



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

**"FUNCIONAMIENTO Y CARACTERISTICAS  
ELECTROMECHANICAS DE LOS MOTORES  
TRIFASICOS DE INDUCCION JAULA DE ARDILLA"**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

PRESENTA

**ALBINO ARTEAGA ESCAMILLA**

ASESOR: ING. VICTOR HUGO LANDA OROZCO

COASESOR: ING. ANSELMO ANGOA TORRES

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1997



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  
AVENIDA DE  
MEXICO

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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:  
"Funcionamiento y Características Electromecánicas de los Motores Trifásicos de Inducción  
Jaula de Artilla".

que presenta el pasante: Albino Arzozac Recamilla  
con número de cuenta: 1403745-0 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista.

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

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 27 de Abril de 1996

PRESIDENTE Ing. Francisco Gutiérrez Santos  
VOCAL Ing. Gasildo Rodríguez Arzozac  
SECRETARIO Ing. Víctor Hugo Landa Orasco  
PRIMER SUPLENTE Ing. Jaime Rodríguez Martínez  
SEGUNDO SUPLENTE Ing. Ramón García Galicia

# Agradecimientos:

---

*A mis padres:*

*Sr. Rosendo Arteaga Cruz  
Sra. Gabriela Escamilla Pérez*

*Con inmensa gratitud y respeto por otorgarme la dicha de vivir, brindarme la oportunidad de estudiar una carrera y el haberme dado una formación fundada en el respeto a mis semejantes, concientizándome desde pequeño acerca de los caminos que nos ofrece la vida y con esto desarrollar en mi una actitud crítica y poder elegir la senda por la cual el día de hoy transito. Ellos son ejemplo de honestidad, rectitud, responsabilidad y entrega a su trabajo, lo cual considero es su legado más preciado.*

*Quiero externar mi agradecimiento especial y amor infinito hacia mi madre que siempre me ha brindado su apoyo y sacrificio, que ha mostrado confianza en mí y me ha alentado siempre en aquellos momentos más difíciles, que supo reprenderme cuando así se requería y reconocer mis aciertos e impulsarme a seguir adelante. A ella le debo la vida y lo que soy.*

*Madre, a ti dedico esta tesis.*

*A mis hermanos:*

*Claudia, Leticia, Israel, Gabriela y Sandra, por apoyarme y mostrar confianza, comprensión y cariño en los momentos difíciles.*

*A mis tías y tíos:*

*Emiliana, Agustina, Juana, Rosa, Agustín, por todos los buenos consejos que me brindaron.*

---

*A mis primos:*

*Felisa, Cuauhtémoc, Roberto, Rocío, Azucena, Dalía, Jaime, por todo su apoyo, confianza, cariño y ese espíritu de lucha del cual me contagiaron, más que mis primos los considero mis hermanos.*

*A mi amiga:*

*Silvia Gómez P. con quien he compartido muchos de los momentos más felices de mi vida, y me ha demostrado su fidelidad, comprensión, cariño y apoyo incondicional en todo momento, con este trabajo le brindo un homenaje con respeto y gratitud.*

*A mis amigos:*

*Victor Hugo Landa O. y su bella esposa Ernestina Hidalgo, Anselmo Angoa T., que han estado conmigo en las buenas y en las malas brindándome sus consejos y su apoyo incondicional, que me han ayudado a aprender y me han dado un ejemplo a seguir de entrega a todo lo que hacen. Gracias a ellos este trabajo tuvo esta forma.*

*Heriberto Rojas Scott, una persona sencilla y sincera que me brindó su amistad y orientación de forma incondicional.*

*Mauricio de Alba R., René Quijada G., Horacio Cordero O., con los que compartí muchos momentos gratos en mi vida estudiantil.*

*A todas aquellas personas que en un momento determinado de mi vida mostraron una actitud positiva y tuvieron un gesto de aliento hacia mí y que en este instante y en este espacio no es posible demostrarles toda mi gratitud.*

# Prólogo:

---

Pareciera quizá inoportuno escribir acerca de motores de inducción, cuando ya existe información en buena cantidad, la presente tesis se propone ofrecer desde sus antecedentes hasta las fallas más comunes en su reparación.

Sin pretensión alguna, nos ha parecido factible la elaboración de una tesis, que retome un buen número de las deficiencias que hemos descubierto en el vasto acervo de bibliografía con la que contamos.

Lo extenso y fabuloso del tema (inducción electromagnética) nos hace pensar en lo redundante, pero el principio de inducción es uno de los pilares en el funcionamiento de las máquinas eléctricas, muy poco entendido por los alumnos de Ingeniería Eléctrica y carreras afines al igual que los técnicos electricistas.

El juicio anterior lo planteamos con perfecto conocimiento de causa después de cierta experiencia en la docencia y el uso de las obras que lo exponen.

Con el propósito de cubrir, en una mínima parte algunos o demasiados errores desde ortografía, presentación, concepto, etc., la preparación de este material ha tenido a bien, poner un especial cuidado en los puntos antes mencionados.

El ánimo del autor estriba en ofrecer a los estudiantes y personas interesadas en el tema de "Motores Trifásicos de Inducción" una iniciación y por consiguiente a entusiasmarlos en un mejor dominio del conocimiento.

Se incluye un programa en Lenguaje C el cual va encaminado a determinar los parámetros más importantes dentro del circuito equivalente del motor de inducción.

Contrario a lo usual en esta clase de trabajos, se recurre al uso de la computadora utilizando la paquetería de vanguardia, Word, Autocad, etc.

Los cuadros y tablas comparativas pueden contribuir en gran parte a la selección de un mejor motor a partir del uso deseado.

Las críticas de manera "alarmante" que se esperan por parte de algunas personas muy conocedoras en el tema son bienvenidas, dado que las características del tema así lo ameritan.

El principal objetivo, es que después de haber leído dicha tesis, se entienda desde el principio de funcionamiento hasta el mantenimiento correctivo y preventivo de los motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.

*Ing. Víctor Hugo Landa Orozco*

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I</b>	
<i>"Nociones Generales de los Motores Trifásicos de Inducción Jaula de Ardilla".</i>	<b>1</b>
1.1 Conocimientos Históricos	1
1.2 Clasificación de los motores	4
1.2.1 Características Mecánicas	5
<b>CAPÍTULO II</b>	
<i>"Estructuras de los Motores Trifásicos de Inducción Jaula de Ardilla".</i>	<b>8</b>
2.1 Clasificación de los motores trifásicos de inducción	8
2.2 Principales diferencias constructivas entre un motor trifásico de inducción jaula de ardilla y uno de rotor devanado	8
2.3 Elementos constructivos del motor trifásico de inducción jaula de ardilla	13
2.4 Principio de funcionamiento	34
2.5 Campo magnético giratorio	36
2.6 Principio del motor de inducción	39
2.7 Circuito equivalente del motor de inducción	46
2.7.1 Análisis del circuito equivalente	47
2.7.2 Circuito equivalente aproximado	50
2.8 <i>C.C.M.I.</i> (Cálculo del Comportamiento del Motor de Inducción)	56
<b>CAPÍTULO III</b>	
<i>"Características Electromagnéticas".</i>	<b>60</b>
3.1 Ecuación de la Fuerza Magnetomotriz (F.M.M.)	60
3.2 Corriente magnetizante	61
3.3 Ecuaciones de tensión de los devanados (F.E.M. del estator y F.E.M. del rotor)	63
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<i>"Determinación Analítica y Gráfica de las Características Electromagnéticas".</i>	<b>66</b>
4.1 Factor de potencia	66
4.2 Variación del factor de potencia en el motor de inducción	71
4.3 Diagrama Circular de Heyland	83
4.3.1 Interpretación del Diagrama Circular de Heyland	88

<b>CAPITULO V</b>	
<i>"Curvas Características de los Motores Trifásicos de Inducción Jaula de Ardilla".</i>	<b>90</b>
5.1 Curvas Características de los Motores Trifásicos de Inducción Jaula de Ardilla.	90
5.2 Características Par-Velocidad para los diseños <i>NEMA</i> .	94
<b>CAPITULO VI</b>	
<i>"Pérdidas en los Motores de Inducción".</i>	<b>95</b>
6.1 Pérdidas eléctricas	95
6.2 Pérdidas mecánicas	96
6.3 Pérdidas magnéticas	97
6.4 Pérdidas indeterminadas	98
<b>CAPITULO VII</b>	
<i>"Métodos de Instalación y Operación".</i>	<b>104</b>
7.1 Elección del motor	104
7.2 Recepción y manejo	107
7.3 Seguridad	108
7.4 Ubicación	108
7.5 Utilidad de los datos de placa	111
7.6 Reducción del ruido generado y vibración	116
7.7 Ubicación y verificación de la base del motor	118
7.8 Alineación	118
7.9 Acoplamiento y transmisión mecánica	119
7.10 Instalación eléctrica	120
7.11 Conexión a tierra	121
7.12 Puesta en marcha	122
7.13 Aplicaciones	123
<b>CAPITULO VIII</b>	
<i>"Métodos de Arranque".</i>	<b>129</b>
8.1 Arranque directo o a tensión fija	130
8.2 Arranque por autotransformador o compensador	131
8.3 Arranque por conmutación estrella(Y) - delta ( $\Delta$ )	132

8.4 Arranque por resistencias en serie	135
8.5 Arranque con reactancias en serie	136
8.6 Arranque con devanado parcial	137

## **CAPITULO IX**

### ***"Características de los Rodamientos".*** **138**

9.1 Rodamientos de bolas	139
9.2 Rodamientos de rodillos	141
9.3 Identificación y especificaciones de los rodamientos	143
9.4 Lubricación de los rodamientos	144
9.5 Duración de los rodamientos	146
9.6 Criterios de selección	147

## **CAPITULO X**

### ***"Principales Averías en los Motores Trifásicos de Inducción Jaula de Ardilla".*** **150**

10.1 Orígenes de las averías	150
10.1.1 Condiciones ambientales adversas	150
10.1.2 Selección o aplicación incorrectas	150
10.1.3 Instalación inadecuada	151
10.1.4 Desperfectos mecánicos	151
10.1.5 Fallas eléctricas	152
10.1.6 Desequilibrio de voltaje	152
10.1.7 Mantenimiento inapropiado	152
10.2 Detección, localización y reparación de averías más frecuentes.	153

## ***Bibliografía***

CAPÍTULO I



*“Nociones Generales de los Motores Trifásicos  
de Inducción Jaula de Ardilla”*



### 1.1 CONOCIMIENTOS HISTÓRICOS:

A mediados de la década de 1880, cuando se utilizó la electricidad por primera vez a una escala relativamente grande, se hizo en la forma de corriente continua.

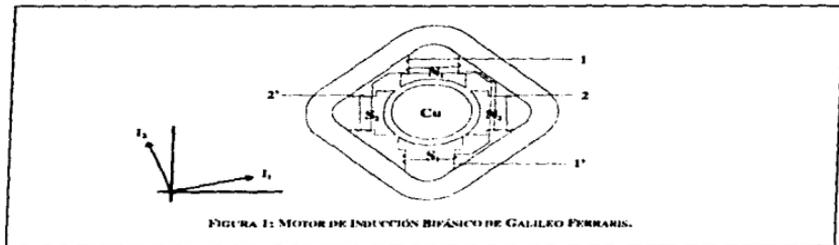
Los sistemas de corriente continua de 110 y 120 V eran muy comunes pero sufrían de la desventaja de distribuir a bajo voltaje, regulación y eficiencia muy pobres. El problema se agravaba más debido a que el voltaje de corriente continua no podía (y no puede) ser transformado a voltajes más altos.

Los alternadores y transformadores eran conocidos y existía un deseo común de conversión a C.A., pero lo que faltaba era un motor efectivo de corriente alterna.

Los motores pueden clasificarse en dos grupos: motores síncronos y de c.d., por un lado y motores de inducción (asíncronos) por otro.

Los motores síncronos y de c.d. se desarrollaron al parejo con los generadores respectivos. En el año de 1831, Henry desarrolló un motor primitivo y elemental, le siguieron en 1832, el de Dal Negro, así como los de Ritchie y Jacobi en 1833 y 1834 respectivamente. Todos ellos se basaron en el principio de atracción aplicado a un electroimán.

En cuanto a los motores de inducción, su origen se sitúa en 1885. En ese año Galileo Ferraris, profesor de Física de la Universidad de Turín, construyó un pequeño motor bifásico, cuyo inductor consistía en dos pares de electroimanes colocados radialmente a  $90^\circ$  y con una culata común que eran alimentados mediante dos corrientes senoidales defasadas  $90^\circ$  eléctricos en el tiempo. El inducido lo formaba un cilindro de cobre que se ponía a girar al excitar los electroimanes.



La disposición adoptada era el resultado de una teoría deducida del hecho de que dos rayos de luz de polarización plana, en cuadratura en el espacio y en el tiempo, se combinan para formar un rayo de luz de polarización circular. Haciendo un razonamiento análogo, Ferraris intuyó que dos campos magnéticos alternos a  $90^\circ$  en el espacio y en el tiempo darían lugar a un campo

giratorio. Los grandes entrehierros existentes en el motor Ferraris hacían que el par producido fuese muy pequeño, y Ferraris mismo declaró que su descubrimiento no tenía importancia económica alguna, pues no se podrían conseguir rendimientos superiores al 50%.

De manera casi simultánea pero de forma independiente, en 1886, Nikola Tesla, un yugoslavo que trabajaba para Westinghouse, concibió la idea del campo magnético giratorio como medio para hacer girar un inducido sin colector ni escobillas considerados hasta ese momento como elementos esenciales de cualquier motor eléctrico. En su lugar utilizó un inducido con un devanado en cortocircuito, en el que la intensidad se creaba por inducción y no era necesario hacerla circular desde el exterior.

El motor original de Tesla, tal como se describe en la patente de U.S.A. del 1º de mayo de 1888, tenía la forma representada en la figura 2:

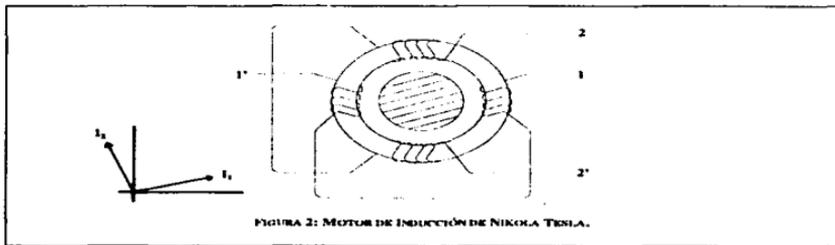


FIGURA 2: MOTOR DE INDUCCIÓN DE NIKOLA TESLA.

En dicha patente se demuestra que Tesla había captado la gran importancia técnica y comercial de la idea del campo giratorio.

Basándose en los trabajos de Galileo Ferraris y Nikola Tesla, Michael Dolivo-Dobrowolsky estudió la influencia del número de fases en la creación de campos magnéticos giratorios.

Sus estudios y experimentos lo llevaron a elegir en 1889 el sistema trifásico como el sistema polifásico óptimo desde el punto de vista económico. En ese mismo año logró construir el primer motor asíncrono utilizable. Tenía una potencia aproximada de 1/9 de CV y era del tipo de jaula de ardilla. Tanto en el arranque como en el régimen de servicio trabajaba satisfactoriamente.

Dos años después, en 1891, en la exposición de Frankfurt, la A.E.G. (empresa en la que trabajaba Dolivo-Dobrowolsky) presentó un motor asíncrono de 100 CV de potencia, con una velocidad de 600 rpm.

Poco después, el propio Dolivo-Dobrowolsky en Alemania y Boucherot en Francia desarrollaron el motor de doble jaula de ardilla, que conserva su uso en la actualidad para aquellos accionamientos que exigen un elevado par de arranque y una baja intensidad de corriente.

Este motor debe su nombre al tipo de construcción de su rotor, el cual consiste de 2 jaulas concéntricas. La jaula exterior está constituida por barras de mailechort, metal muy resistente; la jaula interna está formada por barras de cobre. Al arrancar sólo existe corriente en la jaula de mailechort (la exterior). Cuando aumenta la velocidad del inducido, la segunda jaula, buena conductora entra en función.

Como sabemos uno de los problemas principales del motor de inducción es su corriente de arranque que es varias veces mayor que la corriente nominal de operación. La utilización del rotor de doble jaula de ardilla reduce éste problema (posee laminaciones provistas de ranuras en las cuales se alojaran las barras, con esto presentan alta resistencia y baja reactancia durante el arranque.

La evolución de los motores eléctricos puede resumirse de la siguiente manera:

- 1831 - 1850 Construcción de los primeros motores a partir del principio de atracción y repulsión entre electroimanes (Henry, Dal Negro, Ritchie, Jacobi ...).
- 1850 Establecimiento del principio de reversibilidad (Jacobi). La construcción de motores síncronos o de corriente continua queda reducida a la construcción de un generador.
- 1885 Primer modelo de motor bifásico (Galileo Ferraris).
- 1886 Campos magnéticos giratorios creados mediante sistemas polifásicos para la construcción de motores sin colector ni escobillas (Nikola Tesla).
- 1889 Primer motor trifásico de inducción utilizable (Dolivo-Dobrowolski).
- 1893 Motor de doble jaula (Dolivo-Dobrowolsky y Boucherot).

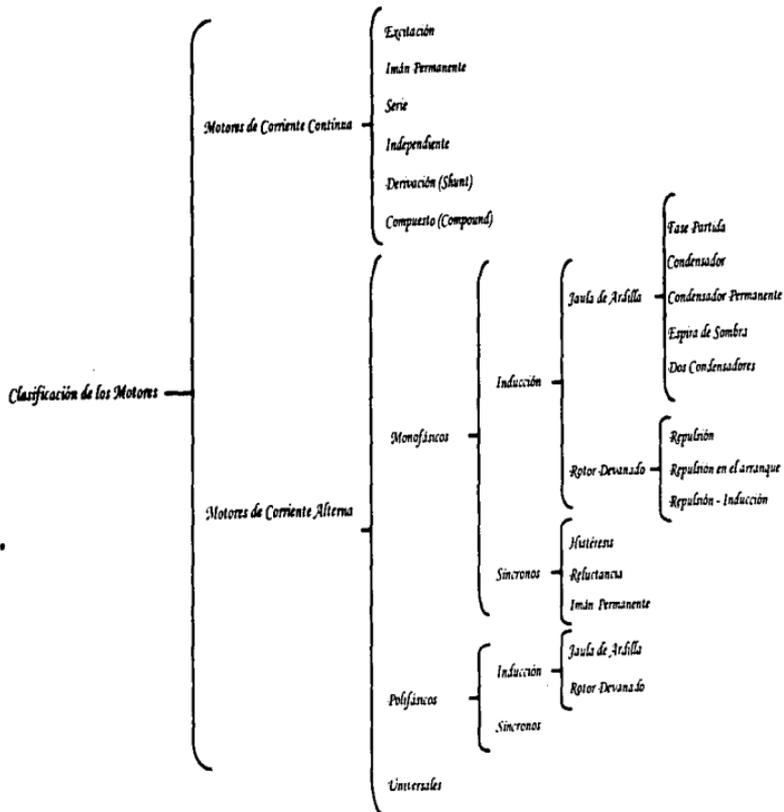
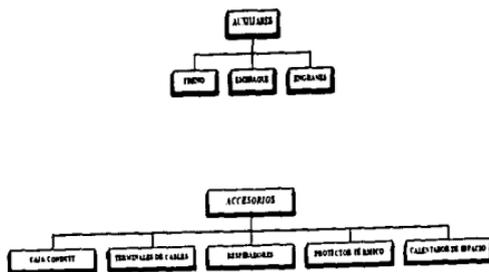


FIGURA 3: CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS





**MOTORES**  
**CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS**  
**(CONTINUACIÓN)**



**FIGURA 4c : CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS**

## CAPÍTULO II



*“Estructuras de los Motores Trifásicos  
de Inducción Jaula de Ardilla”*



## 2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Los motores trifásicos de inducción se clasifican tomando como base el tipo de construcción de su rotor, de tal manera que tenemos dos tipos y se muestran a continuación:

*Motores Trif. de Inducción* { *Motor de Rotor Devanado*  
*Motor de Rotor Jaula de Ardilla*

### **MOTOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO:**

Este tipo de motor debe su nombre a la forma de construcción de su rotor la cual se explicará posteriormente. La particularidad de este tipo de motor radica en el hecho de que permite las variaciones de las características de sus devanados pudiéndosele acoplar resistencias en serie por fase con el objeto de poder limitar las corrientes durante el transitorio de arranque, poder hacer variaciones de velocidad dentro de ciertos límites o rango. Posee un alto par de arranque. Su desventaja radica en el costo de fabricación (respecto al de jaula de ardilla) y su mala regulación de velocidad en condiciones de carga.

### **MOTOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DE JAULA DE ARDILLA**

Este tipo de motor debe su nombre a la forma en que está construido su rotor, el cual se analizará posteriormente. Su par de arranque es bajo con respecto al motor de inducción de rotor devanado, esto es porque en reposo, el rotor (de baja impedancia), con una inductancia relativamente grande con respecto a su resistencia, tiene altas corrientes inducidas que atrasan por 90° al voltaje inducido. Posee una buena regulación de velocidad en condiciones de carga (debido a la baja impedancia de su rotor, que ante una pequeña disminución en la velocidad y aumento en el deslizamiento, produce un gran incremento en la corriente del rotor) ya que a plena carga su deslizamiento es aproximadamente del 7%. Su costo de fabricación es bajo (por su sencillez relativa) comparado con otros tipos de motores lo que aunado a la característica de buena regulación de velocidad y sencillez de fabricación e instalación hacen de éste motor objeto de una aplicación bastante amplia en todo tipo de procesos como en aparatos industriales y electrodomésticos.

## 2.2 PRINCIPALES DIFERENCIAS CONSTRUCTIVAS ENTRE UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA Y UNO DE ROTOR DEVANADO

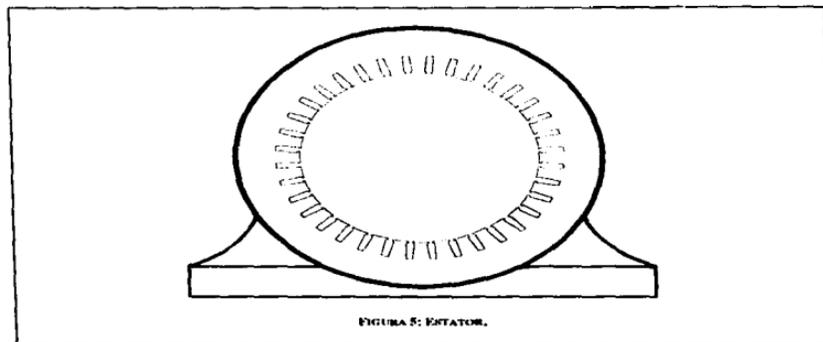
A partir de las invenciones mencionadas en las primeras páginas, la utilización de corriente alterna se generalizó, hoy en día, el motor de inducción, debido a su simple construcción, velocidad relativamente constante, su confiabilidad y costo comparativamente bajo se ha convertido en el caballo de batalla a nivel industrial y doméstico.

El motor de inducción consiste básicamente de dos partes principales, una estática llamada **estator** y otra móvil llamada **rotor**.

#### **ESTATOR**

El estator posee un núcleo hecho de laminaciones de acero ferromagnético de aproximadamente 0.5 mm de espesor (esto con el fin de reducir al máximo las pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis), a éstas laminaciones se le llaman también galletas y son troqueladas y sometidas a un tratamiento térmico con el fin de darles cierta orientación magnética, cada una de ellas es aislada individualmente mediante un baño de esmalte especial. Estas laminaciones en conjunto forman el cuerpo del núcleo del estator, se unen a presión de tal manera que no exista algún espacio de aire entre ellas y son unidas mediante cordones de soldadura (en motores de baja potencia) o por otros métodos de sujeción como pernos (para motores de capacidades elevadas). Una vez formado el núcleo es sometido a un esmaltado por inmersión y un curado (tratamiento térmico u hornado) con el fin de proporcionarle una alta resistencia mecánica y dieléctrica evitándose cualquier mal aislado.

En la figura 5 se muestra el corte de un motor en cuyo interior se puede apreciar la forma de las laminaciones del estator:



En la parte interior de la figura anterior (Fig. 5) podemos apreciar la forma del troquel que nos va a permitir insertar en cada una de sus ranuras (espacio o canal que se forma debido al troquel y al agrupamiento) los lados de bobina del devanado polifásico balanceado estático. Existen en el estator tres devanados espaciados por  $120^\circ$ , los cuales están formados por conductor de cobre de sección circular arrollado en forma de bobinas formadas éstas a su vez por espiras o vueltas y distribuidas adecuadamente en la periferia interna del estator, los extremos de éstos arrollamientos salen al exterior para realizar la conexión conveniente.

Existen diferentes formas de ranuras estáticas pero en general se dividen en abiertas y semicerradas, las primeras se utilizan en motores de capacidades elevadas y de voltajes superiores a 600 V y para bobinas preformadas de alambre magneto de cobre de sección cuadrada o rectangular aisladas previamente y fijadas a la ranura mediante una cuña hecha con material aislante de dimensiones precisas; el segundo tipo se utiliza en motores de bajo voltaje y potencia hasta de 300 Hp, en este tipo de ranura se insertan las bobinas devanadas previamente con conductor (alambre magneto) de sección circular y moldeadas de acuerdo a la forma de la ranura, antes de insertarlas se aísla la ranura.

En la figura 6 se ejemplifica la forma en que se encuentran insertados los lados de bobina y la distribución del devanado polifásico balanceado estático a lo largo de la periferia interna del estator:

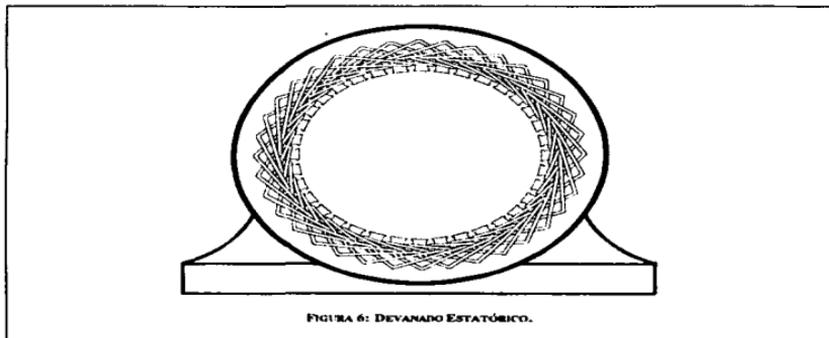


FIGURA 6: DEVANADO ESTÁTICO.

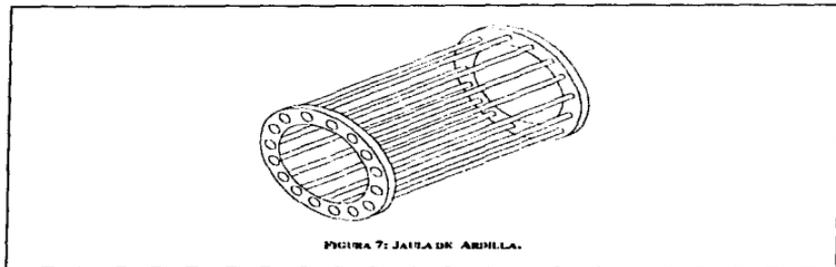
### ROTOR

La parte móvil o rotor puede ser de dos tipos: *rotor devanado* y *jaula de ardilla*. Como el segundo tipo es motivo de estudio en la presente tesis, pondremos mayor énfasis en la forma de construcción de éste.

El primer tipo llamado rotor devanado, posee un núcleo formado por laminaciones de acero ferromagnético punzonadas o troqueladas en su centro con el fin de poder insertarse en la flecha del rotor y en su periferia externa tiene ranuras similares a las estáticas y que van a permitir la inserción de las bobinas. En éste caso se forman tres devanados similares a los estáticos pero con la particularidad de que sus terminales terminan en tres anillos rozantes montados en la flecha (aislados de ésta por supuesto) que mediante el uso de escobillas permitirán la alimentación del motor. Este tipo de construcción de rotor va a permitir las variaciones de la construcción del devanado de tal manera que se puede incrementar su resistencia mediante la conexión de

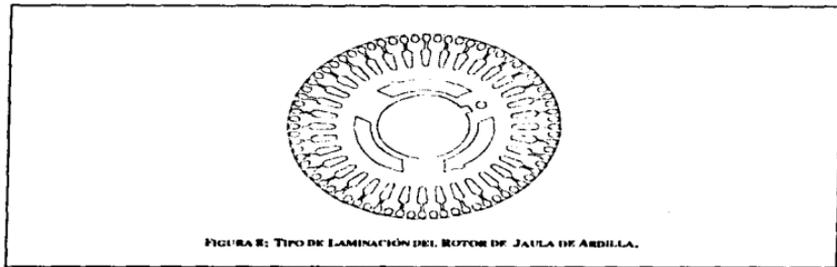
resistencias en serie por fase. Estas características nos van a permitir hacer variaciones de velocidad dentro de cierto rango además de tener un par de arranque elevado y limitar las corrientes durante el transitorio de arranque, pero este tipo de construcción tiene el inconveniente de elevar considerablemente el costo (además de las dimensiones) de la máquina comparándolo con el costo de una máquina de jaula de ardilla.

El rotor jaula de ardilla está construido de un armazón de aluminio fundido de una sola pieza y que va a dar forma a la jaula de ardilla, en la figura 7 se muestra este armazón:



El núcleo del rotor se forma también de laminaciones de acero ferromagnético de 0.5 mm de espesor, previamente troqueladas de tal forma que tengan orificios para insertarse en el armazón o jaula de ardilla mostrada en la figura anterior además de poseer el troquel que va a permitir el alojamiento de los conductores que formarán una jaula de ardilla interna pero de material conductor.

En la figura 8 se muestra la galleta o laminación usada en la construcción del rotor:



Estas laminaciones son bañadas previamente con esmalte aislante y agrupadas se insertan en el armazón de aluminio a presión y son unidas mediante cordones de soldadura (para motores de potencia pequeña) o por otro medio de sujeción, como por ejemplo pernos (para motores de potencias elevadas).

El "devanado" rotórico es en realidad formado por barras (para motores de gran capacidad) de cobre ó latón desnudas (no requieren de aislante puesto que la corriente fluye por donde exista menor oposición ó resistencia) de sección cuadrada, rectangular o circular insertadas en los canales u orificios existentes en el núcleo del rotor (debido al troquelado y al agrupamiento de las laminillas) cortocircuitándose por medio de anillos o aros de sus extremos (se sueldan) para que con esto se forme una jaula interna que, si tienen impedancia cero, hacen que la suma de las F.E.M. inducidas y las caídas de voltaje entre los extremos de cada barra sean iguales a cero. En este tipo de rotor, el número de fases viene dado por el número de barras conductoras axialmente dirigidas por el número de pares de polos.

El hecho de que se cortocircuiten las barras o conductores del rotor tiene la finalidad de que cuando el estator sea alimentado, se forme un campo magnético por efecto de la circulación de corriente a través de sus devanados y éste campo induzca en el rotor una FEM (Fuerza Electromotriz o voltaje inducido), que a su vez provoque la circulación de corriente a través de las barras del rotor (debido a que están cortocircuitadas por los anillos de los extremos) y se genere con ésto un campo magnético rotórico que al interactuar con el campo estático provoque la rotación en el motor. También los conductores pueden ser formados por cobre inyectado en la trayectoria ya formada por el núcleo del rotor de igual forma cortocircuitados en sus extremos por el mismo material.

Una vez constituido el rotor, es sometido a un esmaltado por inmersión y a un tratamiento térmico que servirá para reducir las pérdidas superficiales, además de permitir que se realice el ensamblaje en caliente con el eje o flecha del rotor. Realizada ésta operación se somete al rotor a un balanceo con el fin de que no exista rozamiento con el estator que pueda arruinar a la máquina pues el entrehierro es muy reducido. De esta forma el rotor queda listo para su instalación en la máquina.

Es importante señalar que en las partes extremas del cuerpo del rotor existen aspas y protuberancias del mismo material (aluminio fundido) que van a permitir la ventilación de la máquina además de un equilibrio mecánico en la misma. En la figura 9 se muestra el rotor jaula de ardilla:



FIGURA 9: ROTOR JAULA DE ARDILLA.

Aparte de las partes principales mencionadas el motor de inducción posee una carcasa o cubierta exterior hecha de acero rolado o acero colado, de una sola pieza y cuya forma va a variar de acuerdo a la potencia del motor y medio ambiente en el cual vaya a operar (de tal forma que algunas carcazas tienen una forma especial externa como "costillas" que permiten la disipación del calor generado en la misma), esta carcasa servirá como medio de soporte mecánico del estator, en motores de capacidad pequeña, la carcasa soporta a las tapas (que poseen una chumacera en cada tapa y que contienen a los cojinetes en donde descansan o asientan los rodamientos o baleros acoplados a la flecha del rotor y que permitirán la libertad de movimiento del rotor) en motores más grandes se emplean métodos alternos para el soporte de las mismas.

A la flecha se acoplan unas aspas que permitirán la ventilación interna de la máquina, a cada extremo de la flecha se tienen rodamientos que asentarán en los cojinetes que se encuentran montados en las chumaceras de las tapas y que en conjunto permitirán el libre giro del rotor.

Algo muy importante que no se puede pasar por alto es el entrehierro, este es el espacio de aire que existe entre el estator y rotor y cuya magnitud es muy pequeña con el fin de que se aprovechen al máximo las líneas de campo magnético generado por ambos campos (tanto el rotórico como el estático).

### **2.3 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DEL MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA**

Los motores trifásicos de inducción, tanto de rotor de jaula de ardilla como de rotor devanado poseen características de tipo constructivo muy similares, sobre todo en lo relacionado a la construcción de su estator y algunos otros elementos que se describirán a continuación, cada una de las partes que se mencionen corresponderán a ambos tipos de máquinas y en caso contrario se indicará el tipo de máquina que la posea de manera exclusiva.

De manera general una máquina trifásica de inducción posee las siguientes partes:

- ESTATOR
- ROTOR
- TAPAS

Existen otros elementos que junto con los señalados anteriormente dan forma y funcionalidad a la máquina. En el siguiente cuadro se presentan estos elementos y posteriormente se describen uno a uno:

#### a) Rotor:

- 1.- Núcleo magnético.
- 2.- Arrollamiento o devanado del rotor (rotor devanado).
- 3.- Barras de cobre cortocircuitadas por dos anillos en sus extremos (rotor de jaula de ardilla).
- 4.- Dispositivo de ventilación del rotor (aletas de cobre unidas a los anillos de cortocircuito) (rotor jaula de ardilla).
- 5.- Dispositivo de toma de corriente (anillos rozantes y anillo de cortocircuito) (rotor devanado).

## b) Estator:

- 1.- Núcleo magnético.
- 2.- Carcaza.
- 3.- Devanado o arrollamiento del estator.
- 4.- Soportes del arrollamiento.
- 5.- Caja de terminales de conexión.
- 6.- Dispositivo de ventilación del estator (ventilador acoplado al eje del rotor y canales de ventilación).

## c) Tapa del lado de transmisión.

- 1.- Cabeza de cojinete.
- 2.- Tapa

## d) Tapa del lado opuesto a transmisión.

- 1.- Cabeza de cojinete.
- 2.- Tapa interior.
- 3.- Tapa exterior de protección.
- 4.- Portaescobillas (rotor devanado).

## e) Otros elementos:

- 1.- Placa de datos característicos.
- 2.- Cojinetes (que pueden ser de *resbalamiento* ó de *rodamiento*).
- 3.- Aletas de refrigeración de la carcaza.
- 4.- Pernos de fijación de las tapas a la carcaza

**ROTOR**

El *núcleo magnético del rotor* debe ser laminado para reducir al máximo las pérdidas por corrientes parásitas (de Foucault, de Eddy ó de remolino) y se constituye en un paquete de chapas de acero ferromagnético de un espesor que oscila entre los 0.4 y 0.5 mm aislándolas una de otra por medio de papel de 0.03 mm de espesor. Una vez troqueladas y limpias de rebabas son insertadas en pernos y son comprimidas a una presión de aproximadamente 8 Kg/cm<sup>2</sup>. Para mantener el paquete de laminaciones bajo esta presión, se coloca en cada uno de sus extremos una brida ó platillo que será el elemento sustentador del núcleo en el eje, se utilizan varios procedimientos para el fijado del núcleo al eje en motores de potencias reducidas tales como un *anillo contráctil hendido* y que se cierra sobre sí mismo para que al montarse el núcleo en la flecha este anillo se recorra hasta llegar a una ranura circular hecha en la flecha para alojarlo y de esta manera impida el movimiento del núcleo; por medio de un *anillo partido en dos* que es alojado en la ranura de la flecha para después rodearlo con otro anillo que se introduce en caliente y al enfriarse se contrae además de impedirse el movimiento del anillo interior (partido en dos) por medio de una *cuña*; por medio de un *disco-muelle de dos piezas* (con hendiduras en su parte interna) que son insertados a la flecha junto con el paquete de chapas y que gracias a las hendiduras se sujeta por su borde interno a la ranura del eje impidiendo que el núcleo se deslice.

En el caso de motores de elevadas potencias y que requieren de laminaciones de gran diámetro se emplean pernos pasantes que atraviesan el paquete de laminaciones perfectamente aislados de éstas (y de cualquier otro elemento que tenga contacto con éstas) por medio de tubos aislantes y arandelas. Este procedimiento (muy utilizado en motores de rotor devanado) tiene la desventaja de incrementar las pérdidas por corrientes de Foucault debido a la presencia misma del perno además de reducir la sección del hierro activo.

En los rotores de jaula de ardilla este problema no se presenta debido a que el paquete de laminaciones se ve aprisionado o sujeto por las mismas barras de la jaula y los anillos de cortocircuito que posee en sus extremos.

El sistema de sustentación directa del paquete de laminaciones es aplicable únicamente a rotores cuyo diámetro es menor a 350 mm (35 cm), para rotores cuyo diámetro es mayor a éste límite el paquete de chapas está constituido por anillos montados sobre un cuerpo sustentador llamado estrella del rotor formado por un cubo con varios nervios longitudinales de hierro fundido o acero soldado (4 ó 6 normalmente), que van a permitir el libre paso del aire a través del paquete de laminaciones. El paquete de laminaciones es fijado a la estrella del rotor por medio de cuñas transversales o por tornillos de cabeza.

Los dientes de las ranuras dispuestas en la periferia del núcleo del rotor (rotor devanado) deben ser reforzadas por medio de chapas extremas de 1 a 1.5 mm de espesor ó también de varias chapas en cada extremo de 0.5 mm de espesor fijadas entre sí por medio de soldadura, además los dientes de las últimas 10 ó 20 chapas así como también las chapas extremas se someten a una tensión previa hacia adentro (éste doblez se realiza durante el proceso de fabricación de la laminación), todo esto con el fin de impedir que se expongan a oscilaciones que producirían ruidos y que terminarían por romperlos.

Como una forma de propiciar la disipación del calor que se genera en el núcleo magnético a causa del flujo alterno se colocan dispositivos de ventilación longitudinales y/o radiales.

La ventilación longitudinal se consigue por medio de perforaciones realizadas a lo largo del paquete de laminaciones que pueden ser en forma de orificios, ranuras ó su combinación.

La ventilación radial se consigue subdividiendo el paquete de chapas mediante canales radiales de ventilación de aproximadamente 10 mm cada uno, en paquetes parciales de entre 40 y 50 mm de espesor, estos canales actúan de manera que soplan aire caliente al exterior provocando la aspiración de aire fresco hacia el interior, el arreglo debe tener la suficiente resistencia mecánica para soportar toda la compresión que se ejerce sobre el paquete de laminaciones.

Una vez acoplado el núcleo al eje se procede a *balancear* el rotor para que ante una mala distribución de la masa se eviten perturbaciones de tipo mecánico, el rotor es equilibrado o compensado en el taller limando o taladrando el extremo en el cual existe un exceso de masa o colocando masas compensadoras en el extremo en el cual existe deficiencia de masa.

La acción de estas masas compensadoras es tanto mayor cuanto más alejadas del centro de gravedad estén situadas, por lo tanto es preferible situarlas en el extremo de un diámetro (lo mayor posible) y cerca de los cojinetes.

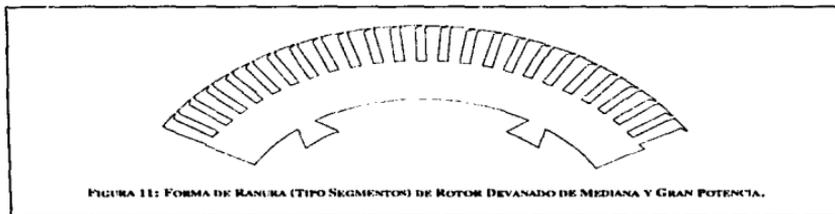
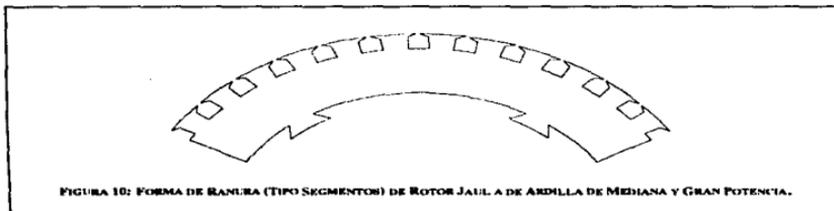
En los motores de rotor devanado se emplean ranuras *abiertas* y *semicerradas*, de forma rectangular con una profundidad de aproximadamente 3 a 4 veces el ancho de la misma. Es preferida la forma rectangular porque resulta la forma más adecuada para contener a las barras de

cobre con que se elaboran las bobinas, además de también poder contener a conductores de sección circular.

Las ranuras abiertas poseen la ventaja de poder alojar las bobinas que se han construido previamente, pudiendo colocarse en su posición a través de la parte superior de la ranura, y de esta forma el arrollamiento queda montado en poco tiempo además de facilitarse la reparación o sustitución de las bobinas. El inconveniente que existe en esta forma de ranura es que al estar abiertas aumentan la reluctancia del circuito magnético, por lo que resultan más adecuadas las ranuras semicerradas.

Las ranuras semicerradas permiten la inserción de bobinas preconstruídas pero estas deberán tener un ancho no mayor a la mitad del ancho de ranura, por lo que su montaje resulta algo más costoso. Debido a las mejores condiciones magnéticas son las más utilizadas en motores (de rotor bobinado) de mediana y gran potencia.

A continuación se muestran dos figuras (Figs. 10 y 11) de formas de ranura empleadas en motores de inducción de mediana y gran potencia:



Cuanto menor es el diámetro del rotor, mayor será el estrechamiento del diente debido a la forma rectangular de las ranuras, por esta razón, los rotores para motores de pequeña potencia se construyen con dientes paralelos y ranuras trapezoidales, que es una forma apropiada para alojar

a conductores de sección circular que son precisamente los que se emplean en motores de pequeña potencia.

Podemos decir que el empleo de las diferentes formas de ranura está ligado a la sección del conductor que va a emplearse en el bobinado, el tipo de bobina, el modo de montaje, y las características magnéticas por lo que el empleo de una u otra forma se determinará de acuerdo a un estudio detenido tomando en cuenta las consideraciones señaladas.

De manera general se puede establecer lo siguiente:

- Para motores de pequeña potencia, con conductores de sección circular, se emplearán ranuras de forma trapezoidal, con dientes de lados paralelos.
- Para rotores de mediana y gran potencia, con conductores de sección rectangular, se emplearán preferiblemente ranuras semicerradas rectangulares, con dientes trapezoidales.

En los motores de jaula de ardilla el arrollamiento del rotor está formado por la propia jaula de ardilla, que está formada por un conjunto de conductores desnudos no aislados del núcleo magnético y cortocircuitados en sus extremos por medio de dos anillos del mismo material.

Las varillas de la jaula de ardilla y los anillos frontales sirven como órganos de sujeción del núcleo magnético.

Los conductores que forman la jaula de ardilla son, por lo regular de sección circular, por lo que las ranuras del rotor serán también de forma circular y generalmente de forma cerrada, estos conductores son de cobre ó de aluminio. En los motores de pequeña capacidad se inyectan en las ranuras del núcleo magnético, ya preparado, aluminio fundido y se moldea después, formando un sólo bloque la jaula de ardilla, los anillos extremos de cortocircuito y las aletas de ventilación .

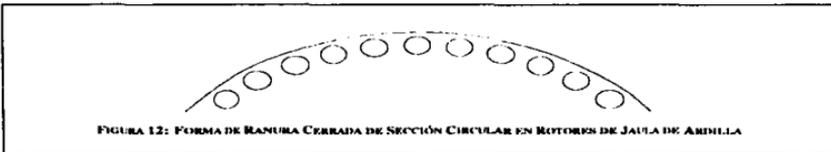
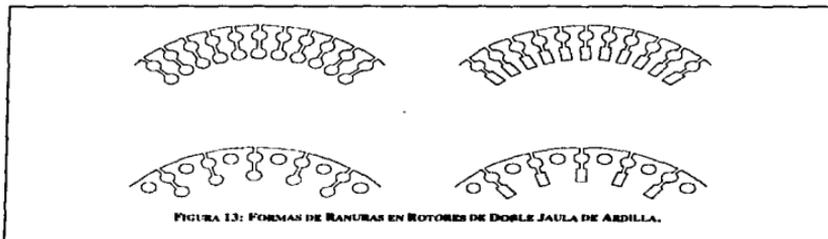


FIGURA 12: FORMA DE RANURA CERRADA DE SECCIÓN CIRCULAR EN ROTORES DE JAULA DE ARDILLA

En los motores de mediana y gran potencia, las barras que forman la jaula de ardilla, se introducen en las ranuras del núcleo magnético y se sueldan a los anillos extremos, por último también se sueldan a dichos anillos, las aletas de ventilación.

En los motores de doble jaula de ardilla y en los de ranuras profundas se siguen idénticos procedimientos para la elaboración de la jaula de ardilla, únicamente cambia la forma de las ranuras que en los motores de doble jaula son cerradas o semicerradas y en los motores de ranuras profundas son abiertas o semicerradas.

Para visualizar los tipos de ranuras que se pueden tener en el rotor de jaula de ardilla se presenta la siguiente figura (Fig. 13):



### **ESTATOR**

El estator en las máquinas de inducción de jaula de ardilla así como las de rotor devanado son exactamente iguales. La forma en que son construidos es idéntica y consta de los siguientes elementos:

- 1.- Carcasa.
- 2.- Núcleo magnético.
- 3.- Arrollamiento o devanado.
- 4.- Soportes de arrollamiento.
- 5.- Dispositivos de ventilación.
- 6.- Caja de terminales de conexión.

