidad a pagar gracias a la bonificación por el buen factor de potencia, ya que el consumo de "demanda máxima" y la "energía consumida" se mantuvieron constantes. Por lo que en sí un ahorro de energía eléctrica no se pudo lograr, sin embargo es posible reducir la "demanda máxima" y la "energía consumida" al mejorar la eficiencia de cada uno de los motores que se encuentran operando, como se pudo observar en el ejemplo 6.6A de este mismo aparato, en el cual se pudo obtener un ahorro de energía eléctrica al sustituir motores poco eficientes por motores más eficientes, trayendo como consecuencia también un ahorro económico. La demanda máxima también es posible reducirla, pero esto se explicará más adelante en el último apartado de este capítulo.

Por último se presentará un ejemplo en el que se combinan los programas de cálculo hechos en los ejemplos 6.6A y 6.6B, con el fin de poder mostrar los ahorros tanto de energía eléctrica como económicos, que se obtendrían al sustituir motores poco eficientes por motores más eficientes o en otro caso al mejorar la eficiencia a la que operan los motores, además de corregir el factor de potencia del circuito eléctrico al cual están conectados los motores.

Ejemplo 6.6C

Considérese que en una determinada empresa, se encuentran tres motores de inducción operando, de los cuales el primero (motor "A") es un motor ya viejo; el segundo (motor "B") se encuentra dañado de sus devanados, debido a un sobrecalentamiento y el tercero (motor "C") es de reciente adquisición, pero no se tiene operando adecuadamente. Por otra parte el factor de potencia que se tiene en el circuito eléctrico de la empresa es de 0.85; así que debido a todo lo anterior, el dueño de dicha empresa requiere de una mejora en el consumo de energía eléctrica, con el fin de poder tener una reducción en el costo a pagar por dicho consumo, es decir, pagar menos debido a la reducción del consumo de la energía eléctrica.

Pues bien, al aplicar una metodología de diagnóstico energético en esta empresa, para poder ahorrar energía eléctrica en los motores de inducción, se obtuvieron los siguientes datos:

Motor "A"

Es un motor de inducción de eficiencia estándar y de tipo de enclaustramiento abierto.

- De 4 polos.
- De 60 Hz.
- Velocidad síncrona de 1800 rpm.
- 50 HP de potencia mecánica de salida.
- Actualmente opera con una eficiencia del 89.5% a plena carga.
- Horas de operación al año = 7940 horas al año.

Solución:

Es un motor viejo que se recomienda cambiarlo por uno nuevo de las mismas características, de preferencia por un motor de inducción de alta eficiencia del 92.4% a plena carga, y cuyo costo es de \$7467.5.

Motor "B"

Es un motor de inducción de eficiencia estándar y de tipo de enclaustramiento abierto.

- De 2 polos.
- De 60 Hz.
- Velocidad síncrona de 3600 rpm.
- 20 HP de potencia mecánica de salida.
- Opera 5230 horas al año.
- No se pudo obtener su eficiencia debido a que se encontraba dañado, así que se tubo que tomar en cuenta su eficiencia-nominal a plena carga de la placa de datos, la cual era de 84%, es decir, la máxima eficiencia que se le podría obtener.

Solución:

Debido a que sus devanados sufrieron daños por un sobrecalentamiento, se recomienda adquirir un motor nuevo que mandarlo a rebobinar, por lo que la operación más correcta es sustituirlo por un motor de inducción de alta eficiencia de las mismas características, pero con una eficiencia a plena carga del 90.2% y cuyo costo es de \$2987.

Motor "C"

Es un motor de inducción de eficiencia estándar y de tipo de enclaustramiento abierto.

- De 6 polos.
- De 60 Hz.
- Velocidad síncrona de 1200 rpm.
- 75 HP de potencia mecánica de salida.
- Opera 8640 horas al año.
- Actualmente opera con una eficiencia del 86%.

Solución:

Este motor ha sido adquirido recientemente, por lo que es nuevo, sin embargo su utilización no es adecuada, ya que se encuentra operando con una carga reducida con respecto a la carga nominal que el motor puede accionar. Por lo que es conveniente aprovechar esos 75 Hp del motor, aumentando la carga que acciona el motor a dicho valor. Logrando de esta manera que el motor opere a su eficiencia nominal de plena carga del 90%.

Programa de cálculo:

Para empezar, se utilizará el mismo procedimiento usado en el ejemplo 6.6A para cada uno de los motores.

Para el motor "A"

Potencia que se ahorraría al instalar el motor de alta eficiencia.

$$P_A \text{ (Kw)} = 0.746 \text{ (HP)} \left(\frac{100}{\eta_1} - \frac{100}{\eta_2} \right) \dots\dots\dots (6-6)$$

$$P_A \text{ (Kw)} = 0.746 \text{ (50 HP)} \left(\frac{100}{89.5\%} - \frac{100}{92.4\%} \right) = \underline{1.308012286 \text{ kW}}$$

La energía que se ahorraría al año al instalar el motor de alta eficiencia:

$$\text{Energía Ahorrada Al Año} = (PA) (\text{Horas de operación al año}) \dots\dots\dots (6-8)$$

$$\text{Energía Ahorrada Al Año} = (1.308012286 \text{ Kw}) (7940 \text{ horas / año}) = \underline{10,385.61755 \text{ Kwh}}$$

La cantidad de dinero real que se ahorraría al año por utilizar el motor de alta eficiencia:

$$\text{IAEE} = (\text{Ahorro económico al año}) + \left[(PA) (\text{Precio de 1Kw por demanda máxima}) (12 \text{ meses al año}) \right]$$

$$\text{IAEE} = [(10,385.61755 \text{ Kwh}) (\$0.1397)] + [(1.308012286 \text{ Kw}) (\$23.778) (12)]$$

$$\underline{\text{IAEE} = \$1824.093765}$$

Para el motor "B"

Potencia que se ahorraría al instalar el motor de alta eficiencia.

$$PA (\text{Kw}) = 0.746 (20 \text{ HP}) \left(\frac{100}{84\%} - \frac{100}{90.2\%} \right) = \underline{1.220884806 \text{ kW}}$$

La energía que se ahorraría al año al instalar el motor de alta eficiencia:

$$\text{Energía Ahorrada Al Año} = (1.220884806 \text{ Kw}) (5230 \text{ horas / año}) = \underline{6385.227535 \text{ Kwh}}$$

La cantidad de dinero real que se ahorraría al año por utilizar el motor de alta eficiencia:

$$\text{IAEE} = [(6385.227535 \text{ Kwh}) (\$0.1397)] + [(1.220884806 \text{ Kw}) (\$23.778) (12)]$$

$$\underline{\text{IAEE} = \$1240.378674}$$

Para el motor "C"

Potencia que se ahorraría al mejorar la eficiencia del motor "C".

$$PA (\text{Kw}) = 0.746 (75 \text{ HP}) \left(\frac{100}{86\%} - \frac{100}{90\%} \right) = \underline{2.891472868 \text{ kW}}$$

La energía que se ahorraría al año al mejorar la eficiencia del motor "C":

$$\text{Energía Ahorrada Al Año} = (2.891472868 \text{ Kw}) (8640 \text{ horas / año}) = \underline{24.982.32558 \text{ Kwh}}$$

La cantidad de dinero real que se ahorraría al año al mejorar la eficiencia del motor "C":

$$\text{IAEE} = [(24,982.32558 \text{ Kwh}) (\$0.1397)] + [(2.891472868 \text{ Kw}) (\$23.778) (12)]$$

$$\underline{\text{IAEE} = \$4315.072186}$$

Para determinar la cantidad de dinero total que se ahorraría al año (por la utilización de dos motores de alta eficiencia, para el caso del motor "A" y "B"; y al mejorar la eficiencia del motor "C") será necesario hacer lo siguiente:

$$\text{IAEE} = \$1824.093765 + \$1240.378674 + \$4315.072186 = \underline{\$7379.544625}$$

La recuperación de la inversión hecha al adquirir los dos motores de alta eficiencia se tendrá en:

$$\text{Recuperación de la inversión} = \frac{\$7467.5 + \$2987}{\$7379.544625} = \underline{1.416686331 \text{ años}}$$

El resultado anterior, quiere decir que se tardarán 1.41 años en recuperar la inversión hecha al adquirir los motores de alta eficiencia, gracias al ahorro económico que se obtendría al poner en operación a ambos motores de alta eficiencia, además de mejorar la eficiencia de operación del motor "C".

Para saber el porcentaje de energía que se ahorraría al utilizar dos motores de alta eficiencia y al mejorar la eficiencia del motor "C", se hará lo siguiente:

$$\text{AEE} = 1 - \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right) \times 100 \dots\dots\dots (6-7)$$

$$\text{AEE}_T = \left(1 - \left(\frac{89.5\%}{92.4\%} \right) + 1 - \left(\frac{84\%}{90.2\%} \right) + 1 - \left(\frac{86\%}{90\%} \right) \right) \times 100$$

$$\text{AEE}_T = (0.031385281 + 0.068736141 + 0.044444444) \times 100 = \underline{14.45658664\%}$$

Por ultimo se añadirá el cargo por medición en baja tensión que se tendrá en un año, así como la bonificación que se obtendrá al mejorar el factor de potencia.

$$\text{Cargo por Medición En baja Tensión.} = \left(\begin{array}{l} \text{Cargo por} \\ \text{demanda} \\ \text{máxima} \\ \text{medida} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Cargo} \\ \text{por} \\ \text{consumo} \end{array} \right) (0.02) \dots\dots\dots (6-19)$$

$$\text{Cargo por medición En baja tensión.} = (\text{IAEE}) (0.02) = (\$7379.544625) (0.02) = \underline{\$147.5908925}$$

Bonificación por factor de potencia superior al 90% (es decir mejorarlo al 95%).

$$\text{Bonificación} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{\text{F.P}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (6-12)$$

$$\text{Bonificación} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{95\%} \right) = \underline{0.013157894}$$

$$\text{Bonificación} = (\text{IAEE}) (0.013157894) = (\$7379.544625) (0.013157894)$$

$$\text{Bonificación} = \underline{\$97.09926594}$$

Ahorro económico anual que se obtendría en la facturación

$$(\text{IAEE}) + [(\text{Cargo por medición en baja tensión}) (12)] + [(\text{bonificación}) (12 \text{ meses al año})]$$

$$\$7379.544625 + [(\$147.5908925) (12)] + [(\$97.09926594) (12)] = \underline{\$10,315.82653}$$

El valor anterior es el ahorro económico anual que se obtendría al sustituir dos de los motores existentes por motores de alta eficiencia y al mejorar la eficiencia del motor "C", además de corregir el factor de potencia de 0.85 a 0.95.

TABLA DE MULTIPLICADORES PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA.

FACTOR DE POTENCIA ORIGINAL Cos θ_1	FACTOR DE POTENCIA QUE SE DESEA $\cos \theta_2$										
	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.50	1.276	1.276	1.306	1.336	1.369	1.403	1.440	1.481	1.529	1.589	1.732
0.51	1.202	1.231	1.260	1.291	1.323	1.357	1.394	1.435	1.483	1.544	1.686
0.52	1.187	1.187	1.216	1.249	1.279	1.314	1.351	1.392	1.439	1.500	1.642
0.53	1.15	1.144	1.173	1.204	1.237	1.271	1.308	1.349	1.396	1.457	1.599
0.54	1.103	1.103	1.132	1.163	1.195	1.230	1.267	1.308	1.355	1.416	1.558
0.55	1.034	1.062	1.092	1.123	1.155	1.189	1.226	1.267	1.315	1.357	1.518
0.56	1.024	1.023	1.053	1.084	1.116	1.150	1.187	1.228	1.276	1.337	1.479
0.57	0.957	0.985	1.015	1.046	1.078	1.112	1.149	1.190	1.238	1.298	1.441
0.58	0.950	0.949	0.978	1.010	1.041	1.075	1.112	1.154	1.201	1.262	1.404
0.59	0.884	0.912	0.942	0.973	1.005	1.039	1.076	1.117	1.165	1.225	1.368
0.60	0.887	0.877	0.907	0.938	0.970	1.004	1.041	1.082	1.130	1.190	1.333
0.61	0.814	0.843	0.873	0.903	0.936	0.970	1.007	1.048	1.095	1.156	1.299
0.62	0.810	0.809	0.839	0.870	0.902	0.937	0.973	1.014	1.062	1.122	1.265
0.63	0.748	0.777	0.806	0.837	0.869	0.904	0.941	0.982	1.029	1.090	1.232
0.64	0.745	0.745	0.774	0.805	0.837	0.872	0.908	0.950	0.997	1.058	1.200
0.65	0.684	0.713	0.743	0.773	0.806	0.840	0.877	0.918	0.966	1.026	1.169
0.66	0.654	0.682	0.712	0.743	0.775	0.809	0.846	0.887	0.935	0.996	1.138
0.67	0.623	0.652	0.682	0.712	0.745	0.779	0.816	0.857	0.904	0.965	1.108
0.68	0.594	0.622	0.652	0.683	0.715	0.749	0.786	0.827	0.875	0.935	1.078
0.69	0.564	0.593	0.623	0.653	0.686	0.720	0.757	0.798	0.845	0.906	1.048
0.70	0.536	0.564	0.594	0.625	0.657	0.691	0.728	0.769	0.817	0.877	1.020
0.71	0.507	0.536	0.565	0.596	0.628	0.663	0.700	0.741	0.788	0.849	0.991
0.72	0.479	0.508	0.534	0.568	0.600	0.635	0.672	0.713	0.760	0.821	0.936
0.73	0.451	0.480	0.510	0.541	0.573	0.607	0.644	0.685	0.733	0.793	0.936
0.74	0.424	0.453	0.483	0.513	0.546	0.580	0.617	0.658	0.705	0.766	0.909
0.75	0.397	0.426	0.455	0.486	0.518	0.553	0.590	0.631	0.678	0.739	0.881
0.76	0.371	0.399	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.604	0.652	0.712	0.855
0.77	0.344	0.373	0.402	0.433	0.465	0.499	0.536	0.578	0.625	0.686	0.828
0.78	0.318	0.346	0.376	0.407	0.439	0.473	0.510	0.551	0.599	0.659	0.802
0.79	0.290	0.320	0.350	0.380	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.633	0.776
0.80	0.266	0.294	0.324	0.354	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.607	0.750
0.81	0.239	0.268	0.297	0.328	0.361	0.395	0.432	0.473	0.520	0.581	0.723
0.82	0.213	0.242	0.272	0.302	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.555	0.698
0.83	0.187	0.216	0.246	0.276	0.309	0.343	0.380	0.421	0.468	0.529	0.627
0.84	0.161	0.190	0.220	0.250	0.238	0.317	0.354	0.394	0.443	0.503	0.646
0.85	0.135	0.164	0.193	0.224	0.256	0.291	0.328	0.369	0.416	0.477	0.619
0.86	0.119	0.137	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.342	0.390	0.450	0.593
0.87	0.082	0.111	0.140	0.171	0.203	0.238	0.275	0.316	0.363	0.424	0.566
0.88	0.055	0.840	0.113	0.144	0.176	0.211	0.248	0.289	0.336	0.397	0.539
0.89	0.027	0.056	0.086	0.117	0.149	0.183	0.220	0.261	0.309	0.369	0.512
0.90		0.028	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.233	0.281	0.342	0.484
0.91			0.029	0.060	0.092	0.126	0.163	0.204	0.252	0.313	0.455
0.92				0.030	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.283	0.426
0.93					0.032	0.066	0.103	0.144	0.192	0.252	0.395
0.94						0.034	0.071	0.112	0.160	0.220	0.363
0.95							0.037	0.078	0.125	0.186	0.328
0.96								0.041	0.088	0.149	0.291
0.97									0.047	0.108	0.250
0.98										0.060	0.203
0.99											0.142

En el caso en el que se deseen más cifras en el multiplicador, será suficiente realizar lo siguiente:

$$\text{Multiplicador} = \tan [(\cos^{-1} (\text{F.P original}))] - \tan [\cos^{-1} (\text{F.P deseado})] \dots\dots\dots (6-16)$$

Utilizando la formula (6-16) se obtienen los valores de los multiplicadores que forman parte de la tabla anterior. Por ejemplo, si se tiene un factor de potencia original de 0.71 y se desea mejorarlo a uno de 0.92, se tendrá un multiplicador de:

$$\text{Multiplicador} = \tan [(\cos^{-1} (0.71))] - \tan [\cos^{-1} (0.92)] = \underline{0.5658351299}$$

Obviamente este valor es el mismo que el que se encuentra en la tabla anterior entre el cruce de un factor de potencia original de 0.7 y del factor de potencia deseado de 0.92, sólo que con tres cifras después del punto decimal.

Por otro lado cuando la carga que se va a compensar no presenta variaciones importantes durante la jornada de trabajo, para calcular la potencia de los capacitores se puede considerar el factor de potencia promedio, por ejemplo durante el periodo de facturación y una potencia media de Kw, que se calcularía como se ha indicado con anterioridad.

Si la carga presenta cambios significativos puede emplearse tanto el factor de potencia, como la potencia en condiciones de demanda máxima. Se debe tener cuidado que los capacitores así seleccionados, cuando se esté en condiciones de mínima carga, no causen una sobre compensación, ya que ésta se traduciría en una elevación del voltaje, la cual podría alcanzar valores peligrosos. Si esto ocurriera, debe considerarse la utilización de bancos desconectables, con los que se puede mantener un factor de potencia dentro de un rango apropiado.

Otra alternativa para evitar una sobre compensación, consiste en instalar los capacitores junto con las cargas, de tal forma que sólo estén en servicio, cuando éstas se tengan conectadas. Esta solución, generalmente es más costosa, y se llega a justificar en equipos de potencia importante.

6.6.2.4 CONSIDERACIONES PARA LA LOCALIZACIÓN DE LOS CAPACITORES DE POTENCIA.

Como se ha indicado la forma más practica y económica para corregir el factor de potencia, es mediante capacitores de potencia, los cuales se pueden situar en distintos puntos de una instalación eléctrica, como se muestra en la figura 6.5. Sin embargo, mientras más cercas se conecten de la carga por compensar, mayor es el beneficio que reportan, ya que la potencia reactiva es confinada a segmentos pequeños de la instalación. El caso ideal sería el emplazar los capacitores junto a cada carga inductiva, pero debido al alto costo que esto representa, se opta por soluciones intermedias.

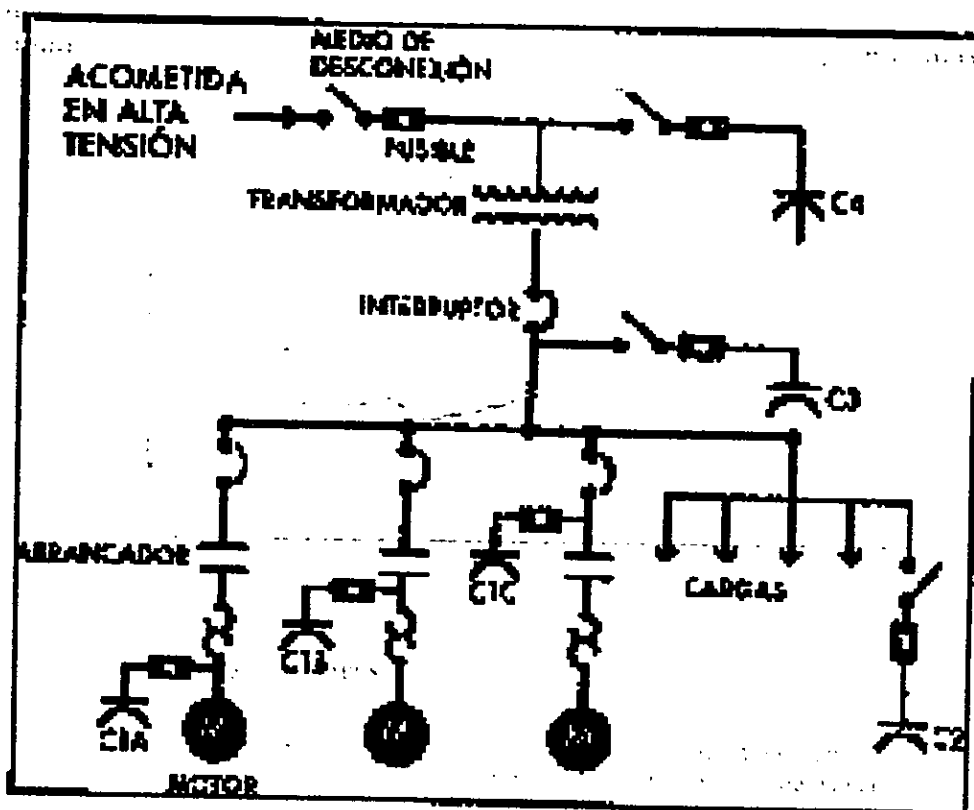


Figura 6.5. Diagrama de una instalación eléctrica en donde se muestra la localización de capacitores para corregir el factor de potencia. Esta figura fue obtenida de una de las publicaciones del FIDE llamada "Aspectos Básicos del Factor de Potencia Orientados al Ahorro de Energía Eléctrica".

Dependiendo de la localización de los capacitores, se distinguen cuatro tipos de compensación, los cuales se describen a continuación.

- 1) **Compensación individual.** Esta se justifica en el caso de cargas como motores de mediana y gran capacidad, de preferencia con ciclos significativos de trabajo, de tal forma que los capacitores tengan un alto factor de servicio. Los puntos C1A, C1B y C1C indican tres posibles emplazamientos en donde un interruptor extra para los capacitores no es necesario, ya que pueden operarse con el mismo interruptor de la carga que van a compensar.

Nótese que en los dos primeros, los capacitores son energizados a través de los arrancadores de los motores, por lo que sólo estarán en servicio cuando estos estén trabajando. Sin embargo, como los capacitores quedan conectados a las terminales de los motores cuando se interrumpe la alimentación, es importante que su potencia, no exceda de la necesaria para corregir el factor de potencia de los motores a la unidad, ya que de tener un factor de potencia adelantado, pueden ocurrir sobrevoltajes que dañen el aislamiento de los motores y anomalías en el par del motor que sometan sus partes mecánicas a esfuerzos excesivos.

Una regla practica es la de que los Kvar en capacitores no excedan en magnitud la de los KVA que toman los motores cuando trabajan sin carga. En la tabla A se da una orientación de la potencia de los capacitores para compensar individualmente motores trifásicos de inducción, en función de la potencia y de la velocidad síncrona. La potencia de los capacitores están en Kvar.

TABLA A

POTENCIA DEL MOTOR EN HP	VELOCIDAD DE SÍNCRONISMO DEL MOTOR (rpm)					
	3600	1800	1200	900	720	600
10	2.5	4	4	5	5	7.5
15	2.5	5	5	7.5	7.5	10
20	5	5	5	7.5	10	12.5
25	5	7.5	7.5	10	10	15
30	7.5	10	10	10	12.5	15
40	10	10	10	12.5	15	17.5
50	12.5	12.5	12.5	15	20	22.5
60	15	15	15	17.5	22.5	25
75	17.5	17.5	17.5	20	27.5	30
100	22.5	22.5	22.5	25	35	37.5
125	25	27.5	27.5	30	40	47.5
150	32.5	35	35	37.5	47.5	55
200	42.5	42.5	42.5	45	60	67.5

Los inconvenientes que se han mencionado se pueden prevenir instalando los capacitores en el punto C1C; si bien, los capacitores podrían quedar permanentemente conectados a la instalación, con el riesgo de una elevación de voltaje, cuando los motores no estén trabajando. Sin embargo hay casos en los que la conexión directa de los capacitores es en extremo peligroso y se opta por esta solución, tal como ocurre con motores reversibles, de varias velocidades, con ciclos frecuentes de arranque y paro y cuando se utilicen arrancadores con transmisión abierta o de estado sólido.

- 2) **Compensación en grupo.** Cuando se tienen varias cargas como motores y equipos de alumbrado de igual capacidad y ciclo de trabajo, en medida de lo posible, se pueden agrupar para compensar su potencia reactiva con un capacitor común emplazado en un punto de distribución como un tablero o un alimentador. La localización C2 ilustra este tipo de compensación, en donde las pérdidas sólo se reducen en el alimentador principal.
- 3) **Compensación central.** La potencia reactiva de un número de cargas de distintas capacidades y diferentes períodos de conexión, puede ser compensada con un banco único de capacitores generalmente instalado en la entrada de la instalación, con lo que se tiene una mejor utilización de la potencia de los capacitores y se mejora en general el nivel de voltaje, aunque no se reducen las pérdidas (I^2R), como ocurre en los casos anteriores. Los puntos C3 y C4, en baja tensión corresponden a este tipo de compensación.

Económicamente resulta más conveniente instalar capacitores en alta tensión, pero si se requiere aumentar la capacidad de la carga de los transformadores de distribución, los capacitores se deben instalar en el lado de baja, para disminuir la corriente reactiva que pasa por ellos. En este caso, se recomienda que la potencia de los capacitores no exceda el 10% de la capacidad del transformador, con los que se evitan problemas de resonancia y se reducen las pérdidas cuando trabaja en vacío.

- 2) **Compensación mixta.** En el caso de las instalaciones en las que se tienen grandes motores u otras cargas con un gran consumo de reactivos, en comparación con el resto de las cargas, suele ser conveniente combinar los arreglos anteriores. Por ejemplo, compensando individualmente las cargas de gran capacidad y para los restantes, instalar bancos de capacitores para compensación en grupo o central.

6.6.2.5 BANCO DE CAPACITORES AUTOMÁTICOS.

La demanda de potencia reactiva en las plantas industriales, suele presentar variaciones en el transcurso de la jornada, que dependen de los equipos instalados y de sus ciclos de trabajo. Cuando las variaciones son significativas, como en las instalaciones de hornos, equipos de laminación, sistemas de refrigeración, etc., mantener un perfil del factor de potencia, usualmente implica la utilización de banco de capacitores automáticos, diseñados para conectar y desconectar parte de su capacidad, de acuerdo con los requerimientos de la carga.

La operación automática se realiza a través de equipos de control, sensibles a magnitudes con el voltaje de línea, corriente, potencia reactiva demandada, etc., y para la conexión de los capacitores, se emplean equipos electromecánicos, como los contactores magnéticos, y más recientemente dispositivos electrónicos de estado sólido.

6.6.2.6 CONSIDERACIONES BÁSICAS.

Cada instalación eléctrica tiene condiciones particulares las cuales deben ser evaluadas cuidadosamente, con relación al factor de potencia y a las acciones necesarias para corregirlo. Al respecto, la asistencia de personal capacitado es recomendable, para tomar la decisión que reporte los mayores beneficios tanto técnicos como económicos. Sin embargo, el conocimiento de los conceptos básicos que se han tratado aquí y cuyos aspectos relevantes se resumen a continuación, pueden ser de ayuda en los trabajos que se realicen.

- a) El factor de potencia se puede definir como la relación que existe entre la potencia activa o real (Kw) y la potencia aparente (KVA) y es indicativo de la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica.
- b) El origen del bajo factor de potencia son las cargas de naturaleza inductiva, entre las que se destacan los motores de inducción, los cuales pueden agravarlos si no se operan en las condiciones para las que fueron diseñados.

- c) El bajo factor de potencia es causa de recargos en la cuenta de energía eléctrica, los cuales llegan a ser significativos cuando el factor de potencia es reducido.
- d) Un bajo factor de potencia limita la capacidad de los equipos con el riesgo de incurrir en sobrecargas peligrosas y pérdidas excesivas con un gasto grande de energía.
- e) El primer paso en la corrección del factor de potencia es el de prevenirlo mediante la selección u operación correcta de los equipos. Por ejemplo, adecuando la carga de los motores a su valor nominal.
- f) Los capacitores de potencia son la forma más practica y económica para mejorar el factor de potencia.
- g) El costo de los capacitores se recupera rápidamente, tan sólo por los ahorros que se tienen al evitar los recargos por bajo factor de potencia en la cuenta de electricidad.
- h) Entre más cercas se conecten los capacitores de la carga que van a compensar, mayores son los beneficios que se obtienen.
- i) Cuando las variaciones de la carga son significativas, es recomendable el empleo de bancos de capacitores automáticos.
- j) La corrección del factor de potencia puede ser un problema complejo. Recurrir a especialistas es conveniente, si no cuenta con los elementos necesarios para resolverlo.

Ventajas principales de corregir el factor de potencia.

- k) La compañía suministradora de energía proporciona una bonificación por tener un factor de potencia superior al 90%.
- l) Evitar recargos por bajo factor de potencia.
- m) Mayor vida útil de conductores.
- n) Mejor regulación en las líneas.
- o) Mayor capacidad de generación.

Además de corregir el bajo factor de potencia, un banco de capacitores proporciona algunas ventajas adicionales como:

- p) Se logra una mejor regulación de voltajes, lo cual alargará la vida útil de todos los equipos.
- q) Hay menor pérdida de energía por calentamiento (efecto Joule) en los conductores eléctricos de todas las instalaciones.

6.7 IMPLEMENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.

En este penúltimo paso de la metodología, se procederá a implementar las alternativas que son necesarias para obtener un ahorro tanto de energía como económico. Por lo que antes de hacer esto será necesario conocer el punto de vista de él o los dirigentes del lugar en el cual se está aplicando la metodología, mostrándoles previamente los ahorros que se podrían obtener al aplicar dichas alternativas en su empresa o planta industrial.

Una vez que los dirigentes de una determinada empresa hagan la evaluación económica pertinente, se sabrá si se cuenta o no con los recursos económicos necesarios para llevar a cabo la aplicación de las alternativas propuestas por la metodología. En caso de que no sea posible, entonces se preguntará si es posible la implementación de programas de energía eléctrica, con el fin de disminuir en un mínimo el consumo de la energía así como el pago a realizar por dicho consumo, si la respuesta a esta otra alternativa de ahorro también es negativa, entonces se dará por concluida la metodología, entregándoles un reporte de la metodología por si en un futuro se desean aplicar las alternativas de ahorro.

En el caso contrario, de que si se acepten las alternativas de ahorro, se procederá a elaborar también como un complemento programas de ahorro de energía eléctrica en los motores, como parte de un programa integral de ahorro de energía en dicha empresa (que es el tema del siguiente y último apartado de este capítulo) y con esto se dará por terminada la metodología de diagnóstico energético que aquí se propone.

6.8 IMPLEMENTACIÓN DE PROGRAMAS DE AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

En este último apartado de la metodología se propondrán como un complemento programas de ahorro de energía eléctrica en los motores, como parte de un programa integral de ahorro de energía.

A cualquier empresa, planta industrial u otro lugar determinado en el cual se aplique la metodología de diagnóstico energético, siempre se les debe de proponer al final un programa de ahorro de energía en motores, esto con el fin de poder organizar mejor la utilización de los motores. Para la realización de un determinado programa, se deben tomar en cuenta las características de operación que se tienen en el lugar en el cual se está llevando a cabo la metodología, por lo que un programa de ahorro de energía eléctrica no siempre es el mismo para un determinado lugar, ya que este se debe de adoptar a las circunstancias de operación que se tenga ahí, respecto a los motores.

Un programa de ahorro energía eléctrica suele componerse de puntos que ayuden no sólo a operar correctamente a los motores, si no proponer alternativas de uso en determinados horarios del día para dichos motores. Esto se puede lograr mediante la aplicación de cursos de capacitación a los operarios de los motores, con el fin de que se les obtenga el mayor aprovechamiento a los motores, además de que el personal sepa lo importante que es tratar de ahorrar energía eléctrica, por lo que una buena campaña de concientización funcionaría. Otro aspecto importante es el de extender los turnos de trabajo, repartiendo la operación de los motores y otros equipos en más horas de labores, fuera del período de punta.

Un programa de ahorro de energía ayuda sobre todo a reducir la energía consumida, así como también la reducción de la demanda máxima. Pero es importante poner atención en la demanda máxima que se consume, ya que por lo general los cargos por consumo de energía eléctrica pueden ser prácticamente iguales, pero por demanda máxima pueden reducirse de manera importante, trayendo como consecuencia un ahorro económico en la facturación de energía eléctrica.

La demanda máxima medida se determina mensualmente por medio de instrumentos de medición que indiquen la demanda medida en kilowatts durante cualquier intervalo de 15 minutos, en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el período de facturación. Por lo que entre más alta sea la demanda máxima en un momento dado por un período de 15 minutos, más alto será también su cargo en la facturación de electricidad; por otro lado entre más uniforme se pueda repartir el consumo de energía eléctrica en una industria o cualquier otro lugar, más bajo será el cargo por demanda máxima.

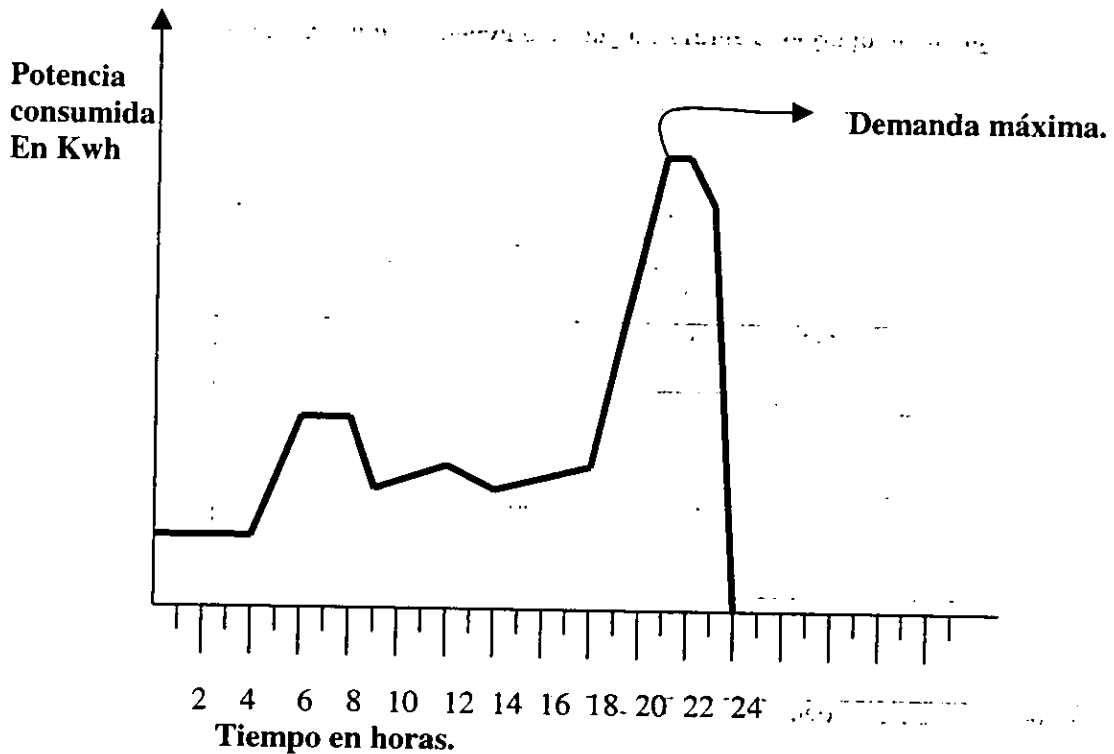


Figura 6.6. En esta figura se muestra la cantidad de Kwh que se consume en todo un día de labores en una determinada empresa, y en la cual se puede observar el punto en el cual se mide la demanda máxima.

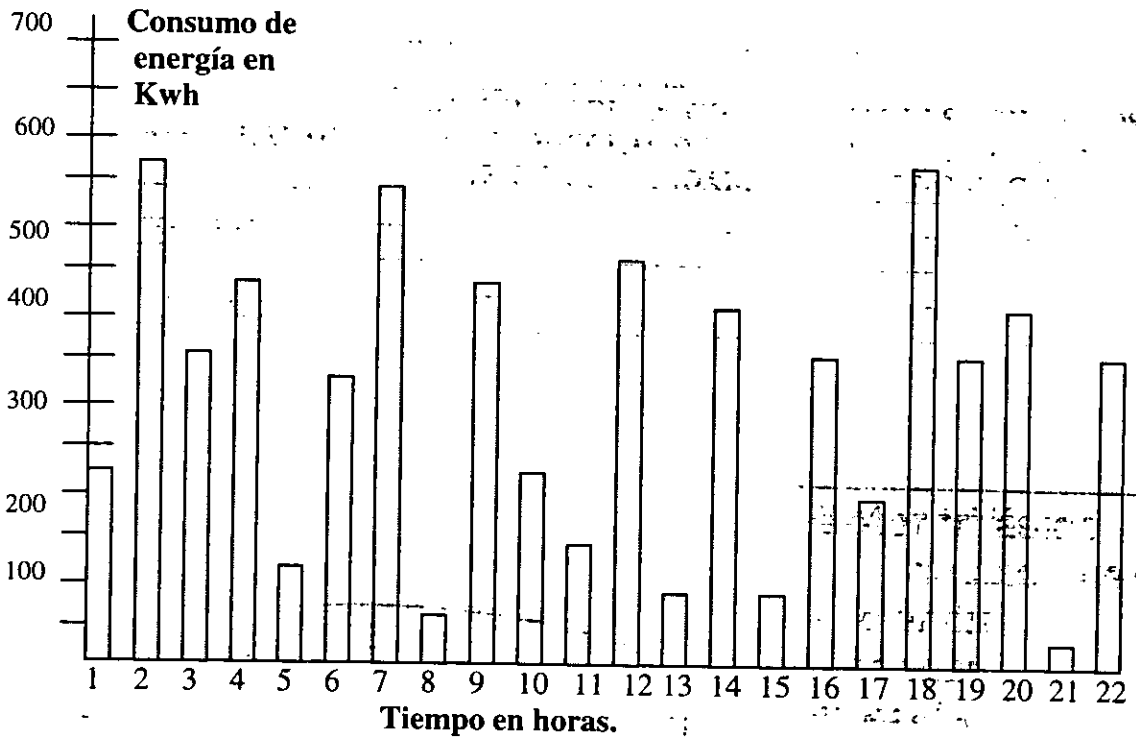
Debido a lo anterior un buen programas de ahorro de energía eléctrica debe tomar en cuenta el consumo por demanda máxima; ya que tomando en cuenta los elevados cargos por concepto de esta demanda vale la pena hace un esfuerzo por parte de los consumidores, con el objetivo de reducir la demanda máxima y tratar de utilizar la energía fuera de las horas de punta. Para esto será necesario analizar las curvas de demanda de una determinada empresa, con el fin de poder determinar cuando ocurre la demanda máxima, y una vez que se tenga esto se podrán adoptar medidas adecuadas para corregir este problema, algunas de las principales soluciones son las siguientes:

- a) Evitar la energización simultanea de equipos y cargas eléctricas cuyas corrientes de arranque sean altas.
- b) Establecer un programa de operación de equipos que permita la creación de turnos de trabajo, repartiendo la demanda máxima de los equipos en más horas de labor. En este caso el cargo por consumo de energía será prácticamente igual, pero su demanda máxima puede reducirse incluso a la mitad.

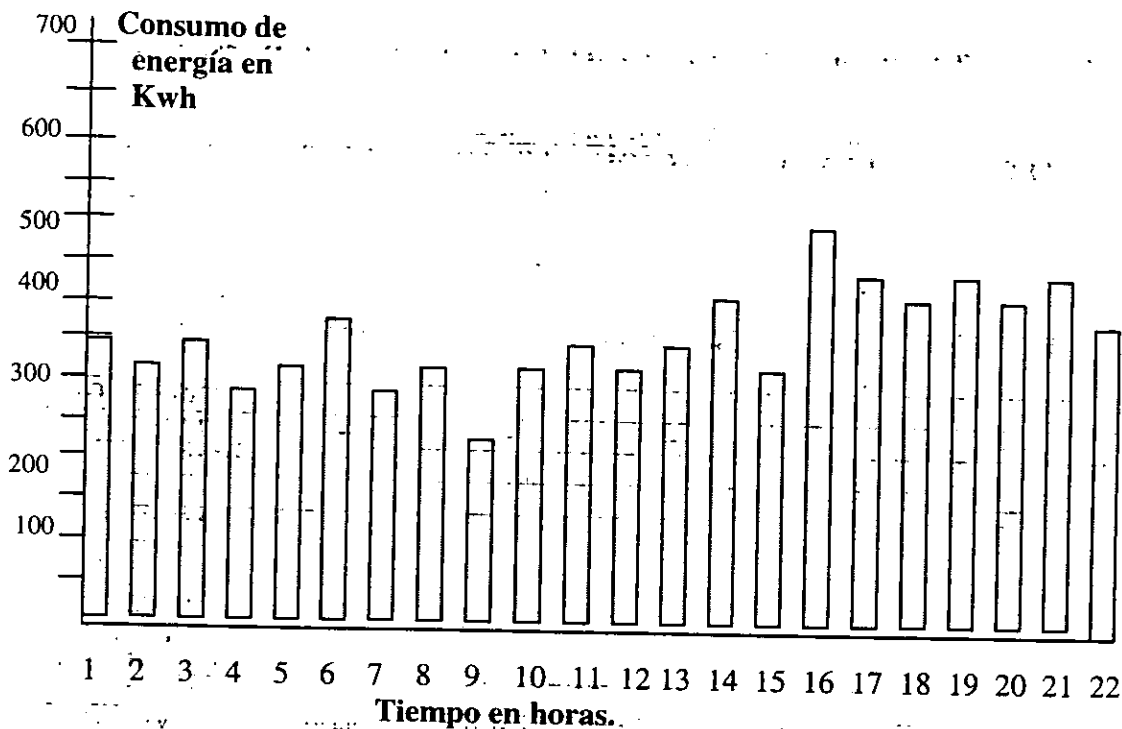
- c) Instalar un sistema de control automático que vigile el comportamiento de la demanda y realice desconexión o limitación de cargas según un programa preestablecido de acuerdo con las funciones propias de la empresa en cuestión.

La puesta en marcha de puntos como los anteriores dependen en mucho de los procesos específicos de producción, que se lleven a cabo de una planta industrial o una empresa, por lo que se debe de estudiar muy bien la posibilidad de instalarlos.

Esta forma de distribuir la demanda máxima fuera de las horas pico del consumo de energía, se denomina "administración de la demanda máxima", y se puede observar mejor mediante las siguientes gráficas.



(a)



(b)

Figura 6.6. En la gráfica (a) se puede observar el comportamiento del consumo de energía (Kwh) durante un día cualquiera de labores en una determinada empresa, antes de administrar la demanda máxima; (b) en esta gráfica se puede observar que mediante un programa de administración de la demanda máxima se puede regular el consumo de la energía. Estas gráficas fueron obtenidas de una publicación realizada por el FIDE llamada "Como Ahorrar Energía Eléctrica".

La buena distribución de la energía consumida a lo largo de un día y una demanda máxima reducida, son consecuencias de la aplicación de un buen programa de ahorro de energía, y es debido a esto que se presenta a final de la metodología, así se tendrá una recomendación extra para obtener un ahorro adicional tanto de energía eléctrica como económico.

Normalmente un programa de ahorro de energía abarca varias áreas: de consumo de energía eléctrica en una determinada empresa, como pueden ser, sólo por mencionar algunas: la iluminación y el aire acondicionado. Sin embargo como la metodología aquí propuesta es para obtener ahorros de energía eléctrica en motores, pues simplemente el programa de ahorro de energía eléctrica que se valla a elaborar sólo se concentrará a los motores que se tengan ahí, sin tomar en consideración otras áreas o equipos de consumo.

La aplicación de un programa de ahorro de energía en una empresa, planta industrial o cualquier otro lugar en el cual se tengan motores, dejara un beneficio adicional en dichos lugares a futuro, ya que creará en el personal que ahí labora una cultura del ahorro de energía, de tal forma que al acostumbrarse no lo vean como un hábito diario en sus actividades, sino como una forma de vida.

CAPÍTULO 7

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA
COMISIÓN MERCANTIL DE ELECTRICIDAD

7.1 INTRODUCCIÓN

En este último capítulo de la tesis, se mostrara como se aplica la metodología del diagnóstico Energético en el uso de motores trifásicos de inducción y síncronos. Para esto fue necesario conseguir una empresa, que pudiera ser muy accesible con respecto a la aplicación del diagnóstico; así mismo la empresa que acepto esto, fue Herramientas Klein S.A de C.V, ubicada en Tultitlan Estado de México.

Esta empresa se contacto via telefonica, gracias a la relación entre el Centro Tecnológico de la E.N.E.P. Aragón y dicha empresa, y se les planteo la aplicación de un diagnóstico energético (propuesto en el capítulo 6) para obtener ahorros de energía tanto eléctricos como económicos. Todo esto se trato a manera de practicas para la realización de este capítulo siete de la tesis.

Una vez con la autorización formal por parte de la empresa, se procedió a la aplicación de la metodología del diagnóstico energético. Como en esta empresa se contaba con una gran cantidad de motores eléctricos, en su totalidad motores trifásicos de inducción, el diagnóstico energético se baso solamente en seis de estos motores (los de HP's más grandes) con el fin de no extenderse demasiado en este último capítulo.

Así que tomando solamente seis motores de esta empresa, se procedió a la aplicación de la metodología, para que posteriormente se plasmara en este último capítulo. Por lo que revisando todo este séptimo capítulo, se podrá demostrar que la metodología del diagnóstico energético realmente sirve para el propósito para el cual fue diseñado, cumpliéndose así el objetivo de esta tesis.

7.2 RECOPIACIÓN DE DATOS.

7.2.1 DATOS BÁSICOS.

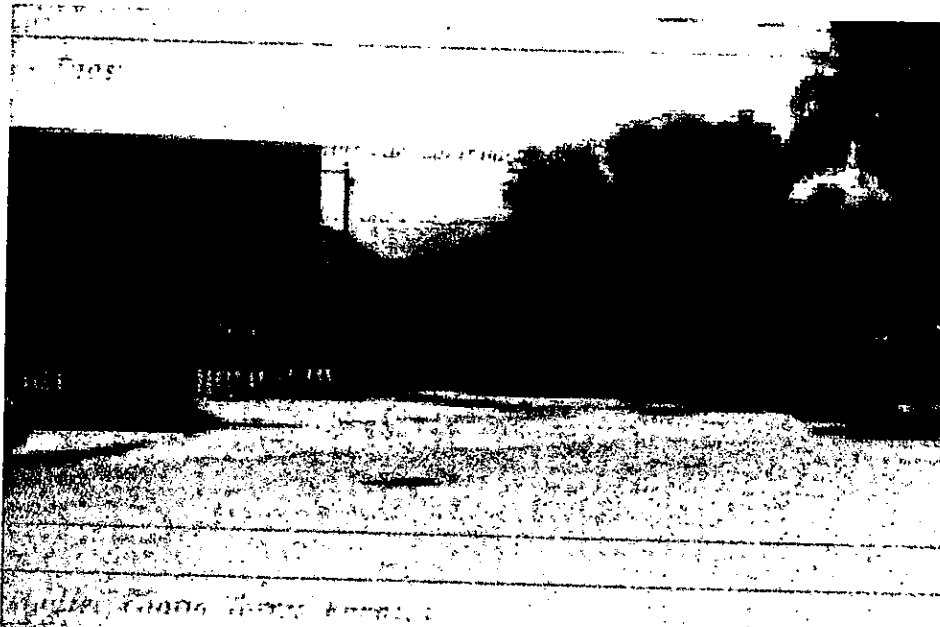


Figura 7.1. En esta imagen se puede observar la entrada de Herramientas Klein S.A de C.V. empresa en la cual se realizó la aplicación de la metodología del diagnóstico energético.

- a) **El nombre:** Herramientas Klein S.A de C.V.
- b) **Ubicación:** Avenida uno # 3, parque industrial Cartagena, Tultitlan Estado de México.
- c) **Actividad que realiza:** Fabricación de herramientas tales como: todo tipo de pinzas, llaves y desarmadores.
- d) **Tipo de tarifa que tiene:** Tarifa HM (para servicios de media tensión y que es aplicable para quienes demandan 100 Kw o más).

e) Facturaciones pagadas a luz y fuerza del centro durante el periodo de un año:

Tabla 3. Para la tarifa H-M (tarifa horaria para servicio general en media tensión, con demanda de 100Kw o más)

PERIODO DE CONSUMO	CARGO POR DEMANDA EN (Kw)	CARGO POR ENERGÍA DE BASE CONSUMIDA EN (Kwh)	CARGO POR ENERGÍA DE PUNTA CONSUMIDA EN (Kwh)	CARGO POR ENERGÍA INTERMEDIA CONSUMIDA EN (Kwh)	Factor de potencia	CARGO	BONIFICACIÓN	PAGO REALIZADO
						\$	\$	\$
25 de Julio del 2000	663	48,000	21,000	184,000	0.95562	2,477.50		187,549.00
24 de Agosto del 2000	590	46,000	21,000	158,000	0.94698	1,742.80		167,761.00
25 de Septiembre del 2000	647	46,000	16,000	173,000	0.95726	2,283.55		175,287.00
24 de Octubre del 2000	694	51,000	21,000	182,000	0.95054	2,140.65		146,869.00
24 de Noviembre del 2000	698	47,000	30,000	157,000	0.94989	2,209.75		195,969.00
27 de Diciembre del 2000	631	47,000	31,000	138,000	0.95635	2,415.95		185,571.00
25 de Enero del 2001	573	25,000	17,000	81,000	0.94868	1,344.25		119,920.00
26 de Febrero del 2001	633	50,000	36,000	158,000	0.94069	2,048.35		214,919.00
27 de Marzo del 2001	575	22,000	19,000	94,000	0.93774	1,148.85		133,640.00
26 de Abril del 2001	585	31,000	21,000	137,000	0.956	2,057.10		158,471.00
25 de Mayo del 2001	663	37,000	15,000	155,000	0.95667	2,077.4		159,805.00
25 de Junio del 2001	591	30,000	13,000	158,000	0.96331	2,082.85		150,236.00

7.2.2 DATOS SOBRE LOS MOTORES.

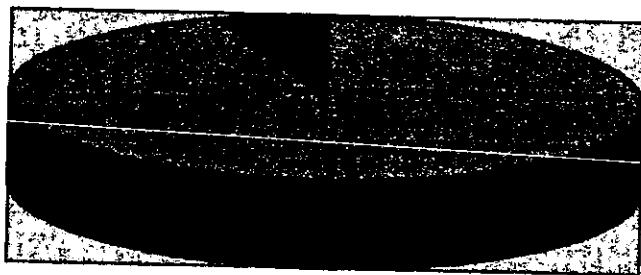
7.2.2.1 EL NÚMERO DE MOTORES TRIFÁSICOS TANTO DE INDUCCIÓN COMO SÍNCRONOS.

Tabla 4. cantidad de motores trifásicos de inducción

	MOTORES DE INDUCCIÓN	MOTORES SÍNCRONOS
CANTIDAD	90	_____
PORCENTAJE	100 %	_____

Tabla 5. Clasificación de los motores de inducción que se tengan de acuerdo a su tipo de eficiencia y de enclaustramiento.

TIPO DE ENCLAUSTRAMIENTO	MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN DE EFICIENCIA ESTÁNDAR	MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN DE ALTA EFICIENCIA
ABIERTO	1	_____
CERRADO	84	5
TOTAL	85	5
PORCENTAJE	94.444 %	5.55556 %



- Motor trifásico de inducción de eficiencia estándar 94.444%.
- Motor trifásico de inducción de alta eficiencia 5.55556%.

Grafica 7.1. En esta gráfica se puede observar mejor la gran cantidad de motores trifásicos de inducción de eficiencia estándar en comparación con los de alta eficiencia.

7.2.2.2 DATOS DE PLACA DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

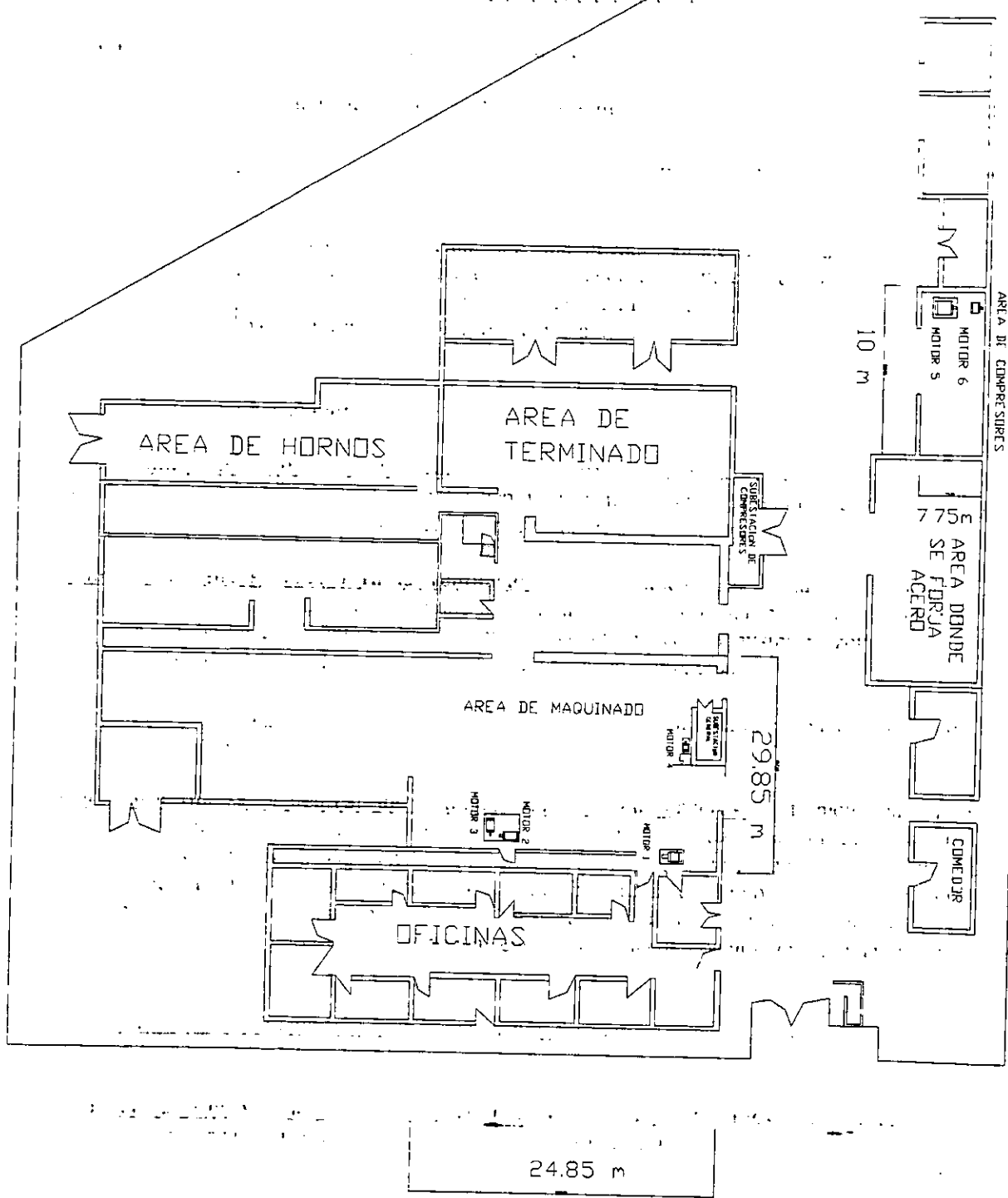
Tabla 6. Datos de placa de los motores trifásicos de inducción

CARACTERÍSTICAS	MOTOR 1	MOTOR 2	MOTOR 3	MOTOR 4	MOTOR 5	MOTOR 6
MARCA	SIEMENS	SIEMENS	SIEMENS	ABB	SIEMENS	SIEMENS
MODELO	1LA2286-6YK30	621	640	MIBA	1LA2226B3P33	KA3254-4YK30
TIPO DE ENCLAUSTRAMIENTO	CERRADO	CERRADO	CERRADO	CERRADO	CERRADO	CERRADO
TIPO DE EFICIENCIA	ESTANDAR	ESTANDAR	ESTANDAR	ALTA EFICIENCIA	ESTANDAR	ESTANDAR
NÚMERO DE FASES	3	3	3	3	3	3
NÚMERO DE POLOS	—	—	—	—	—	—
FACTOR DE SERVICIO	1.0	1.0	1.0	1.15	—	1.0
ARMAZÓN	286T	364T	284T	—	—	254T
CLASE DE DISEÑO SEGÚN NEMA	B	B	B	B	B	B
CLASE DE AISLAMIENTO	—	B	B	F	B	B
TEMPERATURA MÁXIMA AMBIENTE	40°C	40°C	40°C	40°C	—	40°C
POTENCIA (HP)	20	40	15	40	177	15
VOLTAJE (V)	220/440	230/460	230/460	230/460	220/440	220/440
CORRIENTE (amp)	53/26.5	94.6/47.3	37.4/18.7	110/55	420/210	39/19.5
FRECUENCIA (Hz)	60	60	60	60	60	60
VELOCIDAD (rpm)	1165	1170	1170	1770	1485	1745
FACTOR DE POTENCIA	—	—	—	0.84	0.87	—
EFICIENCIA NOMINAL	—	—	—	93%	—	—

7.2.2.3 UBICACIÓN DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

En este apartado, se mostrara un plano de la empresa en el cual se realizó la aplicación de la metodología del diagnóstico energético, en este caso de Herramientas Klein S.A de C.V. Este plano se presenta con el fin de poder observar la ubicación que tienen los seis motores a los cuales se les tomaron medidas, dentro de la empresa.

PLANO DE HERRAMIENTAS KLEIN S.A DE C.V



7.2.2.4 TAREAS QUE DESARROLLAN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

Motor trifásico de inducción uno (MOTOR I₁)

Este motor forma parte de toda una máquina, que se encarga de efectuar el trabajo de brochado (brochadora 67) en las piezas que conforman a una pinza, el brochado se hace con el fin de que las dos piezas de metal que forman parte de una pinza se puedan enganchar entre sí. Por otra parte el trabajo que efectúa el motor es el de crear y mantener presión en un sistema hidráulico con el fin de hacer fluir aceite de un tanque a la máquina brochadora.

Una imagen, en la cual es posible poder observar la maquinaria que hace el trabajo de brochado, así como el Motor I₁ que forma parte de ella, es la mostrada en la figura 7.2.



Figura 7.2. En esta imagen se puede observar al motor trifásico de inducción uno que forma parte de la maquinaria de brochado. Este motor es de color rojo y se encuentra en la parte posterior de la máquina.

Motores trifásicos de inducción dos y tres (MOTOR I₂ y MOTOR I₃)

Estos motores forman parte de una máquina, que se encarga de efectuar el trabajo de brochado (brochadora 69) en las piezas que conforman a una pinza, el brochado se hace con el fin de que las dos piezas de metal que forman parte de una pinza se puedan enganchar entre sí. Los motores trifásicos dos y tres al igual que el motor uno, tienen la tarea de crear y mantener la presión en el sistema hidráulico con el fin de hacer fluir aceite en la tubería desde un tanque hasta la brochadora.

En la imagen 7.3, se puede observar a la máquina brochadora, así como a los dos motores que están acoplados al sistema hidráulico de dicha máquina. Estos dos motores se tienen en color azul y se encuentran ubicados en la parte posterior de la máquina.

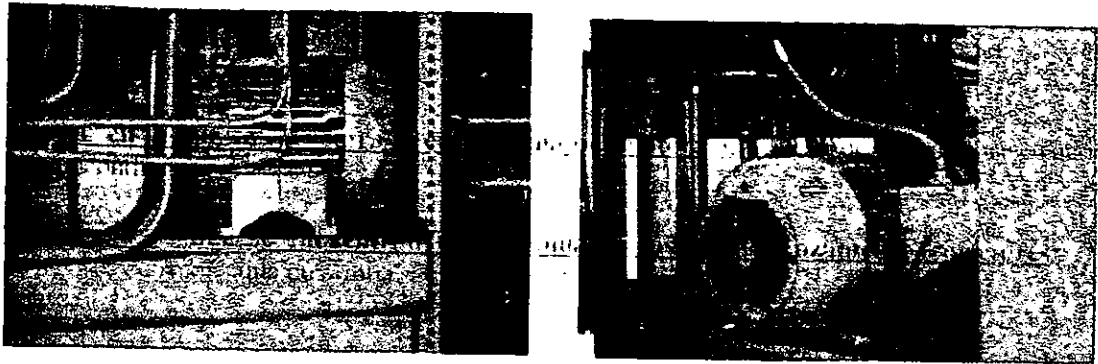


Figura 7.3. En esta imagen se pueden observar a los motores trifásicos de inducción dos y tres, los cuales forman parte de la brochadora.

Motor trifásico de inducción cuatro (MOTOR 4)

Este motor es parte de una máquina denominada brochadora (brochadora 151), dicho motor, al igual que los anteriores, también forma parte de una unidad hidráulica y tienen la tarea de crear y mantener la presión en dicho sistema hidráulico, al cual está conectado, con el fin de hacer fluir aceite en la tubería desde un tanque hasta la brochadora.

En la figura 7.4, se muestra al motor trifásico de inducción cuatro conectado al sistema hidráulico.

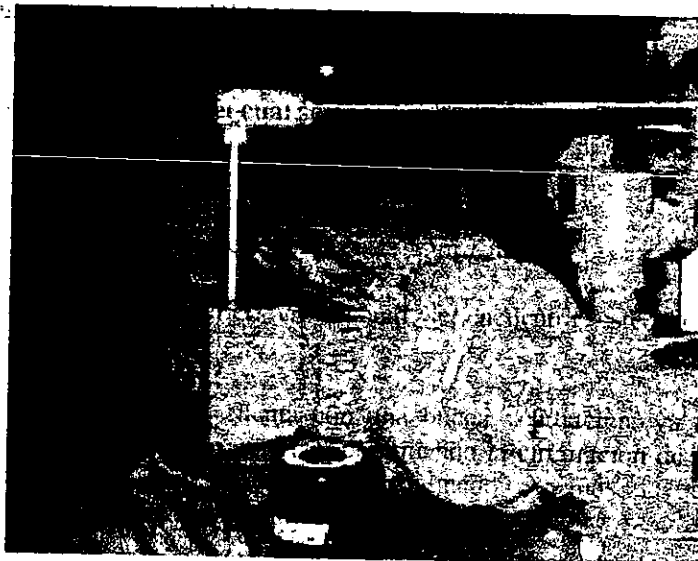


Figura 7.4. Muestra al motor trifásico de inducción cuatro conectado al sistema hidráulico, el cual forma parte de la brochadora.

Motor trifásico de inducción cinco (MOTOR I₅)

Este motor forma parte de un sistema de aire comprimido, por lo que su tarea principal es la de suministrar aire a través de las tuberías a los hornos.

En la figura 7.5, se puede observar una parte del sistema de aire comprimido del cual forma parte el motor trifásico de inducción ocho.

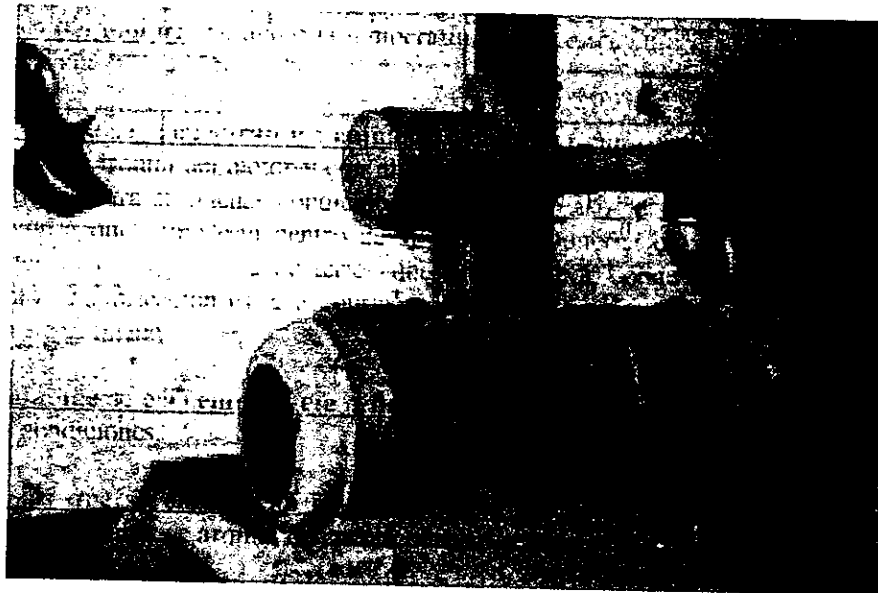


Figura 7.5. En esta imagen se puede observar plenamente al motor trifásico de inducción cinco conectado al sistema de aire comprimido de los hornos.

Motor trifásico de inducción seis (MOTOR I₆)

Este motor forma parte de un ventilador, el cual se encarga de mantener en buena temperatura al aceite que fluye a través de la tubería de un sistema hidráulico.

En la figura 7.6, se puede observar el ventilador del cual forma parte el motor trifásico de inducción seis.



Figura 7.6. En esta imagen se puede apreciar el motor trifásico de inducción seis, el cual acciona al ventilador.

Tabla 8. Actividad que realizan los motores trifásicos de inducción.

	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I ₄	MOTOR I ₅	MOTOR I ₆
TAREA O ACTIVIDAD QUE REALIZA	Mantener la presión en el sistema hidráulico.	Mantener la presión en el sistema hidráulico.	Mantener la presión en el sistema hidráulico.	Mantener la presión en el sistema hidráulico.	Suministrar de aire comprimido a los hornos.	Enfriar aceite que fluye a través de un sistema hidráulico.
FORMA PARTE DE UN PROCESO	Si	Si	Si	Si	Si	Si

7.2.2.5. CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

Motor trifásico de inducción uno (MOTOR I₁)

- 1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Ubicación: Este motor se encuentra en el área de maquinado.

Dimensiones: El área de maquinado es de 29.85m X 24.85m.

Temperatura: En el espacio específico en el cual se encuentra este motor, se midió una temperatura ambiente de 28.3°C.

Ventilación: Esta área de maquinado cuenta con una buena ventilación, ya que las puertas de acceso a esta área siempre se encuentran abiertas, permitiendo la circulación de aire del exterior, es decir, del medio ambiente al interior del área de maquinado. Además de que se cuentan con ventanas abiertas en la parte superior de los muros de dicha área.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra: Sobre la estructura metálica de este motor se encontró un tipo de masa o lodo que se forma debido a la mezcla entre la acumulación de polvo y aceite, esto entre los disipadores de calor del motor sin llegar a ser excesivo, además de pedazos de cáscara de pintura seca, que caen de la tubería hacia el motor.

Condición en la que se encuentra la ventilación: La condición en la que se encuentra el ventilador interno del motor es buena, aunque los conductos de ventilación por donde el ventilador toma aire del exterior hacia el interior del motor, se encuentran con la misma mezcla de polvo y aceite, sin embargo no obstruyen por completo los conductos de ventilación.

La temperatura del motor: Se midió la temperatura en la estructura externa de metal del motor y se obtuvo una medición de 44°C.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, baleros o chumaceras: Este motor cuenta con un balero en la parte frontal del motor y con un cojinete en la parte posterior del mismo. El balero a simple vista se encuentra en buenas condiciones; pero en el caso del cojinete no es posible saber su condición, debido a que como está dentro de la estructura interna del motor no es visible, sin embargo el motor tiene en la parte posterior una grasera, por donde es posible lubricar a dicho cojinete, y como su lubricación es casi continua, entonces se puede concluir que gracias a esto el estado del cojinete es bueno.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor: La flecha de este motor se encontró en buenas condiciones.

Condición en las que se encuentran las escobillas y los anillos rozantes o colectores: Este motor por ser de rotor jaula de ardilla, no cuenta con estos aditamentos.

3) Información sobre la carga que acciona el motor.

Que tipo de carga es la que mueve el motor: Como este motor realiza la tarea de hacer fluir aceite desde un tanque hasta la máquina brochadora, entonces la carga para el motor es el aceite.

Que tipo de acoplamiento es el que tiene el motor con la carga: Este motor se acopla al sistema hidráulico, por medio de un cople, que es colocado en la flecha del motor, y este cople se une por medio de tornillos a otro que se tiene del lado del sistema hidráulico.

Condición en la que se encuentra el acoplamiento: El sistema de acoplamiento se encontró en buenas condiciones.

Motor trifásico de inducción dos (MOTOR I₂)

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Ubicación: Este motor se encuentra en el área de maquinado.

Dimensiones: El área de maquinado es de 29.85m X 24.85m.

Temperatura: En el espacio específico en el cual se encuentra este motor, se midió una temperatura ambiente de 25.2°C.

Ventilación: Esta área de maquinado cuenta con una buena ventilación, ya que las puertas de acceso a esta área siempre se encuentran abiertas, permitiendo la circulación de aire del exterior, es decir, del medio ambiente al interior del área de maquinado. Además de que se cuentan con ventanas abiertas en la parte superior de los muros de dicha área.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra: Sobre la estructura metálica exterior de este motor se encontró un tipo de masa o lodo que se forma debido a la mezcla entre la acumulación de polvo y aceite, esto entre los disipadores de calor del motor sin embargo no llega a ser excesivo.

Condición en la que se encuentra la ventilación: La condición en la que se encuentra el ventilador interno del motor es buena, aunque los conductos de ventilación por donde el ventilador toma aire del exterior hacia el interior del motor, se encuentran con la misma mezcla de polvo y aceite, sin embargo no obstruyen por completo los conductos de ventilación.

La temperatura del motor: Se midió la temperatura en la estructura metálica externa del motor y se obtuvo una medición de 29.4°C.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras: Este motor cuenta con un balero en la parte frontal del motor y con un cojinete en la parte posterior del mismo. El balero a simple vista se encuentra en buenas condiciones; pero en el caso del cojinete no es posible saber su condición, debido a que como esta dentro de la estructura interna del motor no es visible, sin embargo el motor tiene en la parte posterior una grasera, por donde es posible lubricar a dicho cojinete, y como su lubricación es casi continua, entonces se puede concluir que gracias a esto el estado del cojinete es bueno.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor: La flecha de este motor se encontró en buenas condiciones.

Condición en las que se encuentran las escobillas y los anillos rozantes o colectores: Este motor por ser de rotor jaula de ardilla, no cuenta con estos aditamentos.

3) **Información sobre la carga que acciona el motor.**

Que tipo de carga es la que mueve el motor: Como este motor realiza la tarea de hacer fluir aceite desde un tanque hasta la máquina perfiladora, entonces la carga para el motor es el aceite.

Que tipo de acoplamiento es el que tiene el motor con la carga: Este motor se acopla al sistema hidráulico, por medio de un cople, que es colocado en la flecha del motor, y este cople se une por medio de tornillos a otro que se tiene del lado del sistema hidráulico.

Condición en la que se encuentra el acoplamiento: El sistema de acoplamiento se encontró en buenas condiciones.

Motor trifásico de inducción tres (MOTOR I₃)

1) **Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.**

Ubicación: Este motor se encuentra en el área de maquinado.

Dimensiones: El área de maquinado es de 29.85m X 24.85m.

Temperatura: En el espacio específico en el cual se encuentra este motor, se midió una temperatura ambiente de 25.2°C.

Ventilación: Esta área de maquinado cuenta con una buena ventilación, ya que las puertas de acceso a esta área siempre se encuentran abiertas, permitiendo la circulación de aire del exterior, es decir, del medio ambiente al interior del área de maquinado. Además de que se cuentan con ventanas abiertas en la parte superior de los muros de dicha área.

2) **Información sobre el motor.**

Estado de limpieza en el que se encuentra: Sobre la estructura metálica exterior de este motor se encontró un tipo de masa o lodo que se forma debido a la mezcla entre la acumulación de polvo y aceite, esto entre los disipadores de calor del motor sin embargo no llega a ser excesivo.

Condición en la que se encuentra la ventilación: La condición en la que se encuentra el ventilador interno del motor es buena, aunque los conductos de ventilación por donde el ventilador toma aire del exterior hacia el interior del motor, se encuentran con la misma mezcla de polvo y aceite, sin embargo no obstruyen por completo los conductos de ventilación.

La temperatura del motor: Se midió la temperatura en la estructura metálica externa del motor y se obtuvo una medición de 41.7°C.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras: Este motor cuenta con un balero en la parte frontal del motor y con un cojinete en la parte posterior del mismo. El balero a simple vista se encuentra en buenas condiciones; pero en el caso del cojinete no es posible saber su condición, debido a que como esta dentro de la estructura interna del motor no es visible, sin embargo el motor tiene en la parte posterior una grasea, por donde es posible lubricar a dicho cojinete, y como su lubricación es casi continua, entonces se puede concluir que gracias a esto el estado del cojinete es bueno.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor: La flecha de este motor se encontró en buenas condiciones.

Condición en la que se encuentran las escobillas y los anillos rozantes o colectores: Este motor por ser de rotor jaula de ardilla, no cuenta con estos aditamentos.

3) Información sobre la carga que acciona el motor.

Que tipo de carga es la que mueve el motor: Como este motor realiza la tarea de hacer fluir aceite desde un tanque hasta la máquina perfiladora, entonces la carga para el motor es el aceite.

Que tipo de acoplamiento es el que tiene el motor con la carga: Este motor se acopla al sistema hidráulico, por medio de un cople, que es colocado en la flecha del motor, y este cople se une por medio de tornillos a otro que se tiene del lado del sistema hidráulico.

Condición en la que se encuentra el acoplamiento: El sistema de acoplamiento se encontró en buenas condiciones.

Motor trifásico de inducción cuatro (MOTOR L₄)

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Ubicación: Este motor se encuentra en el área de maquinado.

Dimensiones: El área de maquinado es de 29.85m X 24.85m.

Temperatura: En el espacio específico en el cual se encuentra este motor, se midió una temperatura ambiente de 28.3°C.

Ventilación: Esta área de maquinado cuenta con una buena ventilación, ya que las puertas de acceso a esta área siempre se encuentran abiertas, permitiendo la circulación de aire del exterior, es decir, del medio ambiente al interior del área de maquinado. Además de que se cuentan con ventanas abiertas en la parte superior de los muros de dicha área.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra: Sobre la estructura metálica exterior de este motor se encontró polvo y rebaba de metal, entre los disipadores de calor del motor sin llega a ser excesivo.

Condición en la que se encuentra la ventilación: La condición en la que se encuentra el ventilador interno del motor es buena, los conductos de ventilación por donde el ventilador toma aire del exterior hacia el interior del motor, se encuentran libres de polvo.

La temperatura del motor: Se midió la temperatura en la estructura metálica externa del motor y se obtuvo una medición de 28.8°C.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras: Este motor cuenta con un balero en la parte frontal del motor y con un cojinete en la parte posterior del mismo. El balero a simple vista se encuentra en buenas condiciones; pero en el caso del cojinete no es posible saber su condición, debido a que como esta dentro de la estructura interna del motor no es visible, sin en cambio el motor tiene en la parte posterior una grasera, por donde es posible lubricar a dicho cojinete, y como su lubricación es casi continua, entonces se puede concluir que gracias a esto el estado del cojinete es bueno.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor: La flecha de este motor se encontró en muy buenas condiciones.

Condición en las que se encuentran las escobillas y los anillos rozantes o colectores: Este motor por ser de rotor jaula de ardilla, no cuenta con estos aditamentos.

3) Información sobre la carga que acciona el motor.

Que tipo de carga es la que mueve el motor: Como este motor realiza la tarea de hacer fluir aceite desde un tanque hasta la máquina perfiladora, entonces la carga para el motor es el aceite.

Que tipo de acoplamiento es el que tiene el motor con la carga: Este motor se acopla al sistema hidráulico, por medio de un cople, que es colocado en la flecha del motor, y este cople se une por medio de tornillos a otro que se tiene del lado del sistema hidráulico.

Condición en la que se encuentra el acoplamiento: El sistema de acoplamiento se encontró en muy buenas condiciones.

Motor trifásico de inducción cinco (MOTOR I₅)

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Ubicación: Este motor se encuentra en el área de compresores.

Dimensiones: El área de maquinado es de 10m X 7.75m.

Temperatura: En el espacio específico en el cual se encuentra este motor, se midió una temperatura ambiente de 26.0°C.

Ventilación: En esta área de compresores se cuenta con una excelente ventilación, ya que en dicha área se cuenta con una gran puerta de acceso que siempre esta abierta, además de que en uno de los muros de dicha área, se cuenta con una enorme abertura en la parte inferior de dicho muro. Provocando así que se tenga una excelente ventilación, debido a la gran circulación de aire, del exterior hacia el interior del área de compresores.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra: Sobre la estructura metálica exterior de este motor se encontró muy poco polvo entre los disipadores de calor del motor.

Condición en la que se encuentra la ventilación: La condición en la que se encuentra el ventilador interno del motor es buena. Por otra parte los conductos de ventilación por donde el ventilador toma aire del exterior hacia el interior del motor, se encuentran con muy poca acumulación de polvo, por lo que no obstruyen de manera importante a dichos conductos de ventilación.

La temperatura del motor: Se midió la temperatura en la estructura metálica externa del motor y se obtuvo una medición de 30.9°C.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras: Este motor cuenta con un balero en la parte frontal del motor y con un cojinete en la parte posterior del mismo. El balero a simple vista se encuentra en buenas condiciones; pero en el caso del cojinete no es posible saber su condición, debido a que como esta dentro de la estructura interna del motor no es visible, sin embargo el motor tiene en la parte posterior una grasera, por donde es posible lubricar a dicho cojinete, y como su lubricación es casi continua, entonces se puede concluir que gracias a esto el estado del cojinete es bueno.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor: La flecha de este motor se encontró en muy buenas condiciones.

Condición en las que se encuentran las escobillas y los anillos rozantes o colectores: Este motor por ser de rotor jaula de ardilla, no cuenta con estos aditamentos.

3) Información sobre la carga que acciona el motor.

Que tipo de carga es la que mueve el motor: Como este motor realiza la tarea de suministrar aire comprimido a través de las tuberías a los hornos, entonces la carga para el motor es el aire.

Que tipo de acoplamiento es el que tiene el motor con la carga: Este motor se acopla al sistema hidráulico, por medio de un cople, que es colocado en la flecha del motor, y este cople se une por medio de tornillos a otro que se tiene del lado del sistema de aire comprimido.

Condición en la que se encuentra el acoplamiento: El sistema de acoplamiento se encontró en muy buenas condiciones.

Motor trifásico de inducción seis (MOTOR I₆)

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Ubicación: Este motor se encuentra en el área de compresores.

Dimensiones: El área de maquinado es de 10m X 7.75m.

Temperatura: En el espacio específico en el cual se encuentra este motor, se midió una temperatura ambiente de 26.0°C.

Ventilación: En esta área de compresores se cuenta con una excelente ventilación, ya que en dicha área se cuenta con una gran puerta de acceso que siempre esta abierta, además de que en uno de los muros de dicha área, se cuenta con una enorme abertura en la parte inferior de dicho muro. Provocando así que se tenga una excelente ventilación, debido a la gran circulación de aire, del exterior hacia el interior del área de compresores.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra: Sobre la estructura metálica exterior de este motor se encontró un tipo de masa o lodo que se forma debido a la mezcla entre la acumulación de polvo y aceite, esto entre los disipadores de calor del motor, en una cantidad un poco mayor a la que se presentó en los motores anteriores, sin embargo tampoco llega a ser tan excesivo.

Condición en la que se encuentra la ventilación: La condición en la que se encuentra el ventilador interno del motor es buena, aunque los conductos de ventilación por donde el ventilador toma aire del exterior hacia el interior del motor, se encuentran con la misma mezcla de polvo y aceite, sin embargo no obstruyen por completo los conductos de ventilación.

La temperatura del motor: Se midió la temperatura en la estructura metálica externa del motor y se obtuvo una medición de 29.1°C.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras: Este motor cuenta con un par de valeros, tanto en la parte frontal del motor como en la parte posterior. El balero de la parte frontal se encontró en buenas condiciones, pero el balero posterior no es visible, ya que se encuentra en la parte interna del motor, por lo que no es posible verificar su condición.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor: La flecha de este motor se encontró en buenas condiciones.

Condición en las que se encuentran las escobillas y los anillos rozantes o colectores: Este motor por ser de rotor jaula de ardilla, no cuenta con estos aditamentos.

3.) Información sobre la carga que acciona el motor.

Que tipo de carga es la que mueve el motor: Como este motor realiza la tarea de hacer girar las aspas de un ventilador, entonces la carga para el motor es el ventilador.

Que tipo de acoplamiento es el que tiene el motor con la carga: El ventilador se coloca en la flecha del motor por medio de un acoplamiento mecánico.

Condición en la que se encuentra el acoplamiento: El sistema de acoplamiento se encontró en buenas condiciones.

7.2.2.6 EL TIEMPO QUE LLEVAN OPERANDO LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN, ASÍ COMO SU HISTORIAL DE REPARACIONES.

Tabla 10. Tiempo de operación de los motores trifásicos de inducción e historial de reparación de los mismos.

	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I ₄	MOTOR I ₅	MOTOR I ₆
TIEMPO QUE LLEVA OPERANDO	16 DE MARZO DE 1977	17 DE FEBRERO DE 1982	17 DE FEBRERO DE 1982	JUNIO DEL 2001	11 DE OCTUBRE DE 1973	11 DE OCTUBRE DE 1973
HA SIDO REPARADO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
CUANTAS VECES HA SIDO REPARADO	_____	_____	_____	_____	_____	_____
CUANDO FUE SU ÚLTIMA REPARACIÓN	_____	_____	_____	_____	_____	_____

Tabla 12. Mantenimiento preventivo realizado a los motores trifásicos de inducción.

	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I ₄	MOTOR I ₅	MOTOR I ₆
SE LE REALIZA MANTENIMIENTO PREVENTIVO	SI	SI	SI	SI (SE HARÁ CADA DOS AÑOS)	SI	SI
CUANDO FUE SU ÚLTIMO MANTENIMIENTO	DICIEMBRE DEL 2000	DICIEMBRE DEL 2000	DICIEMBRE DEL 2000	NO HA TENIDO MANTENIMIENTO	DICIEMBRE DE 1999	DICIEMBRE DE 1999

7.2.2.7 HORARIO DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

Tabla 14. Horario de operación a la semana de los motores trifásicos de inducción.

	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SABADO	DOMINGO	TOTAL DE HORAS A LA SEMANA
MOTOR I₁	7:00-12:30 13:00-16:00	7:00-12:30 13:00-16:00	7:00-12:30 13:00-16:00	7:00-12:30 13:00-16:00	7:00-12:30 13:00-16:00	—	—	42.5 hrs
MOTOR I₂	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-14:00	—	79.5 hrs
MOTOR I₃	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-12:30 13:00-15:45 16:00-22:00	7:00-14:00	—	79.5 hrs
MOTOR I₄	7:00-12:30 13:00-16:00	7:00-12:30 13:00-16:00	7:00-12:30 13:00-16:00	7:00-12:30 13:00-16:00	7:00-12:30 13:00-16:00	—	—	42.5 hrs
MOTOR I₅	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	80hrs
MOTOR I₆	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	7:00 – 18:45	80hrs

Tabla 16. Horario de operación al año de los motores trifásicos de inducción.

POR EL TIPO DE TARIFA (HM)	PERIODO DE BASE	PERIODO INTERMEDIO	PERIODO DE PUNTA	HORAS TOTALES DE FUNCIONAMIENTO
MOTOR I₁	—	2191.785714 hrs/año	—	2191.785714 hrs/año
MOTOR I₂	—	4099.928571 hrs/año	515.7142856 hrs/año	4615.64285 hrs/año
MOTOR I₃	—	4099.928571 hrs/año	515.7142856 hrs/año	4615.64285 hrs/año
MOTOR I₄	—	2191.785714 hrs/año	—	2191.785714 hrs/año
MOTOR I₅	589.3877545 hrs/año	3536.32653 hrs/año	—	4125.714285 hrs/año
MOTOR I₆	589.3877545 hrs/año	3536.32653 hrs/año	—	4125.714285h hrs/año

Para más información sobre los tres tipos de periodos en los que se factura la energía eléctrica en la tarifa HM, hay que revisar la tabla 6 hasta la tabla 16, las cuales se encuentran en el anexo A.

7.2.2.3 EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA EN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

Para la obtención de la eficiencia y del factor de potencia en cada uno de los motores trifásicos de inducción, fue necesario tomar lecturas de ciertos parámetros, por medio de aparatos de medición. Los aparatos de medición utilizados en la aplicación de la metodología del diagnóstico energético fueron:

- 1) **Genius HT5080:** Utilizado para obtener las mediciones en cada uno de los motores de:
 - a) Voltaje de línea a línea (V_L).
 - b) Potencia real o activa (P).
 - c) Potencia reactiva (Q).
 - d) Frecuencia de la red eléctrica (f).
 - e) Corriente de línea (I_L).
 - f) Potencia aparente (S).
 - g) Factor de Potencia ($F.P$).

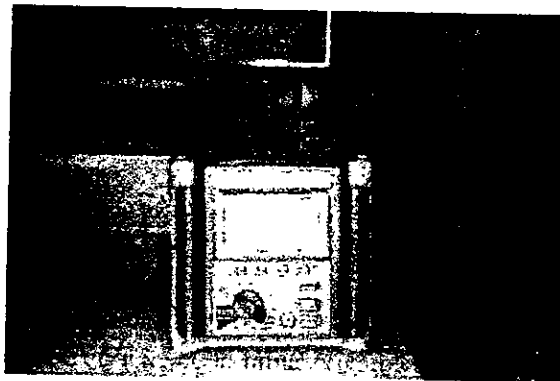


Figura 7.7. En esta imagen se puede observar al aparato de medición denominado Genius HT5080.

- 2) **Tacómetro:** Utilizado para obtener la medición de la velocidad en revoluciones por minuto que presentaba un determinado motor en su eje o flecha.

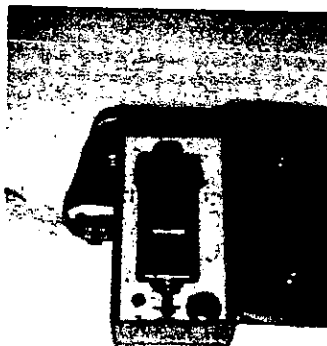


Figura 7.8. En esta imagen es posible observar el tacómetro utilizado para la medición de la velocidad en cada uno de los motores.

- 3) **Termopar:** Utilizado para obtener la medición de la temperatura, tanto del ambiente como del motor en grados centígrados.

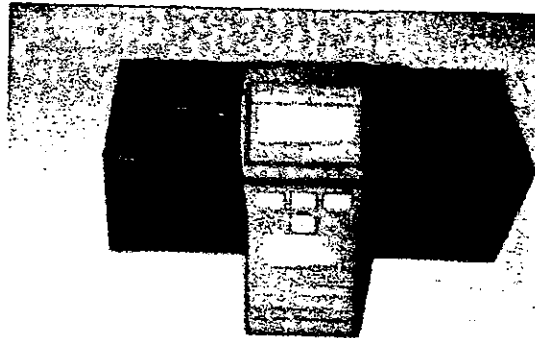


Figura 7.9. En esta imagen se puede observar el termopar utilizado para obtener las mediciones de temperatura.

Las lecturas obtenidas gracias a las mediciones de los aparatos anteriores se pueden observar en la siguiente tabla:

DATOS	MOTOR I ₁	MOTOR I ₂	MOTOR I ₃	MOTOR I ₄	MOTOR I ₅	MOTOR I ₆
VOLTAJE DE LÍNEA (V _L) EN volts	439.8	435.0	436.0	437.4	441.7	443.2
CORRIENTE DE LÍNEA (I _L) EN ampers	22.2	24.2	18.4	50.60	182.2	15
FACTOR DE POTENCIA (F.P)	0.479	0.638	0.762	0.882	0.850	0.803
FRECUENCIA (f) EN Hertz	59.93	60.02	59.91	59.94	60.05	60.01
VELOCIDAD DE OPERACIÓN MAYOR (n _{ma}) EN rpm	1194	1195	1195	1791	1770	Se encuentra en la tabla 6.
VELOCIDAD DE OPERACIÓN MENOR (n _{me}) EN rpm	1184	1183	1189	1781	1762	1735
POTENCIA ACTIVA (P) EN Kw	4.7	6.7	6.1	19.5	68.9	5.3
POTENCIA APARENTE (S) EN KVA	9.8	10.5	8.0	22.1	80.5	6.6
POTENCIA REACTIVA (Q) EN Kvar	8.59	8.08	5.17	10.4	41.6	3.93
T _{AMBIENTE}	28.3	25.2	25.2	28.3	26.0	26.0
T _{MOTOR}	44	29.4	41.7	28.8	30.9	29.1

Tabla de lecturas tomadas a los seis motores de la empresa herramientas Klein S.A de C.V.

Velocidad de operación menor (n_{me}): Esta lectura de velocidad, se refiere a que fue tomada cuando la máquina a la que pertenece un determinado motor se utiliza para llevar a cabo una actividad, que es cuando al motor realmente se le aplica carga.

Velocidad de operación mayor (n_{ma}): Esta lectura de velocidad, se refiere a que fue tomada cuando la máquina a la que pertenece un determinado motor se tiene encendida, pero no lleva a cabo ninguna actividad, por lo que se puede decir que es cuando al motor casi no se le aplica carga.

Obtención de la eficiencia en el motor trifásico de inducción dos (MOTOR I₂):

La eficiencia se obtendrá tomando en cuenta los datos recopilados en la tabla anterior y en la tabla 6, además de las ecuaciones (6-1), (6-2) o (6-2A).

Datos:

$$\begin{aligned} V_L &= 435.0V & I_L &= 24.2 \text{ amp} \\ F.P &= 0.638 & n_s &= 1200 \text{ rpm} \\ n_{ma} &= 1195 \text{ rpm} & n_{me} &= 1183 \text{ rpm} \\ P_{sn} &= 40 \text{ HP} \end{aligned}$$

Nota: n_s (velocidad sincrona) se obtiene de la tabla A1, ubicada en el Anexo "A" que se encuentra al final de esta tesis, tomando en cuenta que las velocidades de operación del MOTOR I₁ se encuentran entre las 1183 y 1195 rpm, por lo que la velocidad sincrona debe ser ligeramente mayor a estos valores, es decir, 1200 rpm.

Para empezar se calculará la potencia en HP que esta entregando el motor al ser utilizado.

$$P_{MSDE} = \left(\frac{1200 \text{ rpm} - 1195 \text{ rpm}}{1200 \text{ rpm} - 1183 \text{ rpm}} \right) (40 \text{ HP}) = \underline{11.76470588 \text{ HP}}$$

Ahora se calculara la eficiencia a la cual esta operando este motor:

$$\eta = \left(\frac{(0.746 \text{ Kw}) (11.76470588 \text{ HP})}{\sqrt{3} (435.0V) (24.2 \text{ amp}) (0.638)} \right) = \frac{8.776470586 \text{ Kw}}{11.63284467 \text{ Kw}}$$

$$\eta = (0.754456097) (100) = \underline{75.44560971\%}$$

Obtención de la eficiencia en el motor trifásico de inducción tres (MOTOR I₃):

La eficiencia se obtendrá tomando en cuenta los datos recopilados en la tabla anterior y en la tabla 6, además de las ecuaciones (6-1), (6-2) o (6-2A).

Datos:

$$\begin{aligned} V_L &= 436.0V & I_L &= 18.4 \text{ amp} \\ F.P &= 0.762 & n_s &= 1200 \text{ rpm} \\ n_{ma} &= 1195 \text{ rpm} & n_{me} &= 1189 \text{ rpm} \\ P_{sn} &= 15 \text{ HP} \end{aligned}$$

Nota: n_s (velocidad síncrona) se obtiene de la tabla A1, ubicada en el Anexo "A" que se encuentra al final de esta tesis, tomando en cuenta que las velocidades de operación del MOTOR I₁ se encuentran entre las 1189 y 1195 rpm, por lo que la velocidad síncrona debe ser ligeramente mayor a estos valores, es decir, 1200 rpm.

Para empezar se calculará la potencia en HP que esta entregando el motor al ser utilizado.

$$P_{MSDE} = \left(\frac{1200 \text{ rpm} - 1195 \text{ rpm}}{1200 \text{ rpm} - 1189 \text{ rpm}} \right) (15 \text{ HP}) = \underline{6.818181818 \text{ HP}}$$

Ahora se calculara la eficiencia a la cual esta operando este motor:

$$\eta = \left(\frac{(0.746 \text{ Kw}) (6.818181818 \text{ HP})}{\sqrt{3} (436.0\text{V}) (18.4 \text{ amp}) (0.762)} \right) = \frac{5.086363636 \text{ Kw}}{10.58814575 \text{ Kw}}$$

$$\eta = (0.48038285) (100) = \underline{48.03828503\%}$$

Obtención de la eficiencia en el motor trifásico de inducción cuatro (MOTOR I₄):

La eficiencia se obtendrá tomando en cuenta los datos recopilados en la tabla anterior y en la tabla 6, además de las ecuaciones (6-1), (6-2) o (6-2A).

Datos:

$V_L = 437.4\text{V}$	$I_L = 50.6 \text{ amp}$
$F.P = 0.882$	$n_s = 1800 \text{ rpm}$
$n_{ma} = 1791 \text{ rpm}$	$n_{me} = 1789 \text{ rpm}$
$P_{sn} = 40 \text{ HP}$	

Nota: n_s (velocidad síncrona) se obtiene de la tabla A1, ubicada en el Anexo "A" que se encuentra al final de esta tesis, tomando en cuenta que las velocidades de operación del MOTOR I₁ se encuentran entre las 1789 y 1791 rpm, por lo que la velocidad síncrona debe ser ligeramente mayor a estos valores, es decir, 1800 rpm.

Para empezar se calculará la potencia en HP que esta entregando el motor al ser utilizado.

$$P_{MSDE} = \left(\frac{1800 \text{ rpm} - 1791 \text{ rpm}}{1800 \text{ rpm} - 1789 \text{ rpm}} \right) (40 \text{ HP}) = \underline{32.72727273 \text{ HP}}$$

Ahora se calculara la eficiencia a la cual esta operando este motor:

$$\eta = \left(\frac{(0.746 \text{ Kw}) (32.72727273 \text{ HP})}{\sqrt{3} (437.4\text{V}) (50.6 \text{ amp}) (0.882)} \right) = \frac{24.41454546 \text{ Kw}}{33.81103833 \text{ Kw}}$$

$$\eta = (0.418050954) (100) = \underline{72.20880123\%}$$

Obtención de la eficiencia en el motor trifásico de inducción cinco (MOTOR I₅):

La eficiencia se obtendrá tomando en cuenta los datos recopilados en la tabla anterior y en la tabla 6, además de las ecuaciones (6-1), (6-2) o (6-2A).

Datos:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| $V_L = 441.7\text{V}$ | $I_L = 182.2 \text{ amp}$ |
| $F.P = 0.850$ | $n_s = 1800 \text{ rpm}$ |
| $n_{ma} = 1770 \text{ rpm}$ | $n_{me} = 1762 \text{ rpm}$ |
| $P_{sn} = 177 \text{ HP}$ | |

Nota: n_s (velocidad sincrona) se obtiene de la tabla A1, ubicada en el Anexo "A" que se encuentra al final de esta tesis, tomando en cuenta que las velocidades de operación del MOTOR I₁ se encuentran entre las 1762 y 1770 rpm, por lo que la velocidad sincrona debe ser ligeramente mayor a estos valores, es decir, 1800 rpm.

Para empezar se calculará la potencia en HP que esta entregando el motor al ser utilizado.

$$P_{MSDE} = \left(\frac{1800 \text{ rpm} - 1770 \text{ rpm}}{1800 \text{ rpm} - 1762 \text{ rpm}} \right) (177 \text{ HP}) = \underline{139.7368421 \text{ HP}}$$

Ahora se calculara la eficiencia a la cual esta operando este motor:

$$\eta = \left(\frac{(0.746 \text{ Kw}) (139.7368421 \text{ HP})}{\sqrt{3} (441.7\text{V}) (182.2 \text{ amp}) (0.850)} \right) = \frac{104.2436842 \text{ Kw}}{118.4828044 \text{ Kw}}$$

$$\eta = (0.879821209) (100) = \underline{87.9821209\%}$$

Obtención de la eficiencia en el motor trifásico de inducción seis (MOTOR I₆):

La eficiencia se obtendrá tomando en cuenta los datos recopilados en la tabla anterior y en la tabla 6, además de las ecuaciones (6-1), (6-2) o (6-2A).

Datos:

$$\begin{aligned} V_L &= 443.2V & I_L &= 15 \text{ amp} \\ F.P &= 0.803 & n_s &= 1800 \text{ rpm} \\ n_{ma} &= 1745 \text{ rpm} & n_{me} &= 1735 \text{ rpm} \\ P_{sn} &= 15 \text{ HP} \end{aligned}$$

Nota: n_s (velocidad síncrona) se obtiene de la tabla A1, ubicada en el Anexo "A" que se encuentra al final de esta tesis, tomando en cuenta que las velocidades de operación del MOTOR I₁ se encuentran entre las 1735 y 1735 rpm, por lo que la velocidad síncrona debe ser ligeramente mayor a estos valores, es decir, 1800 rpm.

Para empezar se calculará la potencia en HP que esta entregando el motor al ser utilizado.

$$P_{MSDE} = \left(\frac{1800 \text{ rpm} - 1745 \text{ rpm}}{1800 \text{ rpm} - 1735 \text{ rpm}} \right) (15 \text{ HP}) = \underline{12.69230769 \text{ HP}}$$

Ahora se calculara la eficiencia a la cual esta operando este motor:

$$\eta = \left(\frac{(0.746 \text{ Kw}) (12.69230769 \text{ HP})}{\sqrt{3} (443.2V) (15 \text{ amp}) (0.803)} \right) = \frac{9.468461537 \text{ Kw}}{9.246283036 \text{ Kw}}$$

$$\eta = (1.024028953) (100) = \underline{102.4028953\%}$$

7.3 ANALISIS DE LOS DATOS RECOPIRADOS.

7.3.1 MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN UNO (MOTOR I₁).

7.3.1.1 CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN.

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Este motor se encuentra ubicado en el área de maquinado, el cual es lo suficientemente espacioso, además de que cuenta con una buena ventilación, debido a lo anterior se tiene presente una temperatura ambiente de 28.3 °C en el área específica en el cual se encuentra operando el motor. Por otra parte en la placa de datos del MOTOR I₁, se encontró que la temperatura ambiente es de 40 °C, este dato representa a la temperatura máxima del medio ambiente que puede rodear al motor y que esta en contacto con sus partes exteriores; según el dato anterior, la temperatura ambiente medida de 28.3 °C se mantiene dentro del rango de 40°C.

Debido a lo anterior, aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica, ya que dicho lugar es lo suficientemente espacioso y que además cuenta con una buena ventilación que logra mantener el lugar a una buena temperatura, para que así no afecte demasiado a la temperatura que el motor genera al estar operando, evitando de esta manera un sobrecalentamiento en el mismo.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra:

El problema básico en este punto vendría si es que el motor se encuentra sucio exteriormente, ya que esto provocaría que dicho motor sufra de un sobrecalentamiento. Esto traería consigo principalmente una baja en la eficiencia, por lo que se tendría un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, provocando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del motor trifásico de inducción uno (MOTOR I₁), el grado de suciedad con el que cuenta (acumulación de la mezcla de polvo y aceite, además de pedazos de cáscara de pintura que caen de la tubería) este motor no es excesivo, por lo que esto no podría provocar un sobrecalentamiento en el mismo, evitando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra la ventilación:

El motor trifásico de inducción uno (MOTOR I₁), es un motor del tipo de enclaustramiento cerrado, enfriado por un ventilador interno, colocado en la parte posterior del motor y el cual es acoplado al rotor, de tal manera que cuando este gira, también lo hace el ventilador, provocando así que se tenga una circulación de aire adentro del motor, con el fin de evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores (pérdidas por efecto Joule) del motor y dañar los aislamientos, trayendo como una probable consecuencia, que el motor se quemé. El MOTOR I₁ no llega a ser totalmente hermético, ya que cuenta con una maya (la cual tiene orificios de ventilación) en la parte posterior del motor; en la maya de ventilación se encontró una acumulación de la mezcla entre polvo y aceite en los orificios de ventilación, pero no llega a ser excesiva, provocando que se tenga una buena circulación de aire adentro del motor, evitando sobrecalentamientos que puedan llevar a tener pérdidas por efecto Joule.

Por otro lado, en el caso de que el ventilador no funcione adecuadamente, también se tienen las pérdidas por fricción y ventilación, las cuales son provocadas por el mal alineamiento del ventilador en el rotor, lo que provocara que se tengan roces por parte del ventilador con otros componentes internos del motor. El acumulamiento de estas pérdidas junto con las de efecto Joule, traerán consigo una disminución en la eficiencia, por lo que el motor desperdiciará la energía eléctrica que consume en dichas pérdidas.

Como la condición en la que se encontró al ventilador del MOTOR I₁ fue buena, además de que la circulación de aire a través de los orificios de ventilación en la maya del motor también es buena, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

La temperatura del motor:-

La temperatura máxima a la cual puede trabajar un motor queda limitada por la temperatura correspondiente a la clase de aislamiento con el que están impregnados los devanados del motor. La temperatura se obtiene sumando la temperatura ambiente más la temperatura propia de funcionamiento del motor, así el motor trifásico de inducción uno en su placa de datos trae que la clase de su aislamiento es "B", y según la tabla A2 (que se encuentra en el anexo "A") este tipo de aislamiento soporta una temperatura de 130 °C, entonces la temperatura máxima a la cual puede trabajar el MOTOR I₁ es de 130 °C. Contando con la lectura de la temperatura ambiente de 28.3 °C y la temperatura medida en la estructura metálica externa del motor de 44 °C, la temperatura a la cual esta trabajando el MOTOR I₁ es de:

$$T = T_{\text{ambiente}} + T_{\text{motor}} = 28.3 \text{ °C} + 44 \text{ °C} = \underline{72.3 \text{ °C}}$$

Nota:

La temperatura de 44 °C medida en la estructura metálica exterior del motor puede tener un ligero error, ya que la temperatura real sería la medida en los devanados del estator del motor por medio de termopares, los cuales hacen contacto en dichos devanados y se conectan al aparato de medición en cuestión.

Como la temperatura de 72.3 °C no llega al límite de la temperatura máxima de 130 °C, entonces el motor no presenta un sobrecalentamiento peligroso que llegue a quemar el motor.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras.

Estos elementos que forman parte de un motor, suelen desgastarse por el uso excesivo de dicho motor y debido a esto se provocan las pérdidas por fricción y ventilación que afectan directamente a la eficiencia, provocando que esta se reduzca. En el caso de que un motor conste de cojinetes en lugar de valeros o chumaceras, si estos se encuentran en mal estado físico o si su lubricación no es buena (insuficiente o excesiva) entonces pueden ser la causa de pérdidas por fricción y ventilación, trayendo como consecuencia también una disminución en la eficiencia del motor.

El motor trifásico de inducción uno (MOTOR I₁) consta de estos dos aditamentos, de un balero en la parte frontal y de un cojinete en la parte posterior del motor, debido a que se encontraron en buenas condiciones estos elementos, no se tiene aquí una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor:

Si el eje de un motor no esta en buenas condiciones, debido a una sobrecarga o simplemente al mal uso del mismo, entonces esto provocara pérdidas por fricción y ventilación, además de que como consecuencia dañaría los valeros o chumaceras o en otro caso los cojinetes si es que el motor consta de estos. Con el incremento de las pérdidas por fricción y ventilación más allá de lo normal a consecuencia de tener el eje de un motor dañado, se tendría obviamente una disminución en la eficiencia del motor, por lo que una parte de la energía eléctrica que el motor consume se irá hacia las pérdidas por fricción y ventilación en vez de formar parte de la potencia mecánica y ayudar a realizar un trabajo útil.

Como el eje del motor se encontró en buenas condiciones, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

3) Información sobre la carga que acciona el motor:

Si un motor presenta una mala alineación con respecto a su carga entonces se presentarán esfuerzos de torsión en la flecha del motor, lo que provocara pérdidas por fricción y ventilación en los valeros o chumaceras, produciendo que el motor no opere a su máxima eficiencia, además de esto se puede presentar el caso extremo de que una mala alineación cause daños mayores en el motor e incluso en la carga. Si los elementos que componen al sistema de acoplamiento no se encuentran en buenas condiciones o simplemente están mal alineados, entonces pueden ocasionar daños severos al motor, además de representar una carga inútil para dicho motor. Provocando así desperdicios en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, sufriendo también un acortamiento en su periodo de vida.

En este caso del motor trifásico de inducción uno (MOTOR I₁), el acoplamiento se encontró en buenas condiciones, por lo que aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.1.2 EL TIEMPO DE OPERACIÓN, ASÍ COMO EL HISTORIAL DE REPARACIONES.

Según los datos recopilados en la tabla 10: el Motor I₁ lleva en operación 24 años y cinco meses y no ha sido reparado; el Motor I₂ e I₃ llevan en operación 19 años y seis meses y no han sido reparados; los Motores I₅ e I₆ llevan en operación casi 28 años y no han sido reparados. Debido a los resultados anteriores se debe tener en cuenta que los motores viejos o simplemente motores que por su uso han depreciado sus características de operación, pueden justificar su sustitución por motores normalizados y de alta eficiencia, ya que los motores que tienen años en operación sufren de deterioros en sus componentes, provocando que sus características nominales de operación ya no sean las mismas, por lo que estos motores suelen desperdiciar la energía eléctrica que consumen. Presentándose de esta manera una buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del Motor I₄, que es de reciente adquisición y por lo mismo no ha sido reparado todavía, no presenta aún deterioro en sus componentes, por lo que opera a sus características nominales.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo que se le tiene programado a cada motor es de 2 años, tal vez esto se deba a la producción de la empresa, sin embargo es recomendable desmontarlos al menos una vez al año para realizarles su mantenimiento completo de todos sus componentes. Ya que con la regularidad con la que se realice esto, será posible localizar fallas antes de que lleguen a un grado mayor y puedan llegar a afectar al motor de manera más importante.

7.3.1.3 HORARIO DE OPERACIÓN.

Por medio de los horarios en los que operan los motores, se podrá saber si es posible tener algunos inconvenientes que afecten el buen consumo de la energía eléctrica por parte de Herramientas Klein S.A de C.V, empresa en la cual se encuentra operando el motor trifásico de inducción uno (MOTOR I₁). Uno de esos inconvenientes que se pueden presentar, es de que si la mayoría de los motores son arrancados al mismo tiempo se suele tener un recargo en el recibo del consumo de la energía eléctrica por "demanda máxima", esto también pasa cuando la mayoría de los motores se encuentran operando al mismo tiempo junto con otros equipos eléctricos dentro del periodo de punta, es decir, en la parte del día en el cual normalmente se tiene el más alto consumo en la energía eléctrica (normalmente este periodo de punta se presenta de las 18:00 hrs a las 22:00 hrs, cuando no se aplica el horario de varano, porque en este caso el periodo de punta se recorre una hora, es decir de las 18:00 hrs a las 19:00 hrs, para que quede de las 19:00 hrs a las 22:00 hrs).

En la tabla 16, se puede observar que todos los motores, así como las máquinas a las que pertenecen operan en un horario específico de 16:00 a las 22:00 hrs, el cual se encuentra dentro del periodo de punta, además de que dentro de este periodo entra en funcionamiento todo el sistema de alumbrado de la empresa, por lo que se tiene un consumo más de energía eléctrica y de demanda máxima. Debido a esto, aquí se tiene una oportunidad potencial de ahorro de energía eléctrica.

7.3.1.4 EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA ACTUAL.

Por otro lado, si un motor es acoplado a una carga, la cual se encuentra arriba o por debajo de la potencia nominal de salida del motor, es decir, si el motor opera sobrecargado o a carga reducida, entonces la eficiencia en el motor cae por debajo de su eficiencia nominal, además de que el factor de potencia del motor también se ve afectado, provocando así un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica.

La explicación anterior es la razón por la cual la eficiencia y el factor de potencia del motor trifásico de inducción uno sean bajos, la eficiencia de 69.0710011% y el factor de potencia de 0.479. El caso que se presenta aquí es que el MOTOR I₁, el cual es de 20HP, se encuentra operando a sólo 7.5HP, es decir el motor esta desperdiciando 12.5HP, por lo que se puede decir que el MOTOR I₁ esta sobredimensionado, ya que se encuentra operando a carga reducida. Esto provoca que la eficiencia y el factor de potencia sean bajos, trayendo como consecuencia un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica, por lo que esto representa una muy buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.2. MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN DOS (MOTOR I₂).

7.3.2.1 CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN.

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Este motor se encuentra ubicado en el área de maquinado, el cual es lo suficientemente espacioso, además de que cuenta con una buena ventilación, debido a lo anterior se tiene presente una temperatura ambiente de 25.2 °C en el área específica en el cual se encuentra operando el motor. Por otra parte en la placa de datos del MOTOR I₂, se encontró que la temperatura ambiente es de 40 °C, este dato representa a la temperatura máxima del medio ambiente que puede rodear al motor y que esta en contacto con sus partes exteriores; según el dato anterior, la temperatura ambiente medida de 25.2 °C se mantiene dentro del rango de 40°C.

Debido a lo anterior, aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica, ya que dicho lugar es lo suficientemente espacioso y que además cuenta con una buena ventilación que logra mantener el lugar a una buena temperatura, para que así no afecte demasiado a la temperatura que el motor genera al estar operando, evitando de esta manera un sobrecalentamiento en le mismo.

2) Información sobre el motor:

Estado de limpieza en el que se encuentra:

El problema básico en este punto vendría si es que el motor se encuentra sucio exteriormente, ya que esto provocaría que dicho motor sufra de un sobrecalentamiento. Esto traería consigo principalmente una baja en la eficiencia, por lo que se tendría un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, provocando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del motor trifásico de inducción dos (MOTOR I₂), el grado de suciedad con el que cuenta (acumulación de la mezcla de polvo y aceite) este motor no es excesivo, por lo que esto no podría provocar un sobrecalentamiento en el mismo, evitando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra la ventilación:

El motor trifásico de inducción dos (MOTOR I₂), es un motor del tipo de enclaustramiento cerrado, enfriado por un ventilador interno, colocado en la parte posterior del motor y el cual es acoplado al rotor, de tal manera que cuando este gira, también lo hace el ventilador, provocando así que se tenga una circulación de aire adentro del motor; con el fin de evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores (pérdidas por efecto Joule) del motor y dañar los aislamientos, trayendo como una probable consecuencia, que el motor se quemé. El MOTOR I₂ no llega a ser totalmente hermético, ya que cuenta con una maya (la cual tiene orificios de ventilación) en la parte posterior del motor; en la maya de ventilación se encontró una acumulación de la mezcla entre polvo y aceite en los orificios de ventilación, pero no llega a ser excesiva, provocando que se tenga una buena circulación de aire adentro del motor, evitando sobrecalentamientos que puedan llevar a tener pérdidas por efecto Joule.

Por otro lado, en el caso de que el ventilador no funcione adecuadamente, también se tienen las pérdidas por fricción y ventilación, las cuales son provocadas por el mal alineamiento del ventilador en el rotor, lo que provocara que se tengan roces por parte del ventilador con otros componentes internos del motor. El acumulamiento de estas pérdidas junto con las de efecto Joule, traerán consigo una disminución en la eficiencia, por lo que el motor desperdiciará la energía eléctrica que consume en dichas pérdidas.

Como la condición en la que se encontró al ventilador del MOTOR I₂ fue buena, además de que la circulación de aire a través de los orificios de ventilación en la maya del motor también es buena, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

La temperatura del motor:

La temperatura máxima a la cual puede trabajar un motor queda limitada por la temperatura correspondiente a la clase de aislamiento con el que están impregnados los devanados del motor. La temperatura se obtiene sumando la temperatura ambiente más la temperatura propia de funcionamiento del motor, así el motor trifásico de inducción dos en su placa de datos trae que la clase de su aislamiento es "B", y según la tabla A2 (que se encuentra en el anexo "A") este tipo de aislamiento soporta una temperatura de 130 °C, entonces la temperatura máxima a la cual puede trabajar el MOTOR I₂ es de 130 °C. Contando con la lectura de la temperatura ambiente de 25.2 °C y la temperatura medida en la estructura metálica externa del motor de 29.4 °C, la temperatura a la cual esta trabajando el MOTOR I₂ es de:

$$T = T_{\text{ambiente}} + T_{\text{motor}} = 25.2 \text{ °C} + 29.4 \text{ °C} = \underline{54.6 \text{ °C}}$$

Nota:

La temperatura de 29.4 °C medida en la estructura metálica exterior del motor puede tener un ligero error, ya que la temperatura real sería la medida en los devanados del estator del motor por medio de termopares, los cuales hacen contacto en dichos devanados y se conectan al aparato de medición en cuestión.

Como la temperatura de 54.6 °C no llega al límite de la temperatura máxima de 130 °C, entonces el motor no presenta un sobrecalentamiento peligroso que llegue a quemar el motor.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras.

Estos elementos que forman parte de un motor, suelen desgastarse por el uso excesivo de dicho motor y debido a esto se provocan las pérdidas por fricción y ventilación que afectan directamente a la eficiencia, provocando que esta se reduzca. En el caso de que un motor conste de cojinetes en lugar de valeros o chumaceras, si estos se encuentran en mal estado físico o si su lubricación no es buena (insuficiente o excesiva) entonces pueden ser la causa de pérdidas por fricción y ventilación, trayendo como consecuencia también una disminución en la eficiencia del motor.

El motor trifásico de inducción dos (MOTOR I₂) consta de estos dos aditamentos, de un balero en la parte frontal y de un cojinete en la parte posterior del motor, debido a que se encontraron en buenas condiciones estos elementos, no se tiene aquí una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor:

Si el eje de un motor no esta en buenas condiciones, debido a una sobrecarga o simplemente al mal uso del mismo, entonces esto provocara pérdidas por fricción y ventilación, además de que como consecuencia dañaría los valeros o chumaceras o en otro caso los cojinetes si es que el motor consta de estos. Con el incremento de las pérdidas por fricción y ventilación más allá de lo normal a consecuencia de tener el eje de un motor dañado, se tendría obviamente una disminución en la eficiencia del motor, por lo que una parte de la energía eléctrica que el motor consume se irá hacia las pérdidas por fricción y ventilación en vez de formar parte de la potencia mecánica y ayudar a realizar un trabajo útil.

Como el eje del motor se encontró en buenas condiciones, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

3) Información sobre la carga que acciona el motor.

Si un motor presenta una mala alineación con respecto a su carga entonces se presentarán esfuerzos de torsión en la flecha del motor, lo que provocara pérdidas por fricción y ventilación en los valeros o chumaceras, produciendo que el motor no opere a su máxima eficiencia, además de esto se puede presentar el caso extremo de que una mala alineación cause daños mayores en el motor e incluso en la carga. Si los elementos que componen al sistema de acoplamiento no se encuentran en buenas condiciones o simplemente están mal alineados, entonces pueden ocasionar daños severos al motor, además de representar una carga inútil para dicho motor. Provocando así desperdicios en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, sufriendo también un acortamiento en su periodo de vida.

En este caso del motor trifásico de inducción dos (MOTOR I₂), el acoplamiento se encontró en buenas condiciones, por lo que aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.2.2 EL TIEMPO DE OPERACIÓN, ASÍ COMO EL HISTORIAL DE REPARACIONES.

Según los datos recopilados en la tabla 10: el Motor I₁ lleva en operación 24 años y cinco meses y no ha sido reparado; el Motor I₂ e I₃ llevan en operación 19 años y seis meses y no han sido reparados; los Motores I₅ e I₆ llevan en operación casi 28 años y no han sido reparados. Debido a los resultados anteriores se debe tener en cuenta que los motores viejos o simplemente motores que por su uso han depreciado sus características de operación, pueden justificar su sustitución por motores normalizados y de alta eficiencia, ya que los motores que tienen años en operación sufren de deterioros en sus componentes, provocando que sus características nominales de operación ya no sean las mismas, por lo que estos motores suelen desperdiciar la energía eléctrica que consumen. Presentándose de esta manera una buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del Motor L₁, que es de reciente adquisición y por lo mismo no ha sido reparado todavía, no presenta aún deterioro en sus componentes, por lo que opera a sus características nominales.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo que se le tiene programado a cada motor es de 2 años, talvez esto se deba a la producción de la empresa, sin embargo es recomendable desmontarlos al menos una vez al año para realizarles su mantenimiento completo de todos sus componentes. Ya que con la regularidad con la que se realice esto, será posible localizar fallas antes de que lleguen a un grado mayor y puedan llegar a afectar al motor de manera más importante.

7.3.2.3 HORARIO DE OPERACIÓN.

Por medio de los horarios en los que operan los motores, se podrá saber si es posible tener algunos inconvenientes que afecten el buen consumo de la energía eléctrica por parte de Herramientas Klein S.A de C.V, empresa en la cual se encuentra operando el motor trifásico de inducción dos (MOTOR I₂). Uno de esos inconvenientes que se pueden presentar, es de que si la mayoría de los motores son arrancados al mismo tiempo se suele tener un recargo en el recibo del consumo de la energía eléctrica por "demanda máxima", esto también pasa cuando la mayoría de los motores se encuentran operando al mismo tiempo junto con otros equipos eléctricos dentro del periodo de punta, es decir, en la parte del día en el cual normalmente se tiene el más alto consumo en la energía eléctrica (normalmente este periodo de punta se presenta de las 18:00 hrs a las 22:00 hrs, cuando no se aplica el horario de varano, porque en este caso el periodo de punta se recorre una hora, es decir de las 18:00 hrs a las 19:00 hrs, para que quede de las 19:00 hrs a las 22:00 hrs).

En la tabla 16, se puede observar que todos los motores, así como las máquinas a las que pertenecen operan en un horario específico de 16:00 a las 22:00 hrs, el cual se encuentra dentro del periodo de punta, además de que dentro de este periodo entra en funcionamiento todo el sistema de alumbrado de la empresa, por lo que se tiene un consumo más de energía eléctrica y de demanda máxima. Debido a esto, aquí se tiene una oportunidad potencial de ahorro de energía eléctrica.

7.3.2.4 EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA ACTUAL.

Por otro lado, si un motor es acoplado a una carga, la cual se encuentra arriba o por debajo de la potencia nominal de salida del motor, es decir, si el motor opera sobrecargado o a carga reducida, entonces la eficiencia en el motor cae por debajo de su eficiencia nominal, además de que el factor de potencia del motor también se ve afectado, provocando así un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica.

La explicación anterior es la razón por la cual la eficiencia y el factor de potencia del motor trifásico de inducción dos sean bajos, la eficiencia de 75.44560971% y el factor de potencia de 0.638. El caso que se presenta aquí es que el MOTOR I₂, el cual es de 40HP, se encuentra operando a sólo 11.76470588HP, es decir el motor esta desperdiciando 28.23529412HP, por lo que se puede decir que el MOTOR I₂ esta sobredimensionado, ya que se encuentra operando a carga reducida. Esto provoca que la eficiencia y el factor de potencia sean bajos, trayendo como consecuencia un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica, por lo que esto representa una muy buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.3 MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN TRES (MOTOR I₃).

7.3.3.1 CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN.

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Este motor se encuentra ubicado en el área de maquinado, el cual es lo suficientemente espacioso, además de que cuenta con una buena ventilación, debido a lo anterior se tiene presente una temperatura ambiente de 25.2 °C en el área específica en el cual se encuentra operando el motor. Por otra parte en la placa de datos del MOTOR I₃, se encontró que la temperatura ambiente es de 40 °C, este dato representa a la temperatura máxima del medio ambiente que puede rodear al motor y que esta en contacto con sus partes exteriores; según el dato anterior, la temperatura ambiente medida de 25.2 °C se mantiene dentro del rango de 40°C.

Debido a lo anterior, aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica, ya que dicho lugar es lo suficientemente espacioso y que además cuenta con una buena ventilación que logra mantener el lugar a una buena temperatura, para que así no afecte demasiado a la temperatura que el motor genera al estar operando, evitando de esta manera un sobrecalentamiento en le mismo.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra:

El problema básico en este punto vendría si es que el motor se encuentra sucio exteriormente, ya que esto provocaría que dicho motor sufra de un sobrecalentamiento. Esto traería consigo principalmente una baja en la eficiencia, por lo que se tendría un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, provocando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del motor trifásico de inducción tres (MOTOR I₃), el grado de suciedad con el que cuenta (acumulación de la mezcla de polvo y aceite) este motor no es excesivo, por lo que esto no podría provocar un sobrecalentamiento en el mismo, evitando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra la ventilación:

El motor trifásico de inducción tres (MOTOR I₃), es un motor del tipo de enclaustramiento cerrado, enfriado por un ventilador interno, colocado en la parte posterior del motor y el cual es acoplado al rotor, de tal manera que cuando este gira, también lo hace el ventilador, provocando así que se tenga una circulación de aire adentro del motor, con el fin de evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores (pérdidas por efecto Joule) del motor y dañar los aislamientos, trayendo como una probable consecuencia, que el motor se quemé. El MOTOR I₃ no llega a ser totalmente hermético, ya que cuenta con una maya (la cual tiene orificios de ventilación) en la parte posterior del motor; en la maya de ventilación se encontró libre de polvo en los orificios de ventilación, provocando que se tenga una buena circulación de aire adentro del motor, evitando sobrecalentamientos que puedan llevar a tener pérdidas por efecto Joule.

Por otro lado, en el caso de que el ventilador no funcione adecuadamente, también se tienen las pérdidas por fricción y ventilación, las cuales son provocadas por el mal alineamiento del ventilador en el rotor, lo que provocara que se tengan roces por parte del ventilador con otros componentes internos del motor. El acumulamiento de estas pérdidas junto con las de efecto Joule, traerán consigo una disminución en la eficiencia, por lo que el motor desperdiciará la energía eléctrica que consume en dichas pérdidas.

Como la condición en la que se encontró al ventilador del MOTOR I₃ fue buena, además de que la circulación de aire a través de los orificios de ventilación en la maya del motor también es buena, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

La temperatura del motor:

La temperatura máxima a la cual puede trabajar un motor queda limitada por la temperatura correspondiente a la clase de aislamiento con el que están impregnados los devanados del motor. La temperatura se obtiene sumando la temperatura ambiente más la temperatura propia de funcionamiento del motor, así el motor trifásico de inducción tres en su placa de datos trae que la clase de su aislamiento es "B", y según la tabla A2 (que se encuentra en el anexo "A") este tipo de aislamiento soporta una temperatura de 130 °C, entonces la temperatura máxima a la cual puede trabajar el MOTOR I₃ es de 130 °C. Contando con la lectura de la temperatura ambiente de 25.2 °C y la temperatura medida en la estructura metálica externa del motor de 41.7 °C, la temperatura a la cual esta trabajando el MOTOR I₃ es de:

$$T = T_{\text{ambiente}} + T_{\text{motor}} = 25.2 \text{ °C} + 41.7 \text{ °C} = \underline{66.9 \text{ °C}}$$

Nota:

La temperatura de 41.7 °C medida en la estructura metálica exterior del motor puede tener un ligero error, ya que la temperatura real sería la medida en los devanados del estator del motor por medio de termopares, los cuales hacen contacto en dichos devanados y se conectan al aparato de medición en cuestión.

Como la temperatura de 66.9 °C no llega al límite de la temperatura máxima de 130 °C, entonces el motor no presenta un sobrecalentamiento peligroso que llegue a quemar el motor.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras.

Estos elementos que forman parte de un motor, suelen desgastarse por el uso excesivo de dicho motor y debido a esto se provocan las pérdidas por fricción y ventilación que afectan directamente a la eficiencia, provocando que esta se reduzca. En el caso de que un motor conste de cojinetes en lugar de valeros o chumaceras, si estos se encuentran en mal estado físico o si su lubricación no es buena (insuficiente o excesiva) entonces pueden ser la causa de pérdidas por fricción y ventilación, trayendo como consecuencia también una disminución en la eficiencia del motor.

El motor trifásico de inducción tres (MOTOR I₃) consta de estos dos aditamentos, de un balero en la parte frontal y de un cojinete en la parte posterior del motor, debido a que se encontraron en buenas condiciones estos elementos, no se tiene aquí una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor:

Si el eje de un motor no esta en buenas condiciones, debido a una sobrecarga o simplemente al mal uso del mismo, entonces esto provocara pérdidas por fricción y ventilación, además de que como consecuencia dañaría los valeros o chumaceras o en otro caso los cojinetes si es que el motor consta de estos. Con el incremento de las pérdidas por fricción y ventilación más allá de lo normal a consecuencia de tener el eje de un motor dañado, se tendría obviamente una disminución en la eficiencia del motor, por lo que una parte de la energía eléctrica que el motor consume se irá hacia las pérdidas por fricción y ventilación en vez de formar parte de la potencia mecánica y ayudar a realizar un trabajo útil.

Como el eje del motor se encontró en buenas condiciones, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

3) Información sobre la carga que acciona el motor.

Si un motor presenta una mala alineación con respecto a su carga entonces se presentarán esfuerzos de torsión en la flecha del motor, lo que provocara pérdidas por fricción y ventilación en los valeros o chumaceras, produciendo que el motor no opere a su máxima eficiencia, además de esto se puede presentar el caso extremo de que una mala alineación cause daños mayores en el motor e incluso en la carga. Si los elementos que componen al sistema de acoplamiento no se encuentran en buenas condiciones o simplemente están mal alineados, entonces pueden ocasionar daños severos al motor, además de representar una carga inútil para dicho motor. Provocando así desperdicios en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, sufriendo también un acortamiento en su periodo de vida.

En este caso del motor trifásico de inducción tres (MOTOR I₃), el acoplamiento se encontró en buenas condiciones, por lo que aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.3.2 EL TIEMPO DE OPERACIÓN, ASÍ COMO EL HISTORIAL DE REPARACIONES.

Según los datos recopilados en la tabla 10: el Motor I₁ lleva en operación 24 años y cinco meses y no ha sido reparado; el Motor I₂ e I₃ llevan en operación 19 años y seis meses y no han sido reparados; los Motores I₅ e I₆ llevan en operación casi 28 años y no han sido reparados. Debido a los resultados anteriores se debe tener en cuenta que los motores viejos o simplemente motores que por su uso han depreciado sus características de operación, pueden justificar su sustitución por motores normalizados y de alta eficiencia, ya que los motores que tienen años en operación sufren de deterioros en sus componentes, provocando que sus características nominales de operación ya no sean las mismas, por lo que estos motores suelen desperdiciar la energía eléctrica que consumen. Presentándose de esta manera una buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del Motor L, que es de reciente adquisición y por lo mismo no ha sido reparado todavía, no presenta aún deterioro en sus componentes, por lo que opera a sus características nominales.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo que se le tiene programado a cada motor es de 2 años, talvez esto se deba a la producción de la empresa, sin embargo es recomendable desmontarlos al menos una vez al año para realizarles su mantenimiento completo de todos sus componentes. Ya que con la regularidad con la que se realice esto, será posible localizar fallas antes de que lleguen a un grado mayor y puedan llegar a afectar al motor de manera más importante.

7.3.3.3 HORARIO DE OPERACIÓN.

Por medio de los horarios en los que operan los motores, se podrá saber si es posible tener algunos inconvenientes que afecten el buen consumo de la energía eléctrica por parte de Herramientas Klein S.A de C.V, empresa en la cual se encuentra operando el motor trifásico de inducción tres (MOTOR I₃). Uno de esos inconvenientes que se pueden presentar, es de que si la mayoría de los motores son arrancados al mismo tiempo se suele tener un recargo en el recibo del consumo de la energía eléctrica por "demanda máxima", esto también pasa cuando la mayoría de los motores se encuentran operando al mismo tiempo junto con otros equipos eléctricos dentro del periodo de punta, es decir; en la parte del día en el cual normalmente se tiene el más alto consumo en la energía eléctrica (normalmente este periodo de punta se presenta de las 18:00 hrs a las 22:00 hrs, cuando no se aplica el horario de varano, porque en este caso el periodo de punta se recorre una hora, es decir de las 18:00 hrs a las 19:00 hrs, para que quede de las 19:00 hrs a las 22:00 hrs).

En la tabla 16, se puede observar que todos los motores, así como las máquinas a las que pertenecen operan en un horario específico de 16:00 a las 22:00 hrs, el cual se encuentra dentro del periodo de punta, además de que dentro de este periodo entra en funcionamiento todo el sistema de alumbrado de la empresa, por lo que se tiene un consumo más de energía eléctrica y de demanda máxima. Debido a esto, aquí se tiene una oportunidad potencial de ahorro de energía eléctrica.

7.3.3.4 EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA ACTUAL.

Por otro lado, si un motor es acoplado a una carga, la cual se encuentra arriba o por debajo de la potencia nominal de salida del motor, es decir, si el motor opera sobrecargado o a carga reducida, entonces la eficiencia en el motor cae por debajo de su eficiencia nominal, además de que el factor de potencia del motor también se ve afectado, provocando así un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica.

La explicación anterior es la razón por la cual la eficiencia y el factor de potencia del motor trifásico de inducción tres sean bajos, la eficiencia de 48.03828503% y el factor de potencia de 0.762. El caso que se presenta aquí es que el MOTOR I₃, el cual es de 15HP, se encuentra operando a sólo 6.818181818HP, es decir el motor esta desperdiciando 8.181818182HP, por lo que se puede decir que el MOTOR I₃ esta sobredimensionado, ya que se encuentra operando a carga reducida. Esto provoca que la eficiencia y el factor de potencia sean bajos, trayendo como consecuencia un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica, por lo que esto representa una muy buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.4 MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN CUATRO (MOTOR I₄).

7.3.4.1 CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN.

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Este motor se encuentra ubicado en el área de maquinado, el cual es lo suficientemente espacioso, además de que cuenta con una buena ventilación, debido a lo anterior se tiene presente una temperatura ambiente de 28.3 °C en el área específica en el cual se encuentra operando el motor. Por otra parte en la placa de datos del MOTOR I₄, se encontró que la temperatura ambiente es de 40 °C, este dato representa a la temperatura máxima del medio ambiente que puede rodear al motor y que esta en contacto con sus partes exteriores; según el dato anterior, la temperatura ambiente medida de 28.3 °C se mantiene dentro del rango de 40°C.

Debido a lo anterior, aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica, ya que dicho lugar es lo suficientemente espacioso y que además cuenta con una buena ventilación que logra mantener el lugar a una buena temperatura, para que así no afecte demasiado a la temperatura que el motor genera al estar operando, evitando de esta manera un sobrecalentamiento en le mismo.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra:

El problema básico en este punto vendría si es que el motor se encuentra sucio exteriormente, ya que esto provocaría que dicho motor sufra de un sobrecalentamiento. Esto traería consigo principalmente una baja en la eficiencia, por lo que se tendría un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, provocando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del motor trifásico de inducción cuatro (MOTOR I₄), el grado de suciedad con el que cuenta (acumulación de polvo y rebaba de metal) este motor no es excesivo, por lo que esto no podría provocar un sobrecalentamiento en el mismo, evitando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra la ventilación:

El motor trifásico de inducción cuatro (MOTOR I₄), es un motor del tipo de enclaustramiento cerrado, enfriado por un ventilador interno, colocado en la parte posterior del motor y el cual es acoplado al rotor, de tal manera que cuando este gira, también lo hace el ventilador, provocando así que se tenga una circulación de aire adentro del motor, con el fin de evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores (pérdidas por efecto Joule) del motor y dañar los aislamientos, trayendo como una probable consecuencia, que el motor se queme. El MOTOR I₄ no llega a ser totalmente hermético, ya que cuenta con una maya (la cual tiene orificios de ventilación) en la parte posterior del motor; en la maya de ventilación se encontró una acumulación de la mezcla entre polvo y aceite en los orificios de ventilación, pero no llega a ser excesiva, provocando que se tenga una buena circulación de aire adentro del motor, evitando sobrecalentamientos que puedan llevar a tener pérdidas por efecto Joule.

Por otro lado, en el caso de que el ventilador no funcione adecuadamente, también se tienen las pérdidas por fricción y ventilación, las cuales son provocadas por el mal alineamiento del ventilador en el rotor, lo que provocara que se tengan roces por parte del ventilador con otros componentes internos del motor. El acumulamiento de estas pérdidas junto con las de efecto Joule, traerán consigo una disminución en la eficiencia, por lo que el motor desperdiciará la energía eléctrica que consume en dichas pérdidas.

Como la condición en la que se encontró al ventilador del MOTOR L₄ fue buena, además de que la circulación de aire a través de los orificios de ventilación en la maya del motor también es buena, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

La temperatura del motor:

La temperatura máxima a la cual puede trabajar un motor queda limitada por la temperatura correspondiente a la clase de aislamiento con el que están impregnados los devanados del motor. La temperatura se obtiene sumando la temperatura ambiente más la temperatura propia de funcionamiento del motor, así el motor trifásico de inducción cuatro en su placa de datos trae que la clase de su aislamiento es "F", y según la tabla A2 (que se encuentra en el anexo "A") este tipo de aislamiento soporta una temperatura de 155 °C, entonces la temperatura máxima a la cual puede trabajar el MOTOR L₄ es de 155 °C. Contando con la lectura de la temperatura ambiente de 28.3 °C y la temperatura medida en la estructura metálica externa del motor de 28.8 °C, la temperatura a la cual esta trabajando el MOTOR L₄ es de:

$$T = T_{\text{ambiente}} + T_{\text{motor}} = 28.3 \text{ °C} + 28.8 \text{ °C} = \underline{57.1 \text{ °C}}$$

Nota:

La temperatura de 57.1 °C medida en la estructura metálica exterior del motor puede tener un ligero error, ya que la temperatura real sería la medida en los devanados del estator del motor por medio de termopares, los cuales hacen contacto en dichos devanados y se conectan al aparato de medición en cuestión.

Como la temperatura de 57.1 °C no llega al límite de la temperatura máxima de 155 °C, entonces el motor no presenta un sobrecalentamiento peligroso que llegue a quemar el motor.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras.

Estos elementos que forman parte de un motor, suelen desgastarse por el uso excesivo de dicho motor y debido a esto se provocan las pérdidas por fricción y ventilación que afectan directamente a la eficiencia, provocando que esta se reduzca. En el caso de que un motor conste de cojinetes en lugar de valeros o chumaceras, si estos se encuentran en mal estado físico o si su lubricación no es buena (insuficiente o excesiva) entonces pueden ser la causa de pérdidas por fricción y ventilación, trayendo como consecuencia también una disminución en la eficiencia del motor.

El motor trifásico de inducción cuatro (MOTOR L₄) consta de estos dos aditamentos, de un balero en la parte frontal y de un cojinete en la parte posterior del motor, debido a que se encontraron en buenas condiciones estos elementos, no se tiene aquí una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor:

Si el eje de un motor no esta en buenas condiciones, debido a una sobrecarga o simplemente al mal uso del mismo, entonces esto provocara pérdidas por fricción y ventilación, además de que como consecuencia dañaría los valeros o chumaceras o en otro caso los cojinetes si es que el motor consta de estos. Con el incremento de las pérdidas por fricción y ventilación más allá de lo normal a consecuencia de tener el eje de un motor dañado, se tendría obviamente una disminución en la eficiencia del motor, por lo que una parte de la energía eléctrica que el motor consume se irá hacia las pérdidas por fricción y ventilación en vez de formar parte de la potencia mecánica y ayudar a realizar un trabajo útil.

Como el eje del motor se encontró en muy buenas condiciones, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

3) Información sobre la carga que acciona el motor.

Si un motor presenta una mala alineación con respecto a su carga entonces se presentarán esfuerzos de torsión en la flecha del motor, lo que provocara pérdidas por fricción y ventilación en los valeros o chumaceras, produciendo que el motor no opere a su máxima eficiencia, además de esto se puede presentar el caso extremo de que una mala alineación cause daños mayores en el motor e incluso en la carga. Si los elementos que componen al sistema de acoplamiento no se encuentran en buenas condiciones o simplemente están mal alineados, entonces pueden ocasionar daños severos al motor, además de representar una carga inútil para dicho motor. Provocando así desperdicios en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, sufriendo también un acortamiento en su periodo de vida.

En este caso del motor trifásico de inducción cuatro (MOTOR L₄), el acoplamiento se encontró en muy buenas condiciones, por lo que aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.4.2 EL TIEMPO DE OPERACIÓN, ASÍ COMO EL HISTORIAL DE REPARACIONES.

Según los datos recopilados en la tabla 10: el Motor I₁ lleva en operación 24 años y cinco meses y no ha sido reparado; el Motor I₂ e I₃ llevan en operación 19 años y seis meses y no han sido reparados; los Motores I₅ e I₆ llevan en operación casi 28 años y no han sido reparados. Debido a los resultados anteriores se debe tener en cuenta que los motores viejos o simplemente motores que por su uso han depreciado sus características de operación, pueden justificar su sustitución por motores normalizados y de alta eficiencia, ya que los motores que tienen años en operación sufren de deterioros en sus componentes, provocando que sus características nominales de operación ya no sean las mismas, por lo que estos motores suelen desperdiciar la energía eléctrica que consumen. Presentándose de esta manera una buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del Motor I₄, que es de reciente adquisición y por lo mismo no ha sido reparado todavía, no presenta aún deterioro en sus componentes, por lo que opera a sus características nominales.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo que se le tiene programado a cada motor es de 2 años, talvez esto se deba a la producción de la empresa, sin embargo es recomendable desmontarlos al menos una vez al año para realizarles su mantenimiento completo de todos sus componentes. Ya que con la regularidad con la que se realice esto, será posible localizar fallas antes de que lleguen a un grado mayor y puedan llegar a afectar al motor de manera más importante.

7.3.4.3 HORARIO DE OPERACIÓN.

Por medio de los horarios en los que operan los motores, se podrá saber si es posible tener algunos inconvenientes que afecten el buen consumo de la energía eléctrica por parte de Herramientas Klein S.A de C.V, empresa en la cual se encuentra operando el motor trifásico de inducción cuatro (MOTOR I₄). Uno de esos inconvenientes que se pueden presentar, es de que si la mayoría de los motores son arrancados al mismo tiempo se suele tener un recargo en el recibo del consumo de la energía eléctrica por "demanda máxima", esto también pasa cuando la mayoría de los motores se encuentran operando al mismo tiempo junto con otros equipos eléctricos dentro del periodo de punta, es decir, en la parte del día en el cual normalmente se tiene el más alto consumo en la energía eléctrica (normalmente este periodo de punta se presenta de las 18:00 hrs a las 22:00 hrs, cuando no se aplica el horario de varano, porque en este caso el periodo de punta se recorre una hora, es decir de las 18:00 hrs a las 19:00 hrs, para que quede de las 19:00 hrs a las 22:00 hrs).

En la tabla 16, se puede observar que todos los motores, así como las máquinas a las que pertenecen operan en un horario específico de 16:00 a las 22:00 hrs, el cual se encuentra dentro del periodo de punta, además de que dentro de este periodo entra en funcionamiento todo el sistema de alumbrado de la empresa, por lo que se tiene un consumo más de energía eléctrica y de demanda máxima. Debido a esto, aquí se tiene una oportunidad potencial de ahorro de energía eléctrica.

7.3.4.4 EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA ACTUAL.

Por otro lado, si un motor es acoplado a una carga, la cual se encuentra arriba o por debajo de la potencia nominal de salida del motor, es decir, si el motor opera sobrecargado o a carga reducida, entonces la eficiencia en el motor cae por debajo de su eficiencia nominal, además de que el factor de potencia del motor también se ve afectado, provocando así un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica.

La explicación anterior es la razón por la cual la eficiencia y el factor de potencia del motor trifásico de inducción cuatro sean bajos, la eficiencia de 41.80509543% y el factor de potencia de 0.882. El caso que se presenta aquí es que el MOTOR I₄, el cual es de 40HP, se encuentra operando a sólo 18.94736842HP, es decir el motor esta desperdiciando 21.05263158HP, por lo que se puede decir que el MOTOR I₄ esta sobredimensionado, ya que se encuentra operando a carga reducida. Esto provoca que la eficiencia y el factor de potencia sean bajos, trayendo como consecuencia un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica, por lo que esto representa una muy buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.5 MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN CINCO (MOTOR I₅).

7.3.5.1 CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN.

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Este motor se encuentra ubicado en el área de compresores, el cual es lo suficientemente espacioso, además de que cuenta con una excelente ventilación, debido a lo anterior se tiene presente una temperatura ambiente de 26.0 °C en el área específica en el cual se encuentra operando el motor. Por otra parte en la placa de datos del MOTOR I₅, se encontró que la temperatura ambiente es de 40 °C, este dato representa a la temperatura máxima del medio ambiente que puede rodear al motor y que esta en contacto con sus partes exteriores; según el dato anterior, la temperatura ambiente medida de 28.3 °C se mantiene dentro del rango de 40°C.

Debido a lo anterior, aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica, ya que dicho lugar es lo suficientemente espacioso y que además cuenta con una excelente ventilación que logra mantener el lugar a una buena temperatura, para que así no afecte demasiado a la temperatura que el motor genera al estar operando, evitando de esta manera un sobrecalentamiento en le mismo.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra:

El problema básico en este punto vendría si es que el motor se encuentra sucio exteriormente, ya que esto provocaría que dicho motor sufra de un sobrecalentamiento. Esto traería consigo principalmente una baja en la eficiencia, por lo que se tendría un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, provocando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del motor trifásico de inducción cinco (MOTOR I₅), el grado de suciedad con el que cuenta (acumulación de polvo) este motor es muy poco, por lo que esto no podría provocar un sobrecalentamiento en el mismo, evitando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra la ventilación:

El motor trifásico de inducción cinco (MOTOR I₅), es un motor del tipo de enclaustramiento cerrado, enfriado por un ventilador interno, colocado en la parte posterior del motor y el cual es acoplado al rotor, de tal manera que cuando este gira, también lo hace el ventilador, provocando así que se tenga una circulación de aire adentro del motor, con el fin de evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores (pérdidas por efecto Joule) del motor y dañar los aislamientos, trayendo como una probable consecuencia, que el motor se quemé. El MOTOR I₅ no llega a ser totalmente hermético, ya que cuenta con una maya (la cual tiene orificios de ventilación) en la parte posterior del motor; en la maya de ventilación se encontró muy poca acumulación de polvo en los orificios de ventilación, pero no llega a ser excesiva, provocando que se tenga una buena circulación de aire adentro del motor, evitando sobrecalentamientos que puedan llevar a tener pérdidas por efecto Joule.

Por otro lado, en el caso de que el ventilador no funcione adecuadamente, también se tienen las pérdidas por fricción y ventilación, las cuales son provocadas por el mal alineamiento del ventilador en el rotor, lo que provocará que se tengan roces por parte del ventilador con otros componentes internos del motor. El acumulamiento de estas pérdidas junto con las de efecto Joule, traerán consigo una disminución en la eficiencia, por lo que el motor desperdiciará la energía eléctrica que consume en dichas pérdidas.

Como la condición en la que se encontró al ventilador del MOTOR I₅ fue buena, además de que la circulación de aire a través de los orificios de ventilación en la maya del motor también es buena, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

La temperatura del motor:

La temperatura máxima a la cual puede trabajar un motor queda limitada por la temperatura correspondiente a la clase de aislamiento con el que están impregnados los devanados del motor. La temperatura se obtiene sumando la temperatura ambiente más la temperatura propia de funcionamiento del motor, así el motor trifásico de inducción cinco en su placa de datos trae que la clase de su aislamiento es "B", y según la tabla A2 (que se encuentra en el anexo "A") este tipo de aislamiento soporta una temperatura de 130 °C, entonces la temperatura máxima a la cual puede trabajar el MOTOR I₅ es de 130 °C. Contando con la lectura de la temperatura ambiente de 26.0 °C y la temperatura medida en la estructura metálica externa del motor de 30.9 °C, la temperatura a la cual está trabajando el MOTOR I₅ es de:

$$T = T_{\text{ambiente}} + T_{\text{motor}} = 26.0 \text{ °C} + 30.9 \text{ °C} = \underline{56.9 \text{ °C}}$$

Nota:

La temperatura de 56.9 °C medida en la estructura metálica exterior del motor puede tener un ligero error, ya que la temperatura real sería la medida en los devanados del estator del motor por medio de termopares, los cuales hacen contacto en dichos devanados y se conectan al aparato de medición en cuestión.

Como la temperatura de 56.9 °C no llega al límite de la temperatura máxima de 130 °C, entonces el motor no presenta un sobrecalentamiento peligroso que llegue a quemar el motor.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras.

Estos elementos que forman parte de un motor, suelen desgastarse por el uso excesivo de dicho motor y debido a esto se provocan las pérdidas por fricción y ventilación que afectan directamente a la eficiencia, provocando que esta se reduzca. En el caso de que un motor conste de cojinetes en lugar de valeros o chumaceras, si estos se encuentran en mal estado físico o si su lubricación no es buena (insuficiente o excesiva) entonces pueden ser la causa de pérdidas por fricción y ventilación, trayendo como consecuencia también una disminución en la eficiencia del motor.

El motor trifásico de inducción cinco (MOTOR I₅) consta de estos dos aditamentos, de un balero en la parte frontal y de un cojinete en la parte posterior del motor, debido a que se encontraron en buenas condiciones estos elementos, no se tiene aquí una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor:

Si el eje de un motor no esta en buenas condiciones, debido a una sobrecarga o simplemente al mal uso del mismo, entonces esto provocara pérdidas por fricción y ventilación, además de que como consecuencia dañaría los valeros o chumaceras o en otro caso los cojinetes si es que el motor consta de estos. Con el incremento de las pérdidas por fricción y ventilación más allá de lo normal a consecuencia de tener el eje de un motor dañado, se tendría obviamente una disminución en la eficiencia del motor, por lo que una parte de la energía eléctrica que el motor consume se irá hacia las pérdidas por fricción y ventilación en vez de formar parte de la potencia mecánica y ayudar a realizar un trabajo útil.

Como el eje del motor se encontró en buenas condiciones, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

3) Información sobre la carga que acciona el motor.

Si un motor presenta una mala alineación con respecto a su carga entonces se presentarán esfuerzos de torsión en la flecha del motor, lo que provocara pérdidas por fricción y ventilación en los valeros o chumaceras, produciendo que el motor no opere a su máxima eficiencia, además de esto se puede presentar el caso extremo de que una mala alineación cause daños mayores en el motor e incluso en la carga. Si los elementos que componen al sistema de acoplamiento no se encuentran en buenas condiciones o simplemente están mal alineados, entonces pueden ocasionar daños severos al motor, además de representar una carga inútil para dicho motor. Provocando así desperdicios en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, sufriendo también un acortamiento en su periodo de vida.

En este caso del motor trifásico de inducción cinco (MOTOR I₅), el acoplamiento se encontró en muy buenas condiciones, por lo que aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.5.2 EL TIEMPO DE OPERACIÓN, ASÍ COMO EL HISTORIAL DE REPARACIONES.

Según los datos recopilados en la tabla 10: el Motor I₁ lleva en operación 24 años y cinco meses y no ha sido reparado; el Motor I₂ e I₃ llevan en operación 19 años y seis meses y no han sido reparados; los Motores I₅ e I₆ llevan en operación casi 28 años y no han sido reparados. Debido a los resultados anteriores se debe tener en cuenta que los motores viejos o simplemente motores que por su uso han depreciado sus características de operación, pueden justificar su sustitución por motores normalizados y de alta eficiencia, ya que los motores que tienen años en operación sufren de deterioros en sus componentes, provocando que sus características nominales de operación ya no sean las mismas, por lo que estos motores suelen desperdiciar la energía eléctrica que consumen. Presentándose de esta manera una buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del Motor I₄, que es de reciente adquisición y por lo mismo no ha sido reparado todavía, no presenta aún deterioro en sus componentes, por lo que opera a sus características nominales.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo que se le tiene programado a cada motor es de 2 años, tal vez esto se deba a la producción de la empresa, sin embargo es recomendable desmontarlos al menos una vez al año para realizarles su mantenimiento completo de todos sus componentes. Ya que con la regularidad con la que se realice esto, será posible localizar fallas antes de que lleguen a un grado mayor y puedan llegar a afectar al motor de manera más importante.

7.3.5.3 HORARIO DE OPERACIÓN.

Por medio de los horarios en los que operan los motores, se podrá saber si es posible tener algunos inconvenientes que afecten el buen consumo de la energía eléctrica por parte de Herramientas Klein S.A de C.V, empresa en la cual se encuentra operando el motor trifásico de inducción cinco (MOTOR I₅). Uno de esos inconvenientes que se pueden presentar, es de que si la mayoría de los motores son arrancados al mismo tiempo se suele tener un recargo en el recibo del consumo de la energía eléctrica por "demanda máxima", esto también pasa cuando la mayoría de los motores se encuentran operando al mismo tiempo junto con otros equipos eléctricos dentro del periodo de punta, es decir, en la parte del día en el cual normalmente se tiene el más alto consumo en la energía eléctrica (normalmente este periodo de punta se presenta de las 18:00 hrs a las 22:00 hrs, cuando no se aplica el horario de varano, porque en este caso el periodo de punta se recorre una hora, es decir de las 18:00 hrs a las 19:00 hrs, para que quede de las 19:00 hrs a las 22:00 hrs).

En la tabla 16, se puede observar que todos los motores, así como las máquinas a las que pertenecen operan en un horario específico de 16:00 a las 22:00 hrs, el cual se encuentra dentro del periodo de punta, además de que dentro de este periodo entra en funcionamiento todo el sistema de alumbrado de la empresa, por lo que se tiene un consumo más de energía eléctrica y de demanda máxima. Debido a esto, aquí se tiene una oportunidad potencial de ahorro de energía eléctrica.

7.3.5.4 EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA ACTUAL.

Por otro lado, si un motor es acoplado a una carga, la cual se encuentra arriba o por debajo de la potencia nominal de salida del motor, es decir, si el motor opera sobrecargado o a carga reducida, entonces la eficiencia en el motor cae por debajo de su eficiencia nominal, además de que el factor de potencia del motor también se ve afectado, provocando así un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica.

La explicación anterior es la razón por la cual la eficiencia y el factor de potencia del motor trifásico de inducción cinco sean ligeramente bajos, la eficiencia de 87.98212091% y el factor de potencia de 0.850. El caso que se presenta aquí es que el MOTOR I₅, el cual es de 177HP, se encuentra operando a sólo 139.7368421HP, es decir el motor esta desperdiciando 37.2631579HP, por lo que se puede decir que el MOTOR I₅ esta ligeramente sobredimensionado, ya que se encuentra operando a carga reducida. Esto provoca que la eficiencia y el factor de potencia sean ligeramente bajos, trayendo como consecuencia un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica, por lo que esto representa una muy buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.6 MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN SEIS (MOTOR I₆).

7.3.6.1 CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN.

1) Información sobre el lugar en el cual se encuentra el motor.

Este motor se encuentra ubicado en el área de compresores, el cual es lo suficientemente espacioso, además de que cuenta con una excelente ventilación, debido a lo anterior se tiene presente una temperatura ambiente de 26.0 °C en el área específica en el cual se encuentra operando el motor. Por otra parte en la placa de datos del MOTOR I₆, se encontró que la temperatura ambiente es de 40 °C, este dato representa a la temperatura máxima del medio ambiente que puede rodear al motor y que esta en contacto con sus partes exteriores; según el dato anterior, la temperatura ambiente medida de 26.0 °C se mantiene dentro del rango de 40°C.

Debido a lo anterior, aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica, ya que dicho lugar es lo suficientemente espacioso y que además cuenta con una excelente ventilación que logra mantener el lugar a una buena temperatura, para que así no afecte demasiado a la temperatura que el motor genera al estar operando, evitando de esta manera un sobrecalentamiento en le mismo.

2) Información sobre el motor.

Estado de limpieza en el que se encuentra:

El problema básico en este punto vendría si es que el motor se encuentra sucio exteriormente, ya que esto provocaría que dicho motor sufra de un sobrecalentamiento. Esto traería consigo principalmente una baja en la eficiencia, por lo que se tendría un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, provocando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del motor trifásico de inducción seis (MOTOR I₆), el grado de suciedad con el que cuenta (acumulación de la mezcla entre polvo y aceite) este motor es en cantidad un poco mayor a la que presentan los motores anteriores, sin embargo esto no podría provocar un sobrecalentamiento en el mismo, evitando así que se tenga una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra la ventilación:

El motor trifásico de inducción seis (MOTOR I₆), es un motor del tipo de enclaustramiento cerrado, enfriado por un ventilador interno, colocado en la parte posterior del motor y el cual es acoplado al rotor, de tal manera que cuando este gira, también lo hace el ventilador, provocando así que se tenga una circulación de aire adentro del motor, con el fin de evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores (pérdidas por efecto Joule) del motor y dañar los aislamientos, trayendo como una probable consecuencia, que el motor se queme. El MOTOR I₆ no llega a ser totalmente hermético, ya que cuenta con una maya (la cual tiene orificios de ventilación) en la parte posterior del motor; en la maya de ventilación se encontró una acumulación de la mezcla entre polvo y aceite en los orificios de ventilación, pero no llega a ser excesiva, provocando que se tenga una buena circulación de aire adentro del motor, evitando sobrecalentamientos que puedan llevar a tener pérdidas por efecto Joule.

Por otro lado, en el caso de que el ventilador no funcione adecuadamente, también se tienen las pérdidas por fricción y ventilación, las cuales son provocadas por el mal alineamiento del ventilador en el rotor, lo que provocara que se tengan roces por parte del ventilador con otros componentes internos del motor. El acumulamiento de estas pérdidas junto con las de efecto Joule, traerán consigo una disminución en la eficiencia, por lo que el motor desperdiciará la energía eléctrica que consume en dichas pérdidas.

Como la condición en la que se encontró al ventilador del MOTOR I₆ fue buena, además de que la circulación de aire a través de los orificios de ventilación en la maya del motor también es buena, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

La temperatura del motor:

La temperatura máxima a la cual puede trabajar un motor queda limitada por la temperatura correspondiente a la clase de aislamiento con el que están impregnados los devanados del motor. La temperatura se obtiene sumando la temperatura ambiente más la temperatura propia de funcionamiento del motor, así el motor trifásico de inducción seis en su placa de datos trae que la clase de su aislamiento es "B", y según la tabla A2 (que se encuentra en el anexo "A") este tipo de aislamiento soporta una temperatura de 130 °C, entonces la temperatura máxima a la cual puede trabajar el MOTOR I₆ es de 130 °C. Contando con la lectura de la temperatura ambiente de 26.0 °C y la temperatura medida en la estructura metálica externa del motor de 29.1 °C, la temperatura a la cual esta trabajando el MOTOR I₆ es de:

$$T = T_{\text{ambiente}} + T_{\text{motor}} = 26.0 \text{ °C} + 29.1 \text{ °C} = \underline{55.1 \text{ °C}}$$

Nota:

La temperatura de 55.1 °C medida en la estructura metálica exterior del motor puede tener un ligero error, ya que la temperatura real sería la medida en los devanados del estator del motor por medio de termopares, los cuales hacen contacto en dichos devanados y se conectan al aparato de medición en cuestión.

Como la temperatura de 55.1 °C no llega al límite de la temperatura máxima de 130 °C, entonces el motor no presenta un sobrecalentamiento peligroso que llegue a quemar el motor.

Condición en la que se encuentran los cojinetes, valeros o chumaceras.

Estos elementos que forman parte de un motor, suelen desgastarse por el uso excesivo de dicho motor y debido a esto se provocan las pérdidas por fricción y ventilación que afectan directamente a la eficiencia, provocando que esta se reduzca. En el caso de que un motor conste de cojinetes en lugar de valeros o chumaceras, si estos se encuentran en mal estado físico o si su lubricación no es buena (insuficiente o excesiva) entonces pueden ser la causa de pérdidas por fricción y ventilación, trayendo como consecuencia también una disminución en la eficiencia del motor.

El motor trifásico de inducción seis (MOTOR I₆) consta de un par de valeros uno en la parte frontal y otro en la parte posterior del motor, debido a que se encontraron en buenas condiciones estos elementos, no se tiene aquí una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Condición en la que se encuentra el eje o flecha del motor:

Si el eje de un motor no esta en buenas condiciones, debido a una sobrecarga o simplemente al mal uso del mismo, entonces esto provocara pérdidas por fricción y ventilación, además de que como consecuencia dañaría los valeros o chumaceras o en otro caso los cojinetes si es que el motor consta de estos. Con el incremento de las pérdidas por fricción y ventilación más allá de lo normal a consecuencia de tener el eje de un motor dañado, se tendría obviamente una disminución en la eficiencia del motor, por lo que una parte de la energía eléctrica que el motor consume se irá hacia las pérdidas por fricción y ventilación en vez de formar parte de la potencia mecánica y ayudar a realizar un trabajo útil.

Como el eje del motor se encontró en buenas condiciones, entonces aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

3) Información sobre la carga que acciona el motor.

Si un motor presenta una mala alineación con respecto a su carga entonces se presentarán esfuerzos de torsión en la flecha del motor, lo que provocara pérdidas por fricción y ventilación en los valeros o chumaceras, produciendo que el motor no opere a su máxima eficiencia, además de esto se puede presentar el caso extremo de que una mala alineación cause daños mayores en el motor e incluso en la carga. Si los elementos que componen al sistema de acoplamiento no se encuentran en buenas condiciones o simplemente están mal alineados, entonces pueden ocasionar daños severos al motor, además de representar una carga inútil para dicho motor. Provocando así desperdicios en el consumo de la energía eléctrica por parte del motor, sufriendo también un acortamiento en su periodo de vida.

En este caso del motor trifásico de inducción seis (MOTOR I₆), el acoplamiento se encontró en buenas condiciones, por lo que aquí no se tiene una posible oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.3.6.2 EL TIEMPO DE OPERACIÓN, ASÍ COMO EL HISTORIAL DE REPARACIONES.

Según los datos recopilados en la tabla 10: el Motor I₁ lleva en operación 24 años y cinco meses y no ha sido reparado; el Motor I₂ e I₃ llevan en operación 19 años y seis meses y no han sido reparados; los Motores I₅ e I₆ llevan en operación casi 28 años y no han sido reparados. Debido a los resultados anteriores se debe tener en cuenta que los motores viejos o simplemente motores que por su uso han depreciado sus características de operación, pueden justificar su sustitución por motores normalizados y de alta eficiencia, ya que los motores que tienen años en operación sufren de deterioros en sus componentes, provocando que sus características nominales de operación ya no sean las mismas, por lo que estos motores suelen desperdiciar la energía eléctrica que consumen. Presentándose de esta manera una buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

En el caso del Motor I₄, que es de reciente adquisición y por lo mismo no ha sido reparado todavía, no presenta aún deterioro en sus componentes, por lo que opera a sus características nominales.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo que se le tiene programado a cada motor es de 2 años, talvez esto se deba a la producción de la empresa, sin embargo es recomendable desmontarlos al menos una vez al año para realizarles su mantenimiento completo de todos sus componentes. Ya que con la regularidad con la que se realice esto, será posible localizar fallas antes de que lleguen a un grado mayor y puedan llegar a afectar al motor de manera más importante.

7.3.6.3 HORARIO DE OPERACIÓN.

Por medio de los horarios en los que operan los motores, se podrá saber si es posible tener algunos inconvenientes que afecten el buen consumo de la energía eléctrica por parte de Herramientas Klein S.A de C.V, empresa en la cual se encuentra operando el motor trifásico de inducción seis (MOTOR I₆). Uno de esos inconvenientes que se pueden presentar, es de que si la mayoría de los motores son arrancados al mismo tiempo se suele tener un recargo en el recibo del consumo de la energía eléctrica por "demanda máxima", esto también pasa cuando la mayoría de los motores se encuentran operando al mismo tiempo junto con otros equipos eléctricos dentro del periodo de punta, es decir, en la parte del día en el cual normalmente se tiene el más alto consumo en la energía eléctrica (normalmente este periodo de punta se presenta de las 18:00 hrs a las 22:00 hrs, cuando no se aplica el horario de verano, porque en este caso el periodo de punta se recorre una hora, es decir de las 18:00 hrs a las 19:00 hrs, para que quede de las 19:00 hrs a las 22:00 hrs).

En la tabla 16, se puede observar que todos los motores, así como las máquinas a las que pertenecen operan en un horario específico de 16:00 a las 22:00 hrs, el cual se encuentra dentro del periodo de punta, además de que dentro de este periodo entra en funcionamiento todo el sistema de alumbrado de la empresa, por lo que se tiene un consumo más de energía eléctrica y de demanda máxima. Debido a esto, aquí se tiene una oportunidad potencial de ahorro de energía eléctrica.

7.3.6.4 EFICIENCIA Y FACTOR DE POTENCIA ACTUAL.

Por otro lado, si un motor es acoplado a una carga, la cual se encuentra arriba o por debajo de la potencia nominal de salida del motor, es decir, si el motor opera sobrecargado o a carga reducida, entonces la eficiencia en el motor cae por debajo de su eficiencia nominal, además de que el factor de potencia del motor también se ve afectado, provocando así un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica.

En el motor trifásico de inducción seis la eficiencia no concuerda y el factor de potencia es ligeramente bajo, la eficiencia de 102.4028953% y el factor de potencia de 0.803. El caso que se presenta aquí es que el MOTOR I₆, el cual es de 15HP, se encuentra operando a sólo 12.69230769HP, es decir el motor esta desperdiciando 2.30769231HP, por lo que se puede decir que el MOTOR I₆ esta ligeramente sobredimensionado, ya que se encuentra operando a carga reducida. Esto provoca que la eficiencia y el factor de potencia sean ligeramente bajos, trayendo como consecuencia un desperdicio en el consumo de la energía eléctrica, por lo que esto representa una muy buena oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

7.4 ALTERNATIVAS PARA EL AHORRO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Aquí se propondrán alternativas para el ahorro de la energía eléctrica en los motores trifásicos de inducción, con el fin de poder corregir los problemas que presentan cada uno de los seis motores, para que de esta forma se eliminen los desperdicios en consumo de energía eléctrica. Además como complemento se darán recomendaciones para que no se presenten problemas que puedan causar disminución tanto en la eficiencia como en el factor de potencia, lo cual traería como consecuencia que el motor desperdicie la energía eléctrica que consume.

7.4.1 ACCIONES CORRECTIVAS PARA EL AHORRO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS SEIS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Motor trifásico de inducción uno (MOTOR I₁)

Este motor cuenta con las siguientes características:

Marca: SIEMENS	Temperatura Máxima Ambiente: 40°C
Tipo de Enclaustramiento: Cerrado	Potencia: 20HP
Tipo de Operación: Continuo	Voltaje: 220V/440V
Tipo de Eficiencia: Estándar	Corriente: 53 amp/26.5 amp
Fases: Trifásico	Frecuencia: 60Hz
Factor de Servicio: 1.0	Velocidad: 1165 rpm
Clase de Diseño: B	Factor de Potencia: ?
Clase de Aislamiento: B	Eficiencia Nominal: ?
Rotor Jaula de Ardilla	

A este motor se le calculó una potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor de 7.5HP en plena operación, este dato al compararlo con la potencia especificada en la placa de datos de 20HP es menor, por lo que el motor está desperdiciando 12.5HP. Con esto se puede decir que el motor aquí utilizado está sobredimensionado.

Debido a lo anterior, es por lo que la eficiencia y el factor de potencia son bajos, la eficiencia se calculó del 69.0710011% y el factor de potencia se midió de 0.479. Por lo que si se desea obtener la máxima eficiencia posible así como el factor de potencia más alto, será necesario adecuar al motor a dicha carga, así que la solución más correcta es sustituir al motor existente de 20HP por otro que se encuentre ligeramente arriba de los 7.5 HP.

Según la norma ANCE (Asociación Nacional de Normalización y Certificación del Sector Eléctrico) NMX - J - 075 / 1 - 1994 - ANCE, las potencias nominales en HP's cercanas a los 7.5HP, para las que se construyen los motores trifásicos de inducción son: 7.5HP y 10HP (las potencias nominales se encuentran en el anexo A).

Como se pudo observar, se tienen dos opciones:

- 1) La primera opción es utilizar un motor de 7.5HP con un factor de servicio del 1.15, además de las otras características antes mencionadas del motor de 20HP. Este factor de servicio le permite operar con sobrecargas hasta del 115% sin exceder la capacidad térmica del aislamiento, es decir, operar con una sobrecarga de 8.625HP. El inconveniente con este motor, es de que en el caso de que si llegara a operar con una sobrecarga equivalente a su factor de servicio no pueden admitirse simultáneamente variaciones de tensión y frecuencia nominales, lo cual suele ser complicado.
- 2) La segunda opción es utilizar el motor de 10HP con un factor de servicio del 1.0, además de las otras características antes mencionadas del motor de 20HP. Este motor ofrece la ventaja de que tiene un valor de sobrecarga un poco más amplio que el de la opción anterior, en caso de que este motor se llegara a sobrecargar, ya que dicha sobrecarga sería hasta los 10HP dando 2.5HP más antes de llegar a la sobrecarga, en comparación con los 1.125HP de la opción uno.

Desde el punto de vista de la eficiencia y del factor de potencia, sería más conveniente la opción uno, ya que al estar operando a la carga nominal se tendría la máxima eficiencia así como el factor de potencia más cercano a la unidad. En cambio en la opción dos no se podría tener la mayor eficiencia ni el factor de potencia más alto posible, ya que el motor estaría ligeramente sobredimensionado.

Otro aspecto importantísimo en el motor a elegir es la eficiencia, por lo que aquí también se tienen dos posibles opciones.

- a) Según la norma ANCE, el valor de la eficiencia nominal a plena carga para un motor trifásico de inducción de eficiencia estándar, de tipo de enclaustramiento cerrado, 7.5HP, velocidad síncrona de 1200 rpm, 6 polos y 60 Hz, es del 83.0%, con una eficiencia mínima garantizada del 80.5%.
- b) Por otra parte, el valor de la eficiencia nominal a plena carga, para un motor trifásico de inducción de alta eficiencia, tipo de enclaustramiento cerrado de 7.5HP, velocidad síncrona de 1200 rpm, 6 polos y 60Hz, es de 87.5%, con una eficiencia mínima garantizada del 85.5%.

Después de haber visto las dos opciones referentes a la eficiencia, la más apropiada es la del inciso (b), ya que por ser de alta eficiencia, presenta valores de eficiencia nominal y de eficiencia mínima garantizada mayores a las que se tienen en un motor de eficiencia estándar. Por lo cual la opción del inciso (b) es la más adecuada.

El motor aquí escogido, con las mismas características (de enclaustramiento, tipo de operación, trifásico, clase de diseño y de aislamiento, temperatura máxima ambiente, voltaje, frecuencia y velocidad) del motor original que será remplazado por este de alta eficiencia. Tiene un precio de N\$5035+I.V.A (marca SIEMENS ya que resulto ser el más económico).

Motor trifásico de inducción dos (MOTOR I₂)

Este motor cuenta con las siguientes características:

Marca: SIEMENS	Temperatura Máxima Ambiente: 40°C
Tipo de Enclaustramiento: Cerrado	Potencia: 40HP
Tipo de Operación: Continuo	Voltaje: 230V/460V
Tipo de Eficiencia: Estándar	Corriente: 94.6 amp/ 47.3 amp
Fases: Trifásico	Frecuencia: 60Hz
Factor de Servicio: 1.0	Velocidad: 1170 rpm
Clase de Diseño: B	Factor de Potencia: ?
Clase de Aislamiento: B	Eficiencia Nominal: ?
Rotor Jaula de Ardilla	

A este motor se le cálculo una potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor de 11.76470588HP en plena operación, este dato al compararlo con la potencia especificada en la placa de datos de 40HP es menor, por lo que el motor esta desperdiciando 28.23529412HP. Con esto se puede decir que el motor aquí utilizado esta sobredimensionado.

Debido a lo anterior, es por lo que la eficiencia y el factor de potencia son bajos, la eficiencia se calculo del 75.44560971% y el factor de potencia se midió de 0.638. Por lo que sí se desea obtener la máxima eficiencia posible así como el factor de potencia más alto, será necesario adecuar al motor a dicha carga, así que la solución más correcta es sustituir al motor existente de 40HP por otro que se encuentre ligeramente arriba de los 11.76470588HP.

Según la norma ANCE (Asociación Nacional de Normalización y Certificación del Sector Eléctrico) NMX - J - 075 / 1 - 1994 - ANCE, la potencia nominal en HP's arriba de los 11.76470588HP, para los que se construyen los motores trifásicos de inducción es de 15HP (las potencias nominales se encuentran en el anexo A).

Debido a lo anterior es necesario utilizar un motor de 15HP con un factor de servicio del 1.0, además de las otras características antes mencionadas del motor de 40HP. Este motor de 15HP esta ligeramente sobredimensionado, ya que se encuentra 3.23529412HP arriba de la potencia que se necesita (11.76470588HP). Por lo que la eficiencia y el factor de potencia no alcanzarán los valores más altos, sin embargo en el caso de que a dicho motor se le llegara a sobrecargar, de tal forma que la potencia que desarrolla en su eje se valla aproximando a los 15HP, entonces la eficiencia se acercara cada vez a su máximo valor, así como el factor de potencia, que se aproximara cada vez más a la unidad. Pero se debe tener cuidado de no sobrecargar al motor por arriba de los 15HP, ya que si esto ocurre la eficiencia como el factor de potencia comenzarán a descender.

Otro aspecto importantísimo en el motor a elegir es la eficiencia, por lo que aquí se tienen dos posibles opciones.

- a) Según la norma ANCE, el valor de la eficiencia nominal a plena carga para un motor trifásico de inducción de eficiencia estándar, de tipo de enclaustramiento cerrado, 15HP, velocidad síncrona de 1200 rpm, 6 polos y 60Hz, es del 85.0%, con una eficiencia mínima garantizada del 82.0%.

- b) Por otra parte, el valor de la eficiencia nominal a plena carga, para un motor trifásico de inducción de alta eficiencia, tipo de enclaustramiento cerrado, de 15HP, velocidad sincrónica de 1200 rpm, 6 polos y 60Hz, es del 89.5%, con una eficiencia mínima garantizada del 87.5%.

Después de haber visto las opciones referentes a la eficiencia, la más apropiada es la del inciso (b), ya que por ser de alta eficiencia, presenta valores de eficiencia nominal y de eficiencia mínima garantizada mayores a las que se tienen en un motor de eficiencia estándar. Además de que como el motor estará operando por debajo de los 15HP la eficiencia será mayor con este tipo de motor que con el de eficiencia estándar, debido a que por la razón de estar ligeramente sobredimensionado no podrá alcanzar la máxima eficiencia ni el factor de potencia más alto. Sin embargo con el motor de alta eficiencia se garantiza que operará con una eficiencia y con un factor de potencia un poco más altos que con el motor de eficiencia estándar.

El motor aquí escogido, con las mismas características (de enclaustramiento, tipo de operación, trifásico, clase de diseño y de aislamiento, temperatura máxima ambiente, voltaje, frecuencia y velocidad) del motor original que será remplazado por este de alta eficiencia. Tiene un precio de N\$4380+I.V.A (marca SIEMENS ya que resulto ser el más económico).

Motor trifásico de inducción tres (MOTOR I₃)

Este motor cuenta con las siguientes características:

Marca: SIEMENS	Temperatura Máxima Ambiente: 40°C
Tipo de Enclaustramiento: Cerrado	Potencia: 15HP
Tipo de Operación: Continuo	Voltaje: 230V/460V
Tipo de Eficiencia: Estándar	Corriente: 37.4 amp/ 18.7 amp
Fases: Trifásico	Frecuencia: 60Hz
Factor de Servicio: 1.0	Velocidad: 1170 rpm
Clase de Diseño: B	Factor de Potencia: ?
Clase de Aislamiento: B	Eficiencia Nominal: ?
Rotor Jaula de Ardilla	

A este motor se le cálculo una potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor de 6.818181818HP en plena operación, este dato al compararlo con la potencia especificada en la placa de datos de 15HP es menor, por lo que el motor esta desperdiciando 8.181818182HP. Con esto se puede decir que el motor aquí utilizado esta sobredimensionado.

Debido a lo anterior, es por lo que la eficiencia y el factor de potencia son bajos, la eficiencia se calculo del 48.03828503% y el factor de potencia se midió de 0.762. Por lo que sí se desea obtener la máxima eficiencia posible así como el factor de potencia más alto, será necesario adecuar al motor a dicha carga, así que la solución más correcta es sustituir al motor existente de 15HP por otro que se encuentre ligeramente arriba de los 6.818181818HP.

Según la norma ANCE (Asociación Nacional de Normalización y Certificación del Sector Eléctrico) NMX - J - 075 / 1 - 1994 - ANCE, la potencia nominal en HP's arriba de los 6.818181818HP, para la que se construyen los motores trifásicos de inducción es de 7.5HP (las potencias nominales se encuentran en el anexo A).

Debido a lo anterior es necesario utilizar un motor de 7.5HP con un factor de servicio del 1.15 (por aquello de que el motor llegara a tener una ligera sobrecarga). Además de las otras características antes mencionadas del motor de 15HP. Este motor de 7.5HP esta ligeramente sobredimensionado, ya que se encuentra 0.681818182HP por arriba de la potencia que se necesita (6.818181818HP). Por lo que la eficiencia y el factor de potencia no alcanzaran los valores más altos, pero estarán muy cerca de ellos, ya que la sobredimensión que presenta el motor no es muy grande.

Otro aspecto importantísimo en el motor a elegir es la eficiencia, por lo que aquí se tienen dos posibles opciones.

- a) Según la norma ANCE, el valor de la eficiencia nominal a plena carga para un motor trifásico de inducción de eficiencia estándar, de tipo de enclaustramiento cerrado, 7.5HP, velocidad síncrona de 1200 rpm, 6 polos y 60Hz, es del 83.0%, con una eficiencia mínima garantizada del 80.5%.
- b) Por otra parte, el valor de la eficiencia nominal a plena carga, para un motor trifásico de inducción de alta eficiencia, tipo de enclaustramiento cerrado, de 7.5HP, velocidad síncrona de 1200 rpm, 6 polos y 60Hz, es del 87.5%, con una eficiencia mínima garantizada del 85.5%.

Después de haber visto las dos opciones referentes a la eficiencia, la más apropiada es la del inciso (b), ya que por ser de alta eficiencia, presenta valores de eficiencia nominal y de eficiencia mínima garantizada mayores a las que se tienen en un motor de eficiencia estándar. Además de que como el motor esta ligeramente sobredimensionado, no podrá alcanzar los valores más altos de eficiencia y de factor de potencia, sin embargo se estará muy próximo a esos valores con el motor de alta eficiencia, ya que presenta valores de eficiencia más altos que el motor de eficiencia estándar.

El motor aquí escogido, con las mismas características (de enclaustramiento, tipo de operación, trifásico, clase de diseño y de aislamiento, temperatura máxima ambiente, voltaje, frecuencia y velocidad) del motor original que será remplazado por este de alta eficiencia. Tiene un precio de N\$5035+I.V.A (marca SIEMENS ya que resulto ser el más económico).

Motor trifásico de inducción cuatro (MOTOR L₄)

Este motor cuenta con las siguientes características:

Marca: ABB	Temperatura Máxima Ambiente: 40°C
Tipo de Enclaustramiento: Cerrado	Potencia: 40HP
Tipo de Operación: Continuo	Voltaje: 230V/460V
Tipo de Eficiencia: Alta Eficiencia	Corriente: 110 amp/ 55 amp
Fases: Trifásico	Frecuencia: 60Hz
Factor de Servicio: 1.15	Velocidad: 1770 rpm
Clase de Diseño: B	Factor de Potencia: 0.84
Clase de Aislamiento: F	Eficiencia Nominal: 93%
Rotor Jaula de Ardilla	

A este motor se le cálculo una potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor de 32.72727273HP en plena operación, este dato al compararlo con la potencia especificada en la placa de datos de 40HP es ligeramente menor, por lo que el motor sólo desperdicia 7.27272727HP. Con esto se puede decir que el motor aquí utilizado esta ligeramente sobredimensionado.

El factor de potencia aquí medido concuerda con el nominal, sin embargo la eficiencia es menor, tomando en cuenta que se trata de un motor de alta eficiencia. La eficiencia nominal es del 93%, pero la calculada es sólo del 72.20880123%, esto se debe a que el motor se encuentra operando ligeramente por debajo de su potencia nominal, por lo que la solución más correcta para aumentar la eficiencia del motor lo más cercas del 93%, es adecuar al motor a dicha carga, es decir, aumentar la carga hasta el valor nominal de la potencia del motor. Este motor no puede ser sustituido por otro debido a que es de reciente adquisición, y por lo mismo, se trata de un motor nuevo.

Debido a lo anterior se debe tomar en cuenta que los motores que operan con cargas bajas disminuyen su factor de potencia así como la eficiencia. Por esto es importante adecuar la capacidad de los motores a sus cargas reales y evitar su operación prolongada en vacío así como a cargas reducidas.

Motor trifásico de inducción cinco (MOTOR I₅)

Este motor cuenta con las siguientes características:

Marca: SIEMENS	Temperatura Máxima Ambiente: 40°C
Tipo de Enclaustramiento: Cerrado	Potencia: 177HP
Tipo de Operación: Continuo	Voltaje: 220V/440V
Tipo de Eficiencia: Estándar	Corriente: 420 amp/ 210 amp
Fases: Trifásico	Frecuencia: 60Hz
Factor de Servicio: 1.0	Velocidad: 1485 rpm
Clase de Diseño: B	Factor de Potencia: 0.87
Clase de Aislamiento: B	Eficiencia Nominal: ?
Rotor Jaula de Ardilla	

A este motor se le cálculo una potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor de 139.7368421HP en plena operación, este dato al compararlo con la potencia especificada en la placa de datos de 177HP es ligeramente menor, por lo que el motor esta desperdiciando 37.2631579HP. Con esto se puede decir que el motor aquí utilizado esta ligeramente sobredimensionado.

El factor de potencia medido en este motor fue de 0.850, el cual casi se aproxima al nominal de 0.870, además en este motor se encontró que tenia acoplado en paralelo un banco de capacitores de 20 Kvar, lo que consigue aumentar el factor de potencia del motor de 0.850 a 0.920. Por otra parte la eficiencia que se le cálculo a este motor fue del 87.98212091%, la cual esta por debajo de los valores de las eficiencias nominales que se presentan en la norma ANCE (la tabla de eficiencias obtenida de esta norma se tiene en el anexo A). Por ejemplo, para un motor trifásico de inducción de eficiencia estándar de 150HP se tiene una eficiencia nominal del 92.5% y para el motor de 200HP se tiene una eficiencia nominal del 93.0%, por lo que se puede concluir que la eficiencia nominal para un motor de 177HP se debe de encontrar entre el 92.5% y el 93%.

Una opción para aumentar la eficiencia es incrementar la carga que acciona el motor a su potencia nominal, solución que sería la más fácil de llevar a cabo.

Por otro lado, si se desea cambiar al motor por otro nuevo, se recomendaría un motor de 150HP con un factor de servicio de 1.0, el cual estaría ligeramente sobredimensionado sólo por 10.2631579, este motor se puede adquirir de eficiencia estándar y de alta eficiencia, por lo que lo más recomendable es el de alta eficiencia, de esta manera, se tiene que: un motor trifásico de inducción de alta eficiencia, de tipo de enclaustramiento, de 150HP, velocidad síncrona de 1800 rpm, 4 polos y 60Hz, tiene una eficiencia nominal del 94.1% y una eficiencia mínima garantizada del 93.0%.

Sin embargo se debe tener en cuenta que al estar operando este motor ligeramente sobredimensionado, no alcanzará el valor nominal de la eficiencia ni el factor de potencia más alto, pero estarán muy cercas de estos valores, ya que estará operando con una ligera sobrecarga, por lo que se obtendría una eficiencia y un factor de potencia mayores que los que se tienen actualmente con la operación del motor de 177HP. En el caso de que la opción elegida sea esta, tome en cuenta que el instalar motores de velocidad ajustable con reguladores electrónicos, en aquellos accionamientos, en donde la carga sea variable y se pueda controlar ajustando la velocidad. Por ejemplo en sistemas de bombeo o compresión que deben suministrar caudales variables y que para hacerlo utilicen válvulas u otros dispositivos de control. La eficiencia total del motor y su carga se elevan notablemente con ahorros importantes de energía.

El motor aquí escogido, con las mismas características (de enclaustramiento, tipo de operación, trifásico, clase de diseño y de aislamiento, temperatura máxima ambiente, voltaje, frecuencia y velocidad) del motor original que será remplazado por este de alta eficiencia. Tiene un precio de N\$32,937+I.V.A (marca SIEMENS ya que resulto ser el más económico).

Motor trifásico de inducción seis (MOTOR L₆)

Este motor cuenta con las siguientes características:

Marca: SIEMENS	Temperatura Máxima Ambiente: 40°C
Tipo de Enclaustramiento: Cerrado	Potencia: 15HP
Tipo de Operación: Continuo	Voltaje: 220V/440V
Tipo de Eficiencia: Estándar	Corriente: 39 amp/ 19.5 amp
Fases: Trifásico	Frecuencia: 60Hz
Factor de Servicio: 1.0	Velocidad: 1745 rpm
Clase de Diseño: B	Factor de Potencia: ?
Clase de Aislamiento: B	Eficiencia Nominal: ?
Rotor Jaula de Ardilla	

A este motor se le cálculo una potencia mecánica de salida disponible en el eje del motor de 12.69230769HP en plena operación, este dato al compararlo con la potencia especificada en la placa de datos de 15HP es ligeramente menor, por lo que el motor sólo desperdicia 2.30769231HP. Con esto se puede decir que el motor aquí utilizado esta ligeramente sobredimensionado.

A pesar de que el motor casi se encuentra operando a su potencia nominal, el factor de potencia al cual opera de 0.803 se considera bajo, ya que por esta razón la eficiencia no es buena (la eficiencia calculada en este motor rebasa el 100%). Para que la eficiencia y el factor de potencia aumenten, sería necesario incrementar la carga que acciona el motor a su potencia nominal, es decir, hasta los 15HP, opción que sería la más factible. Por otra parte, en caso de que se contemple la alternativa de sustituir a este motor por otro, se recomienda el uso de los motores de alta eficiencia, así que un motor trifásico de inducción de alta eficiencia de 15HP, de tipo de enclaustramiento cerrado, velocidad síncrona de 1800 rpm, 4 polos y 60Hz, tiene una eficiencia nominal del 88.5% además de contar con una eficiencia mínima garantizada del 86.5%. Si la opción elegida es esta se sugiere que el motor tenga un factor de servicio de 1.15.

El motor aquí escogido, con las mismas características (de enclaustramiento, tipo de operación, trifásico, clase de diseño y de aislamiento, temperatura máxima ambiente, voltaje, frecuencia y velocidad) del motor original que será remplazado por este de alta eficiencia. Tiene un precio de N\$8663+I.V.A (marca SIEMENS ya que resulto ser el más económico).

7.4.2 RECOMENDACIONES PARA OBTENER AHORROS ADICIONALES EN EL CONSUMO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS SEIS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.

Lugar en el cual se encuentra el motor:

- 1) Evitar concentrar motores en locales reducidos o en lugares que puedan dificultar su ventilación, ya que un sobrecalentamiento en el motor se traduce en una disminución de su eficiencia.
- 2) Mantener en optimas condiciones los sistemas de ventilación y enfriamiento de los motores, para evitar sobrecalentamientos que puedan aumentar las pérdidas en los conductores del motor y dañar los aislamientos.

Limpieza en el motor:

- 3) Efectuar rutinariamente la limpieza del motor, con el propósito de eliminar la suciedad, el polvo y otros objetos extraños, que impidan su óptimo funcionamiento.

Ventilación del motor:

- 4) Limpiar y verificar la correcta alineación del ventilador, con el fin de poder evitar las pérdidas por efecto Joule, en el caso de que los orificios de ventilación se encuentren obstruidos; además de evitar también las pérdidas por fricción y ventilación, en el caso de tener una mala alineación del ventilador en la parte posterior del rotor. Con esto se reducen las posibilidades de un sobrecalentamiento, además de la reducción en la eficiencia del motor.

- 5) La regularidad con la que la limpieza y la verificación en la alineación del ventilador se realice, dependerá de las condiciones en las que el motor este trabajando, pero es recomendable desmontarlo al menos una vez al año para realizar la limpieza y la verificación de la alineación completa del sistema de ventilación

Rodamientos (cojinetes, valeros o chumaceras):

- 6) Mantener en óptimas condiciones los cojinetes del motor, ya que una cantidad considerable de energía se pierde en los cojinetes en mal estado o si su lubricación es inadecuada (insuficiente o excesiva). Repárelos o sustitúyalos si tienen algún desperfecto y siga instrucciones del fabricante para lograr una correcta lubricación.
- 7) Mantener en buen estado los valeros o chumaceras, ya que un rodamiento en mal estado provoca pérdidas por fricción y ventilación, disminuyendo así la eficiencia del motor e incluso llegar a provocar averías severas en el motor. Si un balero se encuentra desgastado hay que reemplazarlo por otro de las mismas características.

Eje o flecha del motor:

- 8) Reparar o cambiar los ejes del motor y de la transmisión, si se han doblado por sobrecarga o por mal uso. Un eje en mal estado incrementa las pérdidas por fricción y puede ocasionar daños severos sobre todo en los cojinetes o valeros del motor.

Carga que acciona el motor:

- 9) Instalar motores de velocidad ajustable con reguladores electrónicos, en aquellos accionamientos, en donde la carga sea variable y se pueda controlar ajustando la velocidad. Por ejemplo en sistemas de bombeo o compresión que deben suministrar caudales variables y que para hacerlo utilicen válvulas u otros dispositivos de control. La eficiencia total del motor y su carga se eleva notablemente con ahorros importantes de energía.
- 10) Preferir el acoplamiento individual, en accionamientos con un grupo de motores, así se consigue mejor que cada motor trabaje lo más cercas posible de su máxima carga.
- 11) Acoplar directamente el motor a la carga siempre que el accionamiento lo permita. Con esto se evitan las pérdidas en el mecanismo de transmisión.
- 12) Verificar periódicamente la alineación del motor con la carga impulsada. Una alineación defectuosa puede incrementar las pérdidas por rozamiento y en caso extremo daños mayores en el motor y en la carga.
- 13) Mantener en buen estado los medios de transmisión entre el motor y la carga, tales como: poleas, engranes, bandas, cadenas o cualquier otro sistema de acoplamiento. Si estos no se encuentran en condiciones apropiadas o su instalación es incorrecta, pueden ocasionar daños importantes, además de representar una carga inútil para el motor.

Tiempo de operación e historial de reparaciones:

- 14) Sustituir los motores antiguos o de uso intenso. Los costos de operación y mantenimiento de motores viejos o de motores que por su uso han depreciado sus características de operación, pueden justificar su sustitución por motores normalizados y de alta eficiencia.
- 15) Analice cuidadosamente el costo de la reparación de sus motores trifásicos de inducción sobre todo cuando se trate de un rebobinado. Tome en cuenta que una reparación deficiente, en muchos casos debido al empleo de materiales diferentes o de menor calidad que los de fábrica, puede provocar una disminución del factor de potencia en los motores. Es necesario que la reparación la realice personal calificado para garantizar la compostura.
- 16) Cuando los daños en un motor sean mayores puede resultar más económico sustituir un motor que componerlo. Evalúe técnica y económicamente la posibilidad de hacerlo y si lo decide utilice motores de alta eficiencia.

Horario de operación:

- 17) Debe tomar en cuenta, que un aspecto importante son las tarifas eléctricas que se aplican a la industria, ya que además del cargo por consumo de energía (Kwh), hacen un cargo por demanda máxima (Kw), que es importante en la facturación. Dicha demanda máxima es registrada por un medidor conforme la potencia que consumen motores lámparas y otros aparatos eléctricos se encuentren funcionando simultáneamente durante un lapso de 15 minutos.
- 18) Evite el arranque y la operación simultánea de los motores y otros equipos eléctricos, sobre todo en el periodo de punta (de las 18 a las 22 hrs) se traduce en ahorros significativos en la cuenta de electricidad.
- 19) Considere la opción de extender los turnos de trabajo, repartiendo la operación de los motores y otros equipos en más horas de labores, fuera del periodo de punta. Los cargos por consumo de energía eléctrica pueden ser prácticamente iguales pero por demanda máxima pueden reducirse de manera importante.
- 20) Evitar hasta donde sea posible el arranque y la operación simultanea de motores, sobretodo los de mediana y gran capacidad, para disminuir el valor máximo de la demanda.

Eficiencia y factor de potencia:

- 21) Los motores que operan con cargas bajas disminuyen su factor de potencia así como su eficiencia. Por esto es importante adecuar la capacidad de los motores a sus cargas reales y evitar su operación prolongada en vacío.
- 22) Elegir correctamente la potencia del motor. El rendimiento máximo se obtiene cuando este opera entre el 75% y el 95% de su potencia nominal y cae bruscamente para cargas reducidas o cuando trabaja sobrecargado. Normalmente los motores trifásicos de inducción a cargas bajas o en vacío tienen un factor de potencia muy bajo.

- 23) 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 un motor y su carga operan a su máxima eficiencia.
- 24) Tenga siempre en cuenta el empleo de motores de alta eficiencia, ya que reducen las pérdidas y los costos de operación.
- 25) Seleccionar el motor adecuado con su ciclo de trabajo. Operar un motor para servicio continuo, en accionamientos de operación intermitente, con frecuentes arranques y paros, ocasiona una depreciación de sus características de operación y eficiencia. Además de que puede dañar el aislamiento de los devanados por la elevación de la temperatura.
- 26) Seleccionar correctamente la velocidad del motor. Si la carga lo permite prefiera motores de alta velocidad, son más eficientes y si se trata de motores de corriente alterna, trabajan con un mejor factor de potencia.
- 27) Verifique y si es posible corrija la caída de tensión en los alimentadores. Una tensión reducida en las terminales del motor, acarreará entre otros, un incremento de la corriente, sobrecalentamiento y disminución de su eficiencia. Las normas permiten una caída máxima del 3% (o del 15% en la combinación de alimentador y circuito derivado) pero es recomendable que no rebase el 1%.
- 28) Balancear la tensión de alimentación en los motores trifásicos de corriente alterna. El desequilibrio entre fases no debe excederse en ningún caso del 5%, pero mientras menor sea el desbalance, los motores operan con mayor eficiencia.
- 29) Compensar la energía reactiva (Q) demandada por los motores de corriente alterna más importantes o con mayor número de horas de funcionamiento, mejorando el factor de potencia de la instalación, con lo que se reducen las pérdidas de la potencia y de la tensión en los conductores.
- 30) Revisar periódicamente las conexiones del motor, junto con la de su arrancador y demás accesorios. Conexiones flojas o mal realizadas con frecuencia originan un mal funcionamiento del motor y ocasionan pérdidas por disipación de calor.
- 31) Realizar la inspección periódica del motor, incluyendo lecturas de corriente, potencia (Kw), velocidad (rpm), resistencia de aislamiento, etc., con objeto de verificar si se mantienen en condiciones apropiadas de funcionamiento y eficiencia, y poder tomar acciones correctivas, cuando se requieran.

7.5 AHORRO DE ENERGÍA CON LA UTILIZACIÓN DE MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

PROGRAMA DE CÁLCULO.

Para el motor trifásico de inducción uno (Motor I₁)

La potencia que se ahorraría al instalar el motor de alta eficiencia se puede determinar como sigue:

Datos:

- Es un motor de 20HP, que es recomendable sustituirlo por uno de 7.5HP.
- La tarifa aplicable a Herramientas Klein S.A de C.V es la HM.
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo intermedio = **2191.785714 hrs/año**
- Eficiencia calculada = **69.0710011%**
- Motor de alta eficiencia de 7.5HP, con una eficiencia nominal del **87.5%**

$$P_A = (0.746 \text{ Kw}) (\text{HP}) \left(\frac{100}{\eta_1} - \frac{100}{\eta_2} \right) \dots\dots\dots (6-6)$$

$$P_A = (0.746 \text{ Kw}) (7.5\text{HP}) \left(\frac{100}{69.0710011\%} - \frac{100}{87.5\%} \right)$$

P_A = 1.706074655 Kw

La energía intermedia que se ahorraría al año al instalar el motor de alta eficiencia es de:

Energía ahorrada al año = (P_A) (Horas de operación al año) (6-8)

Energía ahorrada al año = (1.706074655 Kw) (2191.785714 hrs/año) = **3739.350056 Kwh**

La cantidad de dinero que se ahorraría al año por utiliza el motor de alta eficiencia es de:

Datos:

- Precio por 1Kw.de demanda facturable (ver la tabla A6 perteneciente al anexo A)= **N\$63.80**
- Como este motor opera dentro del “periodo intermedio” (que comprende de 6:00 a 20:00 y de las 22:00 a 24:00) de lunes a viernes, entonces el precio por 1Kwh de energía intermedia es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = **N\$ 0.3856**

$$IAEE = \left(\left(\begin{array}{c} \text{Energía ahorrada} \\ \text{Al año.} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Precio por 1Kwh} \\ \text{De energía} \\ \text{Intermedia} \end{array} \right) \right) + \left(P_A \left(\begin{array}{c} \text{Precio por 1Kw de} \\ \text{demanda facturable} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} 12 \text{ meses} \\ \text{al} \\ \text{año} \end{array} \right) \right)$$

$$IAEE = [(3739.350056 \text{ kWh}) (\$0.3856)] + [(1.706074655 \text{ Kw}) (\$63.80) (12)]$$

$$IAEE = \underline{\underline{NS 2748.064137}}$$

Para el motor trifásico de inducción dos (Motor I₂)

La potencia que se ahorraría al instalar el motor de alta eficiencia se puede determinar como sigue:

Datos:

- Es un motor de 40HP, que es recomendable sustituirlo por uno de 15HP.
- La tarifa aplicable a Herramientas Klein S.A de C.V es la HM.
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo intermedio = 4099.928571 hrs/año
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo de punta = 515.7142856 hrs/año
- Eficiencia calculada = 75.44560971%
- Motor de alta eficiencia de 15HP, con una eficiencia nominal del 89.5%

$$P_A = (0.746 \text{ Kw}) (15\text{HP}) \left(\frac{100}{75.44560971\%} - \frac{100}{89.5\%} \right)$$

$$P_A = \underline{\underline{2.329083659 \text{ Kw}}}$$

La energía que se ahorraría al año al instalar el motor de alta eficiencia es de:

$$\text{Energía intermedia ahorrada al año} = (2.329083659 \text{ Kw}) (4099.928571 \text{ hrs/año}) = \underline{\underline{9549.076638 \text{ Kwh}}}$$

$$\text{Energía de punta ahorrada al año} = (2.329083659 \text{ Kw}) (515.7142856 \text{ hrs/año}) = \underline{\underline{1201.141715 \text{ Kwh}}}$$

La cantidad de dinero que se ahorraría al año por utiliza el motor de alta eficiencia es de:

Datos:

- Precio por 1Kw de demanda facturable (ver la tabla A6 perteneciente al anexo A)= NS\$63.80
- Como este motor opera dentro del “periodo intermedio” (que comprende de-6:00 a 20:00 y de las 22:00 a 24:00) de lunes a viernes y los sábados (que comprende de 7:00 a las 24:00), entonces el precio por 1Kwh de energía intermedia es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = NS 0.3856

- Como este motor opera dentro del “periodo de punta” (que comprende de 20:00 a 22:00) de lunes a viernes, entonces el precio por 1Kwh de energía de punta es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = **N\$ 1.2050**

$$IAEE = [(9549.076638 \text{ kWh}) (\$0.3856) + (1201.141715 \text{ Kwh}) (\$1.2050)] + [(2.329083659 \text{ Kw}) (\$63.80) (12)]$$

$$IAEE = \underline{\underline{N\$ 6912.646168}}$$

Para el motor trifásico de inducción tres (Motor I₃)

La potencia que se ahorraría al instalar el motor de alta eficiencia se puede determinar como sigue:

Datos:

- Es un motor de 15HP, que es recomendable sustituirlo por uno de 7.5HP.
- La tarifa aplicable a Herramientas Klein S.A de C.V es la HM.
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo intermedio = **4099.928571 hrs/año**
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo de punta = **515.7142856 hrs/año**
- Eficiencia calculada = **48.03828503%**
- Motor de alta eficiencia de 7.5HP, con una eficiencia nominal del **87.5%**

$$P_A = (0.746 \text{ Kw}) (7.5\text{HP}) \left(\frac{100}{48.03828503\%} - \frac{100}{87.5\%} \right)$$

$$P_A = \underline{\underline{5.252674614 \text{ Kw}}}$$

La energía que se ahorraría al año al instalar el motor de alta eficiencia es de:

$$\text{Energía intermedia ahorrada al año} = (5.252674614 \text{ Kw}) (4099.928571 \text{ hrs/año}) = \underline{\underline{21,535.59072 \text{ Kwh}}}$$

$$\text{Energía de punta ahorrada al año} = (5.252674614 \text{ Kw}) (515.7142856 \text{ hrs/año}) = \underline{\underline{2708.879336 \text{ Kwh}}}$$

La cantidad de dinero que se ahorraría al año por utiliza el motor de alta eficiencia es de:

Datos:

- Precio por 1Kw de demanda facturable (ver la tabla A6 perteneciente al anexo A)= **N\$63.80**
- Como este motor opera dentro del “periodo intermedio” (que comprende de 6:00 a 20:00 y de las 22:00 a 24:00) de lunes a viernes y los sábados (que comprende de 7:00 a las 24:00), entonces el precio por 1Kwh de energía intermedia es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = **N\$ 0.3856**
- Como este motor opera dentro del “periodo de punta” (que comprende de 20:00 a 22:00) de lunes a viernes, entonces el precio por 1Kwh de energía de punta es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = **N\$ 1.2050**

$$IAEE = [(21,535.59072 \text{ kWh}) (\$0.3856) + (2708.879336 \text{ Kwh}) (\$1.2050)] + [(5.252674614 \text{ Kw}) (\$63.80) (12)]$$

$$IAEE = \underline{\underline{NS 15,589.77107}}$$

Para el motor trifásico de inducción cuatro (Motor I₄)

La potencia que se ahorraría al mejorar la eficiencia del motor de alta eficiencia se puede determinar como sigue:

Datos:

- Es un motor de 40HP, que es recomendable aumentar la carga hasta el valor nominal de la potencia del motor..
- La tarifa aplicable a Herramientas Klein S.A de C.V es la HM.
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo intermedio = **2191.785714 hrs/año**
- Eficiencia calculada = **72.20880123%**
- Eficiencia nominal del **93%**

$$P_A = (0.746 \text{ Kw}) (40\text{HP}) \left(\frac{100}{72.20880123\%} - \frac{100}{93\%} \right)$$

$$P_A = \underline{\underline{9.238580886 \text{ Kw}}}$$

La energía intermedia que se ahorraría al año al aumentar la carga hasta el valor nominal de la potencia del motor es de:

$$\text{Energía intermedia ahorrada al año} = (9.238580886 \text{ Kw}) (2191.785714 \text{ hrs/año}) = \underline{\underline{20,248.9896 \text{ Kwh}}}$$

La cantidad de dinero que se ahorraría al año por utiliza el motor de alta eficiencia es de:

Datos:

- Precio por 1Kw de demanda facturable (ver la tabla A6 perteneciente al anexo A)= **NS63.80**
- Como este motor opera dentro del “periodo intermedio” (que comprende de 6:00 a 20:00 y de las 22:00 a 24:00) de lunes a viernes, entonces el precio por 1Kwh de energía intermedia es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = **NS 0.3856**

$$IAEE = [(20,248.9896 \text{ kWh}) (\$0.3856)] + [(9.238580886 \text{ Kw}) (\$63.80) (12)]$$

$$IAEE = \underline{\underline{NS 14,881.06792}}$$

Para el motor trifásico de inducción cinco (Motor I₅)

La potencia que se ahorraría al instalar el motor de alta eficiencia se puede determinar como sigue:

Datos:

- Es un motor de 177HP, que es recomendable sustituirlo por uno de 150HP.
- La tarifa aplicable a Herramientas Klein S.A de C.V es la HM.
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo intermedio = 3536.32653 hrs/año
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo de base = 589.3877545 hrs/año
- Eficiencia calculada = 87.98212091%
- Motor de alta eficiencia de 150HP, con una eficiencia nominal del 94.1%

$$P_A = (0.746 \text{ Kw}) (150\text{HP}) \left(\frac{100}{87.98212091\%} - \frac{100}{94.1\%} \right)$$

P_A = 8.268884501 Kw

La energía que se ahorraría al año al instalar el motor de alta eficiencia es de:

Energía intermedia ahorrada al año = (8.268884501 Kw) (3536.32653 hrs/año) = **29,241.47563 Kwh**
 Energía de base ahorrada al año = (8.268884501 Kw) (589.3877545 hrs/año) = **4873.579268 Kwh**

La cantidad de dinero que se ahorraría al año por utiliza el motor de alta eficiencia es de:

Datos:

- Precio por 1Kw de demanda facturable (ver la tabla A6 perteneciente al anexo A)= **N\$63.80**
- Como este motor opera dentro del “periodo intermedio” (que comprende de 6:00 a 20:00 y de las 22:00 a 24:00) de lunes a viernes y los sábados (que comprende de 7:00 a las 24:00), entonces el precio por 1Kwh de energía intermedia es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = **N\$ 0.3856**
- Como este motor opera dentro del “periodo de base” (que comprende de 0:00 a 19:00) del domingo, entonces el precio por 1Kwh de energía de base es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = **N\$ 0.3220**

IAEE = [(29,241.47563 kWh) (\$0.3856) + (4873.579268 Kwh) (\$0.3220)] + [(8.268884501 Kw) (\$63.80) (12)]

IAEE = **N\$ 19,175.4635**

Para el motor trifásico de inducción seis (Motor I₆)

La potencia que se ahorraría al instalar el motor de alta eficiencia se puede determinar como sigue:

Datos:

- Es un motor de 15HP, que es recomendable sustituirlo por otro de la misma capacidad.
- La tarifa aplicable a Herramientas Klein S.A de C.V es la HM.
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo intermedio = **3536.32653 hrs/año**
- Horas de funcionamiento al año dentro del periodo de base = **589.3877545 hrs/año**
- Eficiencia calculada = como esta eficiencia sobrepasa el 100%, debido al bajo factor de potencia, entonces se obtendrá de tablas la eficiencia mínima garantizada de un motor cerrado de eficiencia estándar de 15HP, y que es del **85.0%**
- Motor de alta eficiencia de 150HP, con una eficiencia nominal del **88.5%**

$$P_A = (0.746 \text{ Kw}) (15\text{HP}) \left(\frac{100}{85.0\%} - \frac{100}{88.5\%} \right)$$

P_A = 0.520638085 Kw

La energía que se ahorraría al año al instalar el motor de alta eficiencia es de:

Energía intermedia ahorrada al año = (0.520638085 Kw) (3536.32653 hrs/año) = **1841.146273 Kwh**
 Energía de base ahorrada al año = (0.520638085 Kw) (589.3877545 hrs/año) = **306.8577118 Kwh**

La cantidad de dinero que se ahorraría al año por utiliza el motor de alta eficiencia es de:

Datos:

- Precio por 1Kw de demanda facturable (ver la tabla A6 perteneciente al anexo A)= **NS\$63.80**
- Como este motor opera dentro del “periodo intermedio” (que comprende de 6:00 a 20:00 y de las 22:00 a 24:00) de lunes a viernes y los sábados (que comprende de 7:00 a las 24:00), entonces el precio por 1Kwh de energía intermedia es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = **NS \$ 0.3856**
- Como este motor opera dentro del “periodo de base” (que comprende de 0:00 a 19:00) del domingo, entonces el precio por 1Kwh de energía de base es de (ver la tabla A11 perteneciente al anexo A) = **NS \$ 0.3220**

IAEE = [(1841.146273Wh) (\$0.3856) + (306.8577118 Kwh) (\$0.3220)] + [(0.5206638085 Kw) (\$63.80) (12)]

IAEE = **NS 1207.354704**

Para determinar la cantidad de dinero total que se ahorraría al año (por la utilización de cinco motores de alta eficiencia, para el caso de los motores I₁, I₂, I₃, I₅ e I₆; y al mejorar la eficiencia del motor I₄) será necesario hacer lo siguiente:

$$IAEE = \$2748.064137 + \$6912.646168 + \$15,589.77107 + \$14,881.06792 + \$19,175.4635 + \$1207.354704 = \underline{\underline{N\$ 60,514.3675}}$$

La recuperación de la inversión hecha al adquirir los motores de alta eficiencia se tendrá en:

Datos:

- Precio del motor trifásico de inducción de alta eficiencia de 7.5HP (que se recomienda sustituir por el motor I₁) es de = N\$5035 + I.V.A
- Precio del motor trifásico de inducción de alta eficiencia de 15HP (que se recomienda sustituir por el motor I₂) es de = N\$4380 + I.V.A
- Precio del motor trifásico de inducción de alta eficiencia de 7.5HP (que se recomienda sustituir por el motor I₃) es de = N\$5035 + I.V.A
- Precio del motor trifásico de inducción de alta eficiencia de 150HP (que se recomienda sustituir por el motor I₅) es de = N\$32,937 + I.V.A
- Precio del motor trifásico de inducción de alta eficiencia de 15HP (que se recomienda sustituir por el motor I₆) es de = N\$8663 + I.V.A

Nota:

Los precios anteriores fueron obtenidos de Energía Controlada de México S.A de C.V. (tels 5655-08-16, 5573-5837, fax: 5655-2302) en México DF. Los precios son de motores de alta eficiencia marca SIEMENS, ya que resulto ser la más económica.

$$\text{Recuperación de la inversión} = \frac{(\$4380+I.V.A) + (\$5035+I.V.A) + (\$32,937+I.V.A) + (\$8663+I.V.A)}{\$60,514.3675}$$

$$\text{Recuperación de la inversión} = 0.84302294 \text{ años} \approx 10.1162 \text{ meses}$$

El resultado anterior, quiere decir que se tardaran 0.8430 años en recuperar la inversión hecha al adquirir los motores de alta eficiencia, gracias al ahorro económico que se obtendría al poner en operación a los cinco motores de alta eficiencia, además de mejorar la eficiencia de operación del Motor I₄.

Por último se añadirá el cargo por medición en baja tensión que se tendría en un año, así como la bonificación que se tiene en el factor de potencia en un año.

$$\text{Cargo por medición en baja tensión} = (IAEE_{TOTAL}) (0.24)$$

$$\text{Cargo por medición en baja tensión} = (\$60,514.3675) (0.24) = \underline{\underline{N\$ 14,523.4482}}$$

Bonificación por factor de potencia superior al 90% en un año:

Obteniendo un promedio del factor de potencia que se tiene en un año (ver la tabla 3), este es de:

$$\frac{0.9562+0.94698+0.95762+0.95054+0.94989+0.95635+0.94868+0.94069+0.93774+0.956+0.95667+0.96331}{12}$$

Factor de Potencia promedio = **0.951674166**

$$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{F.P} \right) \dots\dots\dots (6-12)$$

$$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{90}{95.1674166} \right) = 0.013574542$$

Bonificación en un año = (IAEE_{TOTAL}) (Valor de la bonificación por alto F.P)

Bonificación en un año = (\$60,514.3675) [(0.013574542) (12)] = **N\$ 9857.458307**

Ahorro económico anual que se obtendría en la facturación:

(IAEE_{TOTAL}) + (Cargo por demanda en baja tensión) + (Bonificación)

(\$60,514.3675) + (\$14,523.4482) + (9857.458307) = N\$ 84,895.27401

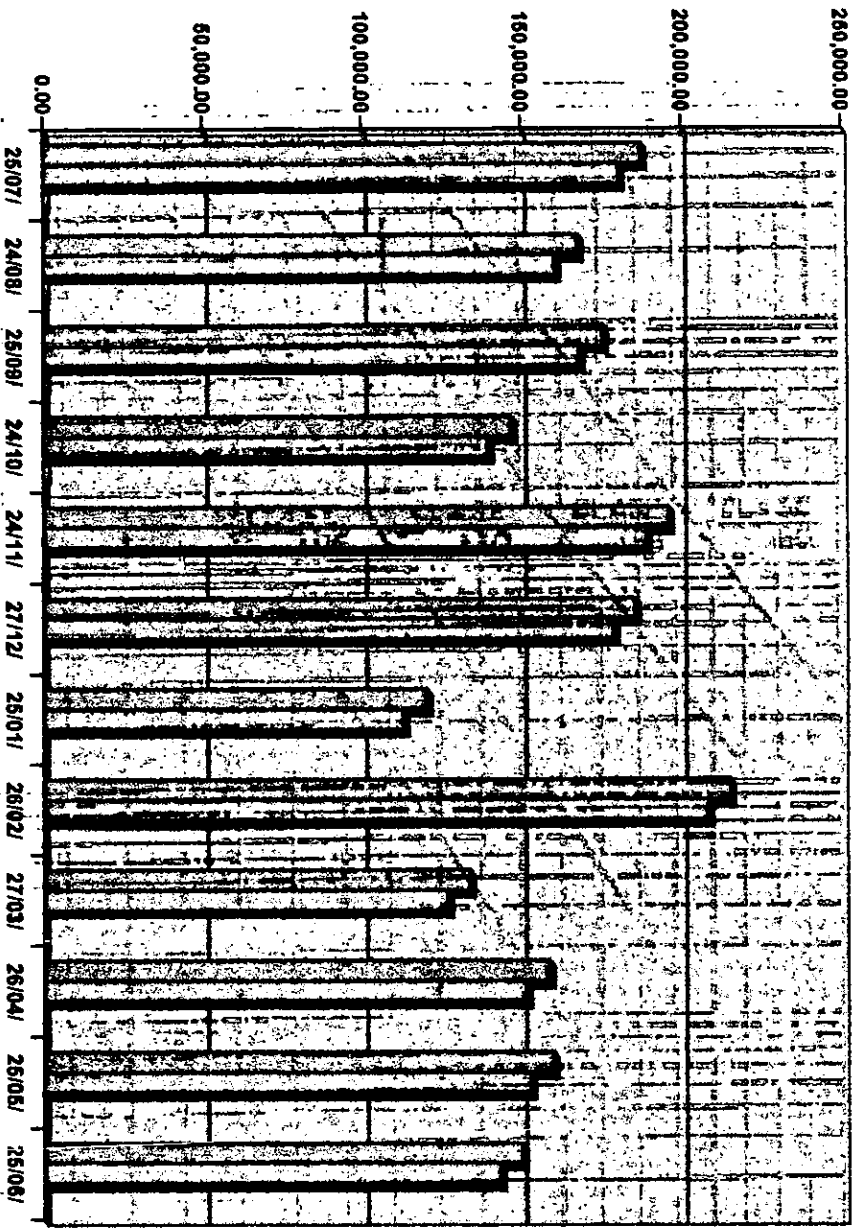
El valor anterior, es el ahorro económico anual que se obtendría al sustituir cinco de los motores existentes por motores de alta eficiencia y al mejorar la eficiencia del motor L₄.

El pago total realizado en un año según los datos recopilados en la tabla 3 es de N\$ 1,995 997, por lo que con el ahorro que se obtendría (según las recomendaciones aquí hechas) en el próximo año se pagara la cantidad aproximada de N\$ 1,911 101.726. Gracias al ahorro económico que se obtuvo de N\$ 84,895.27401, cantidad que representa un ahorro económico del 4.2532% al año.

Por lo que sí hacemos una comparación de los datos contenidos en la tabla 3, con respecto a lo que se podría obtener el próximo año al llevar a cabo las recomendaciones aquí descritas, se tendría lo que se puede observar en las siguientes gráficas.

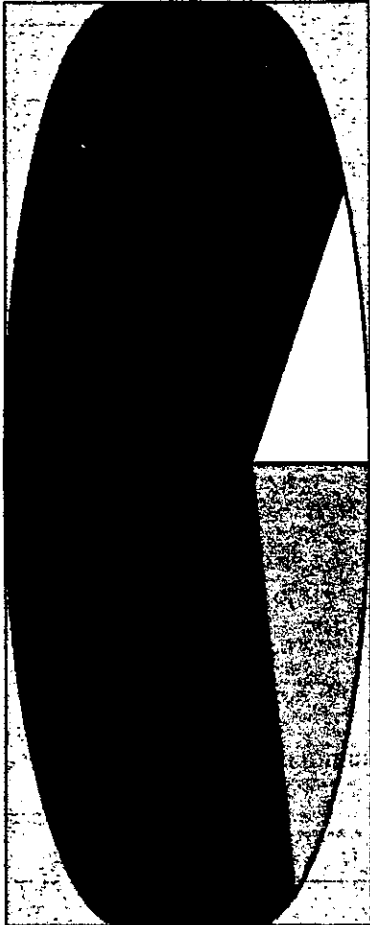
Tabulación de los valores que serán graficados:

PERIDO DE FACTURACIÓN	VALORES DE LA TABLA 3	VALORES CON EL AHORRO
25 DE JULIO	187,549.00	180,474.3938
24 DE AGOSTO	167,761.00	160,686.3938
25 DE SEPTIEMBRE	175,287.00	168,212.3938
24 DE OCTUBRE	146,869.00	139,794.3938
24 DE NOVIEMBRE	195,969.00	188,894.3938
27 DE DICIEMBRE	185,571.00	178,496.3938
25 DE ENERO	119,920.00	112,845.3938
26 DE FEBRERO	214,919.00	207,844.3938
27 DE MARZO	133,640.00	126,565.3938
26 DE ABRIL	158,471.00	151,396.3938
25 DE MAYO	159,805.00	152,730.3938
25 DE JUNIO	150,236.00	143,161.3938



PAGO REALIZADO DEL 26 DE JULIO DEL 2000 AL 25 DE JUNIO DEL 2001
 LO QUE SE PODRÍA PAGAR DEL 25 DE JUNIO DEL 2001 AL 25 DE JULIO DEL 2002
 Norte

En esta grafica es posible apreciar el beneficio económico que se obtendría en los doce meses del año, al poner en practica las recomendaciones propuestas en este diagnóstico energético. Es obvio ver la reducción de las cantidades pagadas por el consumo de energía eléctrica, las cuales se reducen notablemente.



- CARGO POR CONSUMO DE ENERGÍA (Kwh) DE BASE CONSUMIDA EN UN AÑO.
- CARGO POR ENERGÍA (Kwh) INTERMEDIA CONSUMIDA EN UN AÑO.
- CARGO POR ENERGÍA (Kwh) DE PUNTA CONSUMIDA EN UN AÑO.
- 4to trim.

En esta gráfica es posible observar los tres tipos de energía que se tarifican en la tarifa HM, además de ver que energía es la que se consume más por parte de Herramientas Klein. Por la energía de base consumida en un año se paga N\$ 480.000 (19%), por la energía intermedia consumida en un año se paga N\$ 1,775,000 (71%), por la energía de punta consumida en un año se paga N\$261,000 (10%). Por lo que es posible darse cuenta de que como los seis motores a los cuales se les aplico el diagnóstico energético, operan dentro del periodo intermedio, por lo que si se logra ahorrar energía en estos motores (con las recomendaciones aquí descritas) se lograra disminuir el consumo de la energía intermedia.

7.6 IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

El fin de proponer un programa de ahorro de energía eléctrica, es el de obtener un beneficio adicional para poder corregir el consumo de la energía eléctrica con más eficacia. Así que aquí se presentaran los puntos que son más recomendables tener siempre en cuenta.

1) Reducción de la demanda máxima

La demanda máxima medida se determina mensualmente por medio de instrumentos de medición que indiquen la demanda medida en kilowatts durante cualquier intervalo de 15 minutos, en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodo de facturación. Por lo que entre más alta sea la demanda máxima en un momento dado por un periodo de 15 minutos, más alto será también su cargo en la facturación de electricidad, por otro lado entre más uniforme se pueda repartir el consumo de energía eléctrica, más bajo será el cargo por demanda máxima.

La forma de distribuir la demanda máxima fuera de las horas pico del consumo de energía, se denomina “administración de la demanda máxima”, por lo que para esto se recomienda lo siguiente:

- a) Evitar la energización simultánea de equipos y cargas eléctricas cuyas corrientes de arranque sean altas.
- b) Establecer un programa de operación de equipos que permita la creación de turnos de trabajo, repartiendo la demanda máxima de los equipos en más horas de labor. En este caso el cargo por consumo de energía será prácticamente igual, pero su demanda máxima puede reducirse incluso a la mitad.
- c) Instalar un sistema de control automático que vigile el comportamiento de la demanda y realice desconexión o limitación de cargas según un programa preestablecido de acuerdo con las funciones propias de la empresa en cuestión.

2) Reducción de la energía consumida

Aquí se darán los puntos más importantes para poder reducir el consumo de la energía eléctrica.

- a) Tener operando los motores a su potencia nominal, es decir, adecuar la capacidad de los motores a sus cargas reales.
- b) No tener operando motores viejos y que además hallan sido reparados de sus devanados.
- c) Utilización de motores de alta eficiencia.

- a) Realizar la inspección periódica del motor, incluyendo lecturas de corriente, potencia (Kw), velocidad (rpm), resistencia de aislamiento, etc., con objeto de verificar si se mantienen en condiciones apropiadas de funcionamiento y eficiencia, y poder tomar acciones correctivas, cuando se requieran.
- b) Realizar mantenimiento preventivo por lo menos una vez al año, para verificar el buen funcionamiento de todos los componentes del motor. En el caso de desgaste excesivo en algunas de las piezas de dicho motor, se tendrán que reemplazar por piezas nuevas. En el caso de que un motor se haya quemado de sus devanados, es mejor adquirir uno nuevo que mandarlo a reparar.
- c) Mantener actualizados los manuales de operación de los motores, incorporando en estos las modificaciones que tengan lugar.
- d) Colocar carteles con instrucciones concretas para los operarios, con la finalidad de que los motores operen con la mayor seguridad y eficiencia.
- e) Establecer una campaña permanente de ahorro de energía en sus instalaciones, dentro de la cual es fundamental concienciar a su personal. MotíVELO a que participe activamente y tome en cuenta sus opiniones y sugerencias. Muchas de ellas pueden representar verdaderas oportunidades de ahorro.
- f) Capacite a su personal de mantenimiento, con respecto a lo importante que es ahorrar energía eléctrica en los motores. De esta manera ellos podrán detectar y corregir problemas que causen desperdicios en el consumo de la energía eléctrica en los motores, al realizarles el mantenimiento preventivo de rutina.
- g) Es conveniente contar con un especialista que supervise los trabajos de instalación, reparación y operación de los motores y así lograr su óptimo funcionamiento.

ANEXO A

TABLAS

Las siguientes tablas fueron obtenidas de la norma ANCE (Asociación Nacional de Normalización Y Certificación del Sector Eléctrico) "NMX - J - 075/1 - 1994 - ANCE", la cual es la parte 1: Motores de Inducción de Corriente Alterna del Tipo de Rotor en Corto Circuito en Potencias Desde 0.062 a 373 Kw (Especificaciones).

Tabla A1. Clases de aislamiento.

Nomenclatura	Clase de Aislamiento	Temperatura °K (°C)
A	105	378.15K (105 °C)
B	130	403.15K (130 °C)
F	155	428.15K (155 °C)
H	180	473.15K (180 °C)

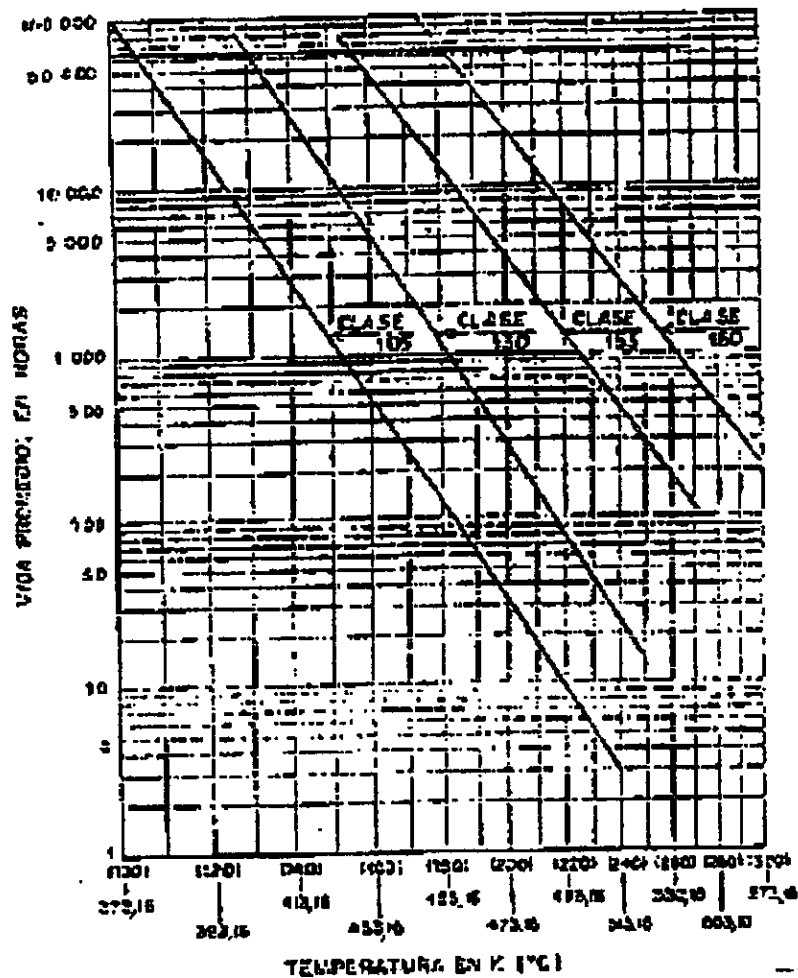


Figura A. Vida promedio para las diferentes clases de aislamiento.

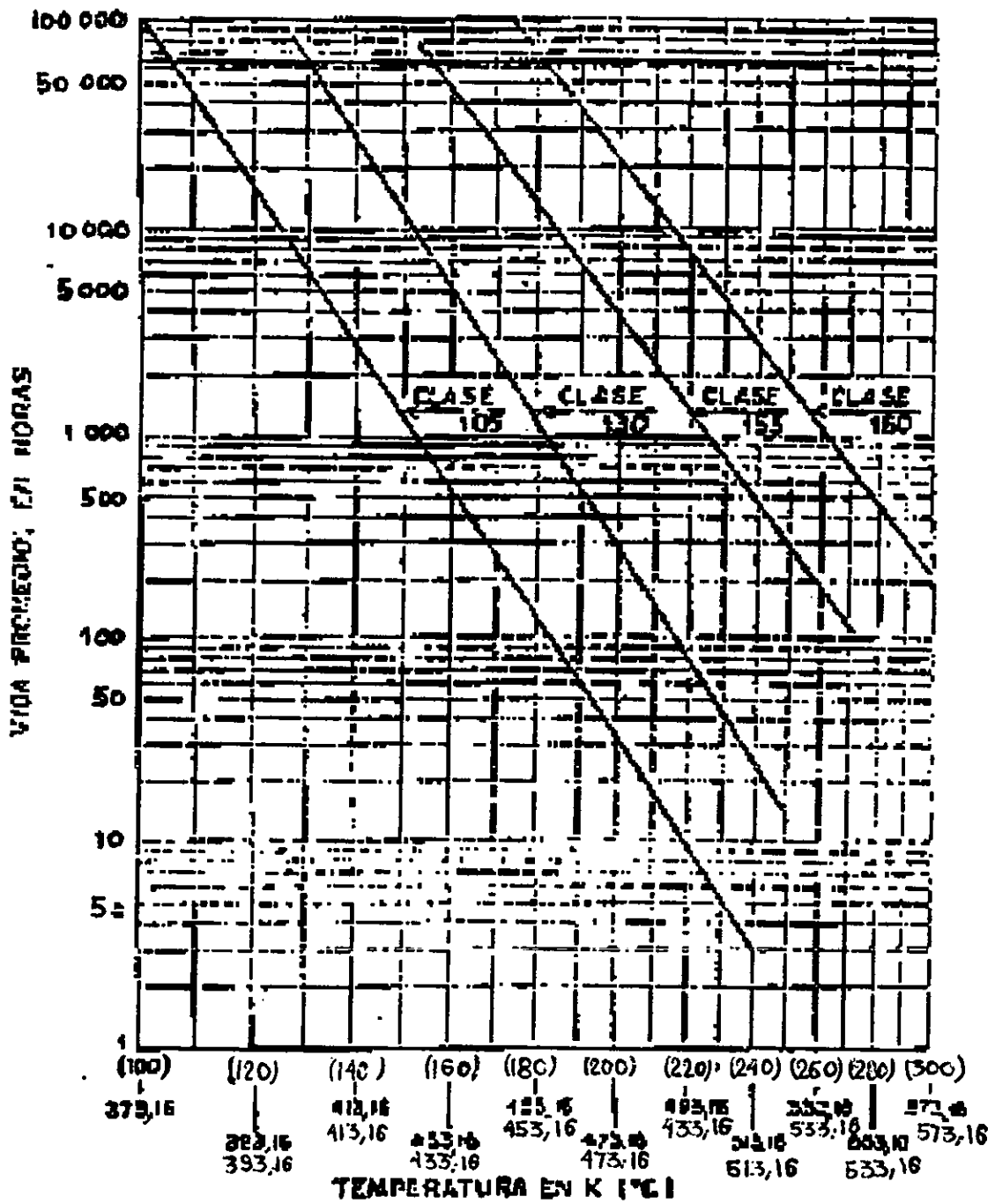


Tabla A2. Velocidades sincronas en revoluciones por minuto.

Frecuencia (Hz)	60						
	2	4	6	8	10	12	14
Número de polos							
Velocidad Sincrona (rpm)	3600	1800	1200	900	720	600	514

Las potencias nominales en Kw (HP), para las que se construyen los motores trifásicos son:

0.187 (1/4)	2.238 (3)	22.38 (30)	111.9 (150)	373.0 (500)
0.249 (1/3)	3.73 (5)	29.84 (40)	149.2 (200)	
0.373 (1/2)	5.60 (7 ½)	37.30 (50)	186.5 (250)	
0.560 (3/4)	7.46 (10)	44.76 (60)	223.8 (300)	
0.746 (1)	11.19 (15)	55.95 (75)	261.1 (350)	
1.119 (1 ½)	14.92 (20)	74.60 (100)	298.4 (400)	
1.492 (2)	18.65 (25)	93.25 (125)	335.7 (450)	

Tabla A3. Valores de eficiencias a plena carga para motores estándar cerrados.

POTENCIA NOMINAL (HP)	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS
1.0	74.0	75.5	75.5	72.0
1.5	77.0	80.0	78.5	75.5
2.0	80.0	81.5	78.5	75.5
3.0	81.5	81.5	80.0	75.5
5.0	82.5	84.0	81.5	82.5
7.5	84.0	86.5	82.5	84.0
10	85.5	86.5	84.0	85.5
15	85.5	87.5	85.5	85.5
20	86.5	87.5	86.5	86.5
25	86.5	89.5	86.5	86.5
30	87.5	90.2	87.5	87.5
40	88.5	90.2	88.5	88.5
50	88.5	91.0	88.5	89.5
60	89.5	91.7	89.5	89.5
75	89.5	91.7	90.2	89.5
100	90.2	92.4	90.2	90.2
125	91.0	92.4	91.0	91.0
150	91.0	92.4	91.0	91.7
200	91.7	93.0	91.7	91.7

Tabla A4. Valores de eficiencias a plena carga para motores estándar abiertos.

POTENCIA NOMINAL (HP)	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS
1.0	72.0	72.0	72.0	72.0
1.5	72.0	74.0	74.0	74.0
2.0	74.0	75.5	75.5	75.5
3.0	80.0	81.5	80.0	78.5
5.0	80.0	81.5	80.0	80.0
7.5	81.5	82.5	81.5	81.5
10	82.5	82.5	82.5	82.5
15	84.0	84.0	84.0	84.0
20	84.0	84.0	84.0	84.0
25	86.5	86.5	86.5	86.5
30	87.5	88.5	87.5	87.5
40	88.5	89.5	88.5	88.5
50	89.5	89.5	89.5	89.5
60	90.2	90.2	90.2	90.2
75	90.2	90.2	90.2	90.2
100	90.2	91.0	90.2	90.2
125	91.0	92.4	91.0	91.0
150	91.0	92.4	91.0	91.0
200	91.7	93.0	91.7	91.7

Tabla A5. Valores de eficiencia a plena carga para motores de alta eficiencia cerrados.

POTENCIA NOMINAL (HP)	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS
1.0	75.5	82.5	80.0	74.0
1.5	82.5	84.0	85.5	77.0
2.0	84.0	84.0	86.5	82.5
3.0	85.5	87.5	87.5	84.0
5.0	87.5	87.5	87.5	85.5
7.5	88.5	89.5	89.5	85.5
10	89.5	89.5	89.5	88.5
15	90.2	91.0	90.2	88.5
20	90.2	91.0	90.2	89.5
25	91.0	92.4	91.7	89.5
30	91.0	92.4	91.7	91.0
40	91.7	93.0	93.0	91.0
50	92.4	93.0	93.0	91.7
60	93.0	93.6	93.6	91.7
75	93.0	94.1	93.6	93.0
100	93.6	94.5	94.1	93.0
125	94.5	94.5	94.1	93.6
150	94.5	95.0	95.0	93.6
200	95.0	95.0	95.0	94.1

Tabla A6. Valores de eficiencia a plena carga para motores de alta eficiencia abiertos.

POTENCIA NOMINAL (HP)	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS
1.0		82.5	80.0	74.0
1.5	82.5	84.0	84.0	75.5
2.0	84.0	84.0	85.5	85.5
3.0	84.0	86.5	86.5	86.5
5.0	85.5	87.5	87.5	87.5
7.5	87.5	88.5	88.5	88.5
10	88.5	89.5	90.2	89.5
15	89.5	91.0	90.2	89.5
20	90.2	91.0	91.0	90.2
25	91.0	91.7	91.7	90.2
30	91.0	92.4	92.4	91.0
40	91.7	93.0	93.0	91.0
50	92.4	93.0	93.0	91.7
60	93.0	93.6	93.6	92.4
75	93.0	94.1	93.6	93.6
100	93.0	94.1	94.1	93.6
125	93.6	94.5	94.1	93.6
150	93.6	95.5	94.5	93.6
200	94.5	95.0	94.5	93.6

Las siguientes tablas fueron obtenidas de la pagina de CONAE en internet www.conae.gob.mx.

Tarifa H-M (2000 - 2001)

Tarifa horaria para servicio general en media tensión, con demanda de 100 Kw o más.

Cuotas aplicables en el mes de Agosto del 2001.

Tabla A7. Valores del cargo por demanda facturable; energía de punta, intermedia y de base.

REGIÓN	CARGO POR KILOWATT DE DEMANDA FACTURABLE	CARGO POR KILOWATT-HORA DE ENERGÍA DE PUNTA	CARGO POR KOLIWATT-HORA DE ENERGÍA DE INTERMEDIA	CARGO POR KOLIWATT-HORA DE ENERGÍA DE BASE
Baja California	\$ 92.01	\$ 1.2574	\$ 0.3480	\$ 0.2737
Baja California Sur	\$ 88.40	\$ 1.0090	\$ 0.4829	\$ 0.3418
Central	\$ 63.80	\$ 1.2050	\$ 0.3856	\$ 0.3220
Noreste	\$ 58.63	\$ 1.1134	\$ 0.3580	\$ 0.2931
Noroeste	\$ 110.76	\$ 1.0669	\$ 0.3822	\$ 0.3074
Norte	\$ 58.91	\$ 1.1214	\$ 0.3614	\$ 0.2941
Peninsular	\$ 65.88	\$ 1.2607	\$ 0.4041	\$ 0.3099
Sur	\$ 63.80	\$ 1.1801	\$ 0.3687	\$ 0.3060

Periodos de punta intermedio y base.

Región Baja California

Del primer de Mayo al sábado anterior al último domingo de Octubre

Tabla A8

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes		0:00 – 12:00 18:00 – 24:00	12:00 – 18:00
Sábados		0:00 – 24:00	
Domingos y Festivos		0:00 – 24:00	

Del último domingo de Octubre al 30 de Abril.

Tabla A9

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes	0:00 – 17:00 22:00 – 24:00	17:00 – 22:00	
Sábados	0:00 – 18:00 21:00 – 24:00	18:00 – 21:00	
Domingos y Festivos	0:00 – 24:00		

Región Baja California Sur

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre.

Tabla A10

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes		0:00 – 12:00 22:00 – 24:00	12:00 – 22:00
Sábados		0:00 – 19:00 22:00 – 24:00	19:00 – 22:00
Domingos y Festivos		0:00 – 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril.

Tabla A11

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes	0:00 – 18:00 22:00 – 24:00	18:00 – 22:00	
Sábados	0:00 – 18:00 21:00 – 24:00	18:00 – 21:00	
Domingos y Festivos	0:00 – 19:00 21:00 – 24:00	19:00 – 21:00	

Regiones Central, Noreste, Norte y Sur.

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre.

Tabla A12

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes	0:00 – 6:00	6:00 – 20:00 22:00 – 24:00	20:00 – 22:00
Sábados	0:00 – 7:00	7:00 – 24:00	
Domingos y Festivos	0:00 – 19:00	19:00 – 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril.

Tabla A13

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes	0:00 – 6:00	6:00 – 18:00 22:00 – 24:00	18:00 – 22:00
Sábados	0:00 – 8:00	8:00 – 19:00 21:00 – 24:00	19:00 – 21:00
Domingos y Festivos	0:00 – 18:00	18:00 – 24:00	

Región Noreste

Del 16 de mayo al sábado anterior al último domingo de octubre.

Tabla A14

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes		0:00 – 13:00 17:00 – 20:00 23:00 – 24:00	13:00 – 17:00 20:00 – 23:00
Sábados		0:00 – 24:00	
Domingos y Festivos		0:00 – 24:00	

Del último domingo de octubre al 15 de mayo.

Tabla A15

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes	0:00 – 17:00 22:00 – 24:00	17:00 – 22:00	
Sábados	0:00 – 18:00 22:00 – 24:00	18:00 – 22:00	
Domingos y Festivos	0:00 – 19:00 21:00 – 24:00	19:00 – 21:00	

Región Peninsular

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre.

Tabla A16

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes	0:00 – 8:00	8:00 – 19:00 22:00 – 24:00	19:00 – 22:00
Sábados	0:00 – 9:00	9:00 – 24:00	
Domingos y Festivos	0:00 – 18:00	18:00 – 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril.

Tabla A17

Día de la Semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a Viernes	0:00 – 9:00 23:00 – 24:00	9:00 – 18:00 21:00 – 23:00	18:00 – 21:00
Sábados	0:00 – 17:00	17:00 – 24:00	
Domingos y Festivos	0:00 – 18:00 23:00 – 24:00	18:00 – 23:00	

CONCLUSIÓN

La propuesta de una metodología de diagnóstico energético presentada en esta tesis, fue con el fin de disponer de una herramienta confiable para poder racionalizar el consumo de la energía eléctrica, en cualquier lugar en el que se encuentren operando motores trifásicos de inducción y síncronos. Por otro lado un diagnóstico energético puede traer beneficios adicionales, como el obtener ahorros económicos, aspecto que es de gran interés para una empresa o planta industrial, en la cual el pago realizado por consumo de energía eléctrica es importante.

El concepto de ahorro de energía no sólo implica a las empresas que la consumen, sino también a las que se dedican a la generación de la misma, ya que así es la única forma de poder tener una explotación moderada de los recursos naturales de nuestro país.

Una vez conociendo lo importante que resulta ahorrar energía eléctrica, se considero una buena idea el plantear y desarrollar una metodología de diagnóstico energético, para poderla así proponer en este trabajo de tesis. Con el objetivo de que cualquier persona sepa que al aplicar dicha metodología se tiene una alternativa más para poder aprovechar al máximo la energía eléctrica.

Ya contando con la metodología para llevar a cabo un diagnóstico energético, plasmada en papel, ahora el segundo paso era la aplicación de la misma, para poder observar sus resultados. De esta manera se consiguió el permiso por parte de una empresa que se dedica a la fabricación de herramientas, denominada "Herramienta Klein S.A de C.V.", ubicada en Tultitlan, Estado de México. Con las facilidades prestadas por parte de esta empresa se procedió a la aplicación de la metodología del diagnóstico energético, la cual arrojó los resultados mostrados en el capítulo 7; el diagnóstico energético se concentro sólo en seis motores trifásicos de inducción (ya que no habían motores síncronos) los de más alta potencia, por lo que representaban una mayor oportunidad de ahorro de energía eléctrica.

Gracias a la aplicación del diagnóstico energético, se pudo obtener a futuro (un año) un ahorro tanto de energía como económico, esto sólo fue mostrado por medio de cálculos, es decir teóricamente, por lo que se puede decir que la metodología del diagnóstico energético realmente cumplió con su objetivo. Sin embargo como la metodología de diseño de forma teórica, al llevarla al plano real se tuvieron que hacerle correcciones a la misma, de tal forma que fuera adaptable en la practica. De esta manera se obtuvo una metodología mucho más completa y la cual es la que se encuentra en el capítulo 6.

Así que la tesis aquí mostrada analiza, plantea y da una posible solución a un problema real, presentando un modelo de un diagnóstico energético, el cual al seguir y al aplicar su metodología, se logran localizar las fallas que causan el problema y por medio de recomendaciones se les pueden dar solución, teniendo siempre presente las características bajo las cuales funcionan los motores trifásicos tanto de inducción como síncronos. Además de lo anterior es posible poder observar como se debe aplicar el diagnóstico energético aquí mostrado, gracias al capítulo 7, en el cual es posible poder observar como es que se realizó el diagnóstico aquí propuesto en una empresa real y bajo condiciones reales. Logrando obtener de forma teórica muy buenos beneficios para dicha empresa.

Debido a todo lo anterior, esta tesis es una alternativa más para poder racionalizar el consumo de la energía eléctrica y evitar así los problemas que se puedan tener a futuro, con respecto a la generación de energía eléctrica, ya que debido a las deficiencias que se tienen en dicha área, por los bajo recursos económicos destinados a este sector en nuestro país, resulta muy importante el hacer todo lo posible por ahorrar energía eléctrica desde nuestros hogares hasta las grandes empresas, logrando de esta manera un apoyo significativo hacia la industria de generación de electricidad en México, cooperando como consumidores de la energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

Ahorro de Energía en Motores Eléctricos

Pablo Vargas Prudente.
Editorial Limusa.
Primera Edición.
Colección Textos Politécnicos.

Curso de Máquinas Síncronas.

Gilberto Enríquez Harper.
Editorial Limusa.
Edición en 1983.

Curso de Transformadores Y Motores de Inducción.

Gilberto Enríquez Harper.
Editorial Limusa.
Edición de 1998

Curso Para Formación de Consultores en Diagnósticos Energéticos de Primer Nivel.

Elaborado por la Comisión Nacional Para el Ahorro de Energía (CONAE) Y Saving de México.

El ABC de las Máquinas Eléctricas II (Motores de Corriente Alterna)

Gilberto Enríquez Harper.
Editorial Limusa.
Edición de 1992.

Fascículos realizados por el Fideicomiso Para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE):

- Como ahorrar energía eléctrica.
- Recomendaciones para el ahorro de energía en motores eléctricos.
- Aspectos básicos del factor de potencia orientados al ahorro de energía eléctrica.

Máquinas Eléctricas.

Stephen J Chapman.
Editorial Mac Graw Hill.
Segunda edición 1993.

Máquinas Eléctricas y Transformadores.

Kosow L. Irving.
Editorial Reverte S.A. de México.

Norma Oficial Mexicana (NOM-016-ENER-1997).

Referente a la eficiencia energética de motores de corriente alterna trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla, de uso general, en potencias nominales de 0.746 a 149.2 Kw (límites, métodos de prueba y mercado).

Elaborada por el instituto de Investigaciones Eléctricas.

Norma ANCE (NMX-J-075/1-1994-ANCE).

Referente a aparatos eléctricos-Máquinas rotatorias, parte I, Motores de inducción de corriente alterna del tipo de rotor en cortocircuito, en potencias desde 0.062 a 373 Kw- especificaciones.

Emitida por la Asociación Nacional de Normalización y Certificación del Sector Eléctrico (ANCE).

Normas NEMA (MG 1-1998).

Section III - Part 21 - Large Machines - Synchronous Motors.

Norma IEEE (std 115)

Efficiency and Losses.

Página de CONAE en internet

www.conae.gob.mx