



**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Mecánica - Eléctrica**

**ESTUDIO DE MOTORES DE MEDIANA TENSIÓN, MONITOREO,  
PROTECCIONES Y CONTROL**

**María Erika Natividad Lima Guzmán**

Asesorado por el Ing. Luis Enrique Lima Guzmán

**Guatemala, octubre de 2008**

UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE MOTORES DE MEDIANA TENSIÓN, MONITOREO,  
PROTECCIONES Y CONTROL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARÍA ERIKA NATIVIDAD LIMA GUZMÁN**

ASESORADO POR EL ING. LUIS ENRIQUE LIMA GUZMÁN

AI CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERA ELECTRICISTA**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2008

UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godinez
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Adolfo Villeda Vásquez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ESTUDIO DE MOTORES DE MEDIANA TENSION, MONITOREO, PROTECCIONES Y CONTROL,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica- Eléctrica, el 16 de febrero de 2006.

María Erika Natividad Lima Guzmán



Santa Lucía Cotzumalguapa 16 de Septiembre de 2008.

Ref. 87 S. De G. 16/09/2008

Ing.  
José Guillermo Bedoya Barrios.  
Coordinador área Potencia.  
Escuela de ingeniería Mecánica Eléctrica.

Estimado Ing. Bedoya:

De la manera mas atenta me dirijo a usted, para comunicarle que he revisado el proyecto de tesis ESTUDIO DE MOTORES DE MEDIANA TENSION, MONITOREO, PROTECCIONES Y CONTROL, presentado por la estudiante María Erika Natividad Lima Guzmán con el número de carné 1993-12284. Puedo concluir que este trabajo llena los requisitos y cumple con los objetivos propuestos para su desarrollo e implementación de su anteproyecto de tesis. Dando mi visto bueno para que proceda a realizar los tramites correspondientes.

Por tanto, la autora de esta tesis y yo como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Sin otro particular me suscribo como su seguro servidor.

Ing. Luis Enrique Lima Guzmán.  
~~Jefe mantenimiento eléctrico~~  
Generación de energía,  
Colegiado 3653.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 10 de septiembre 2008.

Señor Director  
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
ESTUDIO DE MOTORES DE MEDIANA TENSION, MONITOREO,  
PROTECCIONES Y CONTROL, del estudiante; Maria Erika  
Natividad Lima Guzmán, que cumple con los requisitos establecidos  
para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente.



ID Y ENSEÑADA TOROS

Ing. Jose Guillermo Bejaya Barrios  
Coordinador de Energía de Potencia

JGBB:stg

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: Maria Erika Natividad Lima Guzmán, titulado: ESTUDIO DE MOTORES DE MEDIANA TENSION, MONITOREO, PROTECCIONES Y CONTROL, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 16 DE SEPTIEMBRE 2008.

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.325.08

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE MOTORES DE MEDIANA TENSIÓN, MONITOREO, PROTECCIÓN Y CONTROL**, presentado por la universitaria **María Erika Natividad Lima Guzmán** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, octubre de 2008

/cc  
cc. archivo

**“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”.**

**Albert Einstein**

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **DIOS:**

Porque has planificado mi vida de tal manera, que no me ha llegado nada si no ha sido en el momento justo. Te doy gracias por tus infinitas muestras de amor, por darme fortaleza para vencer mis temores, por guiar cada paso que doy.

### María Santísima:

Porque has sido mi apoyo y mi refugio en todo momento.

### Mi angelito:

Que sin saber quien eres, siempre has estado a mi lado.

### Mi padre, Justo Enrique:

Se dice que “El trabajo fortifica el cuerpo, mantiene la salud, prolonga la vida y hace que el tiempo parezca mas corto, porque el trabajo está en el orden de la naturaleza”, que “No hay que confundir nunca el conocimiento con la sabiduría. El primero nos sirve para ganarnos la vida; la sabiduría nos ayuda a vivir” y que “Trabajar es la felicidad de la vida. Poco importa lo que se haga, con tal que se trabaje. El trabajo es la tabla de salvación en los momentos críticos de la existencia”. Aunque son máximas de Benjamín Franklin, Henry Charles y de José Ingenieros, parecieran tuyas, porque las has demostrado cada día con tu ejemplo. Te quiero mucho papá, aunque a veces no lo pueda expresar. Espero que este logro llene otro espacio de tu corazón con alegría y orgullo. Además quiero darte las gracias porque me has enseñado que no hay nada imposible en esta vida.

Mi madre, María Natividad:

Con profunda admiración, por su paciencia, por llenar mi corazón de dulzura y por apoyarme en todo momento.