Por lo general los dispositivos de ventilación del estator se encuentran incluidos en la carcasa por lo que se mencionaran de manera conjunta.

### **CARCASA Y DISPOSITIVOS DE VENTILACIÓN**

La carcasa es el elemento sustentador del núcleo magnético del estator, está hecha de fundición de hierro (colado) ó acero laminado (rolado), dependiendo ello de la potencia del motor.

La forma general de una carcasa de hierro colado es la de un cilindro hueco circular con base y caja de bornes. Posee tapas laterales atornillables y que servirán como medio de sustentación a los rodamientos y al rotor, estas tapas son aseguradas mediante bridas en su parte externa (para motores de grandes potencias) o por tornillos pasantes para motores de pequeña potencia.

La forma de la sección interna de la carcasa dependerá o estará determinada por tres factores, siendo quizás el más decisivo el último:

- 1.- Forma de las cabezas del arrollamiento o devanado.
- 2.- Altura radial del paquete de laminaciones.
- 3.- Sistema de refrigeración del estator.

Las carcasas son *sin nervios interiores* y *con nervios interiores*.

Las carcasas *sin nervios interiores*, son por lo regular de una sola pieza, en esta modalidad el calor que se produce en el núcleo magnético se transmite inmediatamente a la parte interior de la carcasa y de aquí a la parte exterior de la misma para disiparse al aire que circunda a la máquina, se trata de *refrigeración por la cubierta*, en este caso el contacto entre el núcleo magnético y la carcasa debe ser lo más íntimo posible para que la transmisión del calor se realice con facilidad.

Se puede aumentar considerablemente la disipación del calor por medio de nervios exteriores que aumentan la superficie de radiación del calor y se sitúan sobre la carcasa longitudinalmente o anularmente.

La pared de la carcasa y las tapas se determinan a partir de la forma de las cabezas de bobina y se sitúan a una distancia de entre 15 y 20 mm de estas. Cuando la altura del núcleo es grande (máquinas de elevada velocidad y reducido número de polos) hay espacio suficiente para un arrollamiento de gran altura, de manera contraria en las máquinas de pequeña velocidad (y gran número de polos), el núcleo tiene una altura reducida y se colocan cabezas de bobina bajas y de forma alargada.

Las carcasas *con nervios interiores* poseen de 4 a 6 nervios de manera general, el aire constituye el medio transmisor del calor y se trata de *refrigeración por aire*, en este caso el calor producido en el núcleo magnético pasa primero al aire que circula por canales hechos en la carcasa y a través de estos se evacúa al exterior. Por esto en los motores refrigerados por aire debe quedar espacio suficiente entre la carcasa y el núcleo magnético para que circule el aire refrigerante, por lo que la carcasa está provista interiormente de nervios que permiten la necesaria separación entre la carcasa y el hierro activo del núcleo magnético.

Si el aire refrigerante es conducido exclusivamente de forma longitudinal, los nervios son bajos en forma de pestaña, si el aire es conducido de forma radial o mixta (longitudinal-radial) se dispone de nervios altos en forma de "U" o en forma de "T"

La resistencia mecánica de la carcasa está determinada por la forma de la sección de la envoltura exterior, una ligera curvatura en forma de bóveda aumenta notablemente la resistencia mecánica de la carcasa en comparación con la forma cilíndrica. En motores de pequeña y mediana potencia se emplea la forma exterior cilíndrica y ligeramente abovedada, para motores de gran potencia, que necesitan elevada resistencia mecánica se emplean secciones con un abovedado más amplio de la envoltura hacia el interior y disponiendo de uno o más tabiques interiores.

Las carcasas de acero laminado (o rolado) se están utilizando cada vez más en la construcción de las máquinas de inducción ya que presentan numerosas ventajas por encima de las de hierro colado, como son:

- 1.- Al fabricarse en serie el empleo de piezas diferentes, estampadas prensadas y finalmente soldadas proporciona un número de piezas terminadas mayor que el obtenido en el mismo tiempo por fundición.
- 2.- En el caso de fabricación de series limitadas , la utilización de acero laminado permite la supresión de los modelos de fundición (matrices o moldes), con el consecuente ahorro de costos, lo que repercute en ahorro de tiempo.
- 3.- Comparativamente, para igual resistencia mecánica, las carcasas de acero laminado tienen menor peso lo que representa una mayor ligereza en su construcción y un considerable ahorro de material.

Se toman en cuenta diversos factores que se ven involucrados tanto de tipo económico, técnico así como de tiempos para determinar el tipo de carcasa que llevará un motor.

Así pues los motores de gran potencia, que casi siempre se fabrican en series pequeñas, se utiliza casi exclusivamente carcasas de acero laminado, por el ahorro de material menor peso y supresión de modelos de fundición que resultarían sumamente caros al ser aplicables a un número reducido de unidades.

En máquinas de mediana potencia, el costo de los modelos o matrices ya no es un factor decisivo ni tampoco el tiempo de entrega pues se fabrican en serie y se destinan al almacenado, es por esto que para motores cuya potencia está comprendida entre los 25 KV y 750 KV se prefiere la utilización de carcasas de hierro colado.

Para motores cuya potencia es inferior a los 25 KV y sobre todo para motores de potencia fraccionaria se prefiere el uso de carcasas de acero laminado.

En las carcasas de acero laminado, las tapas son por lo general planas y se centran y sujetan en los costados de la misma.

Otros accesorios de los viene provista la carcasa son los pies de la carcasa o base de la misma que constituye en medio de fijación de la máquina en el lugar donde será instalada, éstos pies pueden estar sólidamente unidos a la carcasa (como en el caso de máquinas de gran potencia) o unidos directamente a las tapas de la carcasa (como en el caso de máquinas de baja potencia).

Para máquinas de gran potencia, los pies de carcasa son muy robustos y se encuentran unidos al cuerpo de la misma, se prefiere la forma en U invertida debido a su característica de proveer un buen momento resistente. En las máquinas de acero laminado, son formados con perfiles en forma de U que se sueldan a la carcasa mediante patas intermedias construidas de chapa de acero.

En el caso de máquinas de gran potencia se cuenta también con un marco de fundición especial con varios tornillos de sujeción que forman hilera, así como también de tornillos de presión horizontales y verticales permitiendo con esto ajustes cuidadosos de las mismas en el lugar en el cual van a operar.

Para fines de transporte y maniobra dentro del taller de fabricación o para su instalación en el lugar deseado, la carcasa cuenta con ojales o ganchos de suspensión solidarios a la misma (en el caso de ojales pueden ser atornillados, y en el caso de ganchos pueden ser soldados), éstos

pueden ubicarse en la parte central de la misma o lateralmente lo que permite suspenderla mediante grúa.

### NÚCLEO MAGNÉTICO

El núcleo magnético está formado de *laminaciones* con el fin de reducir al máximo las corrientes de Foucault (pérdidas) derivadas de los flujos alternos.

Cuando el diámetro exterior del núcleo magnético es inferior a 1 m, el mismo consta de laminaciones ranuradas en forma de anillos de una sola pieza (*tipo anillo*).

Si el diámetro exterior del núcleo excede de 1 m (para motores de gran potencia), cada una de las laminaciones estará constituida de varios segmentos (*tipo segmentos*).

A continuación se muestra un ejemplo de laminación tipo segmentos para núcleo magnético de estator (Fig. 14):

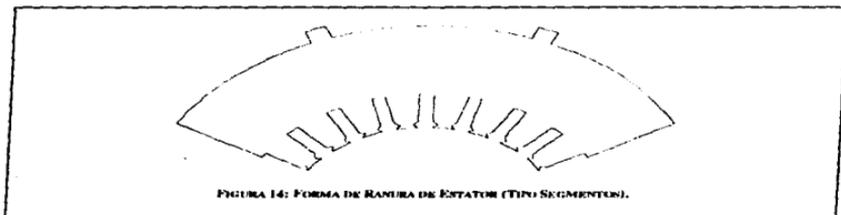


FIGURA 14: FORMA DE RANURA DE ESTATOR (TIPO SEGMENTOS).

Siempre que sea posible se preferirá el tipo de anillos debido a su facilidad de fabricación y montaje.

En el *tipo anillo*, el paquete de laminaciones puede constituirse independiente o solidario a la carcasa.

En el caso del paquete independiente de laminaciones se comprimen fuertemente y sujetan mediante pernos longitudinales lo que permite que una vez formado el cuerpo del núcleo, este pueda ser devanado y posteriormente montado en la carcasa que únicamente soportará el esfuerzo mecánico impuesto por el peso de la máquina.

En el caso del paquete solidario de laminaciones a la carcasa, éstas se fijan y comprimen por medio de la carcasa, la cual tendrá que soportar los esfuerzos mecánicos impuestos por el peso de la máquina, además de los esfuerzos longitudinales que mantienen unido el paquete de laminaciones.

En el *tipo segmentos*, el paquete de laminaciones se comprime siempre sobre la carcasa. Debido a que la resistencia mecánica de un paquete de laminaciones de segmentos es menor a la de laminaciones de anillo, la carcasa debe construirse más robusta para que pueda soportar el esfuerzo al que se ve sometido por efecto del peso de la máquina, además del esfuerzo longitudinal del paquete de laminaciones y esfuerzos diametrales originados por la disminución de la resistencia mecánica de las laminaciones.

El calentamiento que se produce por efecto de la histéresis y corrientes parásitas en el núcleo, provoca dilataciones térmicas en el paquete de laminaciones, con relación a la carcasa que permanece menos caliente. En las máquinas de reducida potencia, las tensiones térmicas resultantes no cobran gran importancia, ya que son absorbidas por la carcasa. En el caso de máquinas de elevada potencia si cobra gran importancia este hecho debido a que la dilatación se produce en dirección longitudinal y en dirección diametral.

La dilatación térmica del paquete de laminaciones en dirección longitudinal, provoca un esfuerzo adicional, con el alargamiento de los pernos de fijación, de tal manera que tanto la longitud como el diámetro de estos debe de contemplarse de tal manera que este alargamiento quede dentro del límite elástico, con el objeto de que los pernos recuperen sus dimensiones originales al enfriarse.

En dirección diametral la carcasa no puede seguir las dilataciones térmicas del núcleo y las placas dilatadas originan, por tanto, alabeos (curvado o torsión) y ondulaciones del paquete, que de manera aislada no tiene importancia, si se le aña a otras circunstancias desfavorables puede ocasionar desperfectos en los aislamientos de las ranuras, aflojamiento de los órganos de fijación, etc.

Los alabeos (curvado o torsión) pueden evitarse realizando adecuadamente el apilado de las laminaciones procurando que cada una de las capas no se solape o encime respecto a la precedente, sino apilando siempre varias capas (desde 6 a 10) con la misma disposición, procediendo después a su solapado. Con esto no se provocan inconvenientes de tipo magnético y al mismo tiempo se consigue la compensación de las tensiones térmicas.

#### **ARROLLAMIENTOS DE ESTATOR Y SOPORTES DE ARROLLAMIENTO**

En lo que se refiere a la forma de las bobinas, estas pueden ser de dos tipos: de *diferente ancho* o de *mismo ancho*. El tipo *mismo ancho* tiene mayor aplicación en las máquinas síncronas, el tipo de *diferente ancho* es muy utilizado en las máquinas asíncronas por lo que se analizará con mayor detalle éste último tipo.

Dentro del tipo de bobinas de *diferente ancho* y de acuerdo a la disposición de las cabezas de arrollamiento pueden distinguirse: el *arrollamiento en dos planos* (Fig. 15), el *arrollamiento en tres planos con cabezas uniformemente distribuidas* (Fig. 16), y el *arrollamiento en tres planos con cabezas concentradas* (Fig. 17). Cada una de estas disposiciones se muestra en las siguientes figuras:

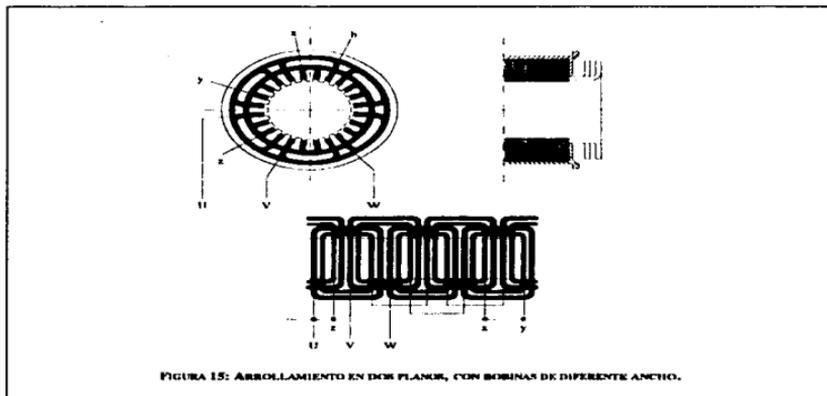


FIGURA 15: ARROLLAMIENTO EN DOS PLANOS, CON BOBINAS DE DIFERENTE ANCHO.

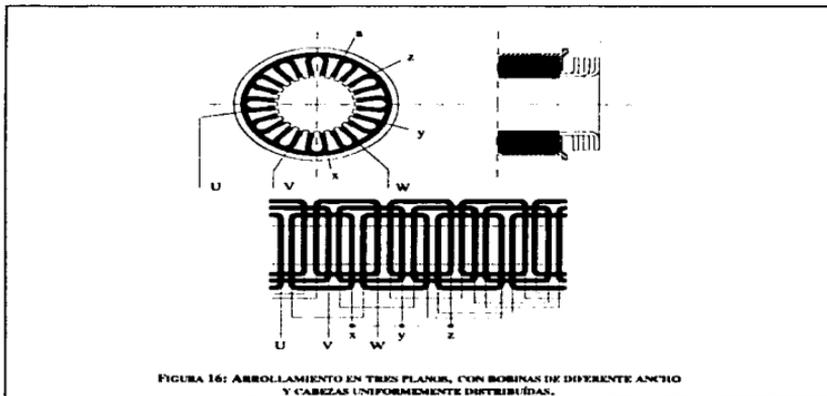


FIGURA 16: ARROLLAMIENTO EN TRES PLANOS, CON BOBINAS DE DIFERENTE ANCHO Y CABEZAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS.

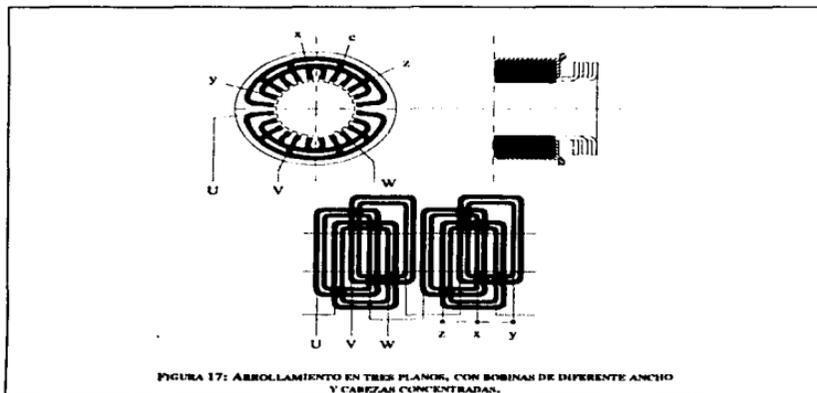


FIGURA 17: ARROLLAMIENTO EN TRES PLANOS, CON BOBINAS DE DIFERENTE ANCHO Y CABEZAS CONCENTRADAS.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, estos arrollamientos tienen el inconveniente de que las bobinas son de diferente ancho para las tres fases, por lo que cada una de ellas tiene distinta resistencia eléctrica, distinta reactancia, lo que puede ocasionar desequilibrios en el funcionamiento de la máquina, sobre todo si se trata de una máquina de mediana o gran potencia.

Como una forma de subsanar este inconveniente o defecto, se emplean los *devanados concéntricos o trapeciales*, en los que aún teniendo bobinas de diferente ancho, estas están curvadas de tal forma que las tres fases del arrollamiento son exactamente iguales entre sí.

Los *devanados concéntricos o trapeciales* pueden ser de *cabezas de bobina uniformemente distribuidas* (Fig. 18), y de *cabezas de bobina concentradas* (Fig. 19). La elección de un tipo u otro dependerá de las condiciones de diseño, funcionamiento, potencia, etc.

En las figuras siguientes se muestra cada uno de estos tipos de devanado:

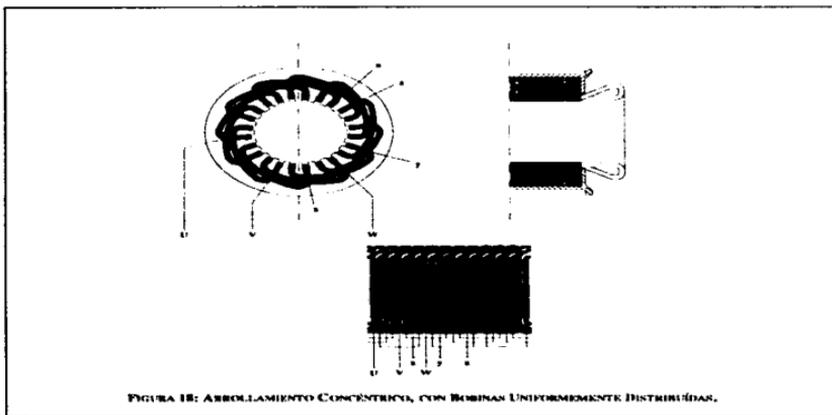


FIGURA 18: ARROLLAMIENTO CONCENTRICO, CON BOBINAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS.

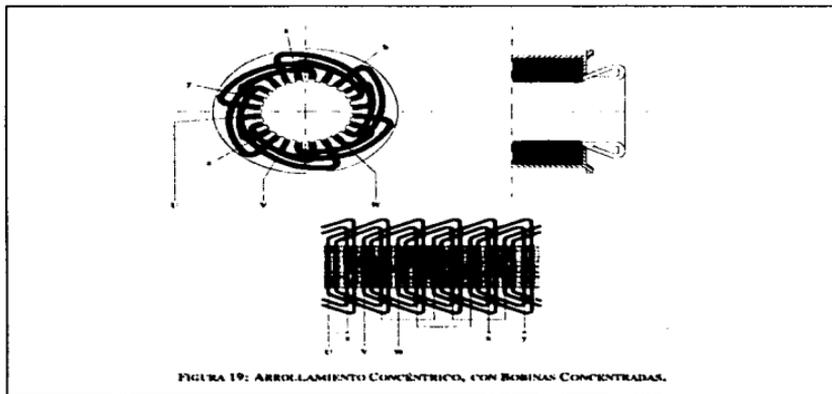


FIGURA 19: ARROLLAMIENTO CONCENTRICO, CON BOBINAS CONCENTRADAS.

A continuación se mencionan las aplicaciones de cada tipo de arrollamiento de acuerdo a su característica:

- El devanado en dos planos, es el que requiere de menor longitud de conductor, situación por la cual se emplea mas que nada en máquinas de pequeña y mediana potencia.
- El devanado en tres planos con cabezas distribuidas, permite mejor ventilación del arrollamiento, pero la longitud en dirección axial de las cabezas de bobina es excesiva.
- El devanado en tres planos con cabezas concentradas, ofrece la posibilidad de subdividir el estator en dos mitades, sin necesidad de cortar o quitar ninguna bobina, lo que representa una gran ventaja para máquinas de gran potencia por la facilidad en el transporte que esta situación representa.

Si es fundamental que exista un funcionamiento totalmente equilibrado de las 3 fases de la máquina se recurre a la utilización de devanados concéntricos cuyas variantes de cabezas distribuidas y cabezas concentradas presentan las mismas ventajas e inconvenientes que las correspondientes a los devanados con bobinas de diferente ancho.

El devanado se aloja en las ranuras del estator, generalmente se utilizan ranuras semicerradas aunque, si el devanado es de barras rectangulares, se emplean ranuras abiertas.

Las cabezas de los devanados pueden estar inclinadas de diferentes formas respecto a la pared frontal del estator. Como en servicio, las cabezas de devanado del motor no se encuentran expuestas a grandes esfuerzos mecánicos, para soportar estas cabezas sólo bastará con sujetarlas con cinta aislante (encintar) entre sí, de forma que se sujetan mutuamente, para facilitar la circulación de aire refrigerante es conveniente montar también unas piezas intermedias para separar las cabezas de bobinas entre sí, y después se encintan junto con estas.

Si la máquina va a estar expuesta a corrientes de cortocircuito, que provocan grandes esfuerzos mecánicos sobre las cabezas de devanado estático (este fenómeno cobra gran relevancia en los generadores síncronos), debe de disponerse de medios de fijación como son bridas y tornillos de variada forma.

### **AISLAMIENTOS**

Los aislantes son materiales orgánicos e inorgánicos que se utilizan para cubrir y proteger a los elementos conductores de otros igualmente conductores. Estos materiales se utilizan extensamente en la construcción de las máquinas eléctricas, para aislar conductores con los que se forman los devanados, los devanados mismos (como acabado), las chapas o laminaciones con las que se forma el núcleo, el núcleo mismo, las ranuras que alojan a los lados de bobina, etc.

Los aislantes, constituidos en su mayor parte por materiales orgánicos se carbonizan a una determinada temperatura, perdiendo la cualidad de aislar. A temperaturas inferiores sufren deterioro gradual, que es más rápido como más elevada sea la temperatura a la que están sometidos.

A continuación se muestra una tabla que contiene cada una de las propiedades con las que debe contar un aislamiento para motor:

AISLAMIENTOS			
PROPIEDADES ELÉCTRICAS	PROPIEDADES TÉRMICAS	PROPIEDADES MECÁNICAS	CONDICIONES DEL MEDIO AMBIENTE
Resistencia al efecto corona.	Resistencia al calor.	Resistencia a los choques.	Resistencia a los ácidos.
Resistencia a los arcos eléctricos.	No se agriete.	Alta resistencia a la compresión.	Resistencia a las sustancias alcalinas.
Alta resistencia en el aislamiento.	Baja pérdida de peso.	Gran integridad interna.	Resistencia al agua.
Larga duración con esfuerzos eléctricos continuos.	Mantener resistencia física.	Buena adherencia.	Resistencia a los solventes.
Bajo factor de potencia	Resistir efectos de la expansión.	Resistencia a la abrasión	Resistencia a la sal.
Alta rigidez dieléctrica	Conducir el calor.	Alta resistencia al desgarramiento.	Resistencia a los hongos.
	Resistencia a choques por cambios de temperatura.	Alta resistencia a la tracción.	Resistencia al fuego.

TABLA 1: PROPIEDADES DE AISLAMIENTOS PARA MOTOR.

Por efecto de la degradación de los aislantes, la máquina no trabajará eficientemente y termine averiándose al producirse cortocircuitos entre espiras o fallas a tierra (contacto a masa).

Existe una regla aproximada llamada de *Montalinger*, que dice que la vida de un aislante se reduce a la mitad por cada 8°C de incremento de la temperatura de funcionamiento, sobre el máximo valor recomendado.

Debido a ésto se han establecido normas que especifican las temperaturas máximas que no se deben sobrepasar en los devanados y en las diferentes partes de la máquina.

A continuación se mencionan las clasificaciones de aislantes para algunas normas (en Europa y Estados Unidos):

#### 1.- Norma UNE 20-113-73 (Europea)

Fija una *temperatura ambiente* de 40°C (para menos de 1,000 m de altura).

##### *Aislamiento Clase A*

Aislamientos a base de algodón, seda, papel y materiales orgánicos análogos, impregnados o sumergidos en aceite; la temperatura máxima (que en ningún caso deberá sobrepasarse en éste tipo de aislantes) es de 105°C.

**Aislamiento Clase E**

Aislamientos a base de esmalte (hilo esmaltado), de tipo sintético (de acetato de vidrio o con propiedades análogas), no sumergido en aceite. Temperatura máxima: **120°C**.

**Aislamiento Clase B**

Aislamiento de mica, amianto (asbesto), vidrio y otras sustancias inorgánicas similares, combinadas con material aglutinante orgánico. Temperatura máxima: **130°C**.

**Aislamiento Clase F**

Aislamiento de fibra de vidrio, amianto (asbesto), tejidos de vidrio, aglomerados de mica, etc. impregnados con resina de elevada estabilidad. Temperatura máxima: **150°C**.

**Aislamiento Clase H**

Aislamiento de fibra de vidrio, amianto (asbesto), tejidos de vidrio, aglomerados de mica, etc. impregnados con resinas de siliconas. Temperatura máxima: **175°C**.

**Aislamiento Clase C**

Aislantes sin límite establecido de temperatura: debe demostrarse mediante ensayos.

**2.- Norma NEMA Standard MG1-1987 Motors and Generators (Estadounidense)**

Fija una temperatura ambiente de **40°C**.

**Aislamiento Clase Y (antes O)**

Aislamientos a base de algodón, seda, papel y materiales orgánicos análogos, sin impregnar ni sumergir en aceite. Temperatura máxima: **90°C**.

**Aislamiento Clase A**

Aislamientos a base de algodón, seda, papel y materiales orgánicos análogos, impregnados o sumergidos en aceite. Temperatura máxima **105°C**.

**Aislamiento Clase E**

Aislamientos a base de esmalte (hilo esmaltado), de tipo sintético (de acetato de vidrio o con propiedades análogas), no sumergido en aceite. Temperatura máxima: **120°C**.

**Aislamiento Clase B**

Aislamiento de mica, amianto (asbesto), vidrio y otras sustancias inorgánicas similares, combinadas con material aglutinante orgánico. Temperatura máxima: **130°C**.

### *Aislamiento Clase T*

Aislamiento de fibra de vidrio, amianto (asbesto), tejidos de vidrio, aglomerados de mica, etc. impregnados con resina de elevada estabilidad. Temperatura máxima: **155°C**.

### *Aislamiento Clase H*

Aislamiento de fibra de vidrio, amianto (asbesto), tejidos de vidrio, aglomerados de mica, etc. impregnados con resinas de siliconas. Temperatura máxima: **180°C**.

### *Aislamiento Clase C*

Aislantes que consisten íntegramente de mica, porcelana, vidrio, cuarzo y materiales inorgánicos similares. Temperatura: **más de 180°C**

En conclusión, el tipo de aislante a utilizarse quedará determinado por el tamaño y capacidad de la máquina (magnitudes de corriente a manejar), temperatura a régimen transitorio (arranque), temperatura a régimen permanente (operación normal), sistema de ventilación y tipo de construcción de la misma. La consideración de cada uno de estos factores, además de los costos, permitirán al diseñador hacer la elección más adecuada del tipo de aislamiento a utilizar.

### **CAJA DE TERMINALES DE CONEXIÓN O BORNES**

Como cualquier máquina eléctrica, los motores asíncronos vienen provistos con una caja de bornes o terminales de conexión y está situada en un costado de la carcasa o en la parte superior de la misma. Las terminales adecuadamente aisladas atraviesan la carcasa y llegan hasta la caja de terminales que posee una tapa para evitar el contacto involuntario y proteger las conexiones del polvo y contaminantes ambientales.

Generalmente las cajas de terminales o bornes de las máquinas asíncronas poseen 6 terminales o bornes de conexión marcados con las letras **U V W** los cuales se conectan a la línea de alimentación y los marcados con las letras **X Y Z** se conectan entre sí (en el caso de conexión estrella {**Y**}) o forman puentes con las terminales anteriores (en el caso de conexión delta o triángulo {**∇**}); para el arranque estrella-delta, deben retirarse todos los puentes de conexión (además de contar con dispositivos de arranque para tal fin).

### **DISPOSITIVOS DE TOMA DE CORRIENTE PARA EL ROTOR**

Estos dispositivos únicamente son aplicables a los motores trifásicos de inducción de rotor devanado, ya que los motores de jaula de ardilla no requieren de ningún elemento de conducción de corriente para el rotor, porque los conductores que constituyen el arrollamiento o devanado rotórico están en cortocircuito. Puesto que el presente trabajo está enfocado al estudio del motor trifásico de inducción de jaula de ardilla, sólo se mencionará brevemente.

Como órgano de conducción del rotor las máquinas de rotor devanado vienen provistas de tres anillos rozantes (construidos de cobre o bronce fundido), conectados cada uno de ellos a una de las tres terminales finales del devando del rotor, sobre éstos anillos asientan tres escobillas (elaboradas en carbón grafitado), mediante las cuales la corriente es conducida al exterior.

Las escobillas pueden permanecer fijas o pueden ser levantadas para simultáneamente ponerse en cortocircuito los anillos rozantes mediante dispositivos mecánicos, esto de acuerdo a la aplicación que tenga la máquina.

### **EJE**

El eje de las máquinas asíncronas no es de un sólo diámetro, posee pequeñas variaciones en sus diámetros con la finalidad de distribuir los esfuerzos mecánicos a los cuales se ve expuesta la máquina durante su funcionamiento, siendo más robustas las partes donde se concentran mayores esfuerzos axiales.

El cuerpo sustentador del núcleo magnético del rotor del cual se habló en párrafos anteriores, se fija al eje utilizando varios procedimientos, por ejemplo, en máquinas de pequeña potencia, se introduce a presión, para máquinas mayores, por medio de tuercas de sujeción, o chavetas longitudinales, en combinación con arandelas elásticas que se montan en las placas de compresión del núcleo magnético. En ocasiones se utilizan dos chavetas longitudinales, desplazadas 90° sobre el eje.

En el eje no deben existir cantos vivos, es decir que los cambios de diámetro no deben ser abruptos, los resaltes o cambios de diámetro deben hacerse con bordes redondeados, debido a que las aristas vivas provocan la concentración de esfuerzos mecánicos que pueden provocar la ruptura del eje, lo que se evita con los bordes suaves.

### **COJINETES**

Los *cojinetes* son los elementos mecánicos que tienen por objeto la fijación de los ejes a las partes fijas de las máquinas. Debe evitarse que el rozamiento de los ejes sobre estos elementos de fijación, desgaste a los propios ejes ya que, en este caso al no ser el ajuste perfecto, el entrehierro de las máquinas se reducirían por un lado, aumentando por el otro, provocando desequilibrios eléctricos en su funcionamiento, pudiendo llegar a tocar el rotor al estator, destruyendo los aislantes y dañando severamente a la máquina. Este peligro es grave en las máquinas de entrehierros muy pequeños.

Debido a esto el asiento del cojinete, debe tornearse con mucha exactitud y someterse a tratamientos térmicos especiales que le den dureza. Los materiales con los que se construyen los cojinetes son de muy buena calidad.

Los cojinetes utilizados en las máquinas asíncronas son de dos tipos:

- a) Cojinete de resbalamiento.
- b) Cojinete de rodamiento.

***Cojinete de Resbalamiento (o cojinete liso):***

En este tipo de cojinete, la punta del eje gira en el interior de un *casquillo o capuchón*, en cuya parte superior existe un compartimiento, donde se aloja un *anillo de engrase*, cuyo diámetro es mucho mayor que el del eje y está colgado de tal manera que en el momento en que esté en operación el motor, éste anillo de engrase gire arrastrado por el movimiento de la flecha y al estar la parte inferior del anillo sumergida en aceite, se le adhiera una capa de aceite que es elevada hasta la cavidad superior (espacio o compartimiento especial para el libre giro del anillo) del casquillo o capuchón, donde se vierte sobre el eje. Como el eje tiene ranuras laterales maquinadas situadas a lo largo del casquillo, el aceite se extiende por medio de ellas para regresar nuevamente a la cámara que contiene al aceite. De esta manera se asegura una circulación continua del aceite proporcionando lubricación a las partes en contacto.

A ambos lados del casquillo se encuentran dos ranuras transversales pequeñas cuya función es la de recoger la mayor parte del aceite que tiende a delizarse por el eje, fuera del cojinete, este aceite puede llegar a afectar el funcionamiento de la máquina, estas ranuras son conocidas con el nombre de *ranuras colectoras de aceite*.

La forma que se le da a estos cojinetes es muy variada y cada una de ellas responde a las necesidades o requerimientos que el diseño del motor le impone, habiendo de forma rectangular o circular, por citar algunas de ellas.

La cámara de aceite siempre se ubica en la parte inferior del cuerpo del cojinete, y sus dimensiones son amplias, esto con el fin de no tener que ser llenada constantemente con aceite, en la parte más baja de esta cámara se cuenta con un orificio de evacuación que sirve para vaciar la cámara cuando se le va a dar mantenimiento o limpieza al interior del cojinete.

Los cojinetes pueden estar unidos mecánicamente a la tapa o soporte del cojinete (utilizado en máquinas de pequeña y mediana potencia), o estar montados en sus propios soportes o soportes independientes a la tapa del motor (utilizado en máquinas de gran potencia).

***Cojinete de Rodamiento (o rodamiento):***

Son cada vez más utilizados en la construcción de máquinas eléctricas de pequeña y mediana potencia, aunque no han desplazado a los cojinetes de resbalamiento.

A continuación se enumeran algunas de las ventajas que tienen los cojinetes de rodamiento sobre los cojinetes de resbalamiento:

- Sus pérdidas por fricción o rozamiento son bastante inferiores, esta característica cobra una mayor relevancia sobre todo durante el periodo de arranque de los motores pues representa un sensible ahorro de energía en aquellas máquinas que tienen que arrancar con cierta frecuencia.
- Los soportes o cajas que contienen a los cojinetes, son bastante más estrechos y, por tanto la dimensión longitudinal resulta ser más reducida.
- Se puede decir que prácticamente no sufren desgaste y en consecuencia, no existe el riesgo de una disminución del entriehorro (espacio de aire que existe entre el estator y el rotor), aunque la máquina lleve funcionando mucho tiempo.

- El consumo de lubricante es muy reducido, pues por razones de óptimo funcionamiento de las máquinas se acostumbra o prefiere su reemplazo cada uno o dos años.

El único inconveniente que tienen los cojinetes de rodamiento sobre los de resbalamiento es que su funcionamiento es más ruidoso, lo que en casos (como el de los aparatos electrodomésticos) restrinja su utilización.

Los cojinetes de rodamiento pueden ser de diferentes tipos que se mencionan a continuación:

- a) **Cojinete de Bolas:** Son empleados en máquinas de pequeña y mediana potencia.
- b) **Cojinete de Rodillos o Balas:** Soportan mayores esfuerzos mecánicos y se emplean en máquinas de mediana y gran potencia.

En ocasiones se utilizan ambos tipos de rodamiento en una misma máquina, esto dependerá de los esfuerzos a los que se vea expuesto el rodamiento.

Los cojinetes de rodamiento se dividen en dos grandes clases:

- **Cojinete de Discos:** Soportan sobre todo esfuerzos longitudinales, son utilizados sobre todo en máquinas de eje vertical (como bombas de pozo profundo, por citar un ejemplo).
- **Cojinete de Anillos:** Soportan sobre todo esfuerzos transversales, son los más utilizados en máquinas de eje horizontal. Estos cojinetes de anillos pueden a su vez dividirse en dos grandes grupos:
  - **Cojinete de Gula:** Son destinados a recibir solamente esfuerzos en dirección transversal, debido a esto son fijos y no tienen movimiento axial.
  - **Cojinete de Ajuste:** También soportan esfuerzos longitudinales, lo que les permite un juego axial hacia uno o dos lados.

Como los ejes de las máquinas eléctricas se dilatan debido al calentamiento que produce su funcionamiento, en cualquier máquina eléctrica, uno de los cojinetes es de gufa y carece de juego axial, este cojinete es montado siempre de lado opuesto al del accionamiento.

El otro cojinete es de ajuste y permite un pequeño desplazamiento axial; siempre se monta del lado de accionamiento por ser el cojinete que ha de soportar mayores esfuerzos, tanto transversales como longitudinales.

Los cojinetes de rodamiento para motores de gran potencia tienen características especiales, es decir que pueden ser lubricados con grasa o con aceite, dependiendo esto de la velocidad a la que funcione la máquina, empleándose para velocidades reducidas los cojinetes lubricados por grasa y para máquinas que funcionan a velocidades elevadas los cojinetes lubricados por aceite debido a la gran fuerza centrífuga que desarrollan y que provoca que la grasa tienda a ser expulsada al exterior.

Los rodamientos lubricados con grasa se proveen de grasa por medio de unas boquillas de inyección y cuentan con un disco regulador que hace que la grasa usada y el sobrante sea evacuado a una cámara de recuperación.

Los rodamientos lubricados con aceite son lubricados automáticamente por medio de un disco engrasador sumergido en aceite que hace llegar el aceite hasta las ranuras colectoras de aceite que lo llevan hasta el rodamiento.

Las *máquinas de eje vertical* precisan de un análisis separado en lo que a rodamientos se refiere, a causa de las especiales condiciones de funcionamiento, a este respecto podemos mencionar los siguientes tipos:

- **Cojinetes de Guía:** Solamente sirven como guía lateral del eje, sin que sean capaces de soportar esfuerzos longitudinales.
- **Cojinete de Apoyo:** Se emplean para soportar esfuerzos longitudinales, sobre todo el propio peso del rotor.

Por lo general una máquina asíncrona de eje vertical viene provista en la parte superior de un **cojinete de guía**, y en la parte inferior un **cojinete de guía** y un **cojinete de apoyo**.

Los **cojinetes de apoyo de resbalamiento** van unidos por lo general a un **cojinete de guía**.

En máquinas de eje vertical de manera general es frecuente montar en la parte superior un **cojinete de guía y ajuste**, otro inferior y un **cojinete de apoyo** para soportar el peso del rotor y el mecanismo que esté accionando, razón por la cual debe ser muy robusto, este cojinete de apoyo se monta algunas veces encima y otras veces debajo del rotor. Para la lubricación, se prefiere el aceite en este tipo de máquinas.

Para los **rodamientos de guía y ajuste** pueden emplearse indistintamente, **cojinetes de bolas** o **cojinetes de rodillos**; la construcción del cojinete se distingue solamente por el tipo de lubricación.

Cuando la lubricación es a base de grasa, el cojinete es idéntico al de uno para eje horizontal; si la lubricación se realiza por aceite, lo más usual es un tubo de nivel de aceite para mantener la cantidad adecuada de aceite lubricante y una cámara hermética, cerrada por su parte inferior.

En lo que respecta a los rodamientos de apoyo de los motores de eje vertical, cuando el peso y los **esfuerzos longitudinales** son **pequeños**, resultan suficientes los **cojinetes de bolas** o **de rodillos del tipo de anillos**. Pero si los **esfuerzos longitudinales** son **elevados**, deben utilizarse además **cojinetes de disco** montados directamente sobre el eje o sobre una pieza común.

### **ORGANOS DE SUSTENTACIÓN DE LOS COJINETES**

Se utilizan como órganos de sustentación de los cojinetes las **tapas o escudos portacojinetes** apoyados en el estator en las máquinas de pequeña y mediana potencia y los **soportes de cojinete**, que son independientes de las tapas y se emplean en máquinas de gran potencia. Casi todas las máquinas asíncronas actuales emplean escudos portacojinetes.

Los escudos portacojinetes tienen distinta anchura, según correspondan al lado del accionamiento o al lado de las escobillas (para el caso del motor de rotor devanado); este último tiene mayor anchura debido al espacio ocupado por los anillos rozantes y los dispositivos de accionamiento de las escobillas.

En los motores de rotor jaula de ardilla, ambos escudos portacojinetes son prácticamente iguales y la máquina tiene una apariencia exterior simétrica.

En casi todos los motores asincrónicos de eje vertical, las escobillas y los anillos rozantes están situados en la parte superior, de tal manera que el escudo portacojinetes superior es más ancho.

## 2.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados  $120^\circ$  eléctricos (la equivalencia de grados eléctricos a grados geométricos está dada por la fórmula siguiente:

$$\beta = \frac{2 \cdot \alpha}{P} \quad \text{ó} \quad \alpha = \frac{\beta \cdot P}{2} \quad \dots (2.1)$$

donde:  $\beta$  = grados geométricos o mecánicos ( $^\circ$ G),  $\alpha$  = grados eléctricos ( $^\circ$ E),  $P$  = número de polos de la máquina en el espacio y de 2 polos (como mínimo), al suministrarle corriente de una red trifásica de frecuencia  $f$ , se produce una onda rotatoria de F.M.M. (*Fuerza Magnetomotriz*) que es la fuerza capaz de producir un campo magnético ya sea en el espacio o en un circuito magnético) distribuida de forma senoidal por la periferia del entrehierro, que produce un flujo giratorio cuya velocidad está definida por la ecuación siguiente (2.2) y es denominada *velocidad síncrona*:

$$S = \frac{120f}{P} \quad \leftarrow \text{VELOCIDAD SÍNCRONA} \quad \dots (2.2)$$

donde:

$f$  = frecuencia de la red (60Hz).

$P$  = número de polos de la máquina.

Este flujo giratorio (debido al campo magnético giratorio que se forma por la interacción de las tres corrientes circulantes por los tres devanados) inducirá F.E.M.'s (*Fuerza Electromotriz*) que es una diferencia de potencial o voltaje generado por efecto del cruce de las líneas de flujo magnético a través de un conductor) en los conductores del rotor y si está su circuito eléctrico cerrado, se presentarán corrientes (por efecto de la fuerza electromotriz a través de un circuito cerrado) que reaccionarán con el flujo del estator. De acuerdo con la Ley de Faraday, la F.E.M. inducida en un conductor de longitud  $l$  que se mueve a una velocidad  $v$  dentro de un campo magnético de densidad de flujo  $B$ , está expresada por la ecuación (2.3):

$$e = \int (B \cdot v) \, dl = B l v \quad \dots (2.3)$$

El rotor gira en sentido contrario al campo (movimiento relativo entre las partes). El sentido de la fuerza que aparece en los conductores del rotor se obtiene aplicando la ley vectorial o ley de Laplace:

$$F = i (B \cdot l) \quad \dots (2.4)$$

donde:

$i$  = corriente que circula por el conductor.

Multiplicando la fuerza por el radio del rotor y el número de conductores existentes en el mismo se obtiene el par total de la máquina que tiende a mover el rotor siguiendo al campo magnético giratorio del estator. La fuerza resultante que provoca el movimiento del rotor actúa realmente en los dientes de las ranuras practicadas al rotor (que contienen a los conductores) o como en el caso del rotor de jaula de ardilla, sobre la superficie de material ferromagnético del mismo (de baja reluctancia). Este es un hecho benéfico ya que de actuar directamente sobre los conductores provocaría la compresión de los aislamientos de estos que sería perjudicial para la vida de la máquina.

El momento o par total de estas fuerzas genera el par de rotación de la máquina que obliga a girar al motor siguiendo el sentido del campo magnético giratorio.

Cuanto más se aproxima la velocidad del rotor a la velocidad del campo magnético giratorio del estator, tanto menor es la F.E.M. inducida en los conductores del rotor y como consecuencia la corriente que circula por ellos también es reducida lo que provoca una reducción del par interno o par electromagnético del motor.

La velocidad del rotor con respecto a la del campo nunca será igual, debido a que ello significaría el que no existiera movimiento del campo con respecto al rotor, desapareciendo con esto la F.E.M. inducida que provocaría la anulación de la corriente en rotor y con ello el par resultante.

La diferencia que existe entre la velocidad del campo magnético giratorio del estator ( $S$ ) y la velocidad del rotor ( $S_r$ ) es denominada *deslizamiento* ( $s$ ) y queda determinado por la siguiente ecuación (2.5):

$$s = \frac{S - S_r}{S} \times 100 \quad \dots (2.5)$$

y cuyo valor está comprendido en los motores industriales entre el 3% y el 8% a plena carga (esto es aproximado pues depende del tipo de motor en cuestión pudiendo llegar el valor a 20% a plena carga).

Al aumentar la carga mecánica del motor, el par resistente (par o momento impuesto por la carga y la inercia de la máquina) se hace mayor que el par interno y el deslizamiento aumenta, esto provoca un aumento en las corrientes del rotor, gracias a lo cual aumenta el par motor y se establece el equilibrio dinámico del par resistente y el par motor.

En realidad son las F.M.M.'s de ambos devanados, las que interactúan para producir el flujo resultante en el entrehierro. Esta interacción sólo es posible si las F.M.M.'s están enclavadas en sincronía, es decir si las ondas de F.M.M. de estator y rotor giran a la misma velocidad, lo que se consigue teniendo ambos arrollamientos con el mismo número de polos (lo cual es exigencia constructiva de este tipo de máquinas).

Sin embargo, no es necesario que tanto rotor como estator tengan el mismo número de fases.

El rotor del motor de jaula de ardilla está formado por un gran número de barras cortocircuitadas, dando lugar a un devanado polifásico, cuyas fases están determinadas por la siguiente expresión (2.6):

$$\text{Fases en rotor} = m_2 = \frac{\text{Barras o conductores en rotor}}{\text{Polos}} \dots (2.6)$$

donde: cada fase está formada por una sola espira.

En resumen, una jaula de ardilla es equivalente a un devanado rotórico de  $m_2$  fases de 1 espira/fase.

Cuando el rotor es de jaula de ardilla, las leyes del bobinado del estator son las que determinan el número de polos del motor.

Debido a que la base del funcionamiento del motor trifásico de inducción de jaula de ardilla sea el principio de inducción electromagnética de modo similar que en el transformador, lleva a considerar análogos los términos *estator* con *primario* y *rotor* con *secundario*, llegándose incluso a analizar a ambas máquinas de forma similar por medio del circuito equivalente que se detallará en puntos posteriores de ésta tesis.

## 2.5 CAMPO MAGNÉTICO GIRATORIO

Al alimentarse los tres devanados de fase del estator con una tensión trifásica equilibrada, producen una fuerza magnetomotriz constante que gira uniformemente y produce un campo magnético que también es constante y gira a la misma velocidad.

En la siguiente figura (Fig. 20) se muestran 6 bobinas, tres bobinas U-X, V-Y y W-Z montadas en la mitad del perímetro del laminado del estator, y la otra mitad la ocupan otras tres bobinas U<sub>1</sub>-X<sub>1</sub>, V<sub>1</sub>-Y<sub>1</sub> y W<sub>1</sub>-Z<sub>1</sub>. Las terminales de "entrada" están desplazadas en el espacio sólo en 120°: 2 = 60°. Cada rama posee dos bobinas (por ejemplo: U-X y U<sub>1</sub>-X<sub>1</sub>) que pueden ser conectadas en serie o en paralelo. De esta forma las 6 bobinas producen un campo magnético tetrapolar. Los tres devanados estáticos (separados entre sí, 120° eléctricos) están conectados a una red trifásica R-S-T. En ésta imagen se ilustra la forma en que las tres corrientes alternas de la red trifásica, entrelazadas en 120°, circulan a través de las bobinas del estator (que se presenta inmediatamente abajo):

Por las bobinas U-X y U<sub>1</sub>-X<sub>1</sub> pasa la corriente  $I_u$ ; por las bobinas V-Y y V<sub>1</sub>-Y<sub>1</sub>, la corriente  $I_v$  y por W-Z y W<sub>1</sub>-Z<sub>1</sub>, la corriente  $I_w$ . Por eso, aparecen dos polos norte  $N_1$  y  $N_2$  y dos polos sur  $S_1$  y  $S_2$  (máquina de 4 polos o tetrapolar). Debido a que en todo momento los valores y sentidos de las corrientes son diferentes, se indican los valores momentáneos que adquieren a 0°, 90°, 180°, 270° y 360° los sentidos de las corrientes y consecuentemente los sentidos del campo magnético.

Si se observa la figura 20, se puede comprobar que durante un periodo o ciclo completo (1/60 de segundo), el polo norte  $N_1$  sólo se desplaza 180°, es decir ½ vuelta. Sólo después de otro periodo,  $N_1$  ocupará su posición original. Esto es que se requiere de 2 periodos para una vuelta completa de una máquina tetrapolar.

Observemos la figura 20 para analizar el comportamiento del campo:

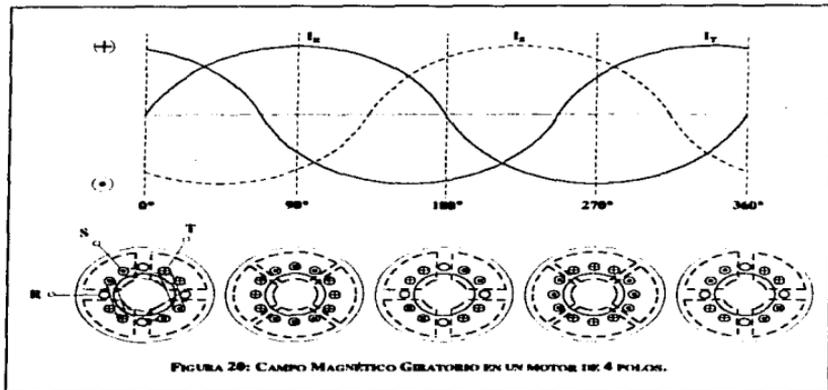


FIGURA 20: CAMPO MAGNÉTICO GIRATORIO EN UN MOTOR DE 4 POLOS.

**Análisis:**

Es conveniente aclarar primero, que el símbolo  $(\otimes)$  representa la entrada de corriente a través del lado activo de la bobina (conductor) y el símbolo  $(\odot)$  representa la correspondiente salida de la corriente por el otro lado de bobina. Esto para cada una de las bobinas que componen los devanados estáticos.

$0^\circ \Rightarrow$  En el instante  $0^\circ$  el valor de la corriente  $I_u$  es 0 (o nulo). En éste momento no pasa corriente por la bobina U-X y los valores de las corrientes  $I_v$  e  $I_w$  son iguales, pero de sentidos opuestos. Como el valor de  $I_v$  se encuentra abajo del eje de las abscisas (eje x), es negativo y la corriente va de la terminal Y (positiva) hacia el comienzo de la bobina  $(\otimes)$ . Al otro lado,  $I_w$  es positiva; el sentido de la corriente se debe trazar de W hacia Z. El conductor T es el de la entrada y el R, el de la salida. Entre los conductores V y Z surge un campo magnético conjunto, lo mismo que entre X y W. Los dos campos magnéticos están en la dirección de las flechas indicadoras. Aparecen los polos Sur y Norte.

$90^\circ \Rightarrow$  A  $90^\circ$ , resultan los valores y los sentidos indicados de las corrientes, en éste instante  $I_u$  alcanzó su valor máximo positivo y va de U hacia X,  $I_v$  e  $I_w$  llegan a sus valores medios negativos. Las corrientes van de Y hacia V y de Z hacia W. El conductor externo R es ahora la entrada y S y T son las salidas. El campo magnético total ejecuta una rotación de  $45^\circ$  en el sentido de las manecillas del reloj. Aparece el campo magnético giratorio.

- 180°** ⇒ En el instante correspondiente a 180°, la corriente  $I_R$  vuelve a alcanzar su valor cero, por la bobina U-X no hay circulación de corriente,  $I_S$  se presenta en el sentido positivo: va de V hacia Y,  $I_T$  tiene sentido negativo: va de Z hacia W. El conductor externo S es la entrada y el conductor T, es la salida. El campo magnético total gira nuevamente 45° en el sentido de las manecillas del reloj.
- 270°** ⇒ En el momento que corresponde a 270°,  $I_R$  llega a su valor máximo negativo. Circula por la bobina de X hacia U.  $I_S$  e  $I_T$  alcanzan su valor medio positivo. Las corrientes van de V hacia Y y de W hacia Z. El campo magnético total gira otra vez 45° en el sentido de las manecillas del reloj.
- 360°** ⇒ El instante 360° corresponde al momento 0°, repitiéndose la secuencia descrita anteriormente, girando 45° a cada momento descrito. En este instante, el campo magnético total gira 45° en el sentido de las manecillas del reloj. Hasta éste punto, el campo magnético giratorio total ha descrito ½ vuelta concluyéndose la vuelta completa al término del 2o. periodo.

De este análisis podemos concluir que al alimentarse con un voltaje trifásico equilibrado, los tres devanados de fase del estator producen una fuerza magnetomotriz constante que gira uniformemente y produce un campo magnético de la misma forma constante, que gira a la misma velocidad.

A la velocidad con la que gira el campo magnético se le conoce como *velocidad síncrona* del motor y se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$S = \frac{120f}{P} \quad \dots (2.2)$$

donde:

S = velocidad síncrona  
 f = frecuencia de la red  
 P = número de polos

Para este caso, el campo magnético giratorio efectúa una revolución completa por cada 2 ciclos de la corriente alterna (debido a que se trata de un motor de cuatro polos o tetrapolar).

De tal forma que si deseamos modificar la velocidad del campo magnético giratorio o velocidad síncrona, debemos cambiar la frecuencia o el número de polos.

Cuanto más polos posea un motor, menor será la frecuencia de rotación del campo.

Una vuelta completa del campo magnético concluye después de tantos periodos como pares de polos posea la máquina.

Cuanto más alta sea la frecuencia de la red de alimentación, mayor será la frecuencia de rotación del campo magnético giratorio.

El sentido de rotación del campo magnético giratorio se puede invertir cambiando la secuencia de fases, es decir, intercambiando dos terminales cualesquiera.

Al cortar a los conductores del estator, el campo magnético giratorio genera en ellos una fuerza contraelectromotriz (CEEM) cuyo efecto es limitar el valor de la corriente que circula por el devanado primario.

## 2.6 PRINCIPIO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

El motor asíncrono o de inducción debe su nombre al hecho de que funciona gracias a los efectos del principio de inducción electromagnética pues no existe conexión física entre su estator o parte estática y su rotor o parte móvil. Al alimentarse su estator por medio de una red trifásica y al fluir por sus devanados una corriente alternante de similar magnitud pero de ángulos de defasamiento distintos por cada una de las fases, se establece un campo magnético giratorio que gira a la velocidad síncrona determinada por la frecuencia del sistema o red de alimentación y del número de polos de la máquina.

Por efecto del campo magnético giratorio se inducen voltajes en las barras del rotor que al estar cortocircuitadas provocará una circulación de corriente generando con esto un campo magnético en rotor, que interactuará con el del estator y hará que éste gire.

La velocidad que el rotor adquiera será muy próxima a la síncrona (en vacío) y variará ligeramente con la carga, pero nunca será igual a esta debido a la existencia del llamado deslizamiento.

### Deslizamiento:

El **deslizamiento** ( $s$ ) es la diferencia entre la velocidad del campo magnético giratorio ( $S$ ) y la velocidad real del rotor ( $S_r$ ), y se expresa como un porcentaje de la velocidad del campo:

$$s = \frac{S - S_r}{S} \times 100 \quad \leftarrow \text{Deslizamiento} \dots (2.5)$$

$$S_r = S(1 - s) \quad \leftarrow \text{Velocidad real del rotor} \dots (2.7)$$

### Ejemplo:

Se tiene un motor de inducción trifásico de 2 polos, alimentado con una tensión cuya frecuencia es  $f=60$  Hz.

La velocidad síncrona (velocidad del campo magnético) es:

$$S = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 60\text{Hz}}{2 \text{ polos}} = 3,600 \text{ rpm}$$

Si el deslizamiento es  $s = 4\%$ , la velocidad de operación del motor es:

$$S_r = S(1 - s) = 3,600(1 - 0.04) = 3,456 \text{ rpm}$$

Si el deslizamiento fuera igual a cero, la tensión inducida en el rotor sería nula. Cuando el rotor está detenido, el deslizamiento es de 100% ( $s=1$ ), la tensión (o FEM)  $E_r$  inducida en cada barra del rotor es igual a la fuerza contraelectromotriz (FCEM) por conductor en el estator. Si se conoce el valor del voltaje del rotor  $E_{br}$  (voltaje inducido en el rotor en reposo o a rotor bloqueado), en estas condiciones, el voltaje o FEM inducida en el rotor a cualquier valor de deslizamiento  $s$  será:

$$E_r = sE_{br} \dots (2.8)$$

De manera similar, la frecuencia en el rotor a cualquier valor de deslizamiento en función de la frecuencia de alimentación es:

$$f_r = sf \dots (2.9)$$

La corriente que circula por las barras y el circuito total del rotor crea un flujo local o disperso a su alrededor que representa una reactancia local  $X_r$  (o de dispersión) cuyo valor, dado que la frecuencia del rotor aumenta con el deslizamiento y la reactancia varía con la frecuencia ( $X_r = 2\pi f L_r$ ) queda expresado de la siguiente manera:

$$X_r = sX_{br} \quad \Leftarrow \text{EN REPOSO} \dots (2.10)$$

donde:

$X_{br}$  = reactancia del rotor en reposo o a rotor bloqueado.

La corriente en el rotor está dada por la siguiente expresión:

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{\text{Tensión inducida}}{\text{Impedancia}} \dots (2.11)$$

A valores bajos de deslizamiento la impedancia es prácticamente constante, por lo que la corriente es casi proporcional al deslizamiento  $s$ .

A valores elevados de deslizamiento, tanto el voltaje inducido como la impedancia son proporcionales al deslizamiento  $s$ , por lo que la corriente es prácticamente constante.

El deslizamiento necesario para producir la fuerza que impulse la carga nominal del motor depende de las características de éste.

Cuanto mayor sea la magnitud de la corriente que demande el motor en el arranque, tanto menor será el deslizamiento a plena carga y mayor será la eficiencia del mismo.

Cuanto más baja sea la magnitud de la corriente que tome el motor en el arranque, tanto mayor será el deslizamiento, y menor será la eficiencia.

Si se incrementa el voltaje de línea, se reduce el deslizamiento y viceversa.

Una reducción en el voltaje de línea provoca un incremento en el calentamiento del motor, de manera contraria un aumento en la magnitud del voltaje de línea trae como resultado una reducción del calentamiento del motor.

Según sea el tipo de motor, el deslizamiento a plena carga oscila entre 3% y 20%.

La impedancia del rotor en reposo ( $Z_{lr}$ ) es:

$$Z_{lr} = R_r + jX_{lr} = \sqrt{R_r^2 + X_{lr}^2} \quad \Leftarrow \text{EN REPOSO} \quad \dots (2.12)$$

y

$$\cos\theta_r = \frac{R_r}{Z_{lr}} \quad \dots (2.13)$$

como se dijo en párrafos anteriores, la corriente en el rotor en reposo ( $I_{lr}$ ) es:

$$I_{lr} = \frac{E_{lr}}{Z_{lr}} = \frac{E_{lr}}{R_r + jX_{lr}} = \frac{E_{lr}}{\sqrt{R_r^2 + X_{lr}^2}} \quad \Leftarrow \text{EN REPOSO} \quad \dots (2.11a)$$

donde:

$E_{lr}$  = Valor efectivo de voltaje inducido en el rotor en reposo,  
 $R_r$  = Resistencia efectiva del rotor en reposo.

El *par de arranque* que desarrolla el rotor de un motor de inducción en reposo es:

$$T_{ARRANQUE} = K_t \phi I_{lr} \cos\theta_r = \frac{K_t \phi E_{lr}}{\sqrt{R_r^2 + X_{lr}^2}} \times \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + X_{lr}^2}} = \frac{K_t \phi E_{lr} R_r}{R_r^2 + X_{lr}^2} \quad \Leftarrow \text{EN REPOSO} \quad \dots (2.14)$$

donde:

$K_t$  = Constante de par para el número de polos, devanado, unidades empleadas.  
 $\phi$  = Flujo por polo  
 $I_{lr} \cos\theta_r$  = Componente de corriente en el rotor que está en fase con  $\phi$ .

Debido a que el rotor está bloqueado se inducen en él voltajes por la acción transformador,  $E_{lr}$  es proporcional a  $\theta_r$ , que a su vez es proporcional al voltaje aplicado de línea o voltaje de fase del estator  $V_s$ , por tanto podemos simplificar:

$$T_{ARRANQUE} = \frac{K_t V_s^2 R_r}{R_r^2 + X_{lr}^2} \quad \Leftarrow \text{EN REPOSO} \quad \dots (2.14a)$$

Para un motor de jaula de ardilla la resistencia efectiva del rotor ( $R_r$ ) y la reactancia del rotor en reposo ( $X_{lr}$ ) son constantes para un voltaje aplicado a las barras y una frecuencia constante, se pueden agrupar en otra constante ( $K_t'$ ) para quedar finalmente simplificada a la siguiente expresión:

$$T_{ARRANQUE} = K_t' V_s^2 \quad \Leftarrow \text{EN REPOSO} \quad \dots (2.14b)$$

de esta forma queda establecido que para cualquier motor de inducción de jaula de ardilla, el par de arranque únicamente es función del voltaje aplicado al devanado del estator.

El par de arranque con el rotor en reposo,  $T_{ARRANQUE}$ , de un motor de inducción jaula de ardilla puede llegar a ser tan grande como el par a plena carga o mayor que este. De tal forma que da lugar al cálculo del *par máximo* o *par crítico* o *par de desenganche*. Una vez que el motor desarrolla el par de arranque y gira, su frecuencia, la reactancia del rotor y el voltaje inducido en el rotor se ven afectados por el deslizamiento.

Al disminuir la frecuencia y la reactancia del rotor, el voltaje inducido en el rotor baja también al aumentar la velocidad del motor.

La disminución en la reactancia del rotor aumenta el valor de  $\cos\theta_r$ , pero al mismo tiempo la disminución en el voltaje del rotor tiende a reducir la corriente en éste.

Para cualquier valor de deslizamiento, la corriente del rotor es:

$$I_r = \frac{sE_{lr}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{lr})^2}} \Leftrightarrow \text{A CUALQUIER VALOR DE DESLIZAMIENTO (s)} \quad \dots (2.15)$$

y

$$\cos\theta_r = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{lr})^2}} \Leftrightarrow \text{A CUALQUIER VALOR DE DESLIZAMIENTO (s)} \quad \dots (2.16)$$

para cualquier valor de deslizamiento, el par es:

$$T_{\text{para cualquier deslizamiento}} = \frac{K_f \phi s E_{lr} R_r}{R_r^2 + (sX_{lr})^2} \quad \dots (2.17)$$

pero como el voltaje a rotor bloqueado ( $E_b$ ), es directamente proporcional al flujo ( $\phi$ ), el par puede ser expresado como:

$$T_{\text{para cualquier deslizamiento}} = \frac{K_f \phi^2 s R_r}{R_r^2 + (sX_{lr})^2} \quad \dots (2.18)$$

El *par máximo* se obtiene cuando el deslizamiento crítico ( $s_b$ ) es igual a  $\frac{R_r}{X_{lr}}$  ... (2.19)

pero como  $\phi^2$  es proporcional a  $V_p^2$ , se tiene que el par máximo que puede desarrollar cualquier motor de inducción es:

$$T_{\text{MAXIMO}} = \frac{KV_p^2}{2(s_b X_{lr})^2} = \frac{K}{s} \left( \frac{V_p}{R_r} \right)^2 \quad \dots (2.20)$$

Si a partir de la ecuación de corriente en rotor a cualquier deslizamiento, mencionada anteriormente:

$$I_r = \frac{sE_{lr}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{lr})^2}} \quad \dots (2.15)$$

dividimos tanto numerador como denominador entre el deslizamiento  $s$ :

$$I_r = \frac{E_{lr}}{\sqrt{(R_r/s)^2 + X_{lr}^2}} \quad \dots (2.21)$$

En reposo el deslizamiento es la unidad. Cuando gira el rotor, disminuye el deslizamiento, con lo cual aumenta la resistencia "aparente" del rotor. La resistencia variable del rotor (debido a la variación del deslizamiento) se puede considerar compuesta de dos términos:

$$\frac{R_r}{s} = R_r + R_r \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad \dots (2.22)$$

$R_r$  representa la resistencia efectiva por fase y el segundo término representa la resistencia de carga ficticia, que varía directamente con la carga y el deslizamiento en condiciones de trabajo.

El término  $R_r$  se puede considerar como el *componente de pérdida de potencia* del rotor para cualquier corriente (de rotor) y se puede considerar al término variable  $R_r[(1-s)/s]$  como el término de potencia desarrollada por el rotor, a fin de producir par. Al multiplicar cada uno de estos términos por el cuadrado de la corriente del rotor se tiene:

$$\frac{I_r^2 R_r}{s} = I_r^2 R_r + I_r^2 R_r \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad \dots (2.23)$$

**POTENCIA DE ENTRADA AL ROTOR = PÉRDIDAS EN EL COBRE + POTENCIA DESARROLLADA  
POR FASE DEL ROTOR POR FASE EN EL ROTOR POR FASE**

La *potencia nominal de entrada* al rotor por fase se expresa de la siguiente forma:

$$P_{in} = \frac{I_r^2 R_r}{s} \quad \{W/fase\} \quad \dots (2.24)$$

El *par nominal* o *par desarrollado* por el rotor en función de la potencia es:

$$T = \frac{5252 \text{ Hp}}{S_r} = \frac{5252 P_d}{746 S_r} = \frac{7.04 P_d}{S_r} \quad \{\text{lb-pie}\} \quad \dots (2.25)$$

donde:

$S_r$  = Velocidad del rotor en rpm a cualquier valor de deslizamiento.

La *potencia total desarrollada* por el rotor de un motor de inducción es:

$$P_d = I_r^2 R_r^2 \frac{(1-s)}{s} = P_{in}(1-s) \quad \{\text{W/fase}\} \quad \dots (2.26)$$

donde:

$P_{in}$  = Entrada total de potencia a todas las fases del rotor.

El *par nominal* o *par desarrollado* por el rotor es:

$$T = \frac{7.04 P_d}{S_r} = \frac{7.04 P_{in}(1-s)}{S_r} = \frac{7.04 P_{in}}{S_r / (1-s)} \quad \{\text{lb-pie}\} \quad \Leftarrow \text{por fase} \quad \dots (2.27)$$

pero como:

$$S = \frac{S_r}{(1-s)} \quad \dots (2.28)$$

$$T = 7.04 \left( \frac{P_{in}}{S} \right) \quad \{\text{lb-pie}\} \quad \Leftarrow \text{por fase} \quad \dots (2.29)$$

La *potencia de entrada al rotor* a cualquier valor de deslizamiento (incluyendo el crítico) es:

$$P_{in} = \frac{I_r^2 R_r}{s_b} \quad \{\text{W/fase}\} \quad \Leftarrow \text{por fase} \quad \dots (2.24a)$$

La *potencia de entrada al rotor* para el *par máximo, crítico* o *de falla* se determina a partir de la relación de las ecuaciones siguientes (para par máximo):

$$s_b = \frac{R_r}{X_{lr}} \quad \dots (2.30) \quad , \quad I_r = \frac{E_{lr}}{\sqrt{(R_r / s_b)^2 + X_{lr}^2}} \quad \dots (2.21a)$$

sustituyendo (2.24a) en la (2.30):

$$I_r = \frac{E_{lr}}{\sqrt{2X_{lr}^2}} = \frac{E_{lr}}{\sqrt{2} \times X_{lr}} = 0.707 \left( \frac{E_{lr}}{X_{lr}} \right) \quad \dots (2.31)$$

sustituyendo (2.30) y (2.31) en la ecuación (2.24a):

$$P_{in} = \frac{E_{lr}^2}{2X_{lr}} \quad \{\text{W/fase}\} \quad \dots (2.32)$$

El *par de arranque en el instante del arranque* se obtiene de la siguiente forma:

Debido a que en el instante del arranque el deslizamiento es unitario ( $s=1$ ), se puede simplificar la ecuación (2.21a) y se tiene:

$$I_r = \frac{E_{lr}}{\sqrt{R_r^2 + X_{lr}^2}} \Leftrightarrow \text{al instante de arrancar} \dots (2.11a)$$

y la entrada de potencia al rotor por fase (a deslizamiento unitario) es:

$$P_{in} = I_r^2 R_r \Leftrightarrow \text{a deslizamiento unitario } (s=1) \dots (2.33)$$

sustituyendo (2.11a) en (2.33):

$$P_{in/fase} = \frac{E_{lr}^2}{R_r^2 + X_{lr}^2} \times R_r \quad \{W/fase\} \Leftrightarrow \text{al momento de arrancar} \dots (2.34)$$

El **par a cualquier valor de deslizamiento a partir del par máximo  $T_b$** , se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$T = T_b \left[ \frac{2}{\left(\frac{s_b}{s}\right) + \left(\frac{s}{s_b}\right)} \right] \quad \{lb-pie\} \dots (2.35)$$

donde:

$T$  = Par a cualquier deslizamiento ( $s$ ).

$T_b$  = Par máximo de falla a un deslizamiento máximo  $s_b$ .

### Par:

El **par** es el momento de una fuerza y se expresa en las unidades correspondientes de distancia y fuerza. Existen distintos niveles de par en el funcionamiento de un motor, éstos se describen a continuación:

El **par de arranque** conocido también como **par a rotor bloqueado**, es el que desarrolla el motor al ser puesto en marcha.

Una vez que el motor se ha puesto en movimiento, el par tiende a un valor más bajo conocido como **par mínimo**, éste valor de par se produce cuando el motor apenas ha alcanzado una fracción de su velocidad nominal.

El *par máximo* es el valor más alto de par que puede desarrollar el motor sin que tienda a frenarse, se le llama también *par crítico o par de desenganche*, porque es el valor de par que hace que el motor disminuya su velocidad súbitamente y tienda a "desengancharse" de la carga.

El *par normal* es el que desarrolla un motor para proporcionar la potencia nominal a la velocidad nominal (de plena carga).

El *par de aceleración* es la diferencia entre el par desarrollado por el motor y el par requerido por la carga a una velocidad determinada. Es importante que el par de aceleración sea adecuado para poder acelerar una carga de inercia elevada sin que el motor tienda a frenarse o a sufrir un calentamiento excesivo.

## 2.7 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

El circuito equivalente es la herramienta más útil para analizar el funcionamiento o comportamiento del motor de inducción, así como para calcular todos los parámetros relacionados con la misma, una vez que se han determinado las constantes del circuito (expresadas en *por unidad*).

El circuito equivalente presenta ventajas por encima de otros métodos (como por ejemplo el diagrama circular, que se analizará posteriormente), ya que nos proporciona una visión más clara acerca de la interrelación de las resistencias y reactancias del circuito del estator como del rotor, y como afectan al comportamiento del motor ante alguna variación de estos parámetros.

El circuito por sí sólo nos permite calcular todos los valores que definen el funcionamiento del motor en sus etapas de operación, como son arranque, vacío, plena carga, etc.

El circuito equivalente del motor de inducción es muy similar al del transformador, de ahí que se les compare, con base en el hecho de que las corrientes en el secundario o rotor son inducidas, con la única observación de que estas corrientes no se deben a la variación cíclica del voltaje aplicado al primario, como ocurre en un transformador, sino por la acción de un campo magnético giratorio que no cambia de magnitud.

El circuito equivalente exacto de un motor de inducción, propuesto por Steinmetz, es el mismo que el de un transformador, con la diferencia de que la impedancia de carga se sustituye por una resistencia variable.

A continuación se presenta la figura (21) del circuito equivalente del motor de inducción:

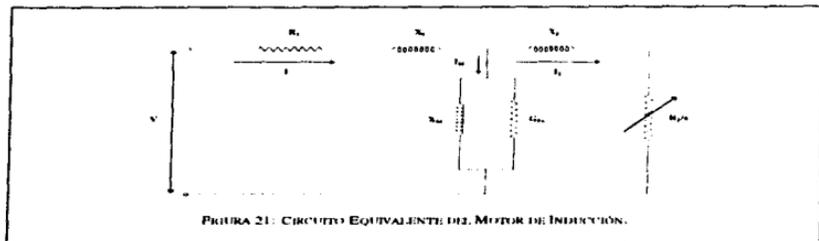


FIGURA 21: CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

donde:

- V** = Voltaje o tensión aplicada al motor (por fase).
- I** = Corriente de línea que circula por el estator.
- R<sub>1</sub>** = Resistencia del devanado del estator.
- X<sub>1</sub>** = Reactancia local (o de dispersión) del estator.
- I<sub>m</sub>** = Corriente Magnetizante (o de magnetización).
- X<sub>m</sub>** = Reactancia de Magnetización.
- G<sub>Fe</sub>** = Conductancia (representa las pérdidas en el hierro o magnéticas).
- X<sub>2</sub>** = Reactancia local (o de dispersión) del rotor referida al estator.
- R<sub>2</sub>** = Resistencia del devanado del rotor.
- s** = Deslizamiento.
- I<sub>2</sub>** = Corriente que circula por la resistencia del rotor R<sub>2</sub>.

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

### 2.7.1 ANÁLISIS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

La primera suposición en que se basa el circuito equivalente es que el voltaje, la potencia y la corriente en cada fase son iguales de manera que el análisis de una sola fase representa a todo el motor.

Si la máquina está conectada en delta ( $\Delta$ ), en el circuito se representa el valor de una fase de la estrella (Y) equivalente. En el circuito,  $V$  representa el voltaje de fase (fase a neutro);  $I$  la corriente de línea que circula por el estator, provocando una caída de voltaje  $I(R_1 + jX_1)$ ;  $I_m$  es la corriente de magnetización o magnetizante;  $I_2$  es la corriente que circula por la resistencia  $R_2$  del rotor.

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

$$P_{\text{VALIDA}} = P_{\text{ENTRADA}} - P_{\text{Cm (ESTATOR)}} - P_{\text{PÉRD. EN EL Fc}} - P_{\text{TRANSE. AL ENTREHIERRO}} - P_{\text{ENTRADA AL ROTOR}} - P_{\text{PÉRD. EN EL ROTOR}}$$

La potencia de entrada al rotor es equivalente a la potencia disipada en la resistencia  $R_2/s$ ; es decir que:

$$P_{\text{ENTRADA AL ROTOR}} = \frac{R_2}{s} I_2^2 \quad (\text{por fase}) \quad \dots (2.24)$$

$$P_{\text{ENTRADA AL ROTOR}} = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 \quad (\text{por las 3 fases}) \quad \dots (2.36)$$

las pérdidas totales en el rotor están dadas por la siguiente fórmula:

$$P_{\text{PÉRD. TOTALES EN ROTOR}} = 3 I_2^2 R_2 \quad \dots (2.37)$$

por lo tanto la potencia de salida del rotor está expresada por:

$$P_{\text{VALIDA DEL ROTOR}} = P_{\text{ENTRADA AL ROTOR}} - P_{\text{PÉRD. TOTALES EN ROTOR}}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{VALIDA}} &= 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 - 3 I_2^2 R_2 \quad \dots (2.38) \\ &= \frac{3R_2 I_2^2 - 3I_2^2 R_2 s}{s} \end{aligned}$$

factorizamos:

$$P_{\text{VALIDA}} = \frac{3I_2^2 R_2}{s} (1 - s) \quad \dots (2.39)$$

Expresando la potencia de salida en términos de par y velocidad:

$$P_{\text{VALIDA}} = \frac{Tn}{K} \quad \dots (2.40)$$

donde:

T = Par.  
n = Velocidad.  
K = Constante.

igualamos (2.39) y (2.40):

$$\frac{Tn}{K} = \frac{3I_2^2 R_2}{s} (1 - s)$$

despejamos el par (T):

$$T = \left( \frac{K}{n} \right) \left( \frac{3I_2^2 R_2}{s} (1 - s) \right)$$

dividimos entre (1-s):

$$T = \left( \frac{K}{n/(1-s)} \right) \left( \frac{3I_2^2 R_2}{s(1-s)} (1-s) \right)$$

$$T = \left( \frac{K}{n/(1-s)} \right) \left( \frac{3I_2^2 R_2}{s} \right)$$

como:

$n/(1-s)$  es la velocidad síncrona del motor ( $n_s$ ):

$$n/(1-s) = n_s$$

entonces:

$$T = \left( \frac{K}{n_s} \right) \left( \frac{3I_2^2 R_2}{s} \right) \dots (2.41)$$

Si comparamos las ecuaciones (2.36) y (2.37) apreciamos que:

$$3 I_2^2 R_2 = s \cdot \left( 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 \right)$$

$$P_{\text{PÉRD. TOTALES EN ROTOR}} = s \cdot P_{\text{ENTRADA AL ROTOR}}$$

Las pérdidas en el rotor son iguales al deslizamiento multiplicado por la potencia de entrada del rotor. Debido a esto no es conveniente trabajar con un deslizamiento elevado, pues de este modo las pérdidas se incrementan.

• En el *periodo de arranque* el deslizamiento vale 1 (o 100%) por lo que:

$$\frac{R_2}{s} = \text{valor mínimo}$$

y su magnitud es comparable a la reactancia  $X_2$ . De tal manera que la corriente en el circuito del rotor es alta y su factor de potencia será bajo.

• En *operación normal* el deslizamiento es pequeño por lo que:

$$\frac{R_2}{s} = \text{valor mayor que en el periodo de arranque}$$

por ejemplo, si el deslizamiento vale 3%,  $R_2/s$  valdrá 33.33 veces más que durante el periodo de arranque, de modo que el circuito del rotor se volverá notablemente resistivo y su factor de potencia será comparativamente más alto.

Se tiene el *par máximo* aproximadamente cuando el deslizamiento es tal que  $R_2/s$  tiene el mismo valor numérico que la impedancia:

$$\sqrt{R_1'^2} = \sqrt{(X_1 + X_2)^2}$$

lo cual sólo puede ocurrir a un deslizamiento elevado.

Por ejemplo, si el deslizamiento fuera del 16%,  $R_2/s$  valdría 6.25 veces más que en condiciones de rotor bloqueado, por lo que la corriente sería elevada y el factor de potencia bajo.

En condiciones de operación en vacío (sin carga), el deslizamiento sería menor, y por lo tanto,  $R_2/s$  tendría un valor muy alto, lo que permite considerar que el circuito del rotor está abierto y sólo circula corriente por el estator.

Como la reactancia  $X_1$  (del estator) +  $X_m$  (de magnetización) es mucho mayor que  $R$ , la corriente de marcha libre tendrá por necesidad un factor de potencia muy reducido.

### 2.7.2 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO

El circuito equivalente aproximado nos permite realizar el análisis del motor de inducción de forma menos complicada y en el cual las pérdidas en el hierro se representan con una resistencia colocada a la entrada del circuito y queda definida como:

$$R_M = \frac{V^2}{P_{Fe}} \quad \dots(2.42)$$

donde:

$P_{Fe}$  = Pérdidas en el hierro.

En este circuito todas las cantidades se expresan *en por unidad* (p.u.).

Se toma como punto de partida la potencia real nominal del motor expresada en watts y se definen las siguientes cantidades unitarias o base, para posteriormente referir todos los valores de las resistencias y reactancias a la impedancia de base de tal manera que queden todas expresadas *en por unidad*.

$$I_B = \frac{P_B}{3V_B} \quad \dots (2.43)$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} \quad \dots (2.44)$$

$$n_B = \frac{120f}{P} \quad \dots (2.2a)$$

$$T_B = K \frac{P_B}{n_B} \quad \dots (2.45)$$

donde:

$P_n$  = Potencia Base.

$V_n$  = Voltaje Base  $\Rightarrow V_n = \frac{V_{LIMIA}}{\sqrt{3}} \dots (2.46)$

$I_n$  = Corriente Base.

$Z_n$  = Impedancia Base.

$n_n$  = Velocidad Base  $\Rightarrow \begin{cases} f = \text{Frecuencia de Alimentación} \\ P = \text{Número de Polos} \end{cases}$

$T_n$  = Par Base  $\Rightarrow (K = \text{Constante})$

Apoyándonos en las fórmulas anteriores podemos determinar con mayor sencillez las condiciones bajo las cuales está operando el motor que se está analizando, obteniéndose los valores tanto de resistencias como de reactancias a partir de las siguientes pruebas:

- **Medición de la resistencia óhmica del devanado**
- **Prueba de vacío**
- **Prueba a rotor bloqueado**

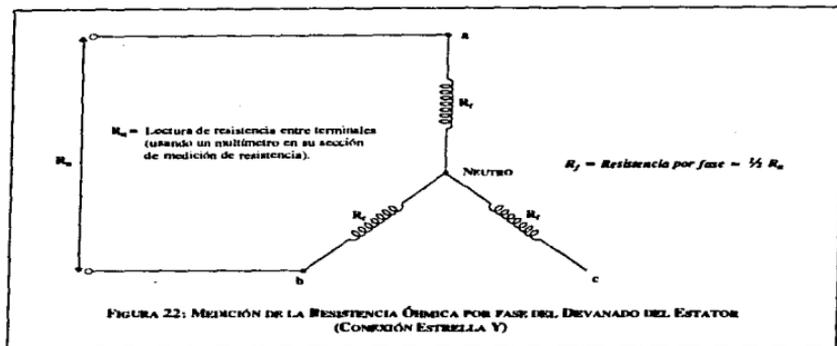
Los valores a utilizarse en el circuito equivalente para evaluar el comportamiento del motor en cualquier condición se obtienen de tres pruebas, como ya se mencionó en un párrafo anterior, son similares a las pruebas realizadas a un transformador, de tal modo que es análoga la forma de analizarlas. A continuación se enuncian las pruebas realizadas y la obtención detallada de los valores se presenta enseguida:

- 1) **Medición de la resistencia óhmica del devanado.**
- 2) **Medición de la corriente y la potencia en vacío, (Prueba en Vacío) (de preferencia a varios valores de voltaje, incluyendo obviamente el valor nominal).**
- 3) **Medición de la corriente y la potencia a rotor bloqueado, (Prueba a Rotor Bloqueado).**

#### **MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ÓHMICA DEL DEVANADO**

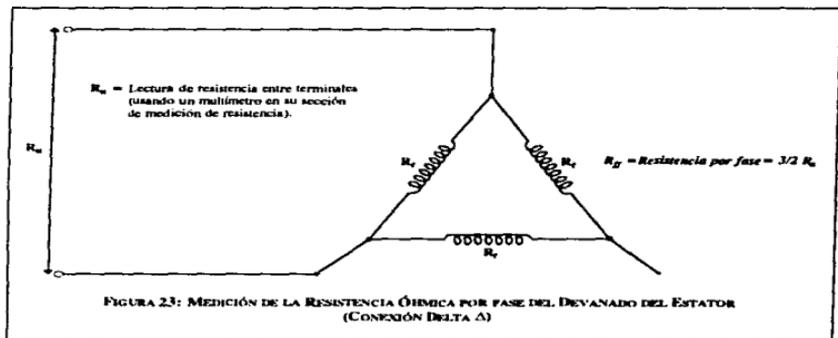
Por lo general sólo se tiene acceso a las terminales de conexión del motor ubicadas en la caja de bornes o terminales de conexión, por lo que se debe saber el tipo de conexión realizada con los devanados del estator, es decir, si se encuentra conectado en **estrella (Y)** o **delta (Δ)**.

Si la conexión es en **estrella (Y)**, la resistencia óhmica por fase será la mitad de la lectura entre terminales ( $R_{\phi}$ ), este hecho se muestra claramente en la figura 22:



Para tomar en consideración las posibles variaciones entre las tres fases, es conveniente medir la resistencia entre los tres pares de terminales y obtener el valor promedio de las tres mediciones.

Si la conexión es en *delta* ( $\Delta$ ), la medición entre terminales corresponderá a la de una fase en paralelo con las dos restantes, por lo que la resistencia por fase será en este caso 1.5 veces el valor obtenido en la medición ( $R_a$ ). Esto se aprecia mejor en el siguiente esquema (Fig. 23):



Es necesario también medir la temperatura ambiente a la cual debe haber estado expuesto el motor durante varias horas antes de la medición. Con este valor de temperatura es posible corregir el valor de resistencia a la temperatura de operación del motor.

### **MEDICIÓN DE LA CORRIENTE Y LA POTENCIA EN VACÍO (PRUEBA EN VACÍO)**

Si tomamos lecturas de **corriente** (en Amperes) y **potencia** (en Watts) a distintos valores de voltaje de alimentación, es posible trazar una gráfica de voltaje aplicado contra pérdidas. A partir de esta gráfica se puede determinar el valor de las pérdidas mecánicas, y una vez conocidas éstas, se pueden determinar mediante cálculos las pérdidas magnéticas (presentes en el hierro del núcleo de la máquina) por diferencia, esto es:

$$P_p = \text{PÉRD. MAGNÉTICAS} = \text{POTENCIA SIN CARGA} - \text{PÉRDIDAS MECÁNICAS} - \text{PÉRDIDAS ELÉCTRICAS EN EL ESTATOR}$$

Como las pérdidas magnéticas se suponen constantes, el valor de la resistencia que se usará para representarlas en el circuito equivalente es:

$$R_M = \frac{1}{P_{Fe}/P_B} \quad (\text{en por unidad, p.u.}) \quad \dots (2.47)$$

donde:

$R_M$  = Resistencia que representa las pérdidas en el hierro (pérdidas magnéticas en por unidad {p.u.}).

$P_{Fe}$  = Pérdidas en el hierro ó pérdidas magnéticas (en Watts).

$P_B$  = Potencia Base (en por unidad {p.u.}).

El valor que resulta de la división de la lectura de voltaje nominal entre la lectura de corriente sin carga corresponde de manera aproximada al valor de la reactancia en vacío, de la cual es posible deducir la reactancia de magnetización con sólo restarle la reactancia de dispersión del estator  $X_1$  cuando sea obtenido su valor:

$$X_{cv} = \frac{V}{I_{cv}} \quad \dots (2.48)$$

donde:

$V$  = Voltaje nominal (en Volts).

$I_{cv}$  = Corriente en vacío o sin carga (en Amperes).

$X_{cv}$  = Reactancia en vacío o sin carga (en Ohms).

$$X_M = X_{cv} - X_1 \quad \dots (2.49)$$

donde:

- $X_m$  = Reactancia de magnetización (en Ohms).  
 $X_1$  = Reactancia de dispersión del estator (en Ohms).

A continuación se muestra el diagrama del circuito equivalente aproximado (Fig. 24) para operación en vacío.

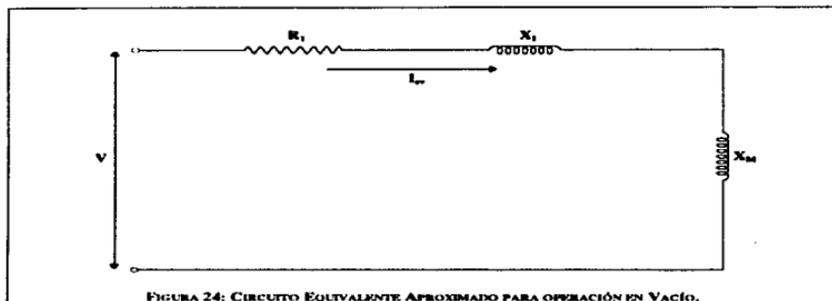


FIGURA 24: CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO PARA OPERACIÓN EN VACÍO.

#### MEDICIÓN DE LA CORRIENTE Y LA POTENCIA A ROTOR BLOQUEADO (PRUEBA A ROTOR BLOQUEADO)

Si se supone que  $X_m$  es mucho mayor que  $X_1 + X_2$ , es posible calcular el valor de la reactancia de dispersión conjunta del estator y el rotor a partir de las lecturas de watts y amperes a rotor bloqueado a partir de la ecuación (2.50):

$$X_1 + X_2 = \sqrt{\left(\frac{V}{I_{rb}}\right)^2 - \left(\frac{P_{rb}}{I_{rb}}\right)^2} \Leftarrow \text{Aplicable únicamente a la condición de rotor bloqueado...} \quad (2.50)$$

donde:

- $X_1$  = Reactancia de dispersión del estator (en Ohms).  
 $X_2$  = Reactancia de dispersión del rotor (en Ohms).  
 $V$  = Voltaje aplicado por fase (en Volts).  
 $P_{rb}$  = Potencia por fase a rotor bloqueado (en Watts).  
 $I_{rb}$  = Corriente por fase a rotor bloqueado (en Amperes).

Sin embargo, debido a la saturación magnética del hierro, el valor de  $X_1 + X_2$  calculado por medio de la fórmula anterior sólo sería aplicable a las condiciones de rotor bloqueado, y no podría utilizarse en el circuito para otro punto de la curva de operación.

A partir de las lecturas de corriente y potencia a rotor bloqueado también se puede calcular el valor de la resistencia del rotor  $R_2$ , por medio de la siguiente expresión:

$$R_2 = \frac{P_{rb}}{I_{rb}^2} - R_1 \quad \Leftarrow \text{Aplicable únicamente en la condición de arranque.} \quad \dots (2.51)$$

donde:

- $R_1$  = Resistencia del devanado del estator.
- $R_2$  = Resistencia del devanado del rotor.

El valor de  $R_2$  obtenido por medio de la fórmula anterior es válido únicamente para la condición de arranque, debido a las diferencias en la distribución de la corriente en las barras del rotor entre la condición de arranque y operación normal.

La norma IEEE 112 (de Estados Unidos) establece que la prueba a rotor bloqueado debe hacerse a frecuencia reducida, que no exceda del 25% del valor de frecuencia de línea y ajustando el voltaje a un valor tal que la corriente a rotor bloqueado sea igual a la obtenida a la frecuencia normal de la línea (60 Hz). Tomando en cuenta las consideraciones planteadas anteriormente se tienen las siguientes expresiones:

$$X_1 + X_2 = \sqrt{\left(\frac{V_{PRUEBA}}{I_{rb}}\right)^2 - \left(\frac{P_{rb}}{I_{rb}^2}\right)^2} \quad \Leftarrow \text{A frecuencia de línea (60 Hz).} \quad \dots (2.50a)$$

$$X_1 + X_2 = \frac{f_{LÍNEA}}{f_{PRUEBA}} \sqrt{\left(\frac{V_{PRUEBA}}{I_{rb}}\right)^2 - \left(\frac{P_{rb}}{I_{rb}^2}\right)^2} \quad \Leftarrow \text{A frecuencia reducida de prueba} \quad \dots (2.50b)$$

(25% de la frecuencia de línea como máximo).

donde:

- $f_{LÍNEA}$  = Frecuencia de línea (60 Hz).
- $f_{PRUEBA}$  = Frecuencia reducida de prueba (25% del valor de la frecuencia de línea como máximo).
- $V_{PRUEBA}$  = Voltaje de prueba (valor al cual la corriente de línea adquiere el mismo valor que a la frecuencia normal de línea).

Como es necesario efectuar una separación de la reactancia de dispersión en sus dos componentes tanto la reactancia del estator  $X_1$  como la reactancia del rotor  $X_2$  y en virtud de que esto no puede hacerse en forma experimental, se acostumbra dividir el valor  $X_1 + X_2$  conforme a las proporciones o relaciones contenidas en el código de prueba del IEEE para relaciones de reactancias de fuga o dispersión:

	CÓDIGO DE PRUEBA DEL IEEE PARA RELACIONES DE REACTANCIAS DE DISPERSIÓN					ROTOR DEVANADO
	ROTOR JAULA DE ARDILLA		ROTOR DEVANADO			
	CLASE DE DISEÑO					
	A	B	C	D	F	
$X_1 / X$	0.5	0.4	0.3	0.5	0.3	0.5
$X_2 / X$	0.5	0.6	0.7	0.5	0.7	0.5

TABLA 2: CÓDIGO DE PRUEBA PARA RELACIONES DE REACTANCIAS DE DISPERSIÓN.

donde:

$$X = X_1 + X_2$$

Un método que da como resultado datos muy congruentes con la realidad consiste en efectuar dos pruebas a rotor bloqueado, una a la frecuencia nominal de línea (60 Hz) y otra al 25% de la misma frecuencia, y utilizar los valores de  $X_1 + X_2$  y de  $R_1$  de la primera prueba para evaluar las condiciones de arranque, y los valores obtenidos de la segunda prueba para otros puntos de la curva de operación.

En ambas pruebas se deben tomar rápidamente las lecturas a fin de evitar sobrecalentar el devanado estático ya que se somete a una corriente muy intensa durante un lapso de tiempo mayor que en operación normal.

Existe otro método mediante el cual se puede analizar el circuito equivalente del motor de inducción, éste método es denominado **Diagrama Circular de Heyland** y se construye a partir de pruebas en vacío y a rotor bloqueado. Es un método práctico y nos permite, al igual que el método algebraico, la visualización del comportamiento del motor a cualquier punto de su curva de operación, el mismo se detalla en el capítulo 4.

### 2.8 CCM1 (CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN)

A continuación se presentan las líneas que conforman el programa «CCM1» que se incluye como parte complementaria a esta tesis. Este programa fue elaborado en **Lenguaje C (Turbo C® versión 2.0 de Borland™)** y calcula cualquier punto en la curva de operación de un motor de inducción (sea de jaula de ardilla o de rotor devanado) a partir de los valores en por unidad obtenidos del análisis de su circuito equivalente.

Se tiene acceso al programa tecleando la siguiente instrucción en el símbolo del sistema:

```
C:\CCM1 [ ]
[enter]
```

Una vez introducida esta instrucción, se muestra en pantalla la presentación del programa e inmediatamente se solicitan los parámetros del motor en cuestión.

## NOTA:

En caso de que el usuario no introdujera algún valor de deslizamiento (s), el programa por sí mismo introduce un valor (a partir de un cálculo) que corresponde a un punto cercano al de operación nominal del motor.

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
```

```
main()
```

```
{
float HP,P,V,F,s,RP,M,R2,X2,XM,A,B,C,D,X1,RJ,XZF,R2F,XT,RT,ZT,WM,
PW,IZW,LX,I1,I2,FAW;FW,T,TT,H,IL,INEA,PEN,TE,F,FP,PRASE,IRASE,TRASE;
clrscr();
gotoxy(22,2); printf("UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO");
gotoxy(21,4); printf("FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAMATLÁN");
gotoxy(27,6); printf("■■■■■■■■■■ COMI ■■■■■■■■");
gotoxy(18,8); printf("CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN");
gotoxy(26,9); printf("A PARTIR DEL CIRCUITO EQUIVALENTE");
gotoxy(29,10); printf("CONSENTES EN POR UNIDAD");
gotoxy(2,12); printf("Elaborado por: Albino Arteaga Escamilla.");
gotoxy(2,14); printf("Este programa es parte complementaria de la tesis profesional que para obtener");
gotoxy(2,15); printf("el título de Ingeniero Mecánico Electricista presenta un servidor.");
gotoxy(2,16); printf("Este programa le permite calcular cualquier punto de la curva de operación del");
gotoxy(2,17); printf("motor de inducción (es decir, a cualquier valor de deslizamiento a partir de su");
gotoxy(2,18); printf("circuito equivalente.");
gotoxy(1,20); printf
```

```
.....);
printf("DATOS DEL MOTOR:");
printf("n POTENCIAL NOMINAL(HP)= "); scanf("%f",&HP);
printf("NÚMERO DE POLOS= "); scanf("%f",&P);
printf("VOLTAJE POR FASE(V)= "); scanf("%f",&V);
printf("FRECUENCIA(Hz)= "); scanf("%f",&F);
printf("DESPLAZAMIENTO= "); scanf("%f",&s);
RP=M=120°/F;
/* CÁLCULO DE LAS CONSTANTES PRASE */
PRASE=746*HP;
IRASE=PRASE/(3*V);
TRASE=7.04*PRASE/RP;
printf("R2(p.u.)= "); scanf("%f",&R2);
/* SI NO SE LE DIO VALOR AL DESPLAZAMIENTO, EL PROGRAMA CALCULA UN VALOR */
if (s==0)
s=1.25*R2;
printf("X2(p.u.)= "); scanf("%f",&X2);
printf("XM(p.u.)= "); scanf("%f",&XM);
/* CÁLCULO DEL VALOR DE LAS VARIABLES INTERMEDIAS A,B,C Y D */
```

```

A=R2/S;
B=(A2+XM)/A;
C=B*A2+A;
D=B*XM+C;
printf("X1(p.u.)= "); scanf("%f",&X1);
printf("R1(p.u.)= "); scanf("%f",&R1);
X2F=C*XM/D;
R2F=pow(XM,2)/D;
XT=X1+X2F;
RT=R1+R2F;
ZT=pow(pow(RT,2)+pow(XT,2),0.5);
printf("RM(p.u.)= "); scanf("%f",&RM);
IW=(1/ZT)*(RT/ZT)+1/RM;
I2W=(1/ZT)*(RT/ZT);
IX=(1/ZT)*XI/ZT;
I=pow(pow(I2W,2)+pow(IX,2),0.5);
IC1=I*BASE;
I2=pow(pow(I2W,2)+pow(IX,2),0.5);
printf("PÉRDIDAS MECÁNICAS(WATTS)= "); scanf("%f",&FAW);
FW=FAW/BASE;
T=pow(12,2)*R2F-FW*pow((1-s),2);
TT=T/BASE;
H=(1-s)*T/H0;
QENT=IW*BASE;
EF=(1-s)*T/IW;
FP=IW/I;
clrscr();
gotoxy(27,2); printf("XXXXXXXXXXXXXXXXX COMI XXXXXXXXXXXXXXX");
gotoxy(2,4); printf("DATOS Y VALORES CALCULADOS.");
gotoxy(2,5); printf
(
.....
gotoxy(2,7); printf("POTENCIA NOMINAL(HP)= %1.4f;H0);
gotoxy(2,8); printf("NO. DE POLOS= %1.4f;P);
gotoxy(2,9); printf("VOLTAGE POR FASE(VOLTS)= %1.4f;V);
gotoxy(2,10); printf("DESLIZAMIENTO= %1.4f;s);
gotoxy(2,11); printf("CORRIENTE DE LINEA(AMPERES)= %f;IL1ME);
gotoxy(2,12); printf("PAR UNTAPIO= %f;T);
gotoxy(2,13); printf("PAR EN CUF-PIE= %f;TI);
gotoxy(2,14); printf("POTENCIA DE SALIDA(HP)= %f;H);
gotoxy(2,15); printf("POTENCIA DE ENTRADA(WATTS)= %f;QENT);
gotoxy(2,16); printf("EFICIENCIA= %f;EF);
gotoxy(2,17); printf("FACTOR DE POTENCIA= %f;FP);
gotoxy(2,19); printf
.....
)
getch();

```

}

El CCMI nos permite conocer datos del motor analizado como son:

- Corriente de línea.
- Par unitario.
- Par en lbf-pie.
- Potencia de salida (Hp).
- Potencia de entrada (W).
- Eficiencia (%).
- Factor de potencia.

Todos estos datos son proporcionados por el programa a cualquier valor de deslizamiento dentro de la curva de operación del motor.

A continuación se presenta un ejemplo de datos calculados por el programa en función de determinados datos de entrada:

Datos de entrada:

Potencia nominal: **10 Hp**  
 Número de polos: **4**  
 Voltaje por fase: **254.03 Volts**  
 Deslizamiento: **0.03**

■■■■■■■■■■ CCMI ■■■■■■■■■■

DATOS Y VALORES CALCULADOS:

.....  
 POTENCIA NOMINAL (HP)= 10  
 NO. DE POLOS= 4  
 VOLTAJE POR FASE (VOLTS)= 254.03  
 DESLIZAMIENTO= 0.03  
 CORRIENTE DE LÍNEA (AMPERES)= 12.47961  
 PAR UNITARIO= 1.034329  
 PAR EN LBF-PIE= 30.17849  
 POTENCIA DE SALIDA (HP)= 10.03299  
 POTENCIA DE ENTRADA (WATTS)= 8512.809  
 EFICIENCIA= 0.8792172  
 FACTOR DE POTENCIA= 0.8950883  
 .....

CAPÍTULO III



*"Características Electromagnéticas"*



### CARACTERÍSTICAS ELECTROMAGNÉTICAS

Es conveniente mencionar algunas de las leyes y características propias de los materiales electromagnéticos antes de llegar hasta las ecuaciones que definen la FEM inducida tanto en estator como en rotor de un motor de inducción.

La intensidad de campo magnético  $H$  se define como (Ec. 3.1):

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (\text{amperes-vuelta/metro}) \quad \dots (3.1)$$

donde:

$B$  = Densidad de flujo magnético.

$\mu$  = Permeabilidad del medio.

#### 3.1 ECUACIÓN DE LA FUERZA MAGNETOMOTRIZ (FMM)

La Ley de Ampere establece que: la circulación del campo magnético  $H$  (intensidad de campo magnético) a lo largo de un camino cerrado es igual a la suma de corrientes que atraviesan cualquier superficie  $S$  apoyada en el camino.

Si existen  $N$  número de espiras o vueltas llevando cada una la corriente  $I$ , la suma de corrientes será igual al producto  $NI$ , el cual se denomina *Fuerza Magnetomotriz (FMM,  $\mathcal{F}$ )* y cuyas unidades son los *amper-vueltas*.

Esta se expresa de la forma siguiente (Ec. 3.2):

$$\oint H \, dl = \int_0^{2\pi r} \frac{1}{2\pi r} \, dl = \sum I = N \cdot I = \mathcal{F} \quad \Leftarrow \text{FUERZA MAGNETOMOTRIZ (FMM)} \quad \dots (3.2)$$

La FMM es la causa de que se establezca un campo magnético en un circuito, de forma análoga al de la FEM que es la causa, en un circuito eléctrico, de que se establezca una corriente eléctrica.

En la práctica, la inducción magnética es prácticamente constante en la sección transversal de los núcleos ferromagnéticos. De tal manera que la densidad de flujo magnético  $B$  al ser constante y al penetrar un área  $A$  fija conocida, el flujo magnético ( $\Phi$ ) correspondiente se puede determinar mediante la siguiente expresión (Ec. 3.3):

$$\Phi = B \cdot A \quad \dots (3.3)$$

Si la longitud total de la trayectoria de una línea de flujo se representa por  $L$ , la FMM total relacionada con la línea de flujo es:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = \frac{B}{\mu} L \quad \dots (3.4)$$

sustituyendo la ecuación (3.3) en (3.4) tenemos:

$$\mathcal{F} = HL = \phi \left( \frac{L}{\mu \cdot A} \right) \quad (3.4a)$$

$\mathcal{F}$  es la fuerza magnetomotriz que crea el flujo  $\phi$ , el cual penetra la sección transversal de área  $A$ , sin embargo el flujo está limitado por la llamada *reluctancia* del circuito magnético, la cual se define como:

$$\mathcal{R} = \frac{L}{\mu \cdot A} \quad \dots (3.5)$$

y es en un circuito magnético, análoga a la resistencia en un circuito eléctrico que representa una oposición al flujo de la corriente a través del circuito.

Sustituyendo la ecuación (3.5) en (3.4a) tenemos:

$$\mathcal{F} = \phi \cdot \mathcal{R} \quad \Leftarrow \text{ECUACIÓN DE LA FMM (LEY DE HOPKINSON)} \quad \dots (3.6)$$

que es la ecuación fundamental para el estudio de los circuitos magnéticos llamada *Ley de Hopkinson*, también denominada *Ley de Ohm de los circuitos magnéticos* (por su analogía con  $V=I \cdot R$ ).

Es importante recalcar que la forma de tratamiento de las ecuaciones anteriores sólo es permitido mientras  $B$  y  $A$  son cantidades fijas.

### 3.2 CORRIENTE MAGNETIZANTE

Supongamos que tenemos un reactor con núcleo de hierro ideal (resistencia en la bobina, pérdidas en la bobina y en el hierro igual a cero, con curva de magnetización lineal) cuya bobina posee  $N$  vueltas o espiras y es alimentada con un voltaje senoidal  $v$ .

Al incrementarse  $v$  en su variación senoidal, da origen a la circulación de una *corriente magnetizante* senoidal  $i$  a través de las  $N$  vueltas de la bobina, lo que a su vez produce un flujo variable de manera senoidal (en fase con la corriente).

La caída de tensión  $e$  asociada a la circulación de corriente  $i$  a través de la bobina en términos de  $i$  se puede expresar de la siguiente forma:

$$v = e = L \frac{di}{dt} \quad \dots (3.7)$$

donde:

$L$  = Inductancia de la bobina.

Como la corriente de magnetización es senoidal se puede expresar de la siguiente manera:

$$i = \sqrt{2} I \text{ sen } \omega t \quad \dots (3.8) \quad \Leftarrow \text{CORRIENTE MAGNETIZANTE}$$

donde:

$I$  = Valor rms ó eficaz de la corriente, que multiplicado por  $\sqrt{2}$  nos proporciona el valor máximo de corriente ( $I_{\text{max}} = \sqrt{2} I_{\text{rms ó eficaz}}$ ).

$\omega$  = Frecuencia angular o pulsación de la señal senoidal ( $\omega = 2\pi f$ ).

Si sustituimos la ecuación (3.8) en (3.7):

$$\begin{aligned} v &= L \frac{d[\sqrt{2} I \text{ sen } \omega t]}{dt} \\ &= \sqrt{2} L \frac{d[I \text{ sen } \omega t]}{dt} \end{aligned}$$

aplicando la fórmula:

$$\frac{d[u \cdot v]}{dx} = u \cdot \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx}$$

donde:

$$u = I$$

$$v = \text{sen } \omega t$$

$$du = 0$$

$$dv = \cos \omega t \cdot \frac{d(\omega t)}{dt} = \cos \omega t \cdot \omega$$

$$= \sqrt{2} L [I \cdot (\cos \omega t \cdot \omega) + \text{sen } \omega t \cdot 0]$$

$$= \sqrt{2} L [\omega I \cos \omega t]$$

$$v = \sqrt{2} L \omega I \cos \omega t$$

$$v = e = \sqrt{2} L \omega I \text{ sen} \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \sqrt{2} L \omega I \text{ sen}(\omega t + 90^\circ)$$

El valor máximo de ésta expresión ocurre cuando  $\cos \omega t$  tiene el valor de la unidad:

$$E_{\text{máx}} = \sqrt{2} L \omega I = \sqrt{2} E \dots (3.9)$$

donde:

$E = L \omega I =$  Valor rms de la caída en la reactancia inductiva.

### 3.3 ECUACIONES DE TENSIÓN DE LOS DEVANADOS (FEM DEL ESTATOR Y FEM DEL ROTOR)

Supongamos que tenemos una bobina formada por  $N$  número de espiras o vueltas, la cual es alimentada con un voltaje de c.a. senoidal definido por la siguiente expresión:

$$v(t) = \sqrt{2} V \cos \omega t \dots (3.10)$$

donde:

$V =$  Valor rms ó eficaz del voltaje aplicado, que al multiplicarlo por  $\sqrt{2}$  nos proporciona el valor máximo de voltaje ( $V_{\text{máx}} = \sqrt{2} V_{\text{rms ó eficaz}}$ ).

$\omega =$  Frecuencia angular o pulsación de la señal senoidal ( $\omega = 2\pi f$ ).

Al incrementarse  $v(t)$  en su variación senoidal, da origen al flujo o circulación de una corriente magnetizante senoidal  $i$  a través de las  $N$  vueltas de la bobina, lo que a su vez provocará un flujo variante senoidal  $\phi$  (en fase con la corriente), en el núcleo.

Este flujo variable dará lugar a una FEM inducida en la bobina que se define de la siguiente manera:

$$v = N \frac{d\phi}{dt} \dots (3.11)$$

de donde despejando el flujo  $\phi$ :

$$d\phi = \frac{v}{N} dt$$

integramos en ambos lados:

$$\int d\phi = \int \frac{v}{N} dt$$

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int v dt$$

sustituimos en la integral el valor de  $v$  y resolvemos:

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int \sqrt{2} V \cos \omega t \, dt = \frac{1}{N} \frac{\sqrt{2} V}{\omega} \int \cos \omega t \, dt$$

$$\phi(t) = \frac{\sqrt{2} V}{N \omega} \sin \omega t$$

ésta ecuación puede escribirse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \phi_m \sin \omega t & \dots (3.12) \\ &= \phi_m \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \phi_m \cos (\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

donde:

$\phi_m$  = Flujo máximo.

pero:

$$\phi_m = \frac{\sqrt{2} V}{N \omega} \quad \dots (3.13)$$

teniendo en cuenta que  $\omega = 2\pi f$ , la expresión anterior puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\phi_m = \frac{\sqrt{2} V}{N 2\pi f} \quad \dots (3.13a)$$

despejando el voltaje  $V$  tenemos:

$$V = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N f \phi_m \quad \dots (3.14)$$

$$V = E = 4.44 N f \phi_m \quad [\text{Volts}] \quad \Leftarrow \text{ECUACIÓN DE LA FEM INDUCIDA} \quad \dots (3.15)$$

Para el caso de un motor de inducción, la ecuación de la **FEM inducida** en su **estator** ( $E_1$ ) es:

$$E_1 = 4.44 N_{1/fase} f \phi_{\max/polo} K_n \times 10^{-8} \quad [\text{Volts}] \quad \Leftarrow \text{FEM IND. EN ESTATOR (SIST. INGLÉS)} \quad \dots (3.16)$$

donde:

$N_{1/fase}$  = Espiras o vueltas por fase en estator.

$f$  = Frecuencia del sistema de alimentación ( $f = 60\text{Hz}$ ).

$\phi_{\max/polo}$  = Flujo máximo por polo (expresado en maxwells ó líneas).

$K_n$  = Factor de devanado determinado por el tipo de devanado del estator y su construcción ( $K_n = K_p \cdot K_d$ ).

ó también:

$$E_1 = 4.44 N_{1\text{fase}} f \phi_{\text{máx/polo}} K_B \text{ [Volts]} \quad \Leftarrow \text{FEM IND. EN ESTATOR (S.I.) ... (3.16a)}$$

donde:

$\phi_{\text{máx/polo}}$  = Flujo máximo por polo (expresado en webers), 1 weber =  $10^8$  maxwells ó líneas.

los demás elementos de la ecuación son iguales.

Y de forma similar la ecuación de la *FEM inducida* en su *rotor* ( $E_2$ ) es:

$$E_2 = 4.44 N_{1\text{fase}} f \phi_{\text{máx/polo}} K_B \times 10^8 \text{ [Volts]} \quad \Leftarrow \text{FEM IND. EN ROTOR (SIST. INGLÉS) ... (3.17)}$$

donde:

$N_{1\text{fase}}$  = Espiras o vueltas por fase en rotor.

$f$  = Frecuencia del sistema de alimentación ( $f=60\text{Hz}$ ).

$\phi_{\text{máx/polo}}$  = Flujo máximo por polo (expresado en maxwells ó líneas).

$K_B$  = Factor de devanado determinado por el tipo de devanado del rotor y su construcción ( $K_B = K_p \cdot K_d$ ).

ó también:

$$E_2 = 4.44 N_{1\text{fase}} f \phi_{\text{máx/polo}} K_B \text{ [Volts]} \quad \Leftarrow \text{FEM IND. EN ROTOR (S.I.) ... (3.17a)}$$

donde:

$\phi_{\text{máx/polo}}$  = Flujo máximo por polo (expresado en webers), 1 weber =  $10^8$  maxwells ó líneas.

los demás elementos de la ecuación son iguales.

CAPÍTULO IV



*“Determinación Analítica y Gráfica de las  
Características Electromagnéticas”*



#### 4.1 FACTOR DE POTENCIA

Es muy importante tomar en consideración el factor de potencia de un motor de inducción, en el momento de solicitar el servicio de suministro de energía eléctrica por parte de la Compañía de Luz y Fuerza o de la Comisión Federal de Electricidad, puesto que el tener un bajo factor de potencia comparado con el valor preestablecido por la compañía suministradora implica una sanción económica debido a las repercusiones que sobre el sistema de distribución este hecho conlleva.

En los circuitos de corriente directa la potencia se expresa de la siguiente forma (Ec. 4.1):

$$P = V \times I \quad \dots (4.1)$$

donde:

P = Potencia (Watts).

V = Tensión o voltaje (Volts).

I = Intensidad de Corriente (Amperes).

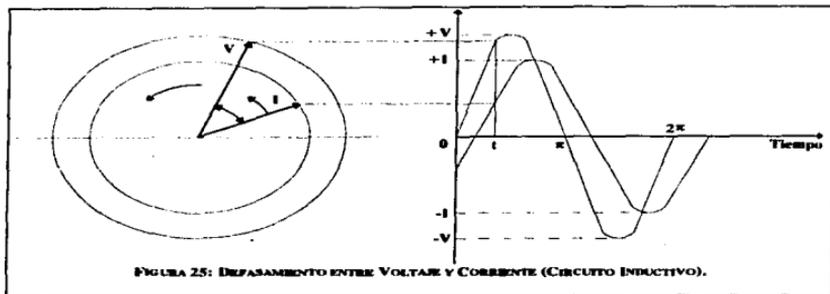
En los circuitos de corriente alterna, la potencia se ve afectada por un ángulo de defasamiento entre la señal de voltaje y la señal de corriente, esto es que en la mayoría de las cargas de potencia el voltaje y la corriente no están en fase y el producto de voltaje por corriente representa una potencia aparente, que multiplicada por un factor que depende directamente de la diferencia de fase y por ende del tipo de carga que se tenga, da como resultado la potencia real o activa absorbida o consumida por la carga.

Este factor es conocido como *factor de potencia* el cual queda determinado matemáticamente como el coseno del ángulo de defasamiento entre la señal de voltaje y la señal de corriente ( $\cos \theta$ ). Este ángulo puede estar en atraso, puede ser cero o estar en adelanto dependiendo esto del tipo de carga que se trate (inductiva, resistiva, capacitiva).

En un *circuito inductivo* la corriente tiene un defasamiento en *atraso* respecto al voltaje debido a la característica o propiedad de autoinducción que tienen las bobinas en un circuito, por ejemplo los transformadores, hornos de inducción, motores de inducción, etc.

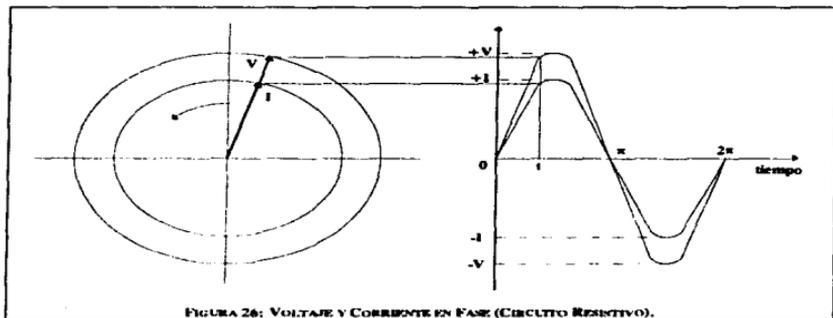
No es posible alcanzar un ángulo de defasamiento de  $90^\circ$ , puesto que no existe una inductancia perfecta.

En la figura 25 se representa el defasamiento entre voltaje y corriente que existe en un circuito inductivo:



En un *circuito resistivo* puro no existe defasamiento entre voltaje y corriente ( $\theta=0$ ), este circuito no es afectado por ningún coeficiente de autoinducción ni de capacitancia, lo cual es muy difícil ver en la práctica.

En la figura 26 se representan las señales de voltaje y corriente *en fase* existentes en un circuito resistivo puro.



En un **circuito capacitivo** la corriente está en **adelanto** con respecto al voltaje debido a la característica que tienen los capacitores o condensadores de provocar un defasamiento en adelanto de la corriente que los atraviesa con respecto al voltaje. Este defasamiento no puede nunca sobrepasar los  $90^\circ$  (lo cual se lograría con una capacitancia pura y muy grande).

A continuación se presenta la figura 27 que muestra el defasamiento que existe entre el voltaje y la corriente en un circuito capacitivo:

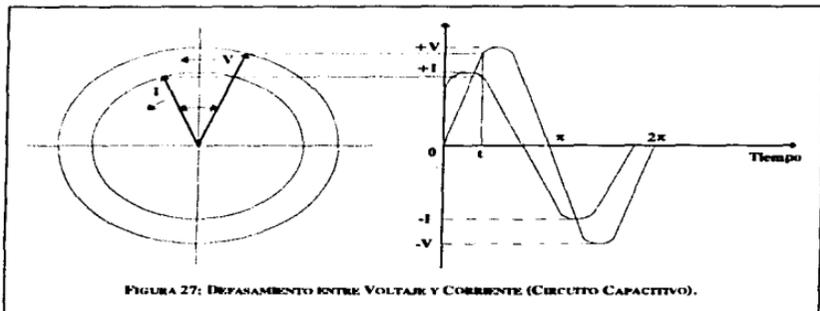


FIGURA 27: DEFASAMIENTO ENTRE VOLTAJE Y CORRIENTE (CIRCUITO CAPACITIVO).

La intensidad de corriente que circula por un circuito de corriente alterna puede ser considerada como la resultante de dos componentes, una de ellas en fase con el voltaje y la otra componente defasada  $90^\circ$ , como se muestra en la figura 28:

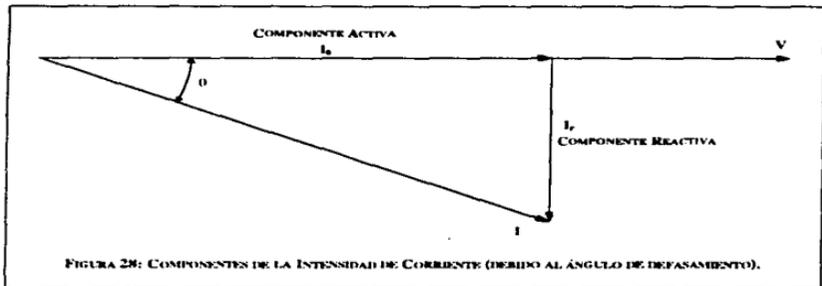


FIGURA 28: COMPONENTES DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE (DEBIDO AL ÁNGULO DE DEFASAMIENTO).

La componente en fase es llamada *componente activa*, porque al multiplicar su valor por el voltaje se obtiene la potencia real o activa del circuito, es decir que es la única corriente susceptible de ser transformada en energía mecánica (par o torque) en el caso de los motores y satisficará la ecuación siguiente:

$$T = K\phi I \quad \dots (4.2)$$

donde:

T = Par de salida.

$\phi$  = Flujo neto en el entrehierro (espacio de aire entre rotor y estator) como resultado de la corriente magnetizante.

I = Corriente activa.

K = Constante (depende de las características constructivas de la máquina en cuestión).

En corriente alterna trifásica, la *potencia real o activa* se expresa de la siguiente manera:

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \quad (\text{KW}) \quad \dots (4.3)$$

donde:

P = Potencia real o activa (KW).

V = Voltaje de línea (Volts).

I<sub>L</sub> = Corriente activa (Amperes).

Pero como se puede ver en la figura anterior (Fig. 28):

$$I_L = I \cos\theta$$

por lo tanto:

$$P = \sqrt{3}VI \cos\theta \quad (\text{KW}) \quad \dots (4.3a)$$

donde:

P = Potencia real o activa expresada en watts (KW).

V = Voltaje de la red (Volts).

I = Corriente total (Amperes).

La componente debida al defasamiento se llama *componente reactiva o magnetizante* y suministra una potencia necesaria para establecer el circuito magnético, pero no contribuye directamente a la potencia real del motor.

Esta componente reactiva de la corriente da lugar a la *potencia reactiva* y se expresa de la siguiente manera:

$$Q = \sqrt{3}VI \sin\theta \quad (\text{KVAR}) \quad \dots (4.4)$$

donde:

Q = Potencia reactiva expresada en volt-ampers reactivos (KVAR).

V = Voltaje de línea (Volts).

I = Corriente total (Amperes).

La **potencia aparente** se expresa de la siguiente manera:

$$S = \sqrt{3}VI \quad (\text{KVA}) \quad \dots (4.5)$$

donde:

S = Potencia aparente expresada en volt-amperes (KVA).

V = Voltaje de línea (Volts).

I = Corriente total (Amperes).

Si observamos la figura anterior nos damos cuenta que cuanto mayor es la magnitud del ángulo de defasamiento  $\theta$ , mayor es el valor de la componente reactiva y menor el de la componente activa de la corriente suministrada.

Desde luego, conviene que la potencia activa se acerque lo más posible a la potencia aparente absorbida por el motor, es decir que el  $\cos\theta$  del motor se aproxime todo lo posible a 1, lo que significa que el ángulo de defasamiento debe ser lo más reducido posible.

La relación entre potencias real, reactiva y aparente se representa mediante el triángulo de potencias mostrado en la figura 29, en donde se representa el ángulo de defasamiento  $\theta$  entre voltaje y corriente del circuito analizado.

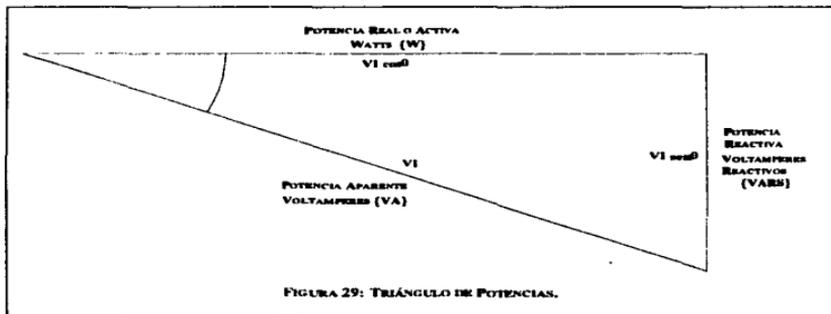


FIGURA 29: TRIÁNGULO DE POTENCIAS.

La base del triángulo representa la potencia real o activa (P), la altura la potencia reactiva (Q) y la hipotenusa la potencia aparente (S) de tal manera que se puede deducir la siguiente expresión:

$$S = \sqrt{(P)^2 + (Q)^2} \quad (\text{KVA}) \quad \dots (4.6)$$

Si se toma en cuenta que en la industria la mayoría de los motores utilizados son trifásicos, podemos utilizar la siguiente expresión (Ec. 4.7) para determinar el factor de potencia de los mismos:

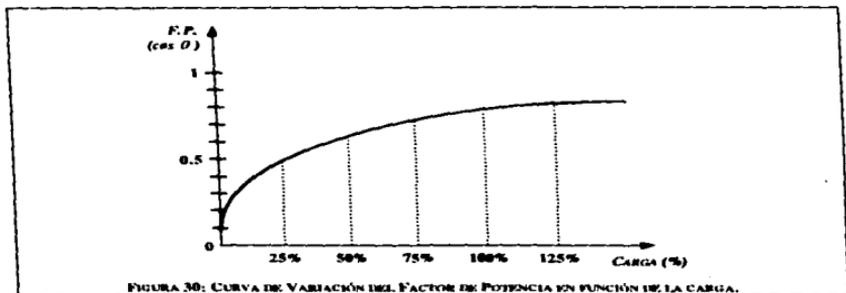
$$F.P. = \frac{P_{ENTRADA}}{\sqrt{3} V_{NOM} I_{NOM}} \dots (4.7)$$

donde:

- F.P. =  $\cos \theta$  = Factor de potencia.  
 $P_{ENTRADA}$  = Potencia que consume el motor (Watts).  
 $V_{NOM}$  = Voltaje nominal (Volts).  
 $I_{NOM}$  = Corriente nominal (Amperes).

#### 4.2 VARIACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN

El motivo principal por el que existe variación en el factor de potencia en los motores eléctricos y principalmente en los de inducción se debe fundamentalmente a la carga acoplada al motor que deberá mover durante el ciclo de trabajo. Esta variación se presenta en la siguiente gráfica:



A partir de la gráfica 30 podemos deducir que todos los motores de inducción deben ser operados a plena carga en la medida de lo posible, es decir que no deben ser utilizados en situaciones donde prevalezcan por tiempos prolongados condiciones de carga ligera (por debajo del valor nominal de carga) o de operación sin carga, así como también no deben operar a velocidades bajas.

La corriente consumida en vacío es en gran parte una corriente magnetizante, que está en atraso un ángulo grande con respecto al voltaje aplicado. De esta manera, un motor de inducción con una carga ligera acoplada posee un factor de potencia muy bajo. Debido al entrehierro, la reluctancia del circuito magnético es grande, lo que da por resultado un valor de la corriente magnetizante relativamente elevado con respecto a un transformador.

Al incrementar la carga, aumenta la demanda de corriente del motor hacia el sistema de alimentación, es decir que la componente activa de la corriente aumenta elevándose el factor de potencia. Sin embargo, debido al alto valor de la corriente magnetizante, que está presente independientemente de la carga, el factor de potencia de un motor de inducción, aún a plena carga muy raramente excede el 0.9 (o 90%).

En lugares como talleres de maquinado y plantas en donde trabajan la madera tienen factores de potencia bajos debido a que algunas máquinas efectúan cortes ligeros de acabado trabajando los motores de las mismas a valores de carga muy por debajo de su valor nominal. Estos lugares con frecuencia tienen factores de potencia totales del 0.5 (o 50%).

En algunos casos resulta práctico reemplazar algunos motores con determinada potencia por otro de capacidad inmediata menor. Estos últimos operarán dentro de los límites de temperatura y el factor de potencia se mejora. Es muy común el hecho de que en algunas industrias se exceda el tamaño y la capacidad de los motores, pero esto como hemos visto tiene sus repercusiones.

Las causas que originan que el factor de potencia sea bajo, son básicamente:

● **Carga insuficiente de los motores.**

Si un motor es cargado insuficientemente, la potencia real o activa que consume disminuye proporcionalmente a la carga. Al mismo tiempo, la potencia reactiva cambia menos. Por eso a menor carga del motor, a menor factor de potencia trabaja este. Los motores que trabajan en vacío tienen un factor de potencia de 0.1 a 0.3 (10% a 30%) dependiendo de su clase, potencia y velocidad de rotación.

● **Elección incorrecta del tipo de motor.**

Los motores de alta velocidad y gran potencia poseen mayor factor de potencia que los de baja velocidad y gran potencia. Los motores cerrados tienen factor de potencia más bajo que los abiertos. Los motores escogidos incorrectamente, según el tipo, potencia y velocidad, disminuyen el factor de potencia.

● **Aumento de la tensión en la red.**

En las horas de cargas pequeñas, la tensión de la red en la industria aumenta en varios volts. Esto lleva al incremento de la corriente de magnetización de los consumidores inductivos (de la componente reactiva de su corriente total), lo que a su vez provoca la disminución del factor de potencia de la empresa.

● **Reparación incorrecta de motores.**

A veces, debido a la selección incorrecta del alambre, durante el cambio del devanado de los motores, las ranuras de las máquinas resultan rellenas de una cantidad diferente de conductores que los que trafa de fábrica. Durante el funcionamiento de dicho motor, aumenta el flujo magnético de dispersión lo que conduce a la disminución del factor de potencia del motor. Si los cojinetes están demasiados desgastados, el rotor del motor al girar puede rozar el estator. En lugar de sustituir los cojinetes, el personal de mantenimiento en ocasiones recurre a un procedimiento incorrecto y perjudicial: el de someter el rotor a un nuevo torneado. El aumento del entrehierro entre el rotor y el estator origina el incremento de la corriente de magnetización y la disminución del factor de potencia del motor.

Para visualizar el efecto que tiene el bajo factor de potencia de un consumidor sobre el equipo de distribución analicemos el siguiente ejemplo:

Supongamos que en una planta industrial está instalado un transformador de 500 KVA, con una tensión en su secundario de 220/127 volts. La corriente que suministra este transformador en baja tensión será la siguiente:

$$I = \frac{\text{KVA}}{\sqrt{3} \times \text{KV}} = \frac{500 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 0.22} = 1312.16 \text{ Amp.}$$

$$I = 1312.16 \text{ Amp.}$$

Suponiendo que el transformador alimenta a una carga resistiva (aparatos eléctricos de calentamiento, lámparas incandescentes). En este caso, toda la potencia suministrada por el transformador es real o activa, de modo que el factor de potencia es unitario (1 o 100%).

La potencia real o activa del transformador será:

$$P = \sqrt{3} \times \text{KV} \times I \times \text{f.p.}$$

$$= \sqrt{3} \times 0.22 \times 1312.16 \times 1$$

$$P = 500 \text{ KW}$$

Si ahora al mismo transformador se le conecta una carga con factor de potencia igual a 0.8 (combinación de resistencia real o activa y reactancia inductiva, como es el caso de los devanados de un motor), la potencia real o activa que suministra el transformador para este caso es:

$$P = \sqrt{3} \times 0.22 \times 1312.16 \times 0.8$$

$$P = 400 \text{ KW}$$

La potencia real o activa del transformador no es suministrada en su totalidad, aunque la corriente anterior de 1312.16 Amp. pase por sus devanados calentándolos. No se puede aumentar la carga en el secundario del transformador por encima de ese valor, ya que esto es peligroso para los devanados del mismo.

De esta forma se observa que cuanto menor es el factor de potencia de los equipos consumidores, tanta menor potencia real o activa suministrará el transformador.

Si el factor de potencia del consumidor es bajo, ocasiona:

#### 1.- La necesidad de aumentar la potencia total o aparente de los transformadores.

Si la potencia de los motores de un taller es igual a 80 KW y el factor de potencia de la instalación del taller es igual a 0.8 (80%), la potencia del transformador para alimentar los motores será:

$$S = \frac{P}{\text{f.p.}} = \frac{80}{0.8} = 100 \text{ KVA}$$

Al disminuir el factor de potencia de la instalación hasta 0.6 (60%), con la misma potencia de los motores, la potencia necesaria del transformador será:

$$S = \frac{80}{0.6} = 133.33 \text{ KVA}$$

Si en el primer caso puede servir un transformador de 112.5 KVA para satisfacer la demanda, en el segundo es necesario emplear un transformador de mayor capacidad, es decir de 150 KVA.

## 2.- La reducción del rendimiento del transformador.

Un transformador que trabaja con una carga con f.p. pequeño, puede ser cargado suficientemente, en cuanto a la corriente, e insuficientemente, en lo que se refiere a la potencia real o activa.

## 3.- El incremento de las pérdidas de la potencia y de la tensión de los conductores y el aumento de la sección transversal de los mismos.

Observemos el siguiente ejemplo:

Si la potencia  $P=1 \text{ KW}$ , f.p.=0.9 y la tensión de 220 V.

A partir de la fórmula de la potencia de corriente alterna monofásica:

$$P = V \times I \times f.p.$$

Despejando I:

$$I = \frac{P}{V \times f.p.}$$

$$I = \frac{1000}{220 \times 0.9} = 5.05 \text{ Amp.}$$

Pero si el factor de potencia cambia a 0.6:

$$I = \frac{1000}{220 \times 0.6} = 7.575 \text{ Amp.}$$

De esta manera podemos darnos cuenta que, siendo invariables los valores de la potencia y de la tensión, la disminución del factor de potencia va acompañado del aumento de la corriente en los conductores, y por consiguiente por el incremento de las pérdidas por calentamiento (efecto Joule  $P R$ ). Para evitar el calentamiento peligroso al aumentar la corriente, es necesario hacer más grande la sección del conductor. Además, el incremento de la corriente en los conductores, cuando su sección es invariable, trae como consecuencia el aumento de la caída de tensión en estos.

El Artículo 64 del Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica establece lo siguiente:

Art. 64: Para los suministros en que intervenga el factor de potencia, el usuario conservará éste en la operación de sus instalaciones entre 90 centésimos de atrasado y 1, de acuerdo con las disposiciones que expida la Secretaría. El usuario no podrá regresar energía activa o reactiva a las líneas del suministrador, excepto cuando celebre convenio al respecto con el mismo. La contravención a estas disposiciones hará procedente la aplicación de las penalizaciones que prevengan las disposiciones tarifarias, sin perjuicio de las sanciones que correspondan en los términos de la ley y de este reglamento por variar las condiciones del suministro.

Por la importancia que esto representa, a continuación se transcribe el inciso 4 de las disposiciones complementarias de las tarifas generales en vigor, publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 10 de noviembre de 1991.

Con la finalidad de mejorar la eficiencia del suministro eléctrico se modifica la disposición complementaria de tarifas relativas al factor de potencia, elevando el valor mínimo sin penalización de 85% actual a 90% e introduciendo bonificaciones porcentuales para factores iguales o superiores a 90%.

El usuario procurará mantener un factor de potencia (f.p.) tan aproximado a 100% (cien por ciento) como le sea posible, pero en el caso de que su factor de potencia durante cualquier periodo de facturación tenga un promedio menor de 90% atrasado, determinado por métodos aprobados por la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI), el suministrador tendrá derecho a cobrar al usuario la cantidad que resulte de aplicar al monto de la facturación el porcentaje de recargo que se determine según la fórmula que se señala. En el caso de que el factor tenga un valor igual al superior de 90%, el suministrador tendrá la obligación de bonificar al usuario la cantidad que resulte de aplicar a la factura el porcentaje de bonificación según la fórmula que también se señala:

**FÓRMULA DE RECARGO:  
(F.P. MENOR QUE 90%)**

$$\% R = \frac{3}{5} \times \left[ \left( \frac{90}{f.p.} \right) - 1 \right] \times 100 \quad \dots (4.8)$$

**FÓRMULA DE BONIFICACIÓN:  
(F.P. MAYOR O IGUAL QUE 90%)**

$$\% B = \frac{1}{4} \times \left[ 1 - \left( \frac{90}{f.p.} \right) \right] \times 100 \quad \dots (4.9)$$

donde:

- %R = Porcentaje de recargo.
- %B = Porcentaje de bonificación.
- f.p. = Factor de potencia del consumidor.

Los valores resultantes de la aplicación de estas fórmulas se redondearán a un sólo decimal, por defecto o por exceso, según sea menor o no, menor que 5 el segundo decimal. En ningún caso se aplicarán porcentajes de bonificación superiores a 120%, ni porcentajes de bonificación superiores a 2.5%.

A los usuarios con un factor de potencia entre 85% y 90% se les concede un plazo de 6 meses para adecuar sus instalaciones sin que se les apliquen los recargos a que se refiere el resolutive décimo segundo de este acuerdo. Así mismo, para los usuarios con un factor de potencia inferior a un 85%, los recargos a que se refiere dicho resolutive, surtirán efecto a partir del séptimo mes, en tanto se les aplicará el procedimiento vigente hasta la fecha de entrada en vigor del presente acuerdo.

Con estas disposiciones los usuarios se ven obligados a realizar los cambios y correcciones necesarias para sus instalaciones eléctricas, y de esta manera se pueda corregir y mejorar el factor de potencia, trayendo como consecuencia una mejor eficiencia de la instalación además de evitar los pagos resultantes de cargos por bajo factor de potencia.

El mejorar el factor de potencia para una carga dada, implica la reducción de la componente de corriente reactiva (KVAR). Esta componente de fuerza reactiva atrasa la componente de fuerza (KW de entrada) 90° eléctricos, y el modo de reducir el efecto de dicha componente es introducir una componente de fuerza capacitiva que adelanta la componente de fuerza 90° eléctricos. Esto último puede realizarse con el uso de un capacitor de fuerza.

Hay varios métodos que se emplean para corregir el factor de potencia. A continuación los señalaremos, analizando con cierto detenimiento los dos últimos que son los más empleados en la industria.

1. *- Selección correcta del tipo, potencia y velocidad de los motores que se instalan.*
2. *- Aumento de la carga de los motores (de tal manera que trabajen a su valor nominal de carga o lo más próximo al mismo).*
3. *- Evitar el trabajo prolongado en vacío de los motores.*
4. *- Reparación correcta y de alta calidad de los motores.*
5. *- Empleo de capacitores estáticos.*
6. *- Empleo de capacitor síncrono o motor síncrono con carga acoplada.*

#### **Capacitores Estáticos:**

El método más conocido para mejorar o corregir el factor de potencia en sistemas de distribución de bajo voltaje es el uso de capacitores de fuerza para suministrar el adelanto requerido de la fuerza reactiva.

Los capacitores reducen el costo de la energía, liberan capacidad sistema, elevan niveles de tensión, reducen las pérdidas en los sistemas de distribución, y en el caso de conexión en serie o en condiciones de control automático, mejoran la regulación de la tensión. En muchos casos son la única solución práctica y económica a problemas de distribución, por lo general resultan ser la forma más económica para mejorar el factor de potencia en instalaciones industriales donde este problema no llega a ser sumamente grave.

Un capacitor es considerado como un generador de KVAR porque proporciona las necesidades magnetizantes en KVAR de los equipos de inducción. Cuando un capacitor y un dispositivo de inducción son instalados en el mismo circuito, habrá un intercambio de corrientes magnetizantes entre ellos, es decir, la corriente adelantada por el capacitor neutraliza la corriente atrasada tomada por el dispositivo de inducción.

La determinación del empleo de capacitores estáticos, capacitor síncrono o motor síncrono se da a partir de un estudio previo y una evaluación de la gravedad del problema. También hay que considerar el costo y tiempo de instalación del capacitor o capacitores. Puede llegar a darse el caso en que resulte más económico usar motores o capacitores síncronos, pero esto es práctico solamente cuando se agregue un motor nuevo y de tamaño considerable a la planta.

**Ventajas:** Entre otras, son bajo costo por KVAR, facilidad de instalación, no requieren vigilancia ni mantenimiento, debido a que son herméticos, perfectamente bien protegidos contra corrosión, pueden ser instalados en cualquier atmósfera, están diseñados para trabajar con sobretensiones de hasta 100%, soportan cambios bruscos de temperatura y su control es sencillo, en su aplicación normal.

**Desventaja:** Una de ellas es que no son reparables, si por alguna causa llegara a fallar una unidad, esta falla lleva a la destrucción total del aparato.

Para mejorar el factor de potencia los capacitores estáticos se conectan entre fases (de fase a fase), o de fase a tierra, pero en paralelo con la línea (de ahí que se les denomine *shunt capacitors*).

Cuando la corriente que produce los KVAR, en un circuito, se reduce (por efecto de la conexión de los capacitores estáticos), la corriente total también se reduce. Si la corriente activa no cambia, como es usual, el factor de potencia mejorará tanto como la corriente magnetizante es reducida.

Los capacitores para la corrección del factor de potencia deben ser colocados eléctricamente lo más cercanos posible a las cargas de bajo factor de potencia. En algunos casos, los capacitores pueden ser localizados en un cable de alimentación. En otros casos, cuando se trata de motores de gran potencia, los capacitores pueden ser conectados lo más próximo posible a las terminales del motor.

La cantidad de KVAR requerida de los capacitores depende del valor del factor de potencia bajo a corregir y del valor deseado del factor de potencia corregido.

Un capacitor es considerado como un generador de KVAR porque proporciona las necesidades magnetizantes en KVAR de los equipos de inducción. Cuando un capacitor y un dispositivo de inducción son instalados en el mismo circuito, habrá un intercambio de corrientes magnetizantes entre ellos, es decir, la corriente adelantada por el capacitor neutraliza la corriente atrasada tomada por el dispositivo de inducción.

### **Capacitor Síncrono y Motor Síncrono**

Otro método de corrección del factor de potencia de un sistema y más frecuentemente en grandes sistemas es el empleo del *motor síncrono* para el manejo de bajas velocidades de carga en operación continua. Una aplicación típica del motor síncrono se da en el accionamiento de compresores de aire de baja velocidad para abastecer el sistema de aire comprimido de una planta.

Los motores síncronos son ajustados (mediante la variación en la magnitud de la excitación de corriente directa a su rotor) para operar con un factor de potencia adelantado (en la región de sobreexcitación de la curva  $-V$ ) y de esta forma proporcionar potencia reactiva capacitiva (KVAR en adelante) compensando el atraso que provocan las cargas de tipo inductivo como motores de inducción al absorber potencia reactiva inductiva del sistema (KVAR en atraso) para poder funcionar.

Los motores síncronos son diseñados generalmente para operar con un factor de potencia del 80% (0.8 capacitivo) en adelanto.

Cuando los motores síncronos se diseñan para operar sin carga mecánica (es decir que se les elimina la saliente de la flecha para el acoplamiento de carga) y cerca de una factor de potencia igual a 100% (1.0) se les conoce con el nombre de *capacitor síncrono* ó *condensador síncrono*.

Una línea de transmisión larga es como un condensador alargado (posee un efecto capacitivo), ya que tiene conductores separados por un espacio de aire.

Bajo cargas muy ligeras el flujo de corriente de carga entre los conductores puede causar que el voltaje en la terminal receptora se eleve arriba del voltaje de entrada lo suficiente como para dañar los aparatos eléctricos conectados.

El capacitor síncrono puede entonces ser operado a baja excitación (en la región de subexcitación de la curva "V") para que funcione como un reactor rotatorio.

En algunos casos la excitación es controlada por un regulador de voltaje que determina si el capacitor síncrono opera en adelanto para corregir los efectos de la carga inductiva en el sistema, o en atraso para compensar el efecto de corrientes cargadas en ligeras cargas.

**Ventajas:** Permite hacer variaciones del factor de potencia (en función de la excitación de c.d. a su rotor) dentro de un rango para que funcione como reactor síncrono o como capacitor síncrono, de acuerdo a las necesidades de la planta. En el caso del motor síncrono, puede realizar la corrección del factor de potencia a la vez que realiza algún proceso que requiera de una velocidad constante al acoplarsele carga. Es de gran ayuda en casos graves de bajo factor de potencia y es la alternativa más apropiada para solucionar problemas de f.p. en grandes sistemas.

**Desventajas:** Al ser una máquina de doble alimentación (C.A. a su estator y C.D. a su rotor) necesita de una instalación especial requiriéndose del uso de un grupo rectificador (convertidor de C.A./C.D.) en el caso de que carezca de una excitatriz (que por ende repercutirá en el costo de la máquina) además de equipo de control para la variación de la excitación. Al requerir de escobillas para la alimentación de C.D. al rotor, ésta máquina necesita de mantenimiento constante y reemplazo de escobillas cada que sea requerido. El costo de ésta máquina es elevado comparativamente con el costo de un banco de capacitores, por lo que es aplicable en aquellos casos donde el problema de bajo factor de potencia es grave que un banco de capacitores resulta ser poco conveniente y donde la envergadura del sistema además de la cantidad de cargas inductivas tales como hornos y motores de inducción justifiquen el empleo de ésta máquina.

#### ***Determinación del factor de potencia del sistema (a corregir)***

El factor de potencia y los KVAR del sistema (que se desea corregir), se pueden determinar mediante la medición de la corriente y el voltaje de línea y el factor de potencia (este último con ayuda de un medidor de factor de potencia) en el punto de corrección.

Para un sistema trifásico se tiene lo siguiente:

$$KVA_{ENTRADA} = \frac{\sqrt{3} \times \text{Volts} \times \text{Amperes}}{1,000} \quad \dots (4.5a)$$

$$KW = KVA \times F.P. \quad \dots (4.3b)$$

donde:

F.P. = Factor de potencia real

$$KVAR = \sqrt{(KVA)^2 - (KW)^2} \quad \dots (4.10)$$

#### **Determinación de los KVAR requeridos para un F.P. deseado**

Los KVAR requeridos para elevar el factor de potencia hasta el punto deseado pueden ser calculados de la siguiente forma:

$$KVAR_{CAPACITIVOS} = KVAR_{CARGA} - \sqrt{\frac{1 - F.P.^2}{F.P.^2} (KW_{CARGA})^2} \quad \dots (4.11)$$

donde:

F.P. = Factor de potencia deseado

Con el objeto de visualizar con mayor claridad los pasos a seguir en la solución del problema de bajo factor de potencia, a continuación se muestra un ejemplo de corrección de f.p.

#### **Ejemplo:**

Consideramos una carga de 1,000 KW con un F.P. = 58% (0.58) que se desea corregir a un F.P. = 90% (0.9)

$$KVAR_{CARGA} = \sqrt{\left(\frac{1,000 \text{ KW}}{0.58}\right)^2 - (1,000 \text{ KW})^2}$$

$$KVAR_{CARGA} = 1,404.511 \text{ KVAR}$$

entonces:

$$KVAR_{CAPACITIVOS} = 1,404.511 \text{ KVAR} - \sqrt{\frac{1 - (0.9)^2}{(0.9)^2} \times (1,000 \text{ KW})^2}$$

$$KVAR_{CAPACITIVOS} = 920.188 \text{ KVAR}$$

De ésta forma determinamos que para corregir el F.P. de nuestro circuito a 0.9 requerimos un banco de capacitores que nos proporcione 920.188 KVAR.

Como una forma práctica y rápida de simplificar los cálculos para la fabricación de los capacitores de fuerza se han desarrollado tablas como la que se muestra a continuación.

FACTOR DE POTENCIA EXISTENTE	FACTOR DE POTENCIA CORREGIDO				
	100%	95%	90%	85%	80%
0.5 = 50 %	1.732	1.403	1.247	1.112	0.892
0.52 = 52 %	1.643	1.314	1.158	1.023	0.893
0.54 = 54 %	1.558	1.229	1.073	0.983	0.808
0.56 = 56 %	1.479	1.150	0.994	0.859	0.799
0.58 = 58 %	1.404	1.075	0.919	0.784	0.654
0.60 = 60 %	1.333	1.004	0.848	0.713	0.583
0.62 = 62 %	1.265	0.936	0.780	0.645	0.515
0.64 = 64 %	1.201	0.872	0.716	0.581	0.451
0.66 = 66 %	1.139	0.810	0.654	0.519	0.389
0.68 = 68 %	1.078	0.749	0.593	0.458	0.328
0.70 = 70 %	1.020	0.691	0.535	0.400	0.270
0.72 = 72 %	0.964	0.635	0.479	0.344	0.214
0.74 = 74 %	0.909	0.580	0.424	0.289	0.195
0.76 = 76 %	0.855	0.526	0.370	0.235	0.105
0.78 = 78 %	0.802	0.473	0.317	0.182	0.052
0.80 = 80 %	0.750	0.412	0.265	0.130	-
0.82 = 82 %	0.698	0.369	0.213	0.078	-
0.84 = 84 %	0.646	0.317	0.161	-	-
0.86 = 86 %	0.594	0.265	0.109	-	-
0.88 = 88 %	0.540	0.211	0.055	-	-
0.90 = 90 %	0.485	0.156	-	-	-

TABLA 3: FACTORES DE CORRECCIÓN PARA FACTOR DE POTENCIA.

Los valores de esta tabla se multiplican por los KW<sub>CARGA</sub> (potencia real de carga) para determinar los KVAR<sub>CAPACITIVOS</sub> (potencia reactiva capacitiva necesaria para corregir el f.p.) y de este forma obtener el factor de potencia corregido deseado.

Para la aplicación de capacitores en la corrección del factor de potencia de motores de inducción, NEMA recomienda un procedimiento basado en los datos de placa del motor eléctrico. Este procedimiento se describe a continuación:

- 1.- El factor de potencia a plena carga en forma aproximada puede ser calculado de los datos de placa de la forma siguiente:

$$F.P. = \frac{431 \times HP}{V \times I \times \eta} \quad \dots (4.12)$$

donde:

F.P. = Factor de potencia a plena carga por unidad.  
 HP = Caballos de potencia nominales.

- V = Voltaje nominal.  
 I = Corriente nominal.  
 $\eta$  = Eficiencia a plena carga por unidad.

- 2.- Por razones de seguridad, generalmente es mejor considerar el factor de potencia para varias cargas como una parte del sistema de distribución de la planta. En esos casos donde los requerimientos locales y otras circunstancias requieren mejorar el factor de potencia de un solo motor, el rango de KVAR del capacitor empleado para mejorar el factor de potencia puede calcularse de la siguiente manera:

$$KVAR = \frac{0.746 \times HP}{\eta} \times \frac{\sqrt{1 - F.P.^2}}{F.P.} \times \frac{\sqrt{1 - F.P. \cdot i^2}}{F.P. \cdot i} \quad \dots (4.13)$$

donde:

- KVAR = Rango del capacitor para mejorar el factor de potencia trifásico.  
 F.P.  $\cdot$  i = Factor de potencia corregido por unidad por la combinación motor-capacitor.

- 3.- En algunos casos, tal vez sea conveniente determinar la resultante del factor de potencia corregido (F.P.i), cuando se tenga que seleccionar el capacitor para corregir el factor de potencia, dentro de un valor máximo especificado por el fabricante del motor. La resultante del factor de potencia corregido puede ser calculado como sigue:

$$F.P. \cdot i = \frac{1}{\sqrt{\left\{ \frac{\sqrt{1 - F.P.^2}}{F.P.} - \left[ \frac{(KVAR \times \eta)}{0.746 \times HP} \right]^2 \right\} + 1}} \quad \dots (4.14)$$

**NOTA:** En ningún caso se aplicarán capacitores para la corrección del factor de potencia que excedan el rango límite especificado por el fabricante del motor.

Una mejora considerable provocará una sobreexcitación de lo cual resultará un voltaje transitorio elevado, corrientes y pares que pueden incrementar los riesgos para el personal y causar posibles daños al motor o al equipo de control.

Para mayor información sobre las consideraciones de seguridad que deberán observarse al utilizar capacitores para la corrección del factor de potencia, consultar las normas NEMA MG 2 (Safety Standard for Construction and Guide for Selection, Installation and Use of "Electric Motors and Generators").

También se puede consultar el "Power Factor Corrections Motor Circuit" según el Artículo 460 del National Electrical Code (NEC).

Las características de la carga del motor se deben considerar para corregir el factor de potencia. Si la carga del motor es cíclica que varía de una carga nominal plena a una carga ligera, el valor de los KVAR<sub>CAPACITIVOS</sub> de corrección no será el que resulte de considerar el factor de potencia a ligeras cargas.

Para evitar esta posibilidad, se recomienda que el valor máximo de los KVAR de corrección añadidos debe ser menor que los KVAR del motor en vacío aproximadamente un 10%.

De este modo se tiene:

El valor máximo de KVAR del capacitor para motores trifásicos es igual a:

$$KVAR = \frac{\sqrt{3} \times V \times I_{NL} \times 0.09}{1.000} \dots (4.15)$$

donde:

V = Voltaje de línea del motor.

$I_{NL}$  = Corriente de línea del motor operando en vacío.

Los capacitores para corregir el factor de potencia se deben conectar lo más próximo posible a las cargas con bajo factor de potencia y esto queda determinado por la naturaleza y diversidad de la carga.

Los puntos más estratégicos para la instalación de capacitores dentro de una instalación son los siguientes:

- 1) En las terminales del motor.
- 2) En las terminales principales de un banco de motores.
- 3) En el centro de distribución o en la ramificación del mecanismo de alimentación.

Razones por las cuales se debe corregir o elevar el factor de potencia:

- Un bajo factor de potencia ocasiona una pobre eficiencia del sistema.
- Con un bajo factor de potencia o una componente de KVAR elevada se generan pérdidas adicionales a través de todo el sistema.

Cuando el factor de potencia en el sistema es bajo se aplican multas o cargos por parte de la compañía suministradora a las empresas en sus tarifas de consumo de energía.

Cuando el factor de potencia es mejorado o corregido se obtienen los siguientes beneficios:

- 1) Reduce la carga en transformadores y equipo de distribución.
- 2) Reduce las pérdidas por calentamiento o efecto Joule ( $I^2R$ ) en transformadores, cables de distribución y otros equipos, resultando un ahorro directo de los kWh de consumo.
- 3) Ayuda a estabilizar el voltaje del sistema.

Como se puede ver es de gran importancia el tener un buen factor de potencia que se encuentre por encima del mínimo establecido (dentro del rango) por la compañía suministradora con el fin de evitarse problemas de tipo económico debido a multas o en el caso más grave el daño severo a otros equipos delicados conectados a nuestro sistema.

## 4.3 DIAGRAMA CIRCULAR DE HEYLAND

El *Diagrama Circular de Heyland* surge a partir de que los investigadores descubrieron que para cualquier valor de carga y cualquier velocidad, la corriente está localizada, como diagrama, en el arco de un círculo referido al voltaje aplicado. Partiendo de éste hecho, se establece el diagrama circular como una forma gráfica mediante la cual se puede visualizar el comportamiento completo de un motor a partir de los siguientes datos:

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

El procedimiento de construcción se explica a continuación:

Debido a que el diagrama resulta ser más alto que ancho, se acostumbra girarlo 90° a la izquierda.

1. Inicialmente se trazan los ejes de referencia, sobre el eje vertical se dibuja el fasor que representa el voltaje de fase  $V_f$ .

2. Trazo de la corriente de arranque.

A partir de la prueba a rotor bloqueado obtenemos los siguientes elementos:

- Magnitud de la corriente de fase de arranque, que se obtiene a partir de la extrapolación de la corriente de fase en la prueba, al valor correspondiente al voltaje nominal.
- Ángulo de fase, que se deduce a partir del factor de potencia de la prueba, a partir de la potencia real y la potencia aparente por fase.

$$\theta_a = \cos^{-1} \frac{P_a}{S_a} \quad \dots (4.16)$$

Con la ayuda de un transportador, se mide el ángulo  $\theta_a$  tomando como base de apoyo del transportador el eje vertical (donde se encuentra dibujado el fasor que representa al voltaje  $V_f$ ). En esta posición se dibuja el fasor que representa la corriente de arranque  $I_a$ , procurando que ocupe todo el espacio disponible para el diagrama. En la figura siguiente se identifica este fasor como el segmento  $OA$ .

3. Cálculo de la escala de corrientes: La escala se define como el cociente entre la magnitud real y la magnitud dibujada.

La magnitud real es la corriente de arranque por fase, extrapolada y la magnitud dibujada es el segmento  $OA$ .

$$\text{Escala de corrientes:} \quad \delta_A = \frac{I_a}{OA} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}} \quad \dots (4.17)$$

## 4. Trazo de la corriente en vacío.

A partir de la prueba en vacío obtenemos los siguientes elementos:

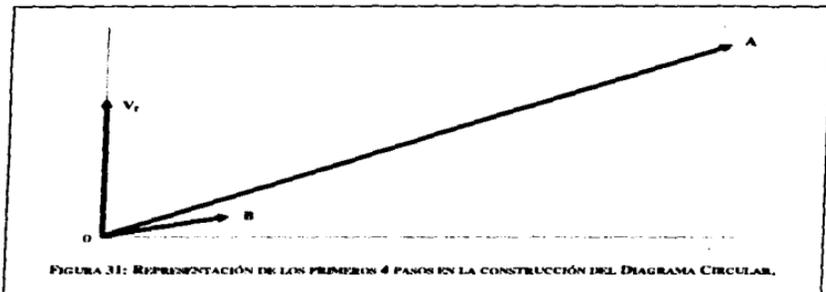
- Magnitud de la corriente en vacío, aplicando el voltaje nominal.
- Ángulo de fase, que se deduce a partir del factor de potencia de la prueba en vacío.

$$\theta_v = \cos^{-1} \frac{P}{S_v} \quad \dots (4.16a)$$

Con la ayuda de un transportador, se mide el ángulo  $\theta_v$  tomando como base de apoyo del transportador el eje vertical (donde se encuentra dibujado el fasor que representa al voltaje  $V_v$ ). En esta posición se indica el fasor  $OB$  que representa la corriente de arranque. Su tamaño se calcula con ayuda de la escala de corrientes (Ec. 4.17).

$$OB = \frac{I_n \left[ \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}} \right]}{\delta_A \left[ \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}} \right]} \quad \dots (4.18)$$

Hasta esta parte del procedimiento, el dibujo se aprecia en la figura 31:



5. Trazo del arco de circunferencia: Por el extremo terminal del fasor  $OB$  se traza una línea horizontal. Posteriormente se traza la línea  $AB$  (del extremo  $A$  al extremo  $B$ ) y se determina su mediatriz (línea perpendicular que pasa por su punto central). El punto en el que la mediatriz cruza con la línea horizontal (trazada al inicio de esta parte del procedimiento) es el punto  $C$ , que es el centro del arco de circunferencia.

Con un compás apoyado en el punto  $C$ , se traza un arco de circunferencia que una los puntos  $A$  y  $B$ .

Hasta este punto, el dibujo se aprecia de la siguiente forma (Fig. 32):

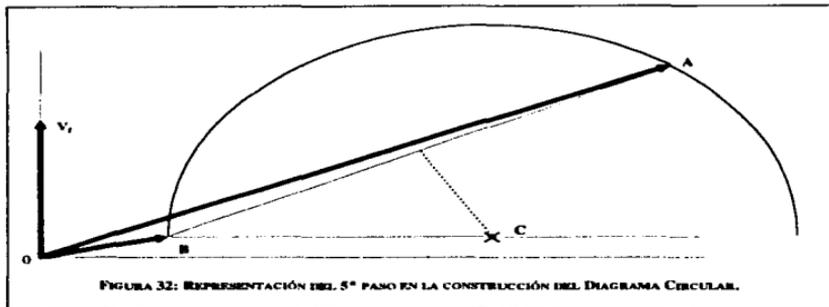


FIGURA 32: REPRESENTACIÓN DEL 5º PASO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA CIRCULAR.

6. Características de arranque del motor. Por el extremo *A* se traza una línea vertical de tal manera que intersecte con las líneas horizontales ubicadas a los pies del diagrama. Los puntos de intersección son rotulados con las letras *D* y *E* de abajo hacia arriba.

La línea *AD* es la componente real de la corriente de arranque:

$$AD = OA \cos \theta_a \quad \dots (4.19)$$

Si multiplicamos la longitud del segmento *AD* (Ec. 4.19) por la escala de corrientes (Ec. 4.17), obtenemos el valor de la componente real de la corriente de arranque en amperes:

$$AD \cdot \delta_a = I_a \cos \theta_a \quad \dots (4.20)$$

Multiplicando ambos miembros de la ecuación anterior por el voltaje de fase, se obtiene una potencia real:

$$AD \cdot \delta_a \cdot V_t = V_t \cdot I_a \cos \theta_a \quad (\text{PÉRDIDAS TOTALES EN EL ARRANQUE}) \quad \dots (4.21)$$

Con la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados, se puede definir una escala de potencias.

$$\delta_p = \delta_a \cdot V_t \quad \dots (4.22)$$

de tal manera que:

$$AD \cdot \delta_p = \text{PÉRDIDAS TOTALES EN EL ARRANQUE.} \quad \dots (4.23)$$

En el arranque (es decir, con el rotor estático), las pérdidas totales se dividen en pérdidas magnéticas y pérdidas eléctricas, que se interpretarían de acuerdo al diagrama circular como:

$$DE \cdot \delta_p = \text{PÉRDIDAS MAGNÉTICAS EN EL ARRANQUE.} \quad \dots (4.24)$$

$$EA \cdot \delta_p = \text{PÉRDIDAS ELÉCTRICAS EN ESTATOR Y ROTOR AL ARRANQUE.} \quad \dots (4.25)$$

**Nota:**

Si observamos la figura que se muestra a continuación notaremos que  $DE = I_a \cos \theta_a$ , de tal forma que  $DE \cdot \delta_p$  en condiciones de vacío abarca pérdidas magnéticas y mecánicas.

Se ha detectado de manera práctica, que al aumentar  $I_a$  (corriente en vacío) hasta  $I_a$  (corriente a rotor bloqueado) la desaparición de pérdidas mecánicas se compensa con un aumento de pérdidas magnéticas, debido al aumento de flujos de dispersión, de tal forma que es válido suponer que  $DE \cdot \delta_p$  equivale a las pérdidas magnéticas en el arranque (o a rotor bloqueado).

7. Determinación del punto  $F$ : Las pérdidas eléctricas totales en el arranque se dividen en pérdidas eléctricas en estator y pérdidas eléctricas en rotor, que de acuerdo al diagrama circular se denotan de la siguiente forma:

$$EF \cdot \delta_p = I_a^2 R_1 \quad \text{PÉRDIDAS ELÉCTRICAS EN EL ESTATOR} \quad \dots (4.26)$$

$$FA \cdot \delta_p = I_a^2 R_2 \quad \text{PÉRDIDAS ELÉCTRICAS EN EL ROTOR} \quad \dots (4.27)$$

y las pérdidas totales:

$$EA \cdot \delta_p = I_a (R_1 + R_2) = I_a^2 R \quad \dots (4.28)$$

Si dividimos las pérdidas en el estator entre las pérdidas totales, se obtiene:

$$\frac{EF}{EA} = \frac{R_1}{R} \quad \dots (4.29)$$

Por tanto, el segmento  $EF$  tiene una longitud:

$$EF = \frac{R_1}{R} \cdot EA \quad \dots (4.30)$$

Marcamos el punto  $F$  sobre la línea  $EA$ .

Hasta éste punto el dibujo del diagrama queda como se muestra en la figura 33 :

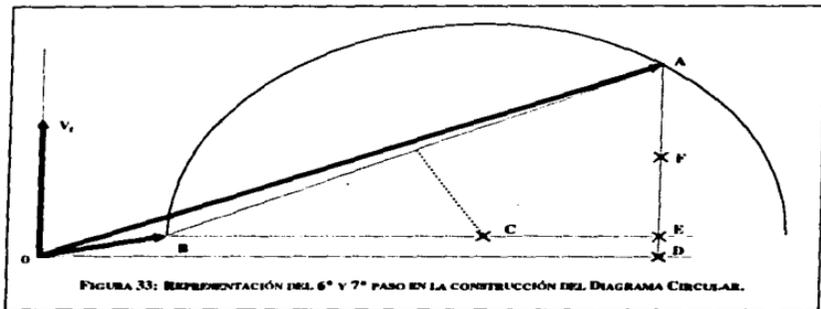


FIGURA 33: REPRESENTACIÓN DEL 6° Y 7° PASO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA CIRCULAR.

No es válido multiplicar los segmentos parciales de  $AD$  por la escala de corrientes, ya que en un circuito serie, la corriente no se divide en partes. El producto de estos segmentos por la escala de potencias sí tiene interpretación real.

8. Obtención de las características nominales. A continuación se dibuja el fasor  $OG$  que representa la corriente nominal de placa. Su longitud se calcula mediante la escala de corrientes:

$$OG = \frac{I_{\text{NOMINAL}}}{\delta_A} \quad \dots (4.31)$$

Con la ayuda de un compás cuya abertura sea esta longitud, nos apoyamos en el origen ( $O$ ), y se determina en el diagrama circular el punto  $G$ .

Posteriormente se traza el fasor  $OG$ , una vertical que parta del punto  $G$ , y la línea  $BF$ . Se marca la posición de los puntos  $H$ ,  $J$ ,  $K$  y  $L$ , como se muestra en la siguiente figura.

Con esto se completa el trazado del *Diagrama Circular de Heyland* (Fig. 34).

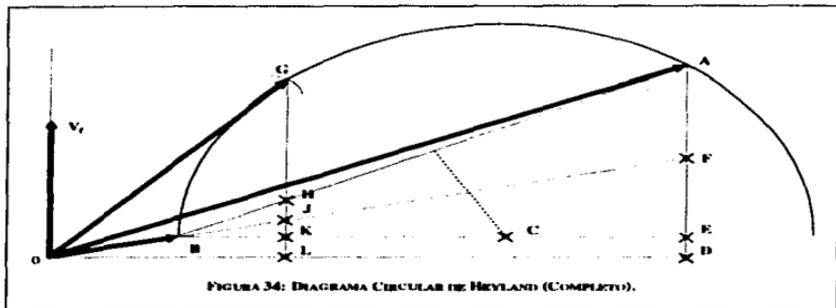


FIGURA 34: DIAGRAMA CIRCULAR DE HEYLAND (COMPLETO).

#### 4.3.1 INTERPRETACIÓN DEL DIAGRAMA CIRCULAR DE HEYLAND

La interpretación de los segmentos que componen la recta  $GL$ , a escala de potencia, permite obtener el comportamiento del motor, de acuerdo con lo siguiente:

$GL \delta_p$  = POTENCIA REAL DE ENTRADA POR FASE.

$LK \delta_p$  = PÉRDIDAS MECÁNICAS Y MAGNÉTICAS POR FASE.

$KJ \delta_p$  = PÉRDIDAS ELÉCTRICAS EN EL ESTATOR POR FASE.

$JH \delta_p$  = PÉRDIDAS ELÉCTRICAS EN EL ROTOR POR FASE.

$HG \delta_p$  = POTENCIA MECÁNICA DE SALIDA POR FASE.

$\frac{JH}{HG}$  = DESLIZAMIENTO.

$\frac{HG}{JG} S$  = VELOCIDAD DEL ROTOR ( $S$  es la velocidad síncrona en RPM).

$OG \delta_a$  = CORRIENTE DE FASE.

$\frac{LG}{OG}$  = FACTOR DE POTENCIA.

$\frac{3 HG \delta_p}{746}$  = POTENCIA TOTAL EN LA FLECHA EN HP (POTENCIA DE SALIDA).

$$\frac{HG}{LG} \times 100 = \% \text{ DE EFICIENCIA.}$$

$$\frac{2.92 \text{ JG } \delta_p}{S} = \text{PAR MECÁNICO EN KG-M.}$$

CAPÍTULO V



*“Curvas Características de los Motores Trifásicos  
de Inducción Jaula de Ardilla”*



### 5.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES TRIF. DE IND. JAULA DE ARDILLA.

Basado en las lecturas obtenidas de las pruebas en vacío y a rotor bloqueado a tensión nominal, y del valor de la resistencia óhmica de los devanados del estator, es posible determinar en forma gráfica los valores de eficiencia, factor de potencia y velocidad en función del par. Estas curvas pueden obtenerse también en forma directa a partir de una prueba con el dinamómetro, en la cual se varía la carga aplicada al motor desde aprox. el 25% hasta el 150% de la carga nominal, manteniéndose el valor nominal de tensión y tomándose las lecturas de velocidad, corriente, par y potencia de entrada.

Las curvas de operación son las más importantes, ya que nos proporcionan una imagen completa del comportamiento del motor (con excepción del aumento de temperatura) desde la etapa de arranque hasta el régimen permanente.

El análisis de estas curvas nos permite deducir algunos hechos, que no son evidentes a primera vista, que pueden ser de gran utilidad y determinantes en la selección de un motor para una aplicación determinada.

A continuación se enlistan las curvas características del motor de inducción y posteriormente se muestran los esquemas de las mismas:

- *Velocidad - Par*
- *Velocidad - Corriente*
- *Par - Corriente*
- *Par - Eficiencia*
- *Par - Factor de potencia*
- *Par - Potencia*

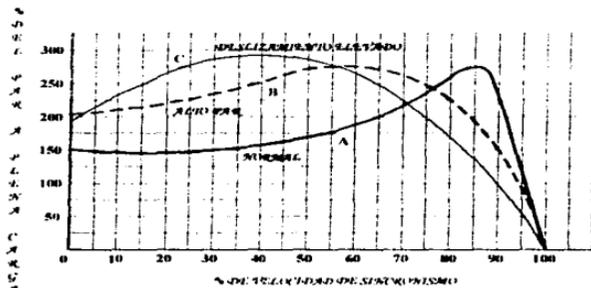


FIGURA 35: CURVA CARACTERÍSTICA VELOCIDAD - PAR.

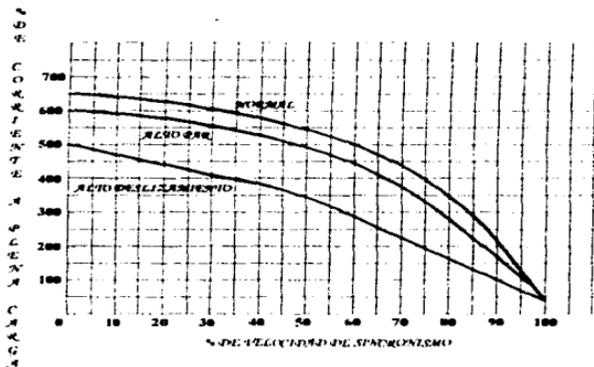
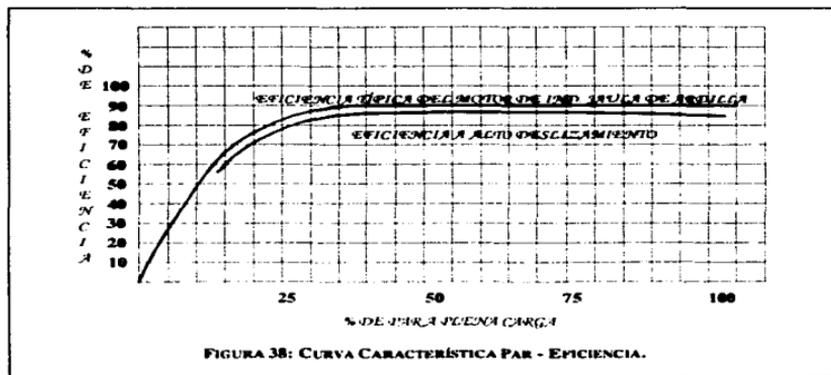
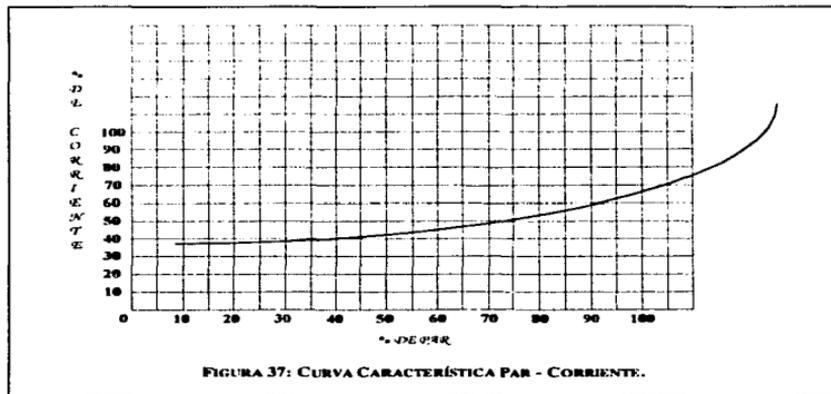


FIGURA 36: CURVA CARACTERÍSTICA VELOCIDAD - CORRIENTE.



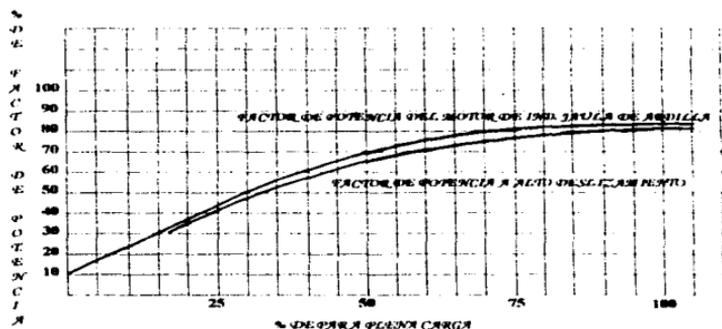


FIGURA 39: CURVA CARACTERÍSTICA PAR - FACTOR DE POTENCIA.

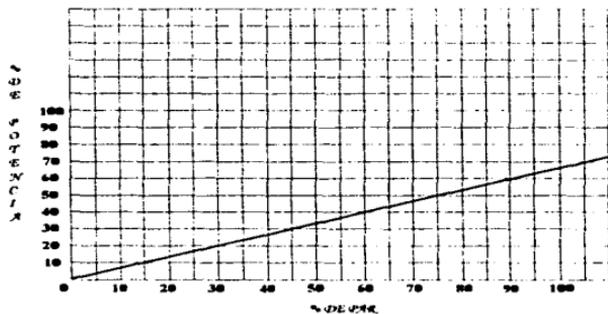


FIGURA 40: CURVA CARACTERÍSTICA PAR - POTENCIA.

Por ejemplo: si la curva de factor de potencia presenta un cambio brusco de la pendiente, puede inferirse que la corriente reactiva a baja carga tiene relativamente menor importancia que a cargas mayores; es decir, que la corriente magnetizante es relativamente baja comparada con la que corresponde al flujo local o de dispersión. Esto explica porqué el factor de potencia a baja carga es comparativamente alto, y permite deducir que el par máximo (a plena carga) tendrá un valor adecuado.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS PAR-VELOCIDAD PARA LOS DISEÑOS NEMA

En la figura 41 se muestran las curvas par-velocidad correspondiente a cada uno de los diseños estándar NEMA (National Manufacturers Association), estos se han agrupado de la siguiente forma (en el capítulo VII se detalla cada uno de estos diseños):

- 1.- NEMA A: *Motores de par normal y corriente de arranque normal.*
- 2.- NEMA B: *Motores de par normal y bajo corriente de arranque.*
- 3.- NEMA C: *Motores de alto par y bajo corriente de arranque con doble jaula en el rotor.*
- 4.- NEMA D: *Motores de alto deslizamiento.*
- 5.- NEMA E: *Motores de velocidad elevada.*

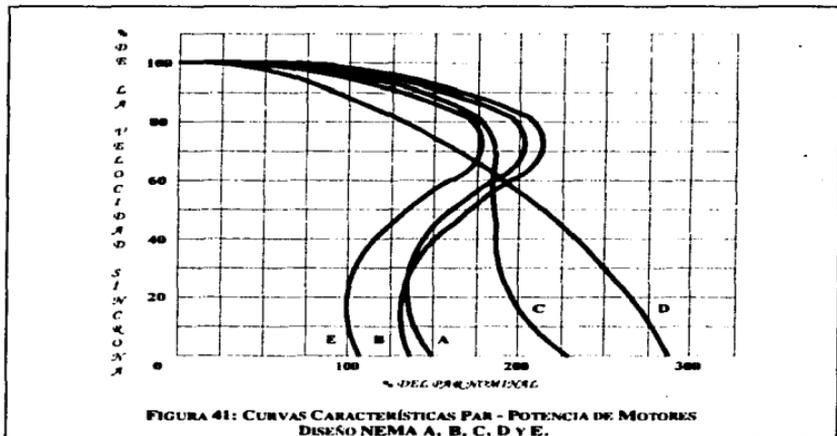


FIGURA 41: CURVAS CARACTERÍSTICAS PAR - POTENCIA DE MOTORES DISEÑO NEMA A, B, C, D Y E.

CAPÍTULO VI



*“Pérdidas en los Motores de Inducción”*



**PÉRDIDAS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN**

Una máquina eléctrica rotatoria operando como motor convierte la potencia eléctrica (expresada en Watts) suministrada a sus terminales de alimentación, en potencia mecánica (expresada en Hp) que se ve reflejada en forma de un par que permite el impulso de la carga acoplada a su eje.

La potencia eléctrica de entrada a un motor de inducción ( $P_{ENTRADA}$ ) se da en forma de voltajes y corrientes trifásicas.

En la transformación electromecánica de la energía que tiene lugar en una máquina eléctrica, una fracción de la potencia transformada se convierte en calor y no es utilizada, constituyendo el conjunto de pérdidas.

La potencia total consumida por un motor está comprendida por la potencia útil empleada para impulsar la carga y la potencia que se pierde en la misma máquina. En un motor la eficiencia es muy baja con cargas reducidas (por abajo de su valor nominal), y en el caso extremo, cuando el motor opera en vacío no desarrolla ningún trabajo y toma cierta potencia de la línea, por lo que su eficiencia en estas condiciones es cero.

Las *pérdidas* de energía son una parte de la potencia suministrada que en su mayor parte se convierte en calor.

La energía que no es transmitida al equipo a impulsar se le conoce con el nombre de *pérdidas en el motor*.

El estudio de las pérdidas en las máquinas es muy importante porque influyen sobre el rendimiento o eficiencia y el calentamiento del motor.

Estas pérdidas se pueden clasificar en cuatro categorías, estas son:

- *Pérdidas Eléctricas.*
- *Pérdidas Mecánicas.*
- *Pérdidas Magnéticas.*
- *Pérdidas Indeterminadas.*

Cada una de ellas se explican a continuación:

**6.1 PÉRDIDAS ELÉCTRICAS**

Las *pérdidas eléctricas* ( $P_{CU}$ ) equivalen al trabajo necesario para hacer pasar corriente por el interior de los conductores. Son consecuencia de la inevitable resistencia que presentan los conductores eléctricos.

Para calcular esta pérdida se eleva al cuadrado la intensidad de corriente y se multiplica por la resistencia, reciben también el nombre de *pérdidas por efecto Joule ó pérdidas en el cobre* quedando expresadas de la siguiente forma:

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \quad \Leftarrow \text{PÉRDIDAS ELÉCTRICAS (POR EFECTO JOULE Ó EN EL COBRE).} \quad \dots (6.1)$$

En virtud de que tanto en estator como en rotor existen conductores eléctricos, estas pérdidas se presentan en ambas partes del motor.

Como se expresó anteriormente es muy frecuente que a estas pérdidas se les denomine como pérdidas en el cobre, lo cual no es estrictamente correcto ya que en la actualidad muchos motores tienen sus devanados contruidos de alambre magneto de aluminio y casi todos los rotores (jaula de ardilla) son contruidos de aluminio fundido por lo que es más correcto llamarlas pérdidas eléctricas.

Las pérdidas eléctricas dependen no solamente de la corriente sino también de la resistencia de los devanados en las condiciones de operación.

La resistencia real efectiva de un devanado varía con la temperatura, carga, flujo magnético, efecto superficial de la corriente alterna, distribución no uniforme de la corriente entre los conductores y otros factores similares.

Una técnica usualmente empleada para reducir estas pérdidas consiste en emplear conductores de cobre (no de aluminio) de mayor diámetro en la elaboración de los devanados.

## 6.2 PÉRDIDAS MECÁNICAS

Son las pérdidas derivadas de la **fricción** y la **ventilación** y se reflejan en el consumo de energía empleado para contrarrestar la fricción en cojinetes y la fricción de las aletas de ventilación con el aire. Parte de esta energía perdida se convierte en calor y son conocidas también con el nombre de **pérdidas por fricción y ventilación** ( $P_{fv}$ ).

Estas pérdidas se presentan como resultado del consumo de energía que se requiere para poder vencer la fricción o rozamiento en los cojinetes, hay disipación de calor en ellos y se produce un aumento en la temperatura de los cojinetes y su lubricante. La fricción incrementa la carga impuesta al motor por el equipo impulsado. El roce del aire es la resistencia que impone este fluido a la rotación de elementos como los ventiladores del motor; tal efecto también incrementa la carga aplicada a la máquina.

El roce del aire se puede producir con el ventilador interno o con el ventilador externo.

La fricción en rodamientos por ajuste forzado de la carga o por falta de grasa lubricante provoca el incremento de estas pérdidas.

Cuanto más alta sea la velocidad de un motor de inducción, más altas serán las pérdidas mecánicas (por fricción y ventilación).

El diseño de ventiladores más pequeños y el empleo de cojinetes antifricción o de mejor calidad ayudan a minimizar estas pérdidas.

### 6.3 PÉRDIDAS MAGNÉTICAS

Las pérdidas que se presentan en el material magnético que constituye el núcleo tanto de estator como de rotor, son de dos clases:

- *Pérdidas por Histéresis.*
- *Pérdidas por Corrientes Parásitas (de Foucault, de Remolino, o de Eddy).*

Ambas se engloban en las *pérdidas magnéticas, pérdidas en el hierro o pérdidas en el núcleo* ( $P_{Fe}$ ) y estas varían con la corriente de carga del motor, los cambios en la velocidad, además de que son muy difíciles de medir en condiciones dinámicas por lo que se suponen constantes.

Entre más alta sea la velocidad del motor (hasta llegar a la proximidad de la velocidad síncrona), más bajas serán sus pérdidas en el núcleo.

Se trata de disminuir la magnitud de estas pérdidas al laminar el núcleo magnético (tanto de estator como de rotor), elaborando las laminaciones de acero al silicio y aislándolas entre sí.

La laminación puede hacerse en caliente (utilizado antiguamente) o en frío (grano orientado) muy utilizado en la actualidad, siendo menores las pérdidas empleando el segundo método.

Las laminaciones se aíslan entre sí, antiguamente se utilizaba papel fino, posteriormente barniz de silicato de sodio y en la actualidad las laminaciones de grano orientado vienen preparadas mediante un tratamiento termoquímico especial, conocido con el nombre comercial de *carlite* que crea una película aislante extremadamente delgada (0.001 mm) cuya adherencia e inalterabilidad al calor son considerables.

Estas pérdidas se detallan a continuación:

#### a).- PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS

Cuando se magnetiza el núcleo de una máquina por efecto de la circulación de corriente a través de los devanados, la dirección por la que se magnetiza el núcleo está determinada por la dirección del campo magnético que lo magnetiza (es decir que tienen la misma dirección).

Cada vez que cambia la dirección del campo magnético alrededor de los devanados, la dirección donde el núcleo es magnetizado también cambia.

Pero las moléculas en el núcleo de hierro no siguen exactamente las inversiones del campo magnético, es decir que existe un retardo. Este atraso de las moléculas en relación a la fuerza magnética se llama *histéresis*. Es obvio que para poder hacer que cambien su dirección las moléculas, es necesario un consumo de energía (que se transforma en calor), esto con el fin de que alcancen al campo magnético. Entre más energía se requiera, mayor será la pérdida por histéresis.

Las *pérdidas por histéresis* aumentan con la densidad de flujo magnético (mayor corriente) o con la frecuencia del voltaje aplicado.

Estas pérdidas están en función directa del tipo de material que se utilice en la construcción del núcleo. Aquellos materiales que retienen la mayor parte de su magnetización después de haber

sido removida la fuerza magnética (es decir, al no alimentar) tienen grandes pérdidas por histéresis. Estos materiales se consideran de alta permanencia.

Al construir los núcleos con láminas u hojas de hierro dulce se contribuye a la disminución de las pérdidas de Foucault así como las pérdidas por histéresis.

#### **b).- PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS**

El núcleo de hierro de una máquina eléctrica es un material conductor, al estar sometido a un campo magnético variable, se induce un voltaje en el núcleo.

Este voltaje causa la circulación de corrientes a través del núcleo. A éstas corrientes se les llaman *corrientes parásitas, de Foucault, de Remolino ó de Eddy*. Estas se pueden considerar de cortocircuito pues la única resistencia que encuentran es la mínima resistencia del material del núcleo. Provocan consumo de potencia (y consecuentemente un calentamiento) que constituyen pérdidas.

Las *pérdidas por corrientes parásitas* varían con la densidad de flujo y con la frecuencia de alimentación

Las corrientes parásitas se pueden reducir dividiendo el núcleo en laminillas delgadas (de 0.5 mm de espesor) y recubiertas con esmalte aislador.

Al dividir el núcleo en laminillas estamos incrementando la resistencia ofrecida por el núcleo lo que contribuirá en la disminución de las corrientes parásitas y por ende en la disminución del calor generado (pérdidas).

#### **6.4 PÉRDIDAS INDETERMINADAS**

Las *pérdidas indeterminadas ó pérdidas diversas ( $P_{ind}$ )* están comprendidas por diversos tipos de pérdidas difíciles de medir que varían en relación con la carga del motor.

Son pérdidas en el hierro y en el cobre y pérdidas por corrientes armónicas que circulan por los conductores del rotor.

Puede decirse que se relacionan en algunos aspectos con peculiaridades en la construcción del motor (como disimetrías), como la existencia de ranuras en los núcleos de acero del rotor y del estator, debido a que son difíciles de cuantificar, se les globaliza, y producen gran parte de las variaciones que se observan al aplicar diferentes métodos de prueba.

Cuanto más alta sea la velocidad de un motor de inducción, más altas serán las pérdidas mecánicas (por fricción y ventilación) y las pérdidas diversas o indeterminadas.

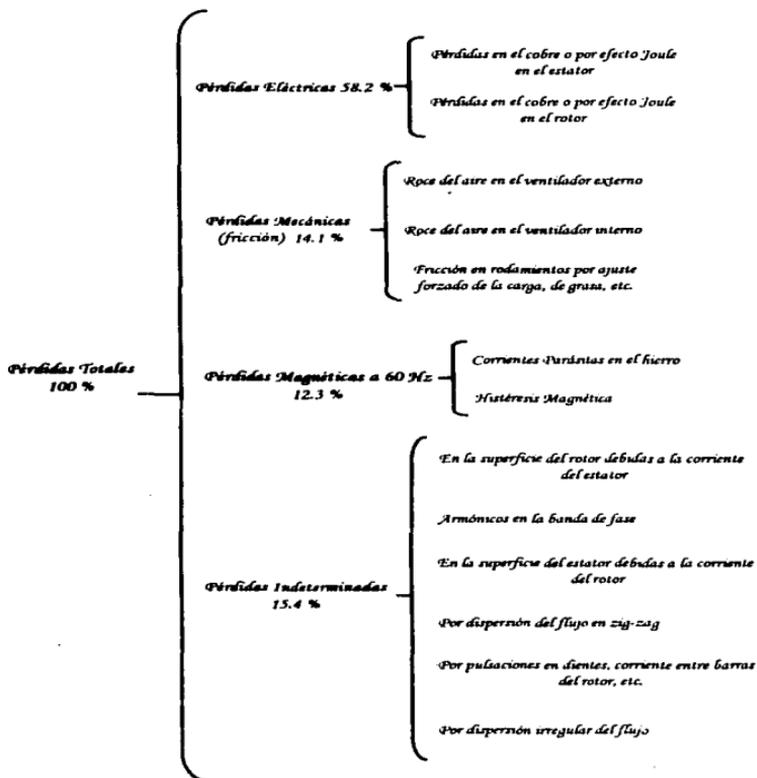


FIGURA 42: PÉRDIDAS PRESENTES EN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA.

Al suministrarle energía eléctrica al motor estamos proporcionando la *potencia de entrada* ( $P_{ENTRADA}$ ) al mismo para que empiece a funcionar.

$$P_{ENTRADA} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{POTENCIA DE ENTRADA} \quad \dots (4.3a)$$

donde:

$V_T$  = Voltaje entre terminales, expresado en {Volts}.

$I_L$  = Corriente de línea, expresada en {Amperes}.

$\cos \theta$  = Factor de potencia del sistema.

Las primeras pérdidas que se presentan son las *pérdidas eléctricas o por efecto Joule* en el estator ( $P_{CU \text{ en Estator}}$ ).

$$P_{CU \text{ en Estator}} = 3 I_1^2 \cdot R_1 \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE EN ESTATOR} \quad \dots (6.1a)$$

donde:

$I_1$  = Corriente en el estator por fase, expresada en {Amp.}.

$R_1$  = Resistencia en el estator por fase, expresada en {Ohms}.

Enseguida se pierde cierta cantidad de potencia por histéresis y corrientes parásitas englobadas en las *pérdidas en el núcleo* del estator ( $P_{Fe}$ ).

$$P_{Fe} = 3 V_1^2 G_{Fe} = \frac{3 V_1^2}{R_c} \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO EN ESTATOR} \quad \dots (6.2)$$

donde:

$V_1$  = Voltaje en el estator por fase, expresado en {Volts}.

$G_{Fe}$  = Conductancia (representa las pérdidas en el hierro o magnéticas).

$R_c$  = Resistencia equivalente expresada en {Ohms}, por la que puede ser sustituida la conductancia.

La potencia que permanece en este punto se traslada al rotor del motor, a través del entrehierro o espacio de aire que existe entre estator y rotor. Esta se llama *potencia del entrehierro* ( $P_{EH}$ ) del motor.

$$P_{EH} = P_{ENTRADA} - P_{CU \text{ en Estator}} - P_{Fe} \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{POTENCIA EN EL ENTREHIERRO} \quad \dots (6.3)$$

Si observamos el esquema del circuito equivalente (pág. X), el único elemento del circuito donde la potencia del entrehierro puede disiparse es la *resistencia de carga*  $\frac{R_2}{s}$ , de tal manera que la *potencia en el entrehierro* ( $P_{EH}$ ) puede obtenerse por medio de la siguiente expresión (Ec. 2.36):

$$P_{EH} = 3I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{POTENCIA EN EL ENTREHIERRO} \quad \dots (2.36)$$

donde:

- $I_2$  = Corriente en el rotor por fase, expresada en {Amperes}.
- $R_2$  = Resistencia en el rotor por fase, expresada en {Ohms}.
- $s$  = Deslizamiento, expresado en { % }.

Después que la potencia se traslada al rotor, una parte de ella se pierde por efecto Joule y se denominan como **pérdidas eléctricas o por efecto Joule en el rotor** ( $P_{CU \text{ en Rotor}}$ )

$$P_{CU \text{ en Rotor}} = 3I_2^2 \cdot R_2 \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE EN ROTOR} \quad \dots (2.37)$$

y el resto de ella se convierte de potencia eléctrica en **potencia mecánica desarrollada** ( $P_D$ ), de tal modo que esta es el resultado de restar a la potencia de entrada, las pérdidas en el cobre del estator, las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en el cobre del rotor, se expresa de la siguiente forma:

$$P_D = P_{EH} - P_{CU \text{ en Rotor}} \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{POTENCIA MECÁNICA DESARROLLADA} \quad \dots (6.4)$$

$$\begin{aligned} P_D &= 3I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \\ &= 3I_2^2 R_2 \cdot \left( \frac{1}{s} - 1 \right) \end{aligned}$$

$$P_D = 3I_2^2 R_2 \cdot \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{POTENCIA MECÁNICA DESARROLLADA} \quad \dots (2.39)$$

Como las pérdidas en el cobre del rotor ( $P_{CU \text{ en Rotor}}$ ) son iguales a la potencia en el entrehierro ( $P_{EH}$ ) multiplicada por el deslizamiento ( $s$ ):

$$P_{CU \text{ en el Rotor}} = s \cdot P_{EH} \quad \dots (6.5)$$

entre más bajo sea el deslizamiento del motor, más bajas son las pérdidas del rotor en la máquina.

Si el rotor no está girando, el deslizamiento es igual al 100% ( $s = 1$ ), y la potencia del entrehierro se disipa completamente en el rotor.

Como:

$$P_D = P_{EH} - P_{CU \text{ en Rotor}}$$

$$= P_{EH} - P_{CU \text{ en Rotor}}$$

$$= P_{EH} - s P_{EH}$$

$$P_D = (1 - s) \cdot P_{EH} \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{POTENCIA MECÁNICA DESARROLLADA} \quad \dots (6.6)$$

Si conocemos las pérdidas por rozamiento o fricción y ventilación ( $P_{FyV}$ ) y las pérdidas diversas o indeterminadas ( $P_{IND}$ ) podemos obtener la **potencia de salida** ( $P_{SAL}$ ) del motor:

$$P_{SAL} = P_D - P_{FyV} - P_{IND} \quad \{\text{Watts}\} \quad \Leftarrow \text{POTENCIA DE SALIDA DEL MOTOR} \quad \dots (6.7)$$

En virtud de que la potencia de salida de un motor es de carácter mecánico, ésta debe ser expresada en unidades propias del mismo, por lo que se debe dividir el resultado expresado en Watts entre un factor de conversión de 746 (1 Hp = 746 Watts), quedando expresado el resultado en **Hp**, que es una unidad de potencia mecánica:

$$P_{SAL \text{ en Hp}} = P_{SAL \text{ en Watts}} \cdot \frac{1 \text{ Hp}}{746 \text{ Watts}} \quad \dots (6.8)$$

Un motor que funciona con baja carga tiene mayor porcentaje de pérdidas que otro de iguales características operando a plena carga, debido a que las pérdidas fijas son constantes independientemente de la magnitud de la carga.

Las **pérdidas** pueden ser clasificadas también de la siguiente forma:

- **Pérdidas Fijas**
- **Pérdidas Variables**

Las **pérdidas fijas**, se consideran constantes o invariables para cualquier condición de carga del motor, desde la operación en vacío hasta plena carga. Esto no es estrictamente cierto pues sí existen variaciones, pero al ser mínimas o insignificantes se hace válida esta suposición.

Dentro de esta categoría se incluyen las siguientes pérdidas:

#### **PÉRDIDAS FIJAS**

- **Pérdidas Magnéticas** (por **Histéresis** y por **Corrientes Parasitas**).
- **Pérdidas Mecánicas** (por **Fricción** de los cojinetes, rotor con el aire interior y **Ventilación**).

Las **pérdidas variables** son aquellas de índole eléctrica que dependen de la carga del motor y consecuentemente de su corriente.

Estas pérdidas se incrementan con la carga aplicada al motor y por tanto la corriente consumida por este aumentará.

Las pérdidas variables son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la corriente de carga del motor.

Esta categoría está comprendida por las siguientes pérdidas:

#### **PÉRDIDAS VARIABLES**

- **Pérdidas Eléctricas** (por efecto Joule o pérdidas en el cobre consistentes en la potencia disipada en forma de calor por la resistencia de los devanados del motor).
- **Pérdidas Indeterminadas** (son pérdidas en el hierro y en el cobre y pérdidas por corrientes armónicas que circulan por los conductores del rotor).

Con la finalidad de reducir al máximo la magnitud de las pérdidas, se realizan constantemente experimentos con otros materiales y nuevos diseños, cuyos frutos repercuten directamente en el ahorro de energía consumida. La generación de energía eléctrica y su máximo aprovechamiento son algunos de los grandes problemas en la actualidad debido a la gran dependencia que tenemos de los hidrocarburos en la producción de energía y que como sabemos son recursos no renovables. Por tal motivo, entre más eficiencia se logre de una máquina, se tendrá un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos.

CAPÍTULO VII



*"Métodos de Instalación y Operación"*



## MÉTODOS DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN

La instalación correcta de una máquina es fundamental para obtener un funcionamiento óptimo, eficiente y confiable de la misma.

Antes de comenzar a describir los procedimientos de instalación es conveniente considerar algunos puntos importantes que deben ser tomados en cuenta desde el momento de recepción de una máquina.

### 7.1 ELECCIÓN DEL MOTOR

El objetivo fundamental en la selección y aplicación de motores es que se llegue a la combinación más adecuada de motor y carga impulsada de modo que se satisfagan todas las condiciones de funcionamiento planteadas, al menor costo posible tanto inicial como de operación.

Los aspectos más importantes que deben considerarse al seleccionar un motor de inducción son los siguientes:

- 1.- Potencia requerida para impulsar la carga.
- 2.- Velocidad a la que deberá funcionar.
- 3.- Par de arranque necesario.
- 4.- Par mínimo requerido durante la aceleración.
- 5.- Máximo par resistente que la carga puede oponer al motor.
- 6.- Efecto de inercia (o de volante) de la carga.

#### *Potencia de la carga*

El seleccionar un motor con la potencia nominal correcta representa el primer paso hacia un costo total mínimo. Pues un motor de menor capacidad a la necesaria estaría trabajando en condiciones de sobrecarga lo que traería problemas de sobrecalentamiento y disminución de la vida útil del mismo, si por el contrario el motor estuviera sobrado provocaría problemas de bajo factor de potencia (por no alcanzar el valor nominal de carga) y reducción de la eficiencia de mismo además de que resultaría más costosa su adquisición.

Es recomendable recurrir a los catálogos de los fabricantes con el fin de tener la información necesaria para la elección de la máquina con la potencia nominal idónea para los requerimientos de la carga, así como para determinar si el motor debe ser para servicio continuo o intermitente.

Cuando se habla de potencia nominal de un motor se entiende que es a potencia que puede desarrollar la máquina en forma continua, es decir las 24 hrs del día, pero existen casos en los que se requieren motores de uso intermitente, en cuyo caso conviene usar motores que sean capaces de desarrollar su potencia nominal durante un tiempo reducido, entre 5 y 60 minutos aprox.

### **Velocidad de Funcionamiento**

Esta característica puede ser más o menos fija o variable en un rango amplio para una determinada aplicación. En la mayor parte de los casos se requiere de una sola velocidad de operación. Es importante el considerar el tipo de acoplamiento a utilizarse para unir al motor con su carga pues si el acoplamiento es directo, la velocidad del motor debe ser igual al de la carga, pero si se utilizan engranes, bandas, cadenas, etc. deberá tomarse en cuenta la relación de velocidades y la variación del par en proporción inversa a la velocidad.

El tipo de acoplamiento más utilizado es el de bandas y poleas lo que representa un esfuerzo extra sobre el eje del motor y sus cojinetes, por lo que se deberá verificar en los catálogos del fabricante el máximo diámetro de poleas a utilizar, el tipo de bandas y su nivel de ajuste con el fin de que no se sobrepase el esfuerzo permitido y se dañe el equipo.

La transmisión de banda puede permitir la aplicación de un motor de mayor velocidad (menor número de polos) lo que repercute en un menor costo (pues a mayor número de polos menor velocidad, y mayor costo).

Esta observación acerca del uso de motores de mayor velocidad no puede ser generalizada ya que existirán casos en los que se requiera, durante el ciclo de trabajo de una máquina, inversiones de sentido de giro, lo que hace de la recomendación anterior algo inadecuado pues a medida que la velocidad de un motor es mayor, tanto menor es su capacidad para cambiar de sentido de giro.

### **Par de arranque**

Es muy importante el saber la magnitud de la fuerza que la carga impondrá al motor en el momento del arranque y compararlo con el par a rotor bloqueado que el motor desarrolla para saber si el motor está capacitado para impulsar adecuadamente a la carga.

El margen mínimo recomendado es del 25% en las condiciones más desfavorables en las que deba efectuarse la puesta en marcha.

Existen cargas que requieren de un par de arranque muy bajo como es el caso de los ventiladores.

Existen otras que requieren de un elevado para de arranque, un ejemplo de estas son los molinos para caucho o hule (llamados también molinos Banbury), que en ocasiones deben arrancar completamente cargados. En este caso, el par de arranque del motor debe ser especificado de manera cuidadosa.

### **Par mínimo de aceleración**

Una vez que el motor ha vencido la resistencia inicial de la carga y su funcionamiento comienza a ascender, por lo común hay un descenso en el par durante un breve intervalo de velocidad, este lapso puede ser crítico para la operación del motor acoplado a la carga. De acuerdo a las normas el par mínimo no debe ser menor al 70% del par de arranque.

Es conveniente que el par mínimo del motor sea cuando menos un 25% mayor que el par requerido por la carga a ese valor de la velocidad.

### **Par máximo resistente**

Una vez que se ha superado el par mínimo, el par de rotación comienza a incrementarse hasta llegar a un punto máximo para después descender nuevamente hasta llegar a un valor nominal.

Cuando se aplica mayor carga al motor, una vez que ya está en marcha normal, la velocidad desciende hasta que llega al punto en que puede proporcionar el par que demanda la carga. Si el proceso continuara, se llegaría al valor del par máximo, donde el motor ya no podría proporcionar más carga extra, pues su velocidad descendería bruscamente hasta quedar frenado, ya que el par de arranque suele ser menor que el par máximo, por esto al par máximo también se le llama par de desenganche.

Al aplicar un motor es necesario cerciorarse de que el par que pueda demandar la carga en las condiciones más desfavorables de operación sea menor en un 25% al par máximo.

### **Efecto inercia o de volante**

Si la carga tiene un momento de inercia rotacional de más de 5 veces el del propio motor, debe ser considerada una carga de alta inercia y poner especial atención en el tiempo que se requiere para alcanzar el punto de operación así como el calor producido en éste periodo.

En los catálogos de los fabricantes de motores se puede encontrar el valor del efecto volante del motor para compararlo con el de la carga.

El efecto volante es inversamente proporcional a la velocidad de operación.

Los puntos descritos anteriormente constituyen los básicos para realizar la elección de un motor de inducción.

Para determinadas aplicaciones es muy importante considerar los aspectos mecánicos (que impongan el manejo de la carga y las condiciones ambientales de operación), pues esto definirá el tipo de carcasa que deberá usarse, además debe ponerse especial atención en la elección adecuada del motor cuando éste va a trabajar en un lugar con una temperatura ambiente por arriba de los 40°C (que es el estándar).

Si el lugar de operación del motor está contaminado con una atmósfera corrosiva, además de carecer de la ventilación necesaria para el motor, puede llegar a requerirse de ventilación por medio de un sistema de enfriamiento de aire forzado que tome el aire del exterior del lugar.

Además de todos éstos factores, las características de la instalación eléctrica del lugar de montaje del motor deben ser cuidadosamente verificadas, de modo que los transformadores de distribución (o alternadores, dado el caso), posean la capacidad suficiente en KVA para alimentar al motor (y de manera esencial en el instante del arranque), esto se logra verificando su capacidad máxima. De no poder satisfacer las necesidades del motor puede llegar a ser un factor de cambio radical en las características del mismo, o en otros casos puede llegar a requerirse del cambio del equipo de distribución de la planta, pero esto, al ser un factor de impacto evidentemente económico, requiere de un estudio riguroso que arroje datos sobre la conveniencia de cambiar un transformador por otro de mayor capacidad o las características elegidas de un determinado motor (todo está en función de los requerimientos de la carga que deberá impulsar y de la solvencia económica de una empresa).

La norma **NEMA MG1-1978 (Motores y Generadores)**, establece que las condiciones usuales de servicio de un motor son:

- 1.- Exposición a una temperatura que se encuentre en el rango de **0°C a 40°C**.
- 2.- Instalación en áreas o alojamientos complementarios que no interfieran seriamente con la ventilación de la máquina.
- 3.- Operación dentro de una tolerancia de variación del voltaje nominal de **±10%**.
- 4.- Operación con una fuente de voltaje de onda senoidal que no sobrepase el factor de desviación del **10%**.
- 5.- Operación dentro de una tolerancia de variación de la frecuencia nominal de **±5%**.
- 6.- Operación dentro de un desbalance de voltaje del **1%** o menos.

La operación en condiciones diferentes a las especificadas como usuales, puede ocasionar el consumo adicional de energía.

La elección adecuada del motor, tomando en cuenta los aspectos de suministro de energía y suficiencia de la misma para la operación óptima de la máquina traerá como resultado el ahorro económico en los costos de instalación y control.

## **7.2 RECEPCIÓN Y MANEJO**

Al recibirse un motor debe inspeccionarse con cuidado y constatar que el mismo no sufrió daño alguno como pueden ser rayaduras, abolladuras u otro maltrato durante su embarque y transportación. Esta inspección debe realizarse antes de que la máquina sea movida del vehículo de transportación y de firmar la nota de conformidad al transportista.

Se deben examinar todos los manuales y documentos referentes a la máquina, y evitarse el destruir o remover de su lugar toda etiqueta o calcomanía relacionada (como puede ser del ensamble, almacenamiento funcionamiento y lubricación).

En los motores pequeños, se debe verificar que la flecha gire libremente, haciéndola girar con la mano.

Comprobar que los datos de placa del motor como pueden ser: voltaje, número de fases, potencia, frecuencia de la red, etc. correspondan con los valores bajo los cuales va a ser alimentado el motor.

La capa protectora contra oxidación y corrosión con que va cubierta la extensión de la flecha, puede ser eliminada con cuidado, con la aplicación de un solvente como thinner, gasolina ó petróleo.

Se debe quedar a cargo de personas con experiencia en el manejo de grúas, montacargas, gatos, y demás equipo que llegara a requerirse.

### 7.3 SEGURIDAD

La seguridad es el factor de máxima importancia durante la instalación, puesta en marcha y funcionamiento de los motores. La misma empieza con el diseño, selección y aplicación del motor y componentes relacionados.

El motor debe ser el adecuado para la operación que va a realizar y la magnitud de carga que deberá impulsar.

Debe contar con las protecciones requeridas para evitar accidentes con las partes móviles como son bandas, engranes, mecanismos impulsados, etc.

Su carcasa debe ser la especificada para operar en el medio ambiente del lugar de instalación, además de contar con la suficiente ventilación para que el motor trabaje a la temperatura nominal.

El personal que participe en la instalación debe estar capacitado en la labor y conocer las normas que establecen los lineamientos de seguridad, correcta selección, instalación y uso de motores como la norma **NEMA MG2, Safety Standards for Construction and Guide for Selection, Installation and Use of Electric Motors and Generators**, además de otros reglamentos.

### 7.4 UBICACIÓN

La ubicación del motor deberá ser acorde a las especificaciones de operación del mismo de tal manera que las condiciones atmosféricas como son temperatura, humedad del aire, partículas en suspensión, polvo, atmósfera explosiva, abrasivos, etc. no afecten su funcionamiento.

De tal manera que:

Un *motor tipo abierto* resulta ser la mejor elección para operar en lugares libres de exceso de polvo, humedad, pelusas.

Un *motor a prueba de goteo* se utiliza en lugares con ambiente más o menos limpio, seco y no corrosivo.

El *motor totalmente cerrado* puede instalarse en lugares con suciedad excesiva, polvo, humedad, corrosión o para su empleo a la intemperie.

Los motores deben ser instalados en lugares (el mejor posible) limpios, secos, y frescos donde puedan desarrollar la potencia adecuada con seguridad, con temperaturas que no excedan de 40°C al nivel del mar o de 30°C a una altura máxima de 2,280 m sobre el nivel del mar (a excepción de casos de fabricación específica).

De no tenerse las condiciones de temperatura y ventilación adecuadas deben utilizarse carcasas y disposiciones adecuadas de instalación como puede ser un cuarto especial con condiciones ambientales especiales que justifica su costo con una operación óptima y facilidad para su mantenimiento.

Las partes conductoras deben ser protegidas de la humedad, además de resguardarse el aislamiento de las terminales de entrada al motor del aceite, agua o líquidos nocivos (para el caso

en el que el motor sea de diseño especial para trabajar en las condiciones existentes en el lugar donde está instalado.

A continuación se presenta la designación de las normas **NEMA MG1** para motores en base a las características de su carcasa y protección:

### **DE CARCASA ABIERTA**

**Usos generales:** Las aberturas para ventilación permiten el paso del aire exterior para enfriamiento, sobre y alrededor de los devanados del motor.

**A prueba de goteo:** Las aberturas para ventilación están construidas de modo que no haya interferencia en el funcionamiento cuando hay gotas de algún líquido o partículas sólidas que caen en la carcasa o penetran en ella a un ángulo de 0° a 15° hacia abajo desde la vertical.

**A prueba de salpicaduras:** Las aberturas para ventilación están construidas de modo que no haya interferencia en el funcionamiento cuando hay gotas de algún líquido o partículas sólidas que caen en la carcasa o penetran en ella a un ángulo no mayor de 100° hacia abajo desde la vertical.

**Resguardado:** Las aberturas que dan acceso directo a partes vivas (energizadas) o rotatorias (excepto los ejes lisos) están limitadas en tamaño por el diseño de las partes estructurales o por pantallas, mallas, metal desplegado, etc., para evitar el contacto accidental con esas partes.

**Semiresguardado:** Una parte de las aberturas para ventilación, por lo general en la parte superior, son como en el motor resguardado, pero las otras están totalmente abiertas.

**Resguardado a prueba de goteo:** Con carcasa a prueba de goteo y con aberturas para ventilación iguales a las de uno resguardado.

**Con ventilación externa:** Enfrñado por aire mediante un ventilador independiente instalado sobre la carcasa del motor. La protección mecánica puede ser la definida en el punto anterior.

**Con ventilación por ducto:** Las aberturas para la entrada del aire de ventilación están dispuestas de modo que puedan conectarse ductos a ellas.

### **Protegido contra la intemperie:**

**Tipo I:** Los conductos de ventilación están diseñados para minimizar la entrada de lluvia, nieve y las partículas transportadas por el aire hasta las partes eléctricas.

**Tipo II:** Los conductos de ventilación en la entrada y salida están dispuestos de modo que el aire a alta velocidad y las partículas suspendidas que llegan hasta el motor llevadas por las tormentas o vientos fuertes puedan ser descargados sin que entren a los conductos internos para ventilación que conducen directamente hasta las partes eléctricas.

### **CON DEVANADOS ENCAPSULADOS O SELLADOS**

**Con devanados encapsulados:** Máquinas de C.A. de jaula de ardilla con devanados de bobinas no preformadas recubiertas de una resina aislante que forma una cápsula protectora.

**Con devanados sellados:** Máquinas de C.A. de jaula de ardilla con devanados preformados y provistos de un aislamiento que, mediante el empleo de ciertos materiales o procesos, o una combinación de éstos, produce el sellado de los devanados y conexiones contra la acción de contaminantes.

### **DE CARCASA TOTALMENTE CERRADA**

**Sin ventilación:** La carcasa impide el libre intercambio de aire entre el interior y el exterior, pero no es hermética ni tiene enfriamiento con componentes externos.

**Con ventilación:** Tiene enfriamiento externo con uno o más ventiladores integrales con el motor, pero localizados en el exterior de la carcasa.

**Resguardado y con ventilador:** Todas las aberturas que dan acceso directo al ventilador son de tamaño limitado por el diseño de las partes estructurales, o mediante pantallas, malla de metal desplegado, etc., a fin de evitar el contacto accidental con el ventilador.

**A prueba de explosión:** Con diseño y construcción para soportar una explosión de gases o vapores en su interior e impedir la inflamación de los gases o vapores que rodeen el motor, debido a chispas, flamaos o explosiones que puedan ocurrir dentro de la carcasa.

**A prueba de inflamación de polvos:** Con diseño y construcción para impedir la entrada de polvos que perjudiquen el funcionamiento o la capacidad, y evitar la inflamación de polvo o materiales semejantes del exterior, sobre la carcasa o sus inmediaciones.

**A prueba de agua:** Con diseño para impedir la entrada de agua aplicada con manguera, excepto que se permite cierto escurrimiento alrededor del eje, siempre y cuando el agua no pueda llegar al depósito del aceite y se tenga algún sistema de drenaje.

**Con ventilación por ductos:** Las aberturas están dispuestas de modo que puedan conectarse ductos a ellas, para la entrada y descarga del aire de ventilación.

**Con enfriamiento por agua:** Se enfría con agua en circulación; el agua o los conductos hacen contacto directo con las partes del motor.

**Con enfriamiento por agua y aire:** Se enfría por circulación de aire que, a su vez, es enfriado con agua circulante.

**Con enfriamiento por aire a aire:** Se enfría al circular el aire del interior por un cambiador de calor que, a su vez, es enfriado por circulación de aire exterior.

## 7.5 UTILIDAD DE LOS DATOS DE PLACA

La placa de datos de los motores aportan una gran cantidad de datos útiles sobre diseño y mantenimiento. Esta información es valiosa para los instaladores y el personal encargado del mantenimiento y reemplazo de los motores existentes.

Las normas **NEMA MG1** (en su sección **10.38**) expresa los datos que deben estar impresos en la placa de datos de toda máquina rotatoria:

- Razón social del fabricante (marca, logotipo, nombre de la empresa).
- Número de serie.
- Modelo
- Tipo.
- Armazón.
- Potencia (Hp).
- Designación de servicio (tiempo de operación en horas).
- Temperatura ambiente máxima.
- Velocidad (rpm).
- Frecuencia (Hz).
- Número de fases.
- Corriente de carga nominal (Amp.).
- Voltaje nominal (V).
- Letra clave de KVA a rotor bloqueado.
- Letra clave de diseño.
- Factor de servicio.
- Clase de aislamiento.
- Eficiencia (%).
- Diagrama de conexión.
- Secuencia de fases.
- Carga axial máxima (en Kgs.).
- Tipo de cojinetes empleados.
- Protección.

Además el fabricante puede indicar la dirección de su fábrica o servicio autorizado, etc.

A continuación se describe cada uno de los datos grabados con regularidad en la placa del motor:

- 1.- **Razón social del fabricante:** Marca, logotipo y nombre de la empresa fabricante.
- 2.- **No. de serie:** Número exclusivo de cada motor o diseño que designa la fábrica al producto terminado como distintivo de cada unidad fabricada en una línea de producción.
- 3.- **Modelo:** Número y datos adicionales de identificación del fabricante.
- 4.- **Tipo:** Combinación de letras, números o ambos, seleccionados por el fabricante para identificar el tipo de carcasa y de cualquier modificación importante en ella. Es necesario tener al sistema de claves del fabricante para entender este dato.

**5.- Armazón:** La designación del tamaño del armazón es para identificar las dimensiones del motor. Si se trata de un armazón normalizado por NEMA incluye las dimensiones para montaje (indicadas en la MGI), con lo cual no se requieren los dibujos de fábrica.

**6.- Potencia:** Potencia nominal (en Hp) que desarrolla el motor en su eje cuando se le aplica el voltaje y frecuencia nominales en sus terminales con un factor de servicio de 1.0.

**7.- Designación de servicio:** En este espacio se graba la palabra - **intermitente** - ó - **continuo** -. Si es de servicio continuo el motor puede funcionar las 24 horas del día los 365 días del año, durante muchos años. Si es intermitente, se indica el tiempo de operación en horas, lo cual significa que el motor puede operar a plena carga durante ese periodo, una vez transcurrido este, hay que apagar el motor y esperar a que se enfríe antes de que arranque de nuevo.

**8.- Temperatura ambiente:** Es la temperatura ambiente máxima en °C a la cual el motor puede desarrollar su potencia nominal sin peligro a determinados metros sobre el nivel del mar (los cuales también se especifican). Si la temperatura ambiente es mayor a la señalada, se debe reducir la potencia de salida del motor para evitar daños a los aislamientos.

**9.- Velocidad:** Es la velocidad de rotación (en rpm) del eje del motor cuando se entrega la potencia nominal con el voltaje y frecuencia nominales (velocidad nominal).

**10.- Frecuencia:** Es la frecuencia eléctrica (en Hz) del sistema de alimentación.

**11.- Número de fases:** Número de fases con las que está construido el motor y que debe de concordar con el número de fases del sistema de alimentación.

**12.- Corriente de carga nominal:** Indica la intensidad de corriente (en Amperes) que toma el motor al voltaje y frecuencia nominales, cuando funciona a plena carga (corriente nominal).

**13.- Voltaje nominal:** Valor de la tensión de alimentación del motor (en Volts).

**14.- Letra clave de KVA a rotor bloqueado:** Valor de KVA (kilo volt-amperes) que sirve para evaluar la corriente máxima en el arranque. Se especifica con una letra clave correspondiente a un intervalo de valores de KVA/HP, y el intervalo que abarca cada letra aparece en el NEMA MGI-10.36. Un valor común es la clave G, que abarca desde 5.6 hasta menos de 6.3 KVA/HP.

Es necesario comprobar que la empresa suministradora de energía local permite ésta magnitud de carga en su sistema.

La siguiente tabla muestra las letras claves correspondientes a cada intervalo de valores KVA/HP:

CLAVE	KVA/HP A ROTOR BLOQUEADO	CLAVE	KVA/HP A ROTOR BLOQUEADO
A	0 - 3.14	L	9.0 - 9.99
B	3.15 - 3.54	M	10.0 - 11.19
C	3.55 - 3.99	N	11.2 - 12.49
D	4.0 - 4.49	P	12.5 - 13.99
E	4.5 - 4.99	R	14.0 - 15.99
F	5.0 - 5.59	S	16.0 - 17.99
G	5.6 - 6.29	T	18.0 - 19.99
H	6.3 - 7.09	U	20.0 - 22.39
J	7.1 - 7.99	V	22.4 y mayores
K	8.0 - 8.99		

TABLA 4: CLAVES CORRESPONDIENTES A INTERVALOS DE KVA/HP.

**15.- Letra clave de diseño:** Se graba en este espacio la letra de diseño NEMA (en su caso), que especifica los valores mínimos de par de rotación a rotor bloqueado, durante la aceleración y a la velocidad correspondiente al par máximo, la corriente máxima de arranque y el valor máximo de deslizamiento con carga. Estos valores se especifican en las normas NEMA MG1 (secciones 1.16 y 1.17).

**16.- Factor de servicio:** Los factores de servicio más comunes son del 1.0 a 1.15. Un factor de 1.0 significa que no debe demandarse que el motor entregue más potencia que la nominal, si se quiere evitar el daño a los aislamientos. Con un factor de servicio de 1.15 (o cualquiera mayor de 1.0), el motor puede hacerse trabajar hasta una potencia igual a la nominal multiplicada por el factor de servicio sin que ocurran daños a los aislamientos.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el funcionamiento continuo dentro del intervalo del factor de servicio hará que se reduzca la duración nominal estimada de los aislamientos.

**17.- Clase de aislamiento:** Indica la clase de materiales de aislamiento utilizados en el devanado del estator. Estos materiales son sustancias sometidas a pruebas de laboratorio para determinar su duración al exponerlas a temperaturas predeterminadas. Los aislamientos y sus temperaturas máximas de operación son detalladas en la parte concerniente a aislamientos de esta tesis.

**18.- Eficiencia:** Es la eficiencia nominal NEMA del motor (de MG1 sección 12.53b). Este valor de eficiencia se aplica a los motores de tipo estándar así como a los de eficiencia superior. Para los de alta eficiencia (*energy-efficient*) se indicará este dato.

**19.- Diagrama de conexión:** Indica las formas posibles de conexión de las terminales del motor a las de la red y en los casos de motores que pueden trabajar a dos tensiones se especifica el tipo de conexión a usarse para cada nivel de tensión.

En los motores de una velocidad y tres conductores es frecuente el que carezcan del diagrama de conexiones externas en su placa de datos. Pero en los motores con más de tres conductores, si aparecen dichas conexiones.

En la placa de los motores de doble velocidad se indican las conexiones para alta y baja.

Para *baja velocidad*, la línea 1 (R) debe conectarse a la terminal T<sub>1</sub>, la línea 2 (S) a la terminal T<sub>2</sub>, y la línea 3 (T) a la terminal T<sub>3</sub>; las terminales T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub> y T<sub>6</sub> del motor permanecen abiertos (sin conexión).

Para *alta velocidad*, la línea 1 (R) se conecta a la terminal T<sub>4</sub>, la línea 2 (S) a la terminal T<sub>5</sub>, y la línea 3 (T) a la terminal T<sub>6</sub>; las terminales T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> del motor se ponen en cortocircuito.

**20.- Secuencia de fases:** Permite al instalador conectar por primera vez al motor para que funcione en el sentido de rotación deseado, suponiendo que se conoce la secuencia de fases de la red de suministro. Si la secuencia de fases de la red es **A-B-C (secuencia de fase positiva (+), sentido de giro horario)** las terminales del motor se conectan como está indicado en la placa de datos. Si la secuencia de fases de la red es **A-C-B (secuencia de fase negativa (-), sentido de giro antihorario)** las terminales del motor se conectan en sentido inverso al ahí señalado.

**21.- Carga axial máxima:** Valor de carga máxima (en Kgs.) que podrá soportar la flecha axialmente sin que se corra el riesgo de que ésta se deforme y produzca averías en la máquina.

**22.- Tipo de cojinetes empleados:** En los motores que tienen cojinetes antifricción (de rodamiento), éstos se identifican con sus números y letras correspondientes conforme a las normas de la **AFBMA (Anti-Friction Bearing Manufacturers Association)**. De esta forma los cojinetes pueden sustituirse por otros del mismo tipo (diseño), pues el número **AFBMA** incluye la holgura juego de ajuste del cojinete, tipo de retención, grado de protección (blindado, sellado, abierto, etc.) y dimensiones.

Se indican el extremo hacia el eje (donde se acopla la carga) **SE, shaft end** y el extremo opuesto **EO, end opposite** en los cojinetes de la flecha.

**23.- Protección:** En esta parte se incluyen las letras **IP (de International Protection)** seguidas de 2 números o cifras significativas, el primero indica la protección contra objetos sólidos, y el segundo la protección contra el agua. Las cifras se muestran y detallan en la siguiente tabla (5):

NÚMERO	SIGNIFICADO	
	PRIMERA CIFRA SIGNIFICATIVA (Protección contra contactos directos y cuerpos extraños)	SEGUNDA CIFRA SIGNIFICATIVA (Protección contra la penetración de líquidos)
0	Ninguna protección específica contra contactos. Ninguna protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños.	Ninguna protección específica contra el agua.
1	Protección contra contactos directos casuales de grandes superficies, por ejemplo con la mano. Protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños de diámetro superior a 50mm.	Protección contra la caída vertical de gotas de agua.
2	Protección contra contactos directos con los dedos. Protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños de diámetro superior a 12mm.	Protección contra la caída de gotas de agua inclinadas en cualquier ángulo hasta 15° con la vertical.
3	Protección contra contactos directos de herramientas, hilos, etc. mayores de 2.5mm. de diámetro. Protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños de diámetro superior a 2.5mm.	Protección contra el rociado de agua en un ángulo de hasta 60° con la vertical.
4	Protección contra contactos directos con herramientas, hilos, etc. mayores de 1mm. de diámetro. Protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños de diámetro superior a 1mm.	Protección contra la proyección de agua en todas las direcciones.
5	Protección total contra contactos directos. Protección contra depósitos de polvo perjudiciales.	Protección contra chorros de agua en todas las direcciones.
6	Protección total contra contactos directos. Protección total contra la penetración de polvo.	Protección contra inundaciones pasajeras.
7		Protección contra los efectos de inmersión (Prueba: 30 minutos bajo 1m. de agua).
8		Protección contra inmersión prolongada (Prueba según acuerdo entre fabricante y usuario).

TABLA 5: NOMENCLATURA EMPLEADA POR IP (INTERNATIONAL PROTECTION).

La clase de protección representa la características de la carcasa de la máquina con la finalidad de:

1ª) Proteger a las personas contra el peligro de tocar directamente partes móviles o que estén en contacto con partes energizadas. Es lo que se denomina protección contra contactos directos.

## 2º) Proteger a la máquina de la entrada de cuerpos sólidos y líquidos de el medio exterior.

Las normas internacionales que tratan este tema son: VDE 100, IEC 144 y 529, DIN 40050 y UNE 20324.

Existen otros datos que pueden llegar a incluirse en la placa de datos pero esto depende del tipo de motor del que se trate. Por ejemplo:

- Bajo nivel de ruido.
- Potencia de sonido.
- Emisión de ruido.

### 7.6 REDUCCIÓN DEL RUIDO GENERADO Y VIBRACIÓN

Los motores producen ruido en su marcha normal que se combina con el del equipo impulsado, pero los primeros suelen ser la fuente principal de ruido (debido a la vibración de los materiales y el aire dentro de los equipos). Podemos definir al **ruido** como un **sonido irregular indeseable**. El ruido puede molestar a toda persona que lo escuche y causar daños y lesiones.

Estudios realizados en los motores mostró que con un mejor diseño de los ventiladores de enfriamiento para los motores podían lograrse importantes reducciones del nivel de ruido que estos producen.

La superficie de un motor en marcha que vibra producirá ruido. Un ventilador ocasiona turbulencia en el aire circundante y también genera ruido.

El ruido producido en los motores de inducción totalmente cerrados y enfriados por ventilador (TEFC), tiene su origen a lo largo de las superficies del ventilador cuando las aspas cortan el aire, ocurriendo la máxima generación de ruido en las puntas de las aspas, donde la velocidad relativa y la turbulencia del aire son máximas.

Entre las modificaciones llevadas a cabo por los investigadores del fenómeno se pueden mencionar: la reducción de la velocidad en las puntas de las aspas, mejora de las trayectorias para entrada de aire, mejor aislamiento acústico del motor, cambios en las configuraciones de las aspas y cubiertas de los ventiladores.

Un método para silenciar los motores consiste en amortiguar las vibraciones con materiales y componentes que eviten la transmisión del sonido a través de las losas del piso, concreto, etc.

Es esencial tener una cimentación rígida fin de tener vibraciones mínimas y la alineación correcta entre el motor y la carga.

Los mejores cimientos son los de cemento reforzado (hormigón).

Si el concreto tiene suficiente masa, esto le dará la rigidez necesaria para minimizar las deformaciones y vibraciones. El concreto puede colarse sobre el suelo, acero estructural o el piso del edificio, siempre y cuando el peso total del motor, mecanismo impulsado y cimientos no excedan la capacidad de carga del suelo donde se ubicará la máquina.

Antes de colar el concreto, es necesario marcar la ubicación de los pernos de anclaje mediante una plantilla a fin de lograr un anclaje firme.

Es de suma importancia el que la lechada sea la apropiada para darle la firmeza, rigidez y estabilidad necesaria a la cimentación. Debe tener la mezcla de arena, cemento y agua apropiada, lo que puede lograrse consultando a los especialistas en esta tarea.

Es recomendable emplear una gruesa placa base rígida de acero entre las patas del motor y el cimiento.

Para que una placa de acero constituya un soporte adecuado, debe estar enclavada o sumergida en la lechada.

De manera aproximada, el peso de una base de cimentación debe ser unas 2.5 veces el peso total a soportar.

Si el motor se va a montar sobre una base de concreto (hormigón), es esencial que los cimientos sean de concreto macizo a suficiente profundidad para que descansen sobre una sub-base firme.

Si el motor se va a montar sobre una placa de acero, todos los soportes deben ser del tamaño y resistencia adecuados y tener refuerzos para alcanzar la máxima rigidez.

A continuación se muestran los puntos a considerar para la verificación de un buen soporte o base para motor:

- 1.- No deben realizarse soldaduras gruesas en bases maquinadas, pues esto puede provocar torceduras en la misma.
- 2.- La soldadura en la base o soporte debe ser continua, sin interrupciones pues esto puede provocar torceduras y deformación.
- 3.- Una base entera (de una sola pieza) es mucho mejor que una seccionada.
- 4.- Las bases con buena profundidad son mejores que las de poca profundidad.
- 5.- Debe tenerse cuidado especial de observar si existen torceduras o deformaciones causadas por cargas en voladizo sobre las bases, por encima del nivel del piso.
- 6.- No debe darse por hecho que el piso en sí es firme. Una base robusta con el motor y carga montados puede vibrar sobre un piso resonante, al igual que una base débil sobre un piso rígido.
- 7.- Las vibraciones durante el funcionamiento son señales de problemas y muy frecuentemente estos provienen de la base del motor y su carga. Se debe inspeccionar la base o la alineación y luego el motor.
- 8.- Es necesario revisar que todos los pernos de anclaje estén en su lugar y bien apretados.
- 9.- Debe revisarse que haya refuerzos cerca de los pernos de montaje, pues incrementa mucho la rigidez de la base del motor.
- 10.- Se debe observar que existan refuerzos directamente debajo del motor, que es donde más se requieren; las soleras de acero deben estar soportadas cuando menos cada 45 cm.

Independientemente si es de concreto o de placa de acero la base debe estar bien nivelada.

Si la base es de concreto no debe ser muy alta. El motor puede ser levantado mediante calzas (laminas o taquetes), pero de ser la base demasiado alta es difícil reducir la altura eliminando parte del concreto.

Para tener un buen nivelado es necesario que los cuatro puntos de montaje (uno en cada esquina de la base) de un motor estén sobre el mismo plano exacto. De no tenerse este, pueden utilizarse lanas para nivelar al motor.

### **7.7 UBICACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA BASE DEL MOTOR**

Las zapatas base son de tamaño suficiente de tal manera que permitan el empleo de soportes permanentes con pernos de anclaje entre ellas y los cimientos y se fijan con hormigón.

Las zapatas largas no deben estar expuestas al calor que puede ocasionar su desalineación o levantamiento cuando su expansión horizontal está restringida. En donde hay calor pueden utilizarse zapatas cortas con juntas de expansión ente ellas.

Es importante que las zapatas estén bien colocadas y los pernos de anclaje bien apretados, antes de vaciar el concreto.

El concreto u hormigón es el llenador de consistencia plástica que debe entrar con fuerza y llenar todos los huecos, espacios de aire y cavidades antes de que se solidifique. La superficie del cimiento de concreto debe estar limpia y áspera para permitir la buena adherencia, se debe eliminar la suciedad, polvo, aceite, pintura, etc.

La parte superior del cimiento debe ser picada y volverla áspera a fin de eliminar la capa superficial que suele ser débil.

El cimiento de concreto debe permanecer húmedo por lo menos 24 hrs y preferentemente 48 hrs antes de comenzar el vaciado del hormigón.

Una vez vaciado el hormigón se debe dejar secar y endurecer durante cuando menos 7 días antes de poner a funcionar la máquina.

### **7.8 ALINEACIÓN**

La alineación correcta empieza con una máquina bien colocada, después se alinea otra u otras con la primera de una forma más fácil. Puede utilizarse un nivel de burbuja para asegurarse que las patas están en el mismo plano.

Cualquiera ligera desalineación provocará daños en los cojinetes y apoyo. Se debe comprobar la alineación de la máquina aunque ésta se haya alineado en la fábrica, debido a que puede perder su alineación durante su embarque, manejo y traslado.

Es importante comprobar que cada pata del motor coincide con su soporte individual, que el peso está bien distribuido en la superficie total de las patas y que los pernos de anclaje están bien

apretados. Si existe alguna anomalía esta puede ser corregida con la ayuda de linternas para darle la alineación adecuada.

El motor se coloca sobre la base, se instalan las tuercas y se aprietan con un torque menor al especificado; el apriete señalado debe aplicarse después de alinearse.

La alineación final consiste en cambiar la posición de los ejes al grado requerido para tener un buen funcionamiento de la máquina. Esta alineación no varía de unas cuantas milésimas de pulgada.

Se dice que se tiene una alineación correcta cuando la posición relativa de los dos ejes giratorios es tal que no ocurrirá flexión en el acoplamiento durante el funcionamiento normal. Para comprobar la correcta alineación se puede utilizar un calibrador de hojas o un micrómetro.

### 7.9 ACOPLAMIENTO Y TRANSMISIÓN MECÁNICA

Salvo en algunos excepciones, se utilizan acoplamientos flexibles para conectar un motor a su carga.

Este acoplamiento es construido de tal manera que tolera cierta desalineación que puede llegar a producir vibraciones, esfuerzos o ambos en los cojinetes de la máquina.

Debe existir una distancia de entre 3.2 mm a 9.5 mm de distancia entre el eje del motor y el eje de su carga (para la colocación del acoplamiento).

Los motores para conexión directa provistos de cojinetes de bolas (rodamientos o baleros) o de rodillos pueden acoplarse a su carga mediante acoplamientos flexibles los cuales no deben ser instalados a golpes ni a presión, sino que deben ser calentados para instalarlos en el eje del motor.

Una alineación mal hecha puede resultar en un acoplamiento incorrecto con la consecuente vibración del mismo. Por lo que es necesario verificar la alineación con la ayuda de micrómetros de carátula y barras de comprobación fijas al eje del motor y en la máquina impulsada.

En los casos de motores con chumaceras es necesario emplear un acoplamiento flexible con juego longitudinal limitado, con el fin de que el corrimiento axial total sea mínimo.

Los motores con cojinetes de bolas deben acoplarse de modo que haya más juego longitudinal en el acoplamiento que en el motor.

La transmisión de banda (o correa) hace necesario que el motor esté montado sobre rieles o placa base con el fin de darle el nivel de ajuste a la banda. Las poleas son colocadas de modo que las bandas queden perpendiculares al eje y que todas tengan la misma tensión. Las bandas deben ser ajustadas de tal manera que no patinen a la potencia nominal.

Las velocidades normales de las bandas están limitadas a 1,500 m/min en el caso de las de sección E, y a 1,950 m/min en el de las de sección 8-V. No deben utilizarse a velocidades mayores sin antes consultar con el fabricante de las bandas.

Las impulsiones con engranajes requieren de alineación precisa y montaje rígido con el fin de que los dientes de los engranes embonen adecuadamente de modo que al girar los dientes lleguen hasta una profundidad que produzca un juego mínimo entre dientes. Para verificar la alineación se hace girar con la mano el eje del motor y se comprueba el juego en el engranaje en una revolución completa, después se aprietan los tornillos de montaje y se vuelve a revisar el acoplamiento.

### 7.10 INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Como se explicó en la parte referente a los datos de placa, se debe verificar que el voltaje y frecuencia de alimentación sean los especificados para el motor (en su placa de datos).

La red de suministro puede tener las siguientes tolerancias con respecto al dato de placa del motor:

- 1.- Voltaje: Puede tener una variación de  $\pm 10\%$ .
- 2.- Frecuencia: Puede tener una variación de  $\pm 5\%$ .
- 3.- Voltaje y frecuencia en conjunto: no deben variar más del 10% (suponiendo que la frecuencia anterior varía menos del 5%).

Una vez que se ha corroborado que los valores de tensión y frecuencia son los adecuados, es necesario conectar las terminales del motor. Las terminales de los devanados deben ser conectadas de acuerdo al diagrama que se presenta en la placa de datos o en los manuales del mismo.

El tamaño de los conductores empleados en la instalación estarán determinados de acuerdo a la corriente de plena carga del motor, y el mismo se incrementa cuando es necesario reducir la caída de voltaje (cuando el motor se ubica en un lugar retirado a la toma de corriente).

Deben utilizarse conectores de orejas apropiados al tamaño del conductor cuando se conecten las terminales del motor a los conductores de la red de suministro.

Se obtienen mejores conexiones si las uniones se aprietan con una llave torsiométrica.

La caja de terminales del motor debe ser de un tamaño tal que permita hacer conexiones firmes y seguras.

Es recomendable soportar y proteger las terminales del motor sujetándolas con abrazaderas en el punto en el que entran a la caja o cerca de él, y cubriéndolos con hojas de neopreno a fin de eliminar mordeduras o corte de los forros de los cables.

Los agujeros en las placas de acero por los que pasan los conductores deben estar libres de rebabas y biselados.

## 7.11 CONEXIÓN A TIERRA

Para efectuar un adecuado aterrizaje de los equipos es necesario tomar en consideración los siguientes puntos:

1.- El valor de voltaje entre las partes no portadoras de corriente de un motor y su equipo eléctrico, y entre esos elementos y tierra debe limitarse a un valor seguro en toda condición de funcionamiento sea normal o anormal.

2.- Se debe establecer una trayectoria de retorno (de baja impedancia) para la corriente de falla derivada a tierra, una alta impedancia podría provocar la aparición de elevados voltajes durante una falla, y ocasionar el mal funcionamiento de los aparatos protectores.<sup>6</sup>

El calibre del conductor requerido puede determinarse a partir de la capacidad nominal o el ajuste o graduación de los dispositivos de protección contra sobrecorriente ubicados antes del equipo eléctrico.

Un conector ajustable del tipo de perno dividido, atornillado a la estructura o armazón del motor puede servir para la conexión a tierra. Puede llegar a requerirse que se solde una placa de tierra con el fin de tener una superficie de gruesa para conexiones del tipo atornillable en la parte exterior de la caja.

La conexión debe hacerse con la masa de metal más grande y más cercana al conjunto del núcleo o armazón del estator.

Para que la trayectoria a tierra sea eficaz, las uniones atornilladas deben tener una baja resistencia eléctrica, por lo que deben estar pulidas y limpias con el fin de tener un buen contacto eléctrico.

Cuando una máquina eléctrica tiene una terminal para conexión a tierra, esta terminal tiene que ubicarse en la parte de la máquina que no tenga que desmontarse durante el funcionamiento o en alguna revisión o servicio.

Desgraciadamente los motores actuales tienen pocas piezas que no suelen ser removidas durante su servicio, lo que dificulta la ubicación adecuada de la terminal para el aterrizaje de la máquina.

Una alternativa viable puede ser el emplear conductores de aterrizaje que vayan desde el punto más cercano para una buena conexión a tierra y pasen por el tubo conduit de la línea de alimentación, con puentes de enlace entre los componentes del motor.

Consiste en emplear una sola placa de aterrizado en la caja de terminales, con el fin de tener conexiones a tierra firmes de todas las partes del motor.

Un cable conductor entre la placa y el núcleo del estator deriva, desvía y rodea todas las uniones atornilladas, el conductor de aterrizado dentro del tubo conduit constituye una trayectoria de baja resistencia hasta el punto de puesta a tierra más cercano. Este cable se atornilla en la parte de acero más grande, en conexión eléctrica con la estructura laminar del núcleo del estator.

## 7.12 PUESTA EN MARCHA

Una vez que se ha instalado la máquina se procede a efectuar una prueba del funcionamiento del motor en la que debe seguirse los siguientes pasos:

- 1.- Comprobar que las conexiones tanto del motor como de los dispositivos control, arranque y protección concuerden con lo descrito en los diagramas.
- 2.- Constatar que el voltaje y frecuencia del sistema de alimentación sean los que aparecen en la placa del motor.
- 3.- Comprobar que los cojinetes estén lubricados y los depósitos de aceite de las chumaceras esté a nivel.
- 4.- Efectuar las pruebas de resistencia del aislamiento con el motor inmóvil y verificar que todos los devanados por probar queden conectados a la carcasa y a tierra un tiempo suficiente para eliminar cualquier carga electrostática residual (de no toarse estas precauciones el personal puede sufrir percances).

Según las normas, la resistencia mínima recomendada para un devanado de estator se determina de la siguiente forma:

$$R_s = 1 + \left( \frac{V_n}{1,000} \right) [M\Omega] \quad \dots (7.1)$$

donde:

- $R_s$  = Resistencia mínima del devanado de estator en M $\Omega$  (megaohms) a 40°C.  
 $V_n$  = Voltaje nominal del motor.

Se obtiene aplicando un voltaje de CD a todo el devanado durante 1 minuto.

Si la resistencia es menor al valor obtenido al aplicar la fórmula, debe determinarse si hay humedad, y eliminarla si es que existe.

- 5.- Verificar que el rotor gira libremente y que no tiene rozamiento cuando se desconecta de la carga. Debe eliminarse todo cuerpo extraño que se encuentre en el entrehierro.
- 6.- Si la carga está desacoplada del motor, poner en marcha el motor el tiempo suficiente para revisar que no existan condiciones anormales de marcha. Escuchar y palpar el motor con el fin de detectar ruido excesivo vibración, golpeteos, etc. En caso de suscitarse alguno de estos problemas, detener inmediatamente el motor y revisar las posibles fuentes del problema y corregirlo antes de ponerlo en funcionamiento nuevamente.
- 7.- Comprobar que el sentido de rotación sea el correcto, de ser contrario al deseado, apagar el motor e intercambiar dos terminales cualesquiera a fin de lograr el sentido requerido. Si se cambia el sentido de giro y el ventilador de enfriamiento del motor tiene marcado este dato, hay que invertir su colocación en el eje del motor.
- 8.- Verificar las condiciones de arranque del motor con carga acoplada (inicialmente con la carga más baja) y constatar que no existen anomalías, posteriormente se incrementa la carga con lentitud hasta llegar a la máxima y se determina si su funcionamiento es el correcto. De ser todo

normal, se ponen en marcha el motor con su carga hasta la velocidad nominal estando al pendiente de posibles anomalías.

9.- Anotar los datos como son voltaje, corriente a plena carga, corriente de arranque (si se dispone del equipo), resultado de las pruebas de aislamiento, nivel de ruido y temperatura. Todo esto para posibles consultas futuras.

### 7.13 APLICACIONES

La aplicación que se le da a un motor estará en función de las características de la operación que tendrá que realizar, del medio ambiente en el que trabajará, valores de par deseados para mover determinada carga, robustez requerida, tipo de acoplamiento a utilizar, tipo de servicio, etc.

El problema de la aplicación de motores consiste en encontrar las demandas de la carga como son potencia, variación de la velocidad, par motor, par de arranque, características de aceleración, ciclo de servicio y condiciones circundantes. Para designar el motor que se adapte a estas demandas se deben conocer el tipo de alimentación de potencia y las características de funcionamiento de los motores que se encuentran disponibles.

Si se ha hecho la elección y aplicación correcta del motor y sus dispositivos de protección y control, el mismo será capaz de arrancar la carga desde el reposo, acelerarla a la velocidad nominal sin perjuicio de la carga o del motor y sin establecer un esfuerzo excesivo en las líneas de suministro.

Muchas cargas industriales son de velocidad relativamente constante (con una variación de entre el 5% y el 15% que son poco significativas), un ejemplo de estas cargas son transportadores de velocidad constante, bombas, ventiladores, aspiradores, máquinas para labrar metales, grupos motores-generadores, transmisiones, rectificadoras mecánicas, mezcladores de concreto, maquinaria para lavandería, telares, etc.

En este caso cualquier motor de velocidad constante con par de arranque y par motor máximo adecuados podrá satisfacer los requerimientos de estas cargas, como pueden ser motores de inducción, síncronos, de C.D. en derivación.

Muchas cargas requieren de una velocidad ajustable en un rango amplio, pero que la regulación de velocidad se mantenga entre el 10% y 15%, ejemplo de estas cargas son: ventiladores, aspiradores, máquinas herramientas, máquinas para papelería.

Las cargas de velocidad ajustable son de tres tipos:

1) En las que el par motor es relativamente constante en todas las velocidades, ejemplos: transportadores (cuando requieren de una velocidad constante), máquinas herramientas automáticas. Se requiere de motores de par constante y velocidad variable.

2) En las que el par motor es constante en todas las velocidades, ejemplo: la mayoría de las máquinas herramientas, donde se reduce la velocidad a medida que se aumenta el tamaño del corte.

3) En las que el par motor es variable en todas las velocidades, ejemplos: ventiladores, aspiradores y bombas centrífugas. En estas cargas el par aumenta con casi el cuadrado de la velocidad, de modo que la potencia de salida requerida varía con el cubo de la velocidad. Estas cargas usualmente requieren de un motor de bajo par de arranque.

El par de arranque requerido por la carga es factor decisivo en la elección del tipo de motor.

Cargas como ventiladores, aspiradores, bombas centrífugas, compresores sin carga, máquinas herramientas, etc. por lo regular requieren de un bajo par de arranque (considerablemente menor, aprox de 30% a 50% del par nominal).

Cargas como compresores cargados, bombas, molinos de bolas para esmerilar mineral en bruto, transportadores con carga, etc. requieren de un elevado par de arranque (pudiendo llegar a ser hasta del 300% en algunas cargas).

Otro factor importante en la elección de un motor es la forma de acoplar el motor a la carga.

Una conexión a base de banda o cadena requiere que los cojinetes del motor sean los adecuados para soportar los esfuerzos radiales a los que serán sometidos.

El tamaño de la estructura de un motor depende básicamente de factores tales como la potencia de salida, velocidad, temperatura (ambiente y de operación máxima), tipo de servicio, y tipo de la envoltura del mismo.

El costo de un motor depende fundamentalmente de los Hp, velocidad, tipo de envoltura y tipo de cojinetes.

El motor de inducción de jaula de ardilla ha sido clasificado por la *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), de modo que hay 6 diseños clasificados:

#### **NEMA Clase A (Motor de inducción jaula de ardilla de propósito general)**

Es el más ampliamente usado de todos los motores industriales de potencia

El par de arranque varía con el número de polos, pero está entre 115% y 150% para motores de alta velocidad cuando se arrancan a tensión plena. La corriente de arranque estará comprendida entre 500% y 1,000% dependiendo del tamaño y la velocidad nominal.

Tiene un par máximo muy elevado y por tanto funcionará a través de cargas máximas elevadas por periodos no muy prolongados.

Las características de este motorse obtiene por la baja resistencia del rotor de jaula de ardilla, con ranuras medias o profundas, semicerradas o completamente cerradas.

Este motor debe ser usado en todos los lugares donde sea posible, debido a su bajo costo inicial, bajo mantenimiento, eficiencia extremadamente alta, factor de potencia elevado, velocidad a plena carga extremadamente alta y deslizamiento bajo (inferior a 5% con carga nominal).

#### **NEMA Clase B (Motor de par de arranque normal (moderado), baja corriente de arranque)**

Las características de este motor se obtienen colocando las barras del rotor en las ranuras más profundas y que tengan una doble jaula de ardilla, situándose las barras de resistencia elevada para el arranque en la parte superior cerca del entrehierro.

Esta construcción hace que este motor tenga aproximadamente el mismo par de arranque que el de clase A, casi el mismo deslizamiento (inferior al 5% con carga nominal, los motores con 10 o más polos pueden tener un deslizamiento ligeramente mayor al 5%), pero par máximo ligeramente menor y factor de potencia algo más bajo. Su velocidad a plena carga es alta al igual que su eficiencia.

Se utiliza cuando se desea la corriente de arranque de la línea y cuando se utilizan los límites de la corriente máxima de arranque de la *clase A*. Su costo es ligeramente mayor que el de los motores *clase A*.

#### **NEMA Clase C (Motor de par de arranque elevado, baja corriente de arranque)**

Este motor tiene también rotor de doble jaula de ardilla y tiene una corriente de arranque ligeramente menor que la *clase B*, pero el par de arranque es mucho mayor, hasta 240%, y el par máximo es menor que el de la *clase A*.

El motor *clase C* produce su par máximo en el arranque, esto es importante en la aceleración de una carga, y resulta ser de mucha utilidad en el manejo de cargas con una fricción excesiva en el arranque. La capacidad de sobrecarga es menor que la *clase A*.

Este motor arrancado a tensión reducida puede sustituir a un motor de rotor devanado para reducir las demandas de corriente y producir una aceleración suave. El rendimiento es menor y el deslizamiento mayor que en los motores de la *clase A*.

#### **NEMA Clase D (Motor de deslizamiento elevado)**

Motor en el que se limita la corriente de arranque por el deslizamiento relativamente elevado a la carga nominal. Los motores de esta clase utilizados en elevadores son silenciosos en su funcionamiento y tienen corriente de arranque relativamente baja.

Son motores subdivididos por sus fabricantes en régimen nominal intermitente de deslizamiento elevado y régimen nominal continuo de deslizamiento medio. El deslizamiento a plena carga es de alrededor de 7% a 11%.

El motor de deslizamiento medio se aplica a prensas cortadoras punzonadoras, cizallas, etc., que tienen volantes para proporcionar energía a la carga durante el golpe de trabajo.

Este motor tiene el par de arranque mayor de todos los motores polifásicos y la máxima capacidad de aceleración.

Estas características se obtienen en el diseño del rotor utilizando barras de resistencia elevada. Esto trae como consecuencia un mayor deslizamiento y un rendimiento menor. Las densidades de flujo son usualmente mayores, y el factor de potencia menor que en los motores de las clases anteriores.

Los motores que tiene deslizamiento elevado se aplican en grúas y montacargas, algunas veces en elevadores (donde el par de arranque requerido es de alrededor de 250%). El deslizamiento a plena carga está entre 12% y 16% y estos motores son utilizados en cargas intermitentes.

#### **NEMA Clase E (Motor de velocidad elevada)**

Motor de jaula de ardilla de bajo par de arranque y corriente de arranque normal y deslizamiento bajo a la carga nominal. Puede tener una corriente de arranque lo suficientemente elevada que requieren en la mayoría de los casos un compensador o resistencia de arranque para motores de potencia arriba de 7½ Hp.

#### **NEMA Clase F (Motor de velocidad elevada)**

Motor de jaula de ardilla de bajo par de arranque y baja corriente de arranque, puede arrancarse a tensión plena. La corriente de arranque se obtiene por diseño de los motores (reactancia elevada). El deslizamiento a plena carga es relativamente bajo.

Tanto los motores de *clase E* como los de *clase F*, son motores de velocidad elevada utilizados para conexión directa a ventiladores y bombas centrífugas donde es suficiente un par de arranque bajo. Tienen deslizamiento bajo y rendimiento elevado.

Se pueden obtener la mismas características de operación con un motor de *clase A* a tensión reducida por lo que no es muy frecuente su aplicación.

En el siguiente cuadro se esquematizan las características y aplicaciones de los motores polifásicos de inducción jaula de ardilla (de acuerdo a su clase o designación NEMA):

NUCLEO ESTATOR CONSTRUIDO  
CON ACERO ESPECIAL DE BAJAS  
PERDIDAS Y MENOR ESPESOR.  
INCREMENTO EN LA CANTIDAD DE  
COBRE Y LONGITUD DE NUCLEO

ASLAMENTOS CLASE F EN LA  
CONSTRUCCION DEL EMBORNADO  
QUE INCREMENTAN SU VIDA TERMICA Y  
MECANICA Y PROPORCIONA EXCELENTE  
RESISTENCIA A LA HUMEDAD

SELLO DE HULE NEOPRENO  
PARA MINIMIZAR LA ENTRADA  
DE HUMEDAD Y POLVO

RODAMIENTOS PARA LARGA  
VIDA

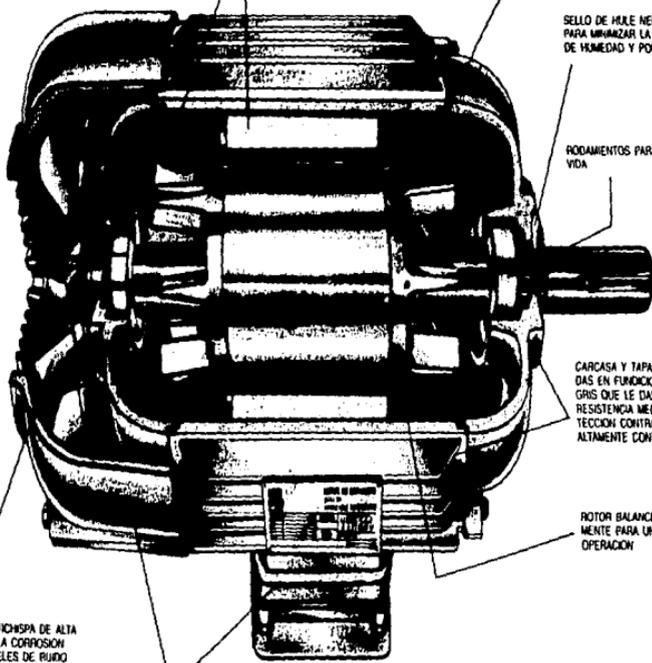
CARCARA Y TAPAS FABRICA-  
DAS EN FUNCION DE HIERRO  
GRIS QUE LE DAN UNA ALTA  
RESISTENCIA MECANICA Y PRO-  
TECCION CONTRA AMBIENTES  
ALTAMENTE CONTAMINADOS

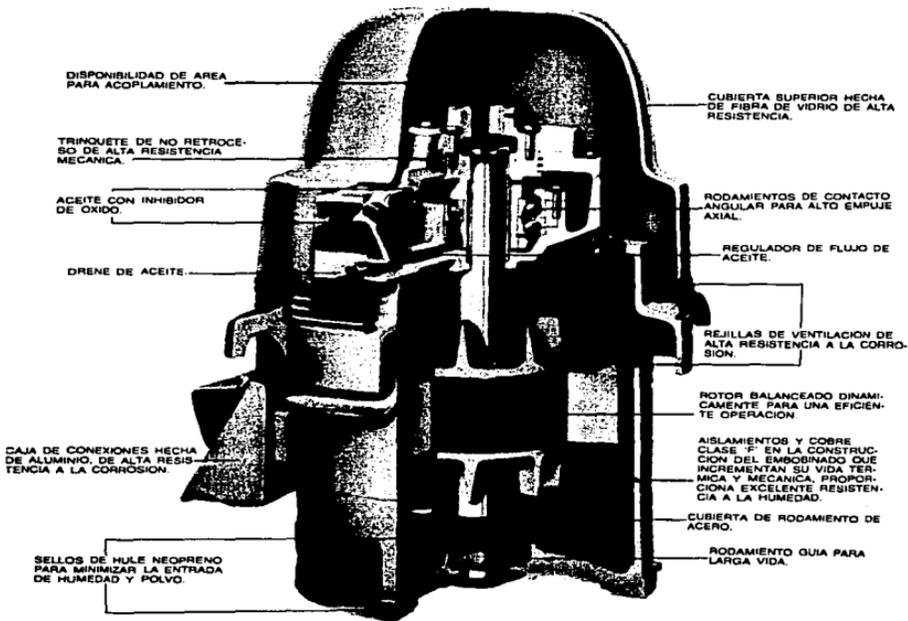
ROTOR BALANCEADO DINAMICA-  
MENTE PARA UNA EFICIENTE  
OPERACION

VENTILADOR ANTICORROSION DE ALTA  
RESISTENCIA A LA CORROSION  
CON BAJOS NIVELES DE RUIDO

CUBIERTA DE VENTILADOR Y  
CAJA DE CONEXIONES, HECHAS  
DE ALUMINIO DE ALTA RESIS-  
TENCIA A LA CORROSION

**MOTOR DE CONSTRUCCION  
RESISTENTE Y AVANZADO  
DISEÑO ELECTRICO**





### CARACTERÍSTICAS Y APLICACIÓN DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA (60HZ)

TIPO DE CLASIFICACIÓN	GAMA Hp	PAR DE ARRANQUE (%) <sup>a</sup>	PAR MÁXIMO (%) <sup>a</sup>	CORRIENTE DE ARRANQUE (%) <sup>a</sup>	DESPLAZAMIENTO (%)	FACTOR DE POTENCIA ELEVADO (%)	RENDIMIENTO ELEVADO (%)	APLICACIONES TÍPICAS
NEMA Clase A Propósito general, par y corriente de arranque normales	0.5 a 200	Polos-Par 2 - 150 4 - 150 6 - 135 8 - 125 10 - 120 12 - 115 14 - 110 16 - 105	Hasta 250 pero no menor que 200	500 - 1,000	Bajo, 3 - 5	87 - 89	87 - 89	Cargas de velocidad constante donde no se necesitan un par de arranque excesivo y donde se tolera una corriente de arranque elevada. Ventiladores, aspiradores, bombas centrífugas, máquinas herramientas, transmisiones. Bajos en costo. Pueden requerir arrancador a tensión reducida. No deben estar sujetos a sobrecargas sostenidas, debido al calentamiento. Tienen par máximo elevado.
NEMA Clase B Propósito general, par normal y baja corriente de arranque	0.5 a 200	Lo mismo que el anterior o bien mayor	Alrededor de los mismos de la clase A, pero pueden ser menores	Alrededor de 500 - 550, menores que el promedio de la clase A.	3 - 5	Un valor menor que la clase A	87 - 89	Las mismas que la clase A, la ventaja sobre la clase A es menor corriente de arranque, pero factor de potencia ligeramente más bajo.
NEMA Clase C Par elevado y baja corriente de arranque	1 a 200	200 a 250	Usualmente un poco menor que la clase A, pero no menor que 200	Alrededor de lo mismo como la clase B	3 - 7	Menor que la clase A	82 - 84	Cargas de velocidad constante que requieren un par de arranque razonablemente elevado y muy baja corriente de arranque. Transportadores, compresores, trituradores, agitadores, bombas de movimiento alternativo. Par máximo en reposo.

NEMA Clase D Par elevado, deslizamiento medio y elevado	0.5 a 150	Deslizamien to medio 350, deslizamien to elevado 250 - 315	Usualmen te el mismo que el par en reposo	Deslizamiento medio 400 - 800, deslizamiento elevado 300 - 500	Medio 7 - 11, Elevado 12 - 16	Bajo	Bajo	Deslizamiento medio, el par de arranque más elevado de todos los motores de jaula de ardilla. Utilizado para cargas de inercia elevada tales como cizallas, prensas, coradoras, punzadoras, forjadores a martillo, máquinas rasadoras, calderas. Tienen un par acelerante promedio muy elevado. Se utilizan deslizamientos elevados para montacargas, elevadores, etc. en cargas intermitentes.
NEMA Clase E o NEMA Clase F Bajo par de arranque ya sea de corriente de arranque normal o baja corriente de arranque respect.	40 a 200	Bajo no menor de 50	Bajo, pero no menor a 150	Normal 500 - 1,000. Baja 350 - 500.	1 a 3½	Casi el mismo que la clase A o B	Casi el mismo que la clase A o B	Cargas de baja inercia directamente conectadas que requieren bajo par de arranque, tales como ventiladores y bombas centrífugas. Tienen rendimiento elevado y deslizamiento bajo.

NOTA: \* Las cifras están dadas en % de los valores nominales de plena carga.

TABLE 6: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIÓN DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA.

CAPÍTULO VIII



*“Métodos de Arranque”*



**MÉTODOS DE ARRANQUE**

Se denomina *arranque* a la acción de poner en marcha o en funcionamiento a una máquina. En un motor para que ésto sea posible es necesario que el par motor o el par mecánico (de arranque) que desarrolle la máquina sea superior al par impuesto por la carga y la inercia de la propia máquina.

Al cumplir con ésta condición se establece un par de aceleración que obliga a girar al rotor a una velocidad cada vez más elevada, llegando al régimen permanente cuando se hacen igual el par motor (par total desarrollado por la máquina) y el par resistente (impuesto por la carga).

El proceso de arranque va acompañado de una demanda considerable de corriente varias veces por encima del valor nominal a plena carga. Este problema no resulta ser considerable en motores de baja potencia pues las corrientes de arranque manejadas no suelen ser tan elevadas que requieran de un dispositivo de protección o de control adicional. Pero en los motores de mediana y gran potencia la demanda de corriente en el transitorio de arranque si es importante, debido a ésto los motores deben ser operados y concretamente arrancados mediante elementos externos adicionales como son dispositivos auxiliares de arranque (reóstato, resistencias en serie, reactancias en serie, autotransformador), arrancadores y otros elementos de protección con la finalidad de limitar la magnitud de la corriente de arranque y con esto proteger los aislamientos de las máquinas de la degradación o posible perforación que traería consigo la avería de la máquina y la reducción de la vida nominal de la misma.

Existen varios métodos de arranque de motores trifásicos de inducción, pero sólo se mencionarán aquellos que son utilizados en el arranque de motores trifásicos de inducción jaula de ardilla que es el tipo de motor en estudio en la presente tesis.

Los métodos de arranque más empleados (siendo el primer método el único a tensión plena y los restantes a tensión reducida) son:

- ARRANQUE DIRECTO O A TENSIÓN PLENA
- ARRANQUE POR AUTOTRANSFORMADOR O COMPENSADOR
- ARRANQUE POR CONMUTACIÓN ESTRELLA (Y)-DELTA ( $\Delta$ )
- ARRANQUE CON RESISTENCIAS EN SERIE
- ARRANQUE CON REACTANCIAS EN SERIE
- ARRANQUE CON DEVANADO PARCIAL

Antes de iniciar con la explicación de cada uno de los métodos de arranque, es importante mencionar que para el caso de los *métodos de arranque a tensión reducida* (todos a excepción del arranque a tensión plena) *la corriente de arranque se reduce en forma directamente proporcional al voltaje y el par de arranque se reduce en proporción directa al cuadrado del decremento de voltaje.*

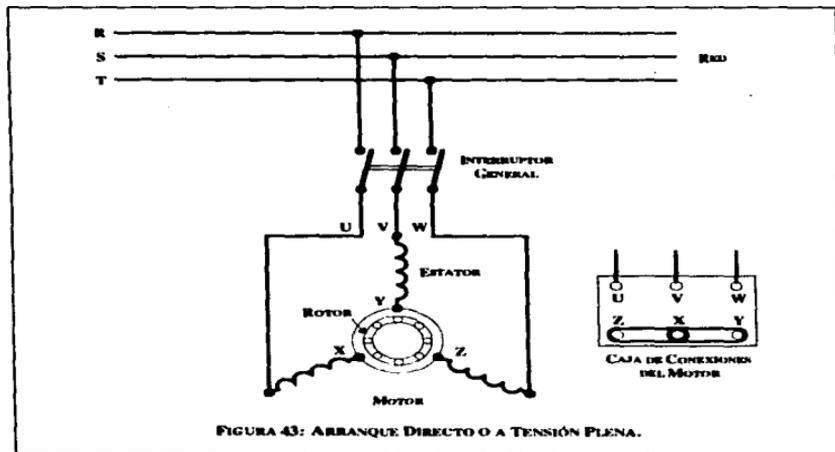
A continuación se detallan cada uno de éstas técnicas de arranque:

## 8.1 ARRANQUE DIRECTO O A TENSIÓN PLENA

Se emplea únicamente en motores de pequeña potencia. En máquinas cuya potencia sea menor a 5KW (6.7 Hp aprox.). En grandes fábricas donde tienen una gran potencia instalada, recibiendo energía en A.T. y que disponen de una subestación transformadora se pueden llegar a arranques directos con motores de hasta 100 CV (ó 98.63 Hp) [CV = Caballos de Vapor, 1 CV = 0.9863 Hp].

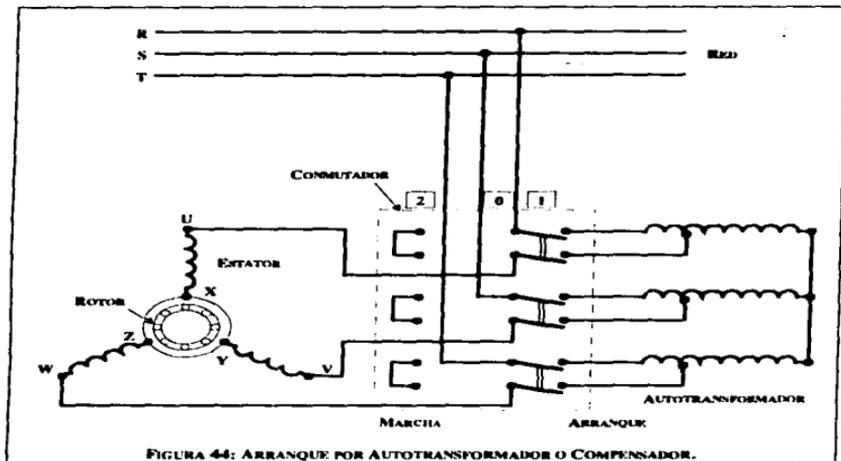
En éste tipo de conexión se emplean interruptores trifásicos, arrancadores además de las imprescindibles protecciones contra sobrecorriente y sobretensión.

En la figura 43 muestra un esquema de conexión que ejemplifica el arranque directo o a tensión plena:



## 8.2 ARRANQUE POR AUTOTRANSFORMADOR O COMPENSADOR

Este método consiste en intercalar un autotransformador entre la red o sistema de alimentación y el motor, de tal manera que la tensión aplicada al motor durante el arranque sea sólo una fracción de la tensión nominal. El proceso puede realizarse en dos o tres pasos o escalonamientos y con tensiones no inferiores al 40%, 60% y 75% de la tensión de línea. En el esquema mostrado a continuación (Fig. 44) se presenta un arranque por autotransformador, con dos etapas de tensión.

**Análisis:**

En la **posición 1** del conmutador se alimenta el autotransformador con la tensión de la red, aplicando al motor solamente una fracción de esta tensión (**etapa de arranque**).

Cuando la máquina ha aumentado su velocidad hasta un valor adecuado, cercano al nominal, el conmutador se pasa a la **posición 2**, de tal forma que el motor queda conectado directamente a la tensión plena de la red.

Este método reduce los efectos que la excesiva corriente de arranque produce sobre la red de suministro (como caídas de tensión), debido a que la corriente de línea, respecto a la conexión directa disminuye con el cuadrado de la tensión de alimentación, por lo que el par de arranque se verá afectado en la misma proporción.

$$V_{\text{MOTOR}} = xV_{\text{RED}} \quad \dots (8.1)$$

$$I_{\text{A en la red}} = x I_{\text{A en el Motor}} = x^2 I_{\text{A a tensión normal}} \quad \dots (8.2)$$

Es decir que el par de arranque con autotransformador ( $T_{\text{A autotransf.}}$  se verá afectado con el cuadrado de la tensión de alimentación ( $x =$  fracción de tensión ó % de la tensión nominal de red, aplicada en cada paso), respecto al par en conexión directa o a tensión plena ( $T_{\text{A directa}}$ ).

$$T_{\text{A autotransf.}} = x^2 T_{\text{A directo}} \quad \dots (8.3)$$

Este sistema de puesta en marcha solamente es posible en los casos en que el par impuesto por la carga no sea muy elevado.

### 8.3 ARRANQUE POR CONMUTACIÓN ESTRELLA (Y)-DELTA (Δ)

Este método permite reducir la tensión de manera apreciable y establece como único **requisito** que el motor esté construido para **funcionar normalmente en conexión delta o triángulo (Δ)** con el voltaje de la red de alimentación.

La máquina es conectada en **estrella (Y)** en el momento del arranque para después, con ayuda de un conmutador, pasar a la conexión **delta (Δ)** cuando está en funcionamiento.

En la figura 45 se muestra este sistema:

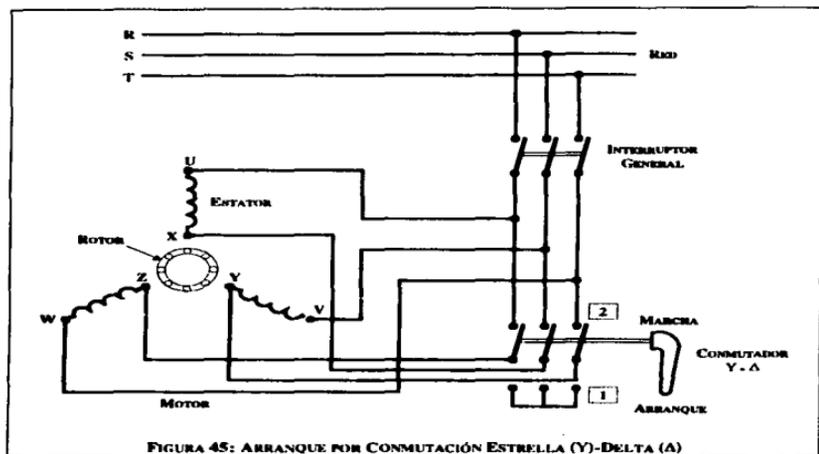


FIGURA 45: ARRANQUE POR CONMUTACIÓN ESTRELLA (Y)-DELTA (Δ)

**Análisis:**

La posición 1 del conmutador se emplea para el arranque y conecta al motor en *estrella* (Y); el estator recibe la alimentación de la red (cuyas terminales son R, S y T) a través de sus terminales U, V y W y el conmutador puentea las terminales X, Y y Z.

Una vez que el motor alcanza una velocidad estable, el conmutador pasa a la posición 2, puenteando las terminales U con X, V con Y y W con Z, de esta forma el motor queda conectado en *delta* (Δ) para funcionar en régimen permanente.

La razón de este cambio de conexión es la siguiente: la impedancia de una fase no depende del tipo de conexión efectuada, pero la corriente por fase es proporcional a la tensión.

Empleando la conexión *delta* (Δ), el voltaje y la corriente de fase son  $\sqrt{3}$  veces mayores que utilizando la conexión *estrella* (Y).

Mediante la conexión *estrella* (Y) en el arranque, cada fase del devanado estatórico recibirá únicamente el voltaje nominal dividido entre  $\sqrt{3}$ , lo que equivale a un arranque con el 57.73% de la tensión nominal.

Por otro lado, la corriente de arranque en *estrella* (Y), es la tercera parte de la corriente de arranque que absorbería el motor si se conectara en *delta* (Δ), es decir que existe una reducción total de la corriente de línea de 0.3333 ó 33.33% de lo normal.

En los motores de jaula de ardilla varía considerablemente la saturación magnética (según se verifique el arranque en estrella o en delta), por lo que es posible que la corriente de arranque disminuya hasta valores aún inferiores a la cuarta parte de la nominal.

Como se había mencionado:

$$V_{\text{MOTOR}} = x V_{\text{RED}} \quad \dots (8.1)$$

$$I_{\text{A en la red}} = x I_{\text{A en el Motor}} = x^2 I_{\text{A a tensión nominal}} \quad \dots (8.2)$$

pero ( $x$  = fracción de tensión ó % de la tensión nominal de red):

$$x = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \dots (8.4)$$

entonces:

$$V_{\text{MOTOR}} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{\text{RED o nominal}} \quad \dots (8.5)$$

y como la corriente de arranque se reduce en forma directamente proporcional a la tensión:

$$I_{\text{A en estrella}} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 I_{\text{A a tensión nominal}} \quad \dots (8.6)$$

$$I_{\text{A en estrella}} = \frac{1}{3} I_{\text{A a tensión nominal}} \quad \dots (8.7)$$

y como el par de arranque se reduce en proporción directa al cuadrado de la reducción de voltaje:

$$T_{\text{A en estrella}} = x^2 T_{\text{A a tensión nominal}} \quad \dots (8.3a)$$

$$T_{\text{A en estrella}} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 T_{\text{A a tensión nominal}} \quad \dots (8.8)$$

$$T_{\text{A en estrella}} = \frac{1}{3} T_{\text{A a tensión nominal}} \quad \dots (8.9)$$

Debido a esto, este procedimiento únicamente se aplica en los casos en el que el par que impone la carga, en el momento del arranque, no excede del 50% (aprox.) del par nominal.

## 8.4 ARRANQUE CON RESISTENCIAS EN SERIE

Este sistema consiste en intercalar cierto valor de resistencia  $R$  entre la línea de alimentación y las terminales del motor durante el período de arranque. Una vez que el motor alcanza su velocidad nominal, la resistencia adicional de cada fase se saca de operación del circuito mediante puentes.

La caída de tensión en las resistencias  $R$  hace que la tensión en las terminales del motor se reduzca usualmente en un 20% aprox., lo que provoca que el motor arranque a un 80% del voltaje de la red. Como la corriente de arranque varía proporcionalmente a la tensión, la misma se reducirá al 80% del valor normal y el par de arranque al 64% del valor normal.

Las resistencias deben estar dimensionadas para disipar una cantidad importante de energía durante el arranque, lo que en algunos casos las hacen comparativamente costosas.

La figura 46 muestra éste sistema de arranque:

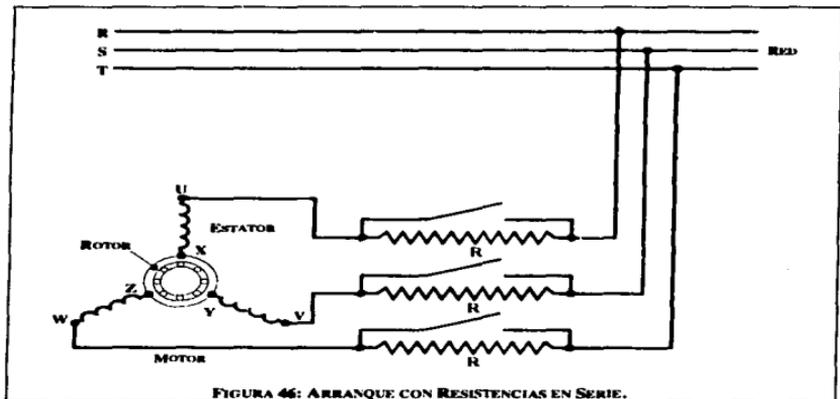


FIGURA 46: ARRANQUE CON RESISTENCIAS EN SERIE.

### 8.5 ARRANQUE CON REACTANCIAS EN SERIE

Este procedimiento es similar al anterior (arranque con resistencias en serie) sólo que se sustituyen las resistencias por reactores  $X$  (o bobinas de conductor de cobre arrolladas sobre un núcleo de hierro).

Con éste método es posible reducir el voltaje de entrada al motor en la misma proporción que con el método de resistencias, pero con menor disipación de calor.

Su diagrama de conexión se muestra a continuación (Fig. 47):

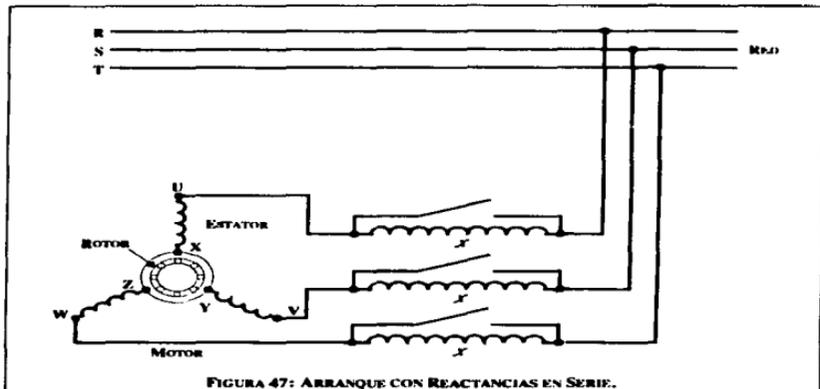


FIGURA 47: ARRANQUE CON REACTANCIAS EN SERIE.

Su desventaja radica en el hecho de que se dificulta el eliminar la reactancia adicional por pasos, como en el caso de la resistencia, lo que hace que se le utilice menos frecuentemente, aunque en ocasiones puede resultar una alternativa más económica.

Los porcentajes de reducción son los mismos que en el método de resistencias en serie.

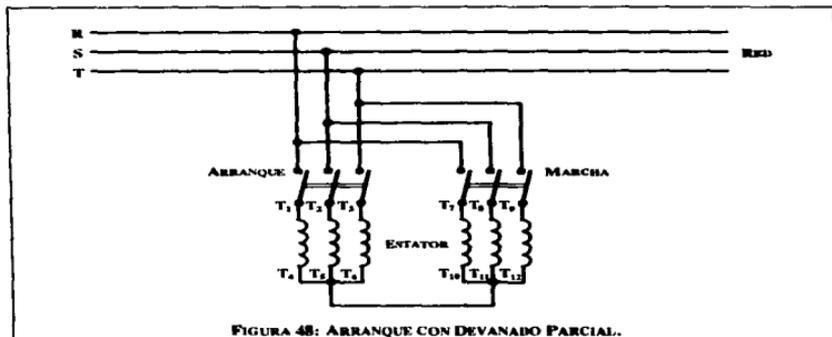
Como la corriente de arranque del motor está sumamente atrasada respecto a la tensión (debido a la conexión de los reactores), el valor de las reactancias será mucho más bajo que en el caso de las resistencias para obtener la misma caída de voltaje.

### 8.6 ARRANQUE CON DEVANADO PARCIAL.

La condición necesaria para utilizar éste procedimiento es que el motor (polifásico de inducción jaula de ardilla) esté construído con devanados parciales, es decir, con dos devanados de fase idénticos (cada uno de ellos produce el mismo número de polos y el mismo campo magnético giratorio).

La ventaja de esta construcción de devanados es que pueden conectarse en serie para sistemas de alto voltaje o en paralelo para los sistemas de menor voltaje.

En la figura 48 se muestra la disposición de las conexiones para el arranque de un motor de inducción jaula de ardilla con devanados parciales de 220/440V, para emplearse con una tensión de red de 220V:



En el esquema (48) vemos que ambas partes del devanado estático están conectadas en estrella. En el arranque sólo una parte es empleada. Se simula con dos interruptores el tipo de arrancador que se emplea con éste tipo de motores.

El motor se pone en marcha con la mitad de sus devanados (conectado en estrella), cuando el motor alcanza cierta velocidad, el segundo devanado se conecta en paralelo.

La ventaja de estos devanados es que la resistencia y la reactancia de la parte del devanado empleado en el arranque, son el doble comparativamente a cuando se conectan en paralelo ambas partes del devanado estático (una vez que el motor alcanza cierta velocidad).

Al utilizar este método se recomienda que el motor arranque bajo condiciones de carga ligera o sin carga.

CAPÍTULO IX



*"Características de los Rodamientos"*



### CARACTERÍSTICAS DE LOS RODAMIENTOS

Los cojinetes del tipo rodamiento funciona bajo el principio del contacto rotatorio entre cuerpos circulares elásticos. La resistencia de ésta acción rotatoria es muy baja, es decir que tiene muy baja fricción.

Los cojinetes antifricción (rodamientos) individuales pueden soportar, al mismo tiempo, cargas radiales y de empuje en grado variable.

Sólo requieren pequeñas cantidades de grasa lubricante y son relativamente insensibles a los cambios de viscosidad de la misma.

Los rodamientos son lubricados con grasa, a excepción de los utilizados en motores de alta velocidad (pues a alta velocidad los elementos rotatorios gelatinizan y expulsan la grasa lubricante).

Los rodamientos son construídos con piezas rotatorias de precisión y como tales, son sensibles a la vibración, ajuste incorrecto, corrosión y suciedad abrasiva.

Si estos están bien instalados, requieren de un mantenimiento mínimo, su desgaste es muy lento y su duración quedará determinada por la resistencia a la fatiga de sus materiales la cual disminuye si se incrementa la carga o la velocidad de la máquina. A altas velocidades producen ruido debido a la fricción del aire y la acción rotatoria, lo que los pone en desventaja frente a las chumaceras (o cojinetes de resbalamiento).

Se fabrican en distintos grados de precisión y para duraciones determinadas. Deben tener cierta holgura interna para su funcionamiento correcto.

Existen en dos formas básicas:

- Rodamientos de bolas (o baleros).
- Rodamientos de rodillos.

De igual forma cada uno de estos tipos se subdivide en diversos diseños que dependen de la velocidad a la que deberán trabajar, temperatura de funcionamiento y clase de cargas que deberán soportar.

Las partes básicas de un rodamiento son: pista interna, elementos rodantes, jaula y pista externa y se muestran en la figura 49:

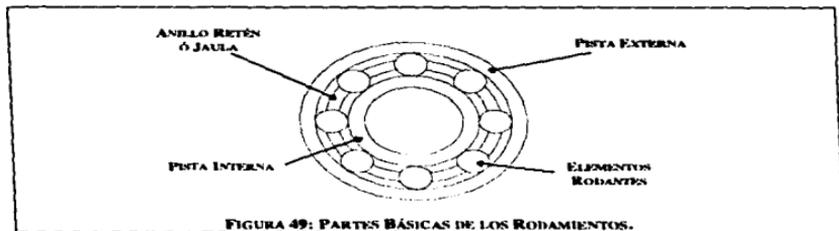


FIGURA 49: PARTES BÁSICAS DE LOS RODAMIENTOS.

Antes de comenzar a describir los distintos tipos de rodamientos de bolas y de rodillos es necesario definir los tipos de esfuerzo a los que están sometidos éstos.

**Carga axial:** Es la fuerza que se aplica al rodamiento en dirección paralela al eje o flecha del motor.

**Carga radial:** Es la fuerza que se aplica al rodamiento en dirección perpendicular al eje o flecha del motor.

A continuación se detallan los tipos de rodamientos que existen de acuerdo a las formas básicas mencionadas anteriormente:

### **9.1 RODAMIENTOS DE BOLAS**

Los hay en 3 tipos:

- 1.- *Rodamiento de bolas con ranuras radiales profundas.*
- 2.- *Rodamiento de bolas del tipo máximo.*
- 3.- *Rodamiento de bolas de contacto angular.*

#### ***Rodamiento de bolas con ranuras radiales profundas***

Es el tipo de más empleo general, está diseñado para soportar no sólo cargas radiales sino también para soportar cargas de empuje moderadas en cualquier sentido, simultáneas o independientes de la carga radial. Cuando el motor se monta verticalmente con el eje hacia arriba o hacia abajo sólo se permiten pequeñas cargas externas de empuje que debe ser menor al peso del rotor del motor.

Estos rodamientos se encuentran disponibles con 3 alojamientos básicos:

- a) *Abierto.*
- b) *Sellado.*
- c) *Doble blindaje.*

#### ***a) Rodamiento con alojamiento abierto***

Consta de una pista interna, una externa, anillo de retén de las bolas o jaula y los elementos rodantes (bolas). Puede ser lubricado sin desarmar el motor, pero ofrece poca protección contra la entrada de cuerpos extraños como polvo y suciedad o exceso de grasa que en combinación con los abrasivos puede llegar a afectar su vida nominal.

La rotación de las bolas y la jaula baten la grasa del depósito lo que provocará su degradación.

#### ***b) Rodamiento con alojamiento sellado***

Son del mismo tamaño y capacidad de carga que los abiertos y pueden ser de dimensiones exactamente iguales que estos aunque pueden llegar a tener una pista 1.5 veces más ancha que los

mismos. Esta última se requiere para instalar los sellos y establecer un depósito para la grasa. Debe ser lubricado antes de ser instalado en el motor y no puede ser lubricado de nuevo a menos que sea desarmado el motor y se quiten los sellos.

Los rodamientos estrechos no pueden volverse a lubricar ni empacar pues no pueden ser reemplazados los sellos. Se limita su aplicación a velocidades hasta de 1,800 rpm.

Se deben considerar los siguientes puntos para su utilización:

- No hay grasa en el exterior del rodamiento y su superficie queda sin protección contra los vapores contaminantes de la atmósfera.
- La cantidad de grasa en estos rodamientos es mucho menor que en otros tipos lo que hace que se deteriore con mayor rapidez cuando la grasa es atacada al entrar en contacto con vapores contaminantes de la atmósfera de trabajo.
- Su duración útil (sin volver a lubricar) está limitada a la cantidad y calidad de la grasa empleada. Lo que hace que deban lubricarse periódicamente.
- Su costo de reposición es alrededor de un 40% más alto que los abiertos, y 35% más que los blindados (de tamaños iguales).

#### *c) Rodamiento con blindaje doble*

Son del tipo abierto, con blindaje o cubierta laminar en la pista externa de cada lado. Posee una holgura muy pequeña en la pista interna lo que permite el paso de la grasa y es suficiente para proteger al rodamiento de partículas grandes que pudieran penetrar durante su instalación o mantenimiento.

El blindaje doble hace mínimo el exceso de grasa y mantiene la grasa en las pistas cuando el motor es montado en posición vertical.

#### **Rodamiento de bolas del tipo máximo**

Soportan un 30% más de carga radial en relación a los *rodamientos de ranura profunda radial* pero no soportan cargas de empuje o axiales, se construyen de igual forma que estos, excepto que poseen una muesca en las pistas interna y externa para poder poner más cantidad de bolas y lograr con ésto un soporte mayor de carga radial.

#### **Rodamiento de bolas de contacto angular**

Soportan cargas de empuje elevadas pero en un solo sentido. Son utilizados cuando la carga de empuje sobre un rodamiento de ranura profunda radial es demasiado grande.

El esfuerzo axial lo soportan los rebordes anchos ubicados tanto en la pista externa como interna en ambos lados del rodamiento.

Cuando la carga axial es en ambos sentidos se acostumbra montar dos rodamientos espalda con espalda por la facilidad de montaje y la rigidez angular que proveen.

A continuación se muestra una tabla comparativa que contiene las principales características de los rodamientos de bolas en sus distintas modalidades:

CARACTERÍSTICA	ROD. DE HILERA SENCILLA TIPO CONRAD	ROD. DE HILERA SENCILLA MÁXIMA CAPACIDAD	ROD. DE HILERA SENCILLA ANCHO DOBLE	ROD. DE DOBLE HILERA	ROD. AUTO ALINANTES	ROD. DE CONTACTO ANGULAR
<i>Capacidad de carga radial</i>	Buena	Excelente	Buena	Excelente	Aceptable	Buena
<i>Capacidad de carga axial (empuje)</i>	Aceptable	Aceptable	Buena	Buena	Deficiente	Excelente
<i>Capacidad de carga combinada</i>	Buena	Aceptable	Buena	Buena	Buena	Excelente
<i>Vida útil</i>	Aceptable	Buena	Excelente	Excelente	Aceptable	Excelente
<i>Velocidad de operación</i>	Excelente	Buena	Buena	Aceptable	Aceptable	Excelente
<i>Compensación de posible desalineación</i>	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Excelente	Deficiente
<i>Capacidad de grasa</i>	Aceptable	Aceptable	Excelente	Buena	Buena	Aceptable
<i>Hermeticidad</i>	Excelente	Aceptable	Excelente	Buena	Deficiente	Deficiente

TABLA 7: CARACTERÍSTICAS DE LOS RODAMIENTOS DE BOLA.

## 9.2 RODAMIENTOS DE RODILLOS

Los hay en 4 tipos:

- 1.- *Rodamiento de rodillos cilíndricos.*
- 2.- *Rodamiento de rodillos esféricos de doble hilera.*
- 3.- *Rodamiento de empuje de rodillos esféricos.*
- 4.- *Rodamiento de rodillos de contacto angular con pista interna dividida.*

### *Rodamiento de rodillos cilíndricos*

Se emplean cuando el esfuerzo radial es tal que supera la capacidad de los rodamientos de bolas como en la transmisión por bandas.

Debe poder soportar hasta 186% más carga radial que los rodamientos de bolas aunque tiene algunas limitaciones sobre éstos como puede ser la velocidad de funcionamiento que son mucho menores debido al ruido y al calor por fricción.

El rodamiento de rodillos cilíndricos no puede soportar cargas axiales y suele utilizarse en el extremo de la flecha que sirve para el acoplamiento de carga, siempre y cuando en el extremo

opuesto sea instalado un rodamiento de bolas que absorba las cargas axiales o de empuje. Debe limitarse el movimiento axial de la pista interna de modo que esta no se desprenda de la pista externa.

La velocidad máxima recomendada para los rodamientos de rodillos cilíndricos es: 1,800 rpm lubricados con aceite y 1,200 rpm lubricados con grasa.

#### ***Rodamiento de rodillos esféricos de doble hilera***

Pueden soportar cargas radiales elevadas, alrededor de 400% más carga que un rodamiento de bolas del mismo tamaño. Puede soportar cargas de empuje en cualquier sentido contrario al rodamiento de rodillos cilíndricos.

Este rodamiento es de **autoalineación**. La anchura de pistas es 1.5 veces mayor que la de un rodamiento de bolas de iguales dimensiones.

La velocidad de operación del rodamiento de rodillos esféricos de doble hilera está limitada a 720 rpm lubricado con grasa (debido al ruido y calor por fricción producido con cargas pesadas).

#### ***Rodamiento de empuje de rodillos esféricos***

Se utiliza cuando las cargas de empuje son demasiado elevadas y quedan fuera del alcance de los rodamientos de rodillos de contacto angular. Este rodamiento es de **autoalineación** y sólo soporta cargas de empuje en un solo sentido. Debe ser lubricado con aceite y requieren de enfriamiento forzado externo (como circulación de agua a través de un serpentín sumergido en el depósito de aceite).

Se acostumbra colocar el rodamiento de empuje en el extremo superior de los motores verticales y para mantener el eje del rotor centrado con respecto al estator se coloca un rodamiento de gufa.

#### ***Rodamiento de rodillos de contacto angular con pista interna dividida***

Se emplean cuando no se desea utilizar piezas adicionales de gufa para fijar el rodamiento.

Está diseñado para soportar cargas radiales y de empuje y puede ser fijado el rodamiento para controlar las fuerzas de empuje ascendentes y descendentes.

A continuación se muestra una tabla comparativa que contiene las principales características de los rodamientos de rodillos en sus distintas modalidades:

CARACTERÍSTICAS	ROD. CÓNICO	ROD. ESFÉRICO	ROD. CILÍNDRICO	ROD. DE CONT. ANGULAR
<i>Capacidad de carga radial</i>	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
<i>Capacidad de carga axial (empuje)</i>	Buena	Aceptable	Deficiente	Deficiente
<i>Capacidad de carga combinada</i>	Excelente	Aceptable	Deficiente	Deficiente
<i>Vida útil</i>	Excelente	Buena	Excelente	Buena
<i>Velocidad de operación</i>	Buena	Aceptable	Buena	Aceptable
<i>Compensación de desalineación</i>	Aceptable	Excelente	Aceptable	Deficiente
<i>Capacidad de grasa</i>	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
<i>Hermeticidad</i>	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Deficiente

TABLA 8: CARACTERÍSTICAS DE LOS RODAMIENTOS DE RODILLAS.

### 9.3 IDENTIFICACIÓN Y ESPECIFICACIONES DE LOS RODAMIENTOS

La AFBMA (*Anti-Friction Bearings Manufacturers Association*) ha establecido reglas para la nomenclatura y las normas relativas a los rodamientos.

Ha normalizado diámetros internos y externos, anchura, tolerancias, capacidades de carga, así como una nomenclatura universal para los mismos.

#### SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE LA AFBMA

Se trata de un sistema de identificación alfanumérico y para explicarlo se muestra un ejemplo de rodamiento:

**60 BN 03 J2**

- 1) *Los primeros dos números* (60 en este caso), indican el diámetro interior del rodamiento en milímetros.
- 2) *Las dos letras siguientes* (BN en este caso), indican el tipo de rodamiento del que se trata conforme a las siguientes claves:

- BC: Rodamiento de bolas y una sola hilera.
- RN: Rodamiento de rodillos.

• **BN:** Rodamiento de contacto angular.

3) Los dos números siguientes (03 para este caso), indican que el rodamiento tiene el diámetro exterior de 130 milímetros, y anchura de 31 milímetros.

4) La letra que sigue (J en este caso), indica el material del cual está hecha la jaula o retén portabolas.

- **J:** Acero.
- **M:** Bronce.

5) El último número (2 en este ejemplo), indica el claro u holgura conforme a la escala siguiente:

- **C1**
- **C2**
- **C0:** *Holgura normal.*
- **C3**
- **C4**
- **C5**

Siendo **C0** la holgura normal (escala de referencia), las escalas anteriores a ella son de un valor menor y las posteriores a ella son de un valor mayor.

Los valores correspondientes a cada una de éstas escalas vienen especificados en los catálogos de los fabricantes, los cuales proporcionan mayores detalles acerca de sus productos.

#### 9.4 LUBRICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS

Es importante tener conocimiento acerca del tipo de lubricante necesario para procurar que los rodamientos cumplan con su función de manera eficiente y tengan la vida nominal para lo cual fueron proyectados (o incluso superarla).

Se tienen dos tipos básicos de lubricantes empleados en los rodamientos, estos son: **aceite y grasa**.

Cada uno de estos lubricantes varían de acuerdo a su grado de viscosidad, penetración, resistencia a los cambios de temperatura, resistencia a temperaturas elevadas, etc.

#### LUBRICACIÓN CON ACEITE

Se emplean aceites minerales a base de petróleo (éstos son mezclados con aditivos que mejoran sus propiedades).

La viscosidad del aceite variará de acuerdo con el diseño, velocidad, carga y temperatura de funcionamiento de los cojinetes.

La lubricación de rodamientos se realiza mediante el baño de aceite, este método es empleado en la lubricación de rodamientos de bolas, de rodillos, de empuje y chumaceras (cojinetes lisos o de resbalamiento).

El aceite de un motor se debe revisar cada de 3 a 6 meses para tener la seguridad de que los cojinetes reciben el suministro adecuado del aceite especificado y libre de contaminantes (esta revisión variará en su frecuencia de acuerdo a las condiciones de trabajo de la motor).

La inspección del color del aceite es un buen indicador de la necesidad de reemplazar el aceite sucio, por aceite nuevo.

### LUBRICACIÓN CON GRASA

Aunque los rodamientos de bolas y rodillos pueden ser diseñados para ser lubricados con aceite o con grasa, ésta última es de empleo más frecuente en motores con potencias que van de 1Hp a 800Hp (por razones de costo, diseño y aplicación).

El empleo de grasa hace que se requiera de menor mantenimiento de la lubricación, impide la entrada de suciedad y humedad si los sellos del eje del motor están bien diseñados, es mínima la contaminación de los devanados y demás partes del motor.

La función de la grasa es proveer a los rodamientos del aceite contenido en la estructura gelatinosa de la misma.

Se requiere de una cantidad muy pequeña, que además de servir como lubricante, debe también evitar la herrumbre, proteger contra la mugre y con esto reducir al mínimo el mantenimiento.

Las grasas usadas para lubricación de los motores eléctricos están hechos a base de aceites de petróleo o sintéticos (espesados con alrededor de 8 a 15% de agentes aditivos).

Propiedades de la grasa:

a) *Tipo de aceite:* En aprox. el 95% de las grasas para motores se emplean aceites de petróleo de viscosidad SAE 20 o 30.

Los aceites con valores más altos de viscosidad son deseables por su baja evaporación y larga duración (además permiten libre funcionamiento a 29°C).

Aceites con viscosidad más baja pueden ser utilizados con el sacrificio de duración.

Se emplean viscosidades un poco más altas para grasas que van a utilizarse a temperaturas entre 95°C y 120°C.

A temperaturas extremas, son empleadas grasas sintéticas.

b) *Tipo de espesador o base:* Se acostumbra utilizar como base o espesador las grasas de jabón y en especial las grasas de jabón de litio.

Las grasas con base de poliurea son utilizadas por su buena estabilidad a altas temperaturas.

Ambas tienen buena resistencia al agua, a altas y bajas temperaturas, buena estabilidad mecánica, y contra la oxidación.

c) *Temperaturas extremas:* Las grasas que contienen aceites sintéticos dan un excelente servicio a temperaturas que oscilan alrededor de los  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $120^{\circ}\text{C}$ .

Las grasas sintéticas de los tipos de diéster y de diéster de siliconas se emplean para temperaturas hasta de  $-73^{\circ}\text{C}$ .

Las grasas de siliconas son útiles para servicio prolongado hasta de  $150^{\circ}\text{C}$ , también pueden ser usadas para temperaturas alrededor de  $-35^{\circ}\text{C}$ .

Algunas grasas siliconas que contienen agentes gelatinizadores orgánicos de alto punto de fusión (que no son jabones) pueden utilizarse en aplicaciones donde la temperatura llega a  $232^{\circ}\text{C}$  durante periodos cortos (aún están en pruebas).

d) *Consistencia:* Casi la totalidad de las grasas para motores eléctricos son del grado 2 de NLGI (*National Lubricating Grease Institute*).

Estas grasas tienen suficiente rigidez para que haya mínimos problemas con el batido, asentamiento, escape; sin embargo son lo suficientemente blandas para llegar fácilmente a las piezas rodantes de un rodamiento.

e) *Separación del aceite y evaporación:* La pérdida de aceite del cuerpo de la grasa por separación y evaporación debe ser baja en toda la duración útil del rodamiento.

Cuando una grasa ha perdido alrededor de la mitad de su contenido inicial de aceite, ya no puede lubricar al rodamiento de forma correcta y se producirá una falla.

f) *Oxidación:* La oxidación de la grasa por la reacción con el aire es uno de los principales factores de degradación que limitan la duración útil de las grasas para cojinetes. La oxidación del aceite de la grasa produce secamiento y endurecimiento (hace que se pierda la estructura gelatinosa). Para evitar esto, se le adicionan a las grasas inhibidores de oxidación para lograr la máxima duración de la misma.

g) *Compatibilidad:* Antes de mezclar distintos tipos de grasa sobre el rodamiento hay que verificar que éstas no contengan distintos tipos de jabones que al mezclarlos pudieran alterar la estabilidad de la grasa.

En conclusión, la determinación del tipo de grasa idónea para lubricar determinado tipo de rodamiento se debe tomar en base a la consulta de las recomendaciones del fabricante (tanto de los rodamientos como del motor) así como los proveedores de lubricantes para condiciones de operación determinadas.

## 9.5 DURACIÓN DE LOS RODAMIENTOS

La duración de un rodamiento sea de bolas o de rodillos, queda comprendida por el número de horas de funcionamiento que transcurrirá antes de que aparezca la primera señal perceptible de falla. Cuando se especifica la duración mínima de los cojinetes, tal duración puede llegar a ser mayor que la promedio esperada para los devanados del estator, por lo que sería innecesario e

inevitable el exigir una mayor duración del rodamiento cuando otros componentes del motor tendrán una duración más corta.

La lubricación es un factor de gran importancia en la duración de un rodamiento.

Los factores que influyen en la duración o vida útil de los rodamientos son:

- 1.- La velocidad de rotación a la que va a trabajar un rodamiento. En los catálogos del fabricante se especifica la velocidad máxima de operación de un rodamiento. Este factor se hace más crítico a medida que aumenta el diámetro interior del cojinete.
- 2.- Las cargas axial y radial que deberá soportar el rodamiento. *La duración es inversamente proporcional al cubo de la carga.*
- 3.- La vibración del conjunto motor-carga impulsada puede acortar notablemente la duración de los rodamientos. Debido a esto las cimentaciones, bases, nivelación y acoplamiento de los motores deben ser hechas lo más precisas posibles para reducir al máximo las vibraciones producidas con el motor en marcha.
- 4.- Los ajustes, tanto en el montaje del rodamiento sobre la flecha del motor como en su alojamiento en la tapa lateral del motor, deben hacerse con precaución siguiendo las recomendaciones del fabricante (para evitar una reducción de la holgura interna).
- 5.- El medio ambiente donde operará el motor ejerce influencia en la duración de los rodamientos, de tal forma que deben protegerse hasta donde sea posible de la penetración de contaminantes en los rodamientos.
- 6.- La temperatura de operación del motor también es de repercusiones en la vida útil del rodamiento, pues si el motor trabaja con sobrecarga o está expuesto a una temperatura ambiental excesiva, aparte de que las partes eléctricas del motor (devanados) sufrirán las consecuencias, los rodamientos también resultarán afectados al verse atacada su grasa lubricante, lo que resultará en la disminución de la duración de los mismos.

Considerando los factores descritos se podrá tener una idea de las medidas a tomar para la operación óptima de los rodamientos y se logre la máxima duración de los mismos.

## 9.6 CRITERIOS DE SELECCIÓN

En muchas aplicaciones los distintos tipos de cojinetes: *antifricción o de rodamiento (de bolas o de rodillos)* y los *lisos o de resbalamiento (chumaceras)* pueden cumplir por igual con los requerimientos.

La selección adecuada de los cojinetes debe estar fundamentada en el conocimiento de las ventajas que ofrece cada uno de los tipos existentes, además del costo tanto de la unidad como de su mantenimiento.

Con el fin de tomar una decisión acertada en la elección del cojinete idóneo para la aplicación que se le vaya a dar, se describen a continuación las ventajas de cada tipo:

### ***Cojinetes de Rodamiento (de bolas)***

#### **Ventajas:**

- 1.- Baja fricción especialmente en el arranque.
- 2.- Alta capacidad de carga (especialmente las cargas de empuje).
- 3.- Estandarización completa. Se encuentran disponibles en cualquier parte del mundo en los comercios del ramo. Son intercambiables por los de otro fabricante (en cuanto a su tamaño y capacidad).

Un cojinete que se puede lubricar no se debe emplear en la cubierta de cojinetes lubricados de fábrica, ni uno que tenga holgura interna reducida se debe utilizar en aplicaciones con holguras amplias.

4.- La falla del cojinete no suele dañar la flecha del motor.

5.- La lubricación con grasa es más sencilla y limpia que con aceite, además se puede utilizar en motores con montajes en los muros, techos o verticales.

El uso de cojinetes sellados lubricados de fábrica ayuda a reducir las inspecciones periódicas de mantenimiento.

6.- La pérdida o deterioro del lubricante disminuirá la duración del cojinete, pero no producirá una falla inmediata.

7.- Hay cojinetes de bolas disponibles, con estabilización térmica, para empleo en temperaturas ambiente superiores a 100°C. Para estas aplicaciones se utilizan grasas con base de siliconas.

8.- Los cojinetes de bolas se pueden fijar en su lugar para que sólo haya el juego longitudinal muy pequeño del eje requerido para impulsos con acoplamiento cerrado o cuando se conectan otros componentes, como bombas e impulsores, en forma directa en la extensión del eje.

### ***Cojinetes Lisos o de Resbalamiento (chumaceras)***

#### **Ventajas:**

1.- Funcionamiento silencioso. En algunas aplicaciones ésta característica es de máxima importancia.

2.- El sistema tiene relativa insensibilidad a cantidades pequeñas de polvo y mugre, y al exceso de lubricación.

3.- Cuando tienen la lubricación correcta, se puede esperar una duración larga indefinida.

4.- Cuando las chumaceras están demasiado gastadas, se pueden volver a "enmetalar" a bajo costo y ponerlas de nuevo en servicio.

5.- Algunas chumaceras pueden ser del tipo dividido, para permitir su inspección, desmontaje e instalación sin quitar las tapas de extremo del motor ni alterar la alineación del acoplamiento.

### ***Consideraciones Generales***

La temperatura de los cojinetes de bolas y chumaceras estándar no deben exceder de 85°C. Esta se puede verificar con la ayuda de un termómetro sobre la cubierta del cojinete.

Cuando la temperatura ambiente del lugar donde opera un motor con rodamientos de bolas excede de los 40°C o 50°C, se debe consultar con el fabricante para que este recomiende cojinetes para alta temperatura que soportan hasta 125°C. Las grasas evidentemente deberán ser especiales para este tipo de cojinetes por lo que también se deberá consultar al respecto.

Las chumaceras no están destinadas para funcionar a temperaturas ambiente superiores a 40°C. Para condiciones fuera de éste límite se deberá consultar al fabricante.

Los motores grandes que deben trabajar a la intemperie y que están sujetos a temperaturas de congelación, en ocasiones son equipados con calentadores pequeños en el depósito del lubricante para impedir que el aceite se congele y reducir el desgaste de los cojinetes.

Los cojinetes de empuje de rodillos esféricos y los cojinetes con zapatas inclinadas requieren en ocasiones (a 1,800 rpm) de enfriamiento por circulación de agua a través de serpentines ubicados en su recipiente del aceite.

En resumen, la consideración de todos estos factores aunado a los costos llevará a la elección del cojinete adecuado a nuestras necesidades.

CAPÍTULO X



*“Principales Averías en los Motores Trifásicos  
de Inducción Jaula de Ardilla”*



## **10.1 ORIGEN DE LAS AVERÍAS EN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN**

El origen de las averías principales de las que sufre un motor de inducción radica en alguno de los siguientes factores:

- 1.- Condiciones ambientales adversas.
- 2.- Selección o aplicación incorrectas.
- 3.- Instalación inadecuada.
- 4.- Desperfectos mecánicos.
- 5.- Fallas eléctricas.
- 6.- Desequilibrio de voltaje.
- 7.- Mantenimiento inapropiado.
- 8.- La combinación de dos o más de los factores anteriores.

### **10.1.1 CONDICIONES AMBIENTALES ADVERSAS**

Los motores deben funcionar dentro de la variación límite de temperatura indicada en su placa de datos, como ya se indicó en esta tesis, en la parte concerniente a los aislamientos, por cada 8°C de elevación de la temperatura de operación del motor por encima del valor nominal de temperatura, la duración de los aislamientos se reduce a la mitad (regla de **Montsinger**).

Además de cuidar del medio ambiente en el que operará la máquina también se deben localizar y reducir o eliminar otras fuentes posibles de aumento de temperatura, como son la desalineación, sobrecarga, voltaje incorrecto, etc.

### **10.1.2 SELECCIÓN O APLICACIÓN INCORRECTA DEL MOTOR**

Es esencial seleccionar el tamaño y tipo correctos de motor para la carga (en base a la información detallada por el fabricante y las normas). Hay varios factores que deben considerarse:

Un ciclo severo de trabajo puede causar fallas prematuras en el motor. La marcha irregular (a tirones), el frenado por inversión (o a contracorriente) y un prolongado tiempo de aceleración hacen que los motores trabajen a una velocidad más baja que la normal además de que absorben elevadas corrientes de arranque que provocan el calentamiento excesivo del mismo. Por la disminución de la velocidad, las condiciones de enfriamiento disminuyen lo que agrava el sobrecalentamiento.

La altura es también un factor importante a considerar pues a alturas elevadas la densidad del aire es menor y es menos eficaz para enfriar, debido a esto la temperatura de casi todos los motores aumente en alrededor de 5% por cada 300 m de altura por arriba de la altura de operación para la cual fue diseñado.

### 10.1.3 INSTALACIÓN INADECUADA

Una instalación mal proyectada y realizada puede ocasionar fallas en los motores por efecto de:

- 1) Vibración excesiva
- 2) Ruido
- 3) Corrientes Elevadas
- 4) Operación a altas temperaturas
- 5) Falla de baleros

Si los pernos de sujeción no son de la medida adecuada o no están bien apretados, puede ocurrir una desalineación y vibraciones que ocasionarán daños en los cojinetes y el eje de la flecha y en consecuencia de la pérdida del entrehierro, la quemadura de los devanados.

La cimentación, la placa de acero de fijación del motor y el lechado del hormigón deben ser de la suficiente resistencia para soportar los paros y arranques múltiples de las máquinas.

Los elementos de acoplamiento, bandas, poleas y cualquier otra conexión deben estar bien alineados para evitar la vibración excesiva.

Una instalación puede ser también incorrecta cuando no se han considerado los puntos concernientes a ésta en las normas **NEMA** y **NEC** para una instalación adecuada.

### 10.1.4 DESPERFECTOS MECÁNICOS

Una carga excesiva por periodos prolongados puede dañar rápidamente a un motor; en ocasiones se pudo haber elegido correctamente el motor para impulsar de terminada carga pero una variación en su magnitud o si el acoplamiento realizado entre ambas partes (motor-carga) no fue bien realizado pueden surgir esfuerzos de sobrecarga en el motor. Los cojinetes empezarán a fallar, en el caso de engranajes, estos pueden llegar a trabarse o en ambos casos la fricción aumenta, el motor consumirá más corriente y el mismo se sobrecalentará disminuyendo su vida útil.

Las fallas en los cojinetes son las más frecuentes en cualquier motor y aprox. el 50% de las quemaduras de motores se deben a cojinetes dañados. Debido a esto se debe prestar especial atención al mantenimiento y lubricación de los mismos.

La desalineación del acoplamiento entre motor y carga es otra causa de falla mecánica.

En función de todo lo descrito se puede decir que es de bastante importancia la alineación correcta de la máquina y de su carga para evitar todos estos problemas.

### **10.1.5 FALLAS ELÉCTRICAS**

Si el voltaje y la frecuencia de suministro no están dentro del límite usual permitido provocará averías en el motor.

Un bajo voltaje provoca que la corriente sea mayor a la normal. Una reducción considerable del voltaje provocará que la máquina se sobrecaliente.

Un voltaje elevado produce una disminución de pérdidas en el cobre pero hace que el flujo magnético sea más intenso saturando el núcleo con mayor rapidez, lo cual provoca mayores pérdidas en el hierro por calentamiento. El incremento reducido de voltaje trae como consecuencia una disminución del consumo de corriente, pero un incremento del 10% o más produce la saturación del hierro del núcleo y un incremento de las pérdidas considerable que trae como efecto el sobrecalentamiento del motor.

### **10.1.6 DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE**

Los voltajes trifásicos desequilibrados o desbalanceados producen una grave alteración de la corriente de entrada al motor provocando su sobrecalentamiento. Para evitar el efecto de este problema es conveniente instalar equipo de protección como los relevadores de sobrecarga.

Existe equipo de protección que permite proteger a los motores contra voltajes desequilibrados así como contra caídas de fases que son los casos extremos de desequilibrio de un sistema.

### **10.1.7 MANTENIMIENTO INAPROPIADO**

El mantenimiento preventivo evita o cuando menos retarda la posible falla de la máquina y sus elementos.

La falta de mantenimiento periódico trae como consecuencia que polvo, suciedad, conductos de ventilación obstruidos, corriente incorrecta, sobrecalentamiento, cojinetes ruidosos, humedad dentro y fuera del motor, acaben con la vida útil de los motores con gran rapidez.

Habrán ocasiones en las que no se requiera de éste, principalmente en aquellos casos en los que el costo comparativo entre su realización y la reparación de un motor suele ser más elevado.

Pero existe también el caso contrario en el que el motor forma parte de una instalación crítica o es parte de un proceso fundamental en una fábrica, el costo del motor es elevado o de difícil sustitución que justifique un buen programa de mantenimiento.

El mantenimiento adecuado provoca que los motores duren más, su funcionamiento no se vea afectado por fallas (lo que evita las interrupciones en la producción en el caso de una fábrica), y sus costos de operación sean más bajos.

## 10.2 DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y REPARACIÓN DE AVERÍAS

Una prueba muy eficaz para verificar el estado general de un motor consiste en ponerlo en funcionamiento sin carga acoplada poniendo atención en los siguientes puntos:

Observar que:

- 1) La velocidad sea la correcta.
- 2) No haya vibración excesiva.
- 3) El ruido del motor sea normal.
- 4) No haya calentamiento anormal.
- 5) La corriente no sea excesiva y que esté equilibrada en las tres fases.

Si el motor emite un ruido y la velocidad del motor es aproximada a la velocidad síncrona, pero se duda acerca del origen del mismo (si se debe al ruido de origen magnético o al provocado por el caudal de aire de enfriamiento en contacto con las aspas), puede desconectarse momentáneamente la alimentación eléctrica, con lo cual el ruido magnético cesa y deja percibir el ruido debido a las aspas del ventilador pues el motor seguirá girando prácticamente a la misma velocidad por efecto de la inercia del rotor.

Si la vibración del motor es excesiva al simple tacto, puede verificarse si es de origen magnético o mecánico de la misma forma descrita anteriormente. Si la vibración desaparece o disminuye notablemente al suspender la alimentación, el origen de la vibración está en el circuito magnético, su causa más probable: la conexión incorrecta de un grupo de bobinas o a un entrehierro no uniforme (rotor descentrado). Si esto último ocurre se puede llegar a apreciar en la superficie de las laminaciones tanto de rotor como de estator el desgaste producido por el rozamiento entre las partes.

Si el motor no presenta un cambio apreciable en el nivel de vibración, el problema es mecánico, por lo que se deberá considerar el equilibrio dinámico del elemento rotatorio (balanceo). Si se cambia el ventilador de un motor, este debe ser balanceado o equilibrado para no producir vibraciones.

Otro fuente interna de vibración del motor es la deformación del eje, holgura excesiva entre el eje y los rodamientos, acoplamientos descentrados.

El que un rotor de jaula de arrilla tenga barras dañadas o abiertas, también produce vibraciones (lo cual sería más notable al arrancar el motor y tendería a desaparecer a plena velocidad).

Una forma de verificar si existen fallas en el rotor de un motor, es alimentando a su estator con un voltaje monofásico reducido (entre dos de sus fases dejando la otra libre) colocando un amperímetro en el circuito, se hace girar el rotor lentamente de forma manual y si se aprecia una variación considerable en la lectura del amperímetro es señal de que las barras del mismo están abiertas o existe una unión defectuosa entre las barras y los anillos extremos de colector.

Si el motor es de carcasa tipo abierta se puede comprobar el calentamiento del devanado el cual no deberá ser excesivo después de trabajar cierto tiempo sin carga. Esta operación se hace con el motor desenergizado para evitar accidentes.

Si se trata de un motor de carcasa cerrada se puede apreciar el calentamiento de los devanados tocando la superficie de la carcasa.

Si los puntos anteriores parecen ser los adecuados se revisa la corriente que absorbe el motor sin carga.

La corriente magnetizante de un motor con respecto a la corriente a plena carga varía según la capacidad y el número de polos del mismo.

Es necesario que se revise si la corriente en todas las fases es la misma, de no ser así se debe revisar el devanado correspondiente a la fase en donde existe una mayor o menor corriente que la de las otras dos.

Los síntomas y las averías más frecuentes en los motores trifásicos se enlistan a continuación:

#### 1.- El motor no arranca.

Las posibles causas son:

- a) Fusible fundido.
- b) Cojinetes desgastados.
- c) Sobrecarga.
- d) Fase interrumpida.
- e) Bobina o grupo de bobinas con cortocircuito entre espiras.
- f) Barras de rotor flojas.
- g) Conexiones internas erróneas.
- h) Cojinetes trabados.
- i) Combinador defectuoso (inversor de sentido de giro).
- j) Arrollamiento con contacto a masa.

#### 2.- El motor no funciona correctamente.

Las posibles causas son:

- a) Fusible fundido.
- b) Cojinetes desgastados.
- c) Bobina con cortocircuito entre espiras.
- d) Fase con la polaridad invertida.
- e) Fase interrumpida.
- f) Conexión en paralelo interrumpida.
- g) Arrollamiento con contacto a masa.
- h) Barras de rotor flojas.
- i) Tensión o frecuencia incorrectas.

#### 3.- El motor gira despacio.

Las posibles causas son:

- a) Bobina o grupo de bobinas con cortocircuito entre espiras.
- b) Bobina o grupo de bobinas con la polaridad invertida.
- c) Cojinetes desgastados.
- d) Sobrecarga.
- e) Fase con la polaridad invertida.
- f) Barras de rotor flojas.

**4.- El motor se calienta excesivamente.**

Las posibles causas son:

- Sobrecarga.
- Cojinetes desgastados o ajustados con exceso.
- Bobina o grupo de bobinas con espiras en cortocircuito.
- Funcionamiento como monofásico.
- Barras de rotor flojas.

A continuación se detallan cada una de las causas posibles de avería y su reparación:

1.- **Fusible fundido:** Se quita cada fusible y se prueba con un multímetro (continuidad) o con una lámpara de prueba con el fin de verificar que el filamento del fusible está en buen estado, si la lámpara se enciende, el fusible está bien, si no enciende, es señal de que el fusible está fundido y se deberá sustituir.

Para evitar sacarlos del potafusibles se conectan ambos extremos de la lámpara de prueba sobre los extremos de cada uno de los fusibles, si al cerrar el interruptor de alimentación la lámpara se enciende es evidencia de que el fusible está abierto.

Cuando un fusible salta durante la operación del motor, la corriente de la fase respectiva se interrumpirá, éste seguirá girando, trabajando como un motor monofásico con parte de su devanado estático que deberá soportar toda la carga, aunque por poco tiempo pues la parte activa de la parte del devanado que está siendo alimentado se calienta intensamente y acaba por quemarse. Además el motor tendrá una marcha ruidosa y dificultades para impulsar la carga.

Para comprobar si se trata de éste problema, se debe detener el motor y volverlo a arrancar, si éste no lo hace es señal de que alguno de los fusibles está quemado.

2.- **Cojinetes desgastados:** Cuando los cojinetes están desgastados, el rotor roza contra el estator lo que produce ruido. Si el desgaste de los cojinetes es tal que el rotor descansa sobre el núcleo estático, la rotación del motor es imposible. Si el motor es pequeño tal que es posible mover su rotor con la mano, se podrá constatar esta anomalía moviendo la flecha hacia arriba y hacia abajo. Si este movimiento es posible, uno de los cojinetes está desgastado. Se debe desarmar el motor y revisar la superficie del núcleo de rotor y del estator para buscar posibles señales de roce lo que confirmará el desgaste del rodamiento y se procede a su sustitución.

Cuando el motor es grande, el estado de los cojinetes se comprueba mediante el uso de un calibrador de láminas, si sus rodamientos están en buenas condiciones el entrehierro entre estator y rotor deberá ser uniforme en cualquier parte de su periferia. Si existe alguna diferencia es señal de que algún rodamiento está en mal estado y se deberá reemplazar.

3.- **Sobrecarga:** Una forma de saber si un motor trabaja sobrecargado es quitando las bandas de acoplamiento del motor con la carga y tratar de hacer girar el árbol de acoplamiento de la carga con la mano. Si este no puede girar, se debe a que algún mecanismo está roto o sucio.

Otra forma consiste en conectar un amperímetro en cada línea de alimentación o emplear un amperímetro de gancho. Si la lectura del aparato es diferente a la nominal especificada en la placa

de datos del motor, el mismo está sobrecargado. Las corrientes que circulan por cada una de las fases deben ser aproximadamente iguales entre sí y próximas al valor de placa.

Si la lectura de corriente en una fase es excesivamente elevada y distinta de las otras dos, es señal de que existen espiras en cortocircuito en esta fase.

**4.- Fase interrumpida:** Si se produce una falla en un arrollamiento mientras el motor se encuentra en marcha, éste seguirá trabajando, aunque desarrollará menos potencia; si se suscita mientras el motor se encuentra parado, no será posible volverlo a arrancar. La interrupción puede estar localizada en una bobina o en la conexión entre dos grupos de bobinas. Puede ser ocasionada por la ruptura del conductor o por algún contacto flojo en una conexión.

Si la interrupción está ubicada en una bobina, debe ser cambiada por otra nueva. Si no se tiene a disposición la bobina, el problema puede ser solucionado dejando fuera de servicio la bobina dañada punteando las terminales. Esta reparación es sólo provisional y es practicable cuando el rebobinado es imposible. No puede usarse cuando las bobinas están estructuradas por grupos.

Los efectos de una fase interrumpida sobre la marcha o el arranque del motor son completamente análogos a los de un fusible fundido.

**5.- Bobina o grupo de bobinas con espiras en cortocircuito:** Los cortocircuitos entre espiras provocan marcha ruidosa del motor y el desprendimiento de humo. Una vez localizadas las bobinas defectuosas ya sea por inspección visual o midiendo la corriente absorbida por cada fase, se sustituyen por otras nuevas o se dejan fuera de servicio.

Cuando el esmalte aislante que protege a los conductores se desquebraja, pone en contacto directo a varias bobinas y la bobina afectada se calienta demasiado hasta que termina por quemarse. Por este motivo pueden quemarse otras bobinas, con lo que un grupo entero de éstas o incluso una fase completa pueden resultar dañadas.

Las bobinas con cortocircuitos se dejan fuera de servicio de forma distinta a las bobinas interrumpidas. Primero se localiza la bobina dañada con la ayuda de una bobina exploradora o de forma visual pues el aspecto y el olor permiten descubrir casi siempre el punto quemado. Luego se secciona de manera íntegra la bobina por la cabeza opuesta a las conexiones y se retuercen a cada lado los hilos cortados sobre sí mismos. Antes de ser retorcidos es preciso asegurarse de que estén libres de aislamiento para que pueda haber continuidad. Se aplica el mismo método para bobinas elaboradas por grupos. Cuando se ha quemado un grupo completo de bobinas es necesario cambiar todo el devanado del motor.

**6.- Barras de rotor flojas:** Provocan un funcionamiento ruidoso del motor, una pérdida de potencia del mismo y la producción de chispas entre las barras y los aros de cortocircuito de la jaula de ardilla (mediante éstos aros, que son de cobre, se ponen en cortocircuito las barras del rotor por ambos extremos). Si alguna o varias de estas barras se aflojan y dejan de hacer buen contacto con los aros, el motor funciona con irregularidades o puede incluso no funcionar.

La localización de las barras flojas puede hacerse a simple vista o utilizando una bobina de prueba. Cada vez que pasa una barra se notará una vibración de la hoja de sierra o zumbador, de

no ser así, la barra no hace contacto con uno de los aros. El remedio consiste en volver a soldar todas las barras flojas.

Estas observaciones no son aplicables a los rotores de aluminio los cuales han sido fundidos en una sola pieza tanto barras como aros.

**7.- Conexiones internas erróneas:** Un sistema efectivo para saber si las conexiones internas de un motor polifásico son las correctas, es colocar una bola de rodamiento de gran tamaño en el interior del estator y cerrar el interruptor de alimentación del devanado estático. Si las conexiones internas son correctas, la bola girará en el interior del estator; si las conexiones internas son erróneas, la bola permanecerá en reposo.

Cuando el motor es de un tamaño mediano o grande, es conveniente utilizar una tensión de alimentación reducida a fin de evitar que un fusible pueda fundirse.

**8.- Cojinetes trabados:** Cuando la parte de eje que gira dentro de un cojinete (liso o de resbalamiento) está falta de lubricación, el eje se calienta intensamente y se dilata hasta el punto de quedar inmovilizado en el cojinete.

En muchos casos el propio cojinete se funde y queda soldado con el eje, haciendo con ello imposible el movimiento de éste. Cuando ocurre esto, se dice que los cojinetes están trabados o agarrados.

Para verificar la falla se deben desmontar ambos escudos del motor; el que cueste más trabajo de sacar será el que tenga el cojinete defectuoso. Se desmonta ese escudo junto con el rotor manteniéndose éste último en posición fija y se hace girar el escudo hacia adelante y hacia atrás.

Si este procedimiento no es posible de realizar, se afloja el tornillo que mantiene al cojinete en su alojamiento y se prueba la extracción conjunta de rotor y cojinete, teniendo la precaución de no arrastrar el anillo de engrase. El cojinete podrá ser separado del eje con la ayuda de un martillo posteriormente.

Es probable que después se tenga que torneear el eje a un diámetro algo menor y adaptarle otro cojinete.

Si el cojinete es de bolas o de rodillos se sustituye por uno nuevo.

**9.- Cambiador defectuoso:** Un cambiador es un dispositivo que permite la inversión de sentido de giro de un motor trifásico. Esta operación la realiza mediante elementos mecánicos giratorios que realizan la inversión de dos fases del motor cambiando la secuencia del mismo provocando la inversión del sentido de flujo de la corriente y consecuentemente el sentido de giro del motor.

Al ser un dispositivo que posee elementos móviles como resortes, láminas de contacto, etc., es posible que un desajuste de los mismos, la suciedad acumulada en los contactos, la ruptura de alguna conexión o la falta de lubricación de las partes provoquen que los elementos de contacto no realicen adecuadamente su función, es decir que los contactos del cambiador no cierran bien, por lo que el motor no puede arrancar al no recibir la alimentación adecuada.

La detección de esta anomalía se realiza mediante el chequeo de continuidad entre la red de alimentación y el motor, en virtud de que el cambiador se ubica inmediatamente antes de la entrada de la alimentación al motor, si existe alguna discontinuidad entre la fuente y el motor, la

falla radicará en el cambiador y la solución a esta anomalía se dará desmontando el mismo y revisando sus partes móviles internas que se encuentren en buen estado, que estén lubricados los bujes donde asienta el árbol, que las láminas de contacto están limpias y sin desgaste excesivo, y que sus conexiones estén correctamente unidas. Si alguna de las partes presenta un desgaste excesivo y es posible su reemplazo se deberá realizar, si ésto no es posible porque la pieza no producida por el fabricante del equipo (como refacción), se tendrá que proceder al reemplazo de la unidad completa.

10.- **Arrollamiento con contacto a masa:** Este problema es notorio por la sacudida que se recibe al torcer cualquier parte mecánica del motor mientras se encuentra conectado. Si los contactos a masa son más de uno, se produce un cortocircuito, el cual quema el devanado o eventualmente provoca la apertura de un fusible.

La presencia de ésta avería se detecta con la ayuda de una lámpara de prueba. La reparación se efectúa rebobinando el devanado entero o también reemplazando la bobina defectuosa.

11.- **Fase con la polaridad invertida:** Esta anomalía es detectable porque el motor gira a una velocidad inferior a la de régimen y emite un ronquido característico. Este problema se soluciona revisando todas las conexiones efectuadas con ayuda del diagrama correspondiente y se rehacen las erróneas.

12.- **Conexión en paralelo interrumpida:** Se manifiesta por un zumbido característico del motor y por la dificultad que éste experimenta al arrastrar la plena carga. Se deben verificar todos los circuitos en paralelo para la corrección de éste problema.

## BIBLIOGRAFÍA

- ✱ **"Fundamentos de Máquinas Eléctricas Rotativas"**.  
Autor: Luis Serrano Iribarnegaray.  
Editorial: Marcombo Boixarcu Editores & Universidad Politécnica de Valencia.  
España 1989.  
360 páginas.
- ✱ **"Máquinas Eléctricas y Sistemas Accionadores"**.  
Autor: C. B. Gray.  
Editorial: Alfaomega.  
México 1993.  
482 páginas.
- ✱ **"Máquinas Eléctricas, Transformadores y Controles"**.  
Autor: Harold W. Gingrich.  
Editorial: Prentice-Hall Hispanoamericana.  
México 1980.  
365 páginas.
- ✱ **"Motores Eléctricos Industriales y Dispositivos de Control"**.  
Autor: F. T. Bartho.  
Editorial: Ediciones URMO.  
España 1968.  
383 páginas.
- ✱ **"Biblioteca Práctica de Motores Eléctricos"**.  
Tomos 1 y 2.  
Autor: Robert J. Lawrie.  
1ª Edición en Español.  
Editorial: Océano/Centrum.  
Barcelona, España 1990.  
389 páginas.
- ✱ **"Máquinas Eléctricas". Curso de Electrotecnia.**  
Autor: J. Jesús Fraile Mora.  
2ª Edición.  
Editorial: Servicio de Publicaciones. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
Colección Escuelas.  
Madrid, España 1993.  
728 páginas.

- \* **Enciclopedia CEAC de Electricidad.**  
**Tomo III. "MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNIA".**  
 Autores: Juan María Ortega Plana, José Ramírez Vázquez y Lorenzo Beltrán Vidal.  
 1ª Edición.  
 Editorial: Ediciones CEAC.  
 Barcelona, España 1991.  
 685 páginas.
  
- \* **"Reparación de Motores Eléctricos".**  
**Parte 1 y 2.**  
 Autor: Robert Rosenberg.  
 7ª Edición.  
 Editorial: Gustavo Gili.  
 Barcelona, España 1970.  
 419 páginas (parte 1) y 400 páginas (parte 2).
  
- \* **"Máquinas Eléctricas".**  
**Tomo 1. "Corriente Alterna".**  
 Colección TECNOLÓGICAS.  
 Autores: Robert Arnold y Wilhelm Stehr.  
 1ª Edición en Español.  
 Editorial: Trillas.  
 México, 1980.  
 142 páginas.
  
- \* **"Motores Eléctricos". Selección, Mantenimiento y Reparación.**  
**Tomos I, II y III.**  
 Autor: Robert W. Smeaton.  
 2ª Edición.  
 Editorial: Mc Graw-Hill.  
 México, 1991.
  
- \* **"Pruebas de Equipo Eléctrico".**  
**Parte 2. "MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN".**  
 Autor: Victor Pérez Amador.  
 1ª Preedición.  
 Editorial: Limusa.  
 México, 1983.  
 155 páginas.

- \* **"Distribución de Energía Eléctrica en Plantas Industriales I"**.  
**Basado en las NOM-93 y NEC-93.**  
 Autor: Jesús Velasco Solís.  
 2ª Edición.  
 Elaboración: Protección Eléctrica Industrial.  
 México, 1994.
  
- \* **"Manual de Cálculos de Ingeniería Eléctrica"**.  
 Autores: Arthur H. Scidman, Haroun Mahrous y Tyler G. Hicks.  
 1ª Edición.  
 Editorial: Mc Graw-Hill.  
 México, 1988.  
 476 páginas.
  
- \* **"Selección y Aplicación de Motores Eléctricos"**.  
**Tomo I.**  
 Autores: Orlando Silvio Lobosco y José Luiz Pereira da Costa Dias.  
 1ª Edición en Español.  
 Editorial: Siemens Aktiengesellschaft & Marcombo Boixarcu Editors.  
 Barcelona, España 1989  
 372 páginas.
  
- \* **"Manual de Equipo Eléctrico y Electrónico". Conservación y Aplicaciones.**  
 Autor: Coyne Electrical School.  
 Editorial: Unión Tipográfica Hispano-Americana (UTEHA).  
 México, 1987.  
 654 páginas.
  
- \* **"Diagnóstico de Averías en los Motores Eléctricos y Dinamos"**.  
 Autor: J. Fabregas Costajusa.  
 Editorial: Ediciones CEDEL. Editia Mexicana.  
 México, 1984.  
 272 páginas.
  
- \* **"Máquinas Eléctricas"**.  
 Autor: Stephen J. Chapman.  
 2ª Edición.  
 Editorial: Mc Graw-Hill.  
 Santafé de Bogotá, Colombia 1994.  
 740 páginas.

✱ **"Electromecánica y Máquinas Eléctricas"**.

Autores: S.A. Nasar y L.E. Unnewehr.  
Editorial: Limusa.  
México 1982.  
490 páginas.

✱ **"Máquinas Eléctricas", Funcionamiento, Reparación y Bobinado.**

Autor: Arnold Wagner.  
Editorial: Gustavo Gili.  
España 1975.  
445 páginas.

✱ **"Máquinas de Corriente Alterna"**.

Autor: Michael Livschitz-Garik y Clyde C. Whipple.  
1ª Edición.  
Editorial: Compañía Editorial Continental S.A. (CECSA).  
México 1970.  
767 páginas.

✱ **"Máquinas Eléctricas y Transformadores"**.

Autor: Irving L. Kosow.  
2ª Edición.  
Editorial: Prentice-Hall Hispanoamericana.  
México 1993.  
704 páginas.

✱ **"Fundamentos de Ingeniería Eléctrica"**.

Autor: Vincent Del Toro.  
2ª Edición.  
Editorial: Prentice-Hall Hispanoamericana.  
México 1988.  
977 páginas.

✱ **"Fundamentos de Electricidad-Electrónica"**.

Autores: Morris Slurzberg y William Osterheld.  
1ª Edición.  
Editorial: Mc Graw-Hill.  
España 1968.  
561 páginas.

\* **"Motores de Corriente Alterna". Rebobinado, Reparación de Averías, Modificaciones.**

Autor: José Manuel Puchol Vivas.  
Editorial: Editores Técnicos Asociados.  
España.  
293 páginas.

\* **"Motores Eléctricos Industriales y Dispositivos de Control".**

Autor: Francis Trenam Bartho.  
Editorial: Ediciones URMO.  
Bilbao, España 1968.  
383 páginas.

\* **Manuales y Catálogos de Motores IEM.**

Industrias IEM S.A. de C.V.

\* **Manual PHELPS DODGE PYCSA S.A.**

PHELPS DODGE PYCSA S.A.

\* **Manual ASEA de Motores Trifásicos.**

ASEA AB./A.C. Machine Subdivision.