Mi hermano Luis Enrique:

Por ser esa luz que se observa desde lejos y nos hace pensar que hay alguien especial que nos recuerda, en algún momento, con cariño sincero.

Mi esposo Carlos Manuel:

Por ser amigo, confidente, apoyo y quien me ha entregado los momentos más lindos de mi vida, gracias amor.

Mi familia, en especial a don Carlos y a doña Elisa, por hacerme parte de su hogar.

Mis amigos:

Nancy Castillo, Allan Cifuentes, Fernando Reiche, Víctor Velásquez, Juan Carlos Ovalle y Abel Gómez; aunque nuestros caminos han tomado rumbos distintos, siempre hemos permanecido juntos. Gracias por su amistad incondicional.

**USTED**, con mucho cariño y respeto.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	VII
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	XI
<b>GLOSARIO</b>	XIII
<b>RESUMEN</b>	XVII
<b>OBJETIVOS</b>	XIX
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XXI
<b>1. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA</b>	
1.1 Motores síncronos	1
1.1.1 Aspectos constructivos	1
1.1.2 Principios de funcionamiento	5
1.1.3 Ventajas y aplicaciones	7
1.2 Motores asíncronos	8
1.2.1 Aspectos constructivos	8
1.2.2 Principios de funcionamiento	10
1.2.3 Ventajas y aplicaciones	13
1.3 Motores asíncronos de anillos deslizantes	14
1.3.1 Aspectos constructivos	14
1.3.2 Principios de funcionamiento	14
1.3.3 Ventajas y aplicaciones	16
1.4 Características electromecánicas de los motores	16
1.4.1 Características del par de arranque y la velocidad	16
1.4.1.1 Motor síncrono	17
1.4.1.2 Motor asíncrono	20

1.4.1.2.1	Motor asíncrono rotor jaula de ardilla	20
1.4.1.2.2	Motor asíncrono con rotor devanado	24
1.4.2	Características de la carga mecánica	24
1.4.3	Características de la corriente y la velocidad del motor	26
1.4.3.1	Motor síncrono	26
1.4.3.2	Motor asíncrono	29
1.4.3.2.1	Motor asíncrono rotor jaula de ardilla	29
1.4.3.2.2	Motor asíncrono con rotor devanado	34
1.5	Pruebas de los motores de mediana tensión	35
1.5.1	Pruebas de funcionamiento	35
1.5.1.1	Pruebas en vacío	35
1.5.1.2	Prueba a rotor bloqueado	37
1.5.2	Pruebas dieléctricas	39
<b>2.</b>	<b>ARRANQUE DE MOTORES DE MEDIANA TENSIÓN</b>	<b>41</b>
2.1	Generalidades sobre la tensión media	41
2.2	Arranque directo	44
2.2.1	Motores síncronos	44
2.2.2	Motores asíncronos	45
2.3	Arranque a voltaje reducido	47
2.4	Arranque con reactancia primaria	47
2.5	Arranque de rotor	50
2.6	Arranque con variador de velocidad	53

2.6.1	Tipos de variadores	57
2.6.2	Modos de funcionamiento	57
<b>3.</b>	<b>CONTROL Y MONITOREO DE MOTORES</b>	<b>59</b>
3.1	Definición de control	59
3.2	Tipos de control	59
3.2.1	Control manual	59
3.2.2	Control semiautomático	60
3.2.3	Control automático	60
3.3	Dispositivos y elementos usados en control	60
3.3.1	Descripción y características de los dispositivos de control	61
3.3.1.1	Seccionadores e interruptores	61
3.3.1.2	Contactores	61
3.3.1.3	Pulsadores	62
3.3.1.4	Relés	62
3.3.1.5	PTs	63
3.3.1.6	CTs	63
3.3.1.6.1	Transformadores de medición	64
3.3.1.6.2	Transformadores de protección	64
3.3.1.6.3	Transformadores mixtos	64
3.4	Descripción de los sistemas de monitoreo	65
3.4.1	Relé de tensión	65
3.4.2	Relé de intensidad	65
3.4.3	Relé térmico	66
3.4.4	Relé de frecuencia	66

3.4.5	Relé temporizado	66
3.4.6	Relé de sobrecarga	67
3.4.7	Dispositivos piloto	69
3.4.8	Interruptor de flotador	69
3.4.9	Interruptores de presión	70
3.4.10	Finales de carrera o interruptores de posición	71
3.4.11	Detectores de proximidad	72
3.4.11.1	Detectores de proximidad inductivos	72
3.4.11.2	Detectores de proximidad capacitivos	72
3.4.12	Detectores fotoeléctricos	72
3.4.12.1	Detectores fotoeléctricos de barrera	73
3.4.12.2	Detectores fotoeléctricos tipo <i>reflex</i>	73
3.4.12.3	detectores fotoeléctricos de proximidad	73
3.4.13	Interruptor de caudal	73
3.5	Soluciones electromecánicas	74
3.5.1	Fusibles y switches	74
3.5.2	Interruptores de circuito ( <i>Circuit Breakers</i> )	74
3.5.3	Fusibles y contactores	75
3.6	Soluciones electrónicas	76
3.6.1	Rectificadores e inversores autónomos	77
3.6.2	Cascada subsíncrona	78
3.6.3	Rectificador e inversor autocontrolado	79
3.6.4	Ciclo convertidor	79

<b>4. PROTECCIÓN DE MOTORES DE MEDIANA TENSIÓN</b>	<b>81</b>
4.1 Definición de protección	81
4.2 Principios de protección	81
4.2.1 Clasificación de los sistemas de protección	82
4.2.1.1 Electromecánicas	82
4.2.1.2 Estáticas	82
4.2.1.3 Microprocesador	82
4.2.2 Características de una protección	82
4.2.2.1 Selectividad	82
4.2.2.2 Rapidez	83
4.2.2.3 Confiabilidad	83
4.3 Principales protecciones y principales fallas	83
4.3.1 Protección de sobrecarga, protección por modelo térmico y temperatura de rotor	84
4.3.2 Protección diferencial	89
4.3.3 Protección de falla a tierra	90
4.3.4 Protección de desbalance	92
4.3.5 Protección de corto circuito	92
4.3.6 Bajo voltaje	93
4.3.7 Sobrevoltaje	93
4.3.8 Interferencia o bloqueo mecánico	94
4.3.9 Pérdida de carga	94
4.3.10 Arranque incompleto o excesivamente prolongado	95
4.3.11 Ruptura de sincronismo	95
4.3.12 Pérdida de excitación	96
4.3.13 Tierra en el rotor de un motor síncrono	96
4.3.14 Marcha prolongada en asíncrono en el arranque	97

<b>5. DETERMINACIÓN DEL MODO DE ARRANQUE</b>	99
5.1 Soluciones de arranque	99
5.1.1 Arranque directo	103
5.1.2 Arranque por autotransformador	103
<b>6. COORDINACIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN</b>	105
6.1 Generalidades de la protección	105
<b>CONCLUSIONES</b>	111
<b>RECOMENDACIONES</b>	113
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	115

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Despiece de un motor síncrono	2
2	Motor síncrono de armadura rotatoria y campo estacionario	4
3	Motor síncrono de campo rotatorio y armadura estacionaria	5
4	Circuito equivalente del motor síncrono, diagrama fasorial y de campo magnético	7
5	Despiece de un motor asíncrono de inducción tipo jaula	10
6	Circuito equivalente en parámetros de un transformador	12
7	Circuito equivalente del motor asíncrono y diagrama fasorial	12
8	Circuito de conexión del rotor para un motor de inducción de anillos deslizantes	15
9	Curva característica par-velocidad de un motor síncrono	19
10	Curva característica par-velocidad de un motor asíncrono	21
11	Curvas par-velocidad para motores de inducción con rotor jaula de ardilla	23
12	Curva par-velocidad para motores de inducción con rotor devanado, para diferentes valores de resistencias externas insertadas	24
13	Características par-velocidad de cargas mecánicas	26
13a	Par que varia de forma constante	26
13b	Par que varia linealmente con la rotación	26
13c	Par que varia con el cuadrado de la velocidad de rotación	26
13d	Par que varia inversamente con la rotación	26
13e	Par que varia de forma no uniforme con la rotación	26
14a	Efecto de aumentar la corriente de campo sobre la operación	28

	del motor síncrono	
14b	Curvas V del motor sincrónico	28
14c	Diagrama fasorial de un motor subexcitado síncrono	28
14d	Diagrama fasorial de un motor sobreexcitado síncrono	28
15	Efectos de la corriente primaria y el factor de potencia del estator en un motor jaula de ardilla	30
16	Curva característica velocidad-corriente para motores de inducción jaula de ardilla	33
17	Curvas características de velocidad-corriente para un motor asíncrono de rotor devanado	34
18	Conexiones para prueba de vacío de un motor de inducción	37
19	Conexiones para prueba de rotor bloqueado en un motor de inducción	38
20	Curva característica corriente-velocidad en un arranque directo	46
21	Diagrama de fuerza para un arranque directo	46
22	Curva característica de arranque a voltaje reducido por reactancia	48
23	Diagrama de fuerza, para un arranque a voltaje reducido por reactancia	49
24	Diagrama vectorial de arranque a voltaje reducido por reactancia	50
25	Curvas características par-velocidad para un arranque de rotor	51
26	Diagrama de fuerza para un arranque de rotor	52
27	Esquema equivalente de un variador	55
28	Comparación de características de par-velocidad con y sin empleo de variador de velocidad	56
29	Modelos térmicos de operación de corriente y voltaje	85
30	Esquema motor a dos rotores	87
31	Diagrama fasorial de corrientes en desbalance	87

32	Diagrama fasorial de secuencia positiva	88
33	Diagrama fasorial de secuencia negativa	88
34	Protección diferencial	90
35	Protección de falla a tierra- CT's de secuencia cero	91
36	Protección mínima y máxima de tensión	94
37	Protección contra la ruptura de sincronismo	96
38	Protección del rotor en el arranque y en funcionamiento de motores síncronos	97
39	Curva característica carga-deslizamiento-eficiencia	101
40	Curva característica velocidad-torque-corriente	101
41	Curva característica tiempo corriente	102
42	Curva de funcionamiento de contactor, relevador y fusible	108
43	Curva de funcionamiento de contactor, relevador, <i>breaker</i> alimentador o guarda motor magnético en el caso de baja tensión	109
44	Curva de funcionamiento de contactor, <i>breaker</i> alimentador o guarda motor magneto térmico en el caso de baja tensión	109
45	Coordinación de tres elementos para motor de baja tensión	110

## TABLAS

I	Pares con rotor bloqueado, de sincronización y desincronización	18
II	Corriente de plena carga, para motores trifásicos de corriente alterna	33
III	Distribución de las reactancias en motores de inducción	39
IV	Características y aplicaciones de los motores de inducción jaula de ardilla para tensión media y frecuencia fija	43
V	Cuadro comparativo entre el uso normal de un motor y con variador de velocidad	55
VI	Aplicación de dispositivos de interrupción	76
VII	Características y aplicaciones de los motores eléctricos con respecto al tipo de controlador de velocidad	80
VIII	Soluciones de arranque	99
IX	Datos reales de funcionamiento de un motor síncrono	100
X	Datos asociados para el análisis de arranque de un motor	102

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	Factor de reflejo de la impedancia en el secundario
ANSI	American National Standard Institute
AT	Alta tensión
BT	Baja tensión
$C'_d$	Par de arranque a voltaje reducido
$C_d$	Par de arranque a voltaje pleno
$C_n$	Par nominal
$C_p$	Par máximo
CT's	Transformadores de corriente
E	Tensión
f	Frecuencia
FP	Factor de potencia
$g_n$	Tasa de deslizamiento
Hz	Hertz
$I_{arr}$	Corriente de arranque
$I'_d$	Corriente de arranque a voltaje reducido
$I_d$	Corriente de arranque a voltaje pleno
IEC	International Electrotechnical commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics
Ef	Eficiencia
IGBT	Transistor de potencia
$I_n$	Corriente nominal
$I_L$	Corriente de línea
$I_M$	Corriente de magnetización
$I_o$	Corriente que el motor absorbe en vacío
$I_P$	Pérdidas en el hierro

ISO	Organización Internacional de estándares
$jX_m$	Reactancia mutua
L	Inductancia o reactor
MAT	Muy alta tensión
MT	Media tensión
N	Número de etapas
$n_{nl}$	Velocidad del motor sin carga
$n_{fl}$	Velocidad del motor a plena carga
Nema	National electrical manufactures association
$P_n$	Potencia nominal
PT'S	Transformadores de potencial
PWM	Modulación de ancho de pulso
$R_H$	Pedidas en el núcleo
Q	Potencia reactiva
$R_{ext}$	Resistencia externa
$S_m$	Potencia aparente máxima
$S_{mg}$	Potencia magnetizante del autotransformador
SR	Regulación de velocidad
T	Par
$U_d$	Voltaje de arranque
$U_n$	Voltaje nominal
$V_F$	Voltaje de fase
?	Velocidad angular
$X_{LR}$	Reactancia a rotor bloqueado
$Z_L$	Impedancia de carga

## GLOSARIO

<b><i>Across line</i></b>	Directo.
<b>Alternador</b>	Generador de corriente alterna.
<b>Armadura</b>	Parte de una máquina eléctrica en la cual se genera voltaje en virtud del movimiento relativo con respecto a un campo magnético.
<b>Arrancador de motor</b>	Controlador eléctrico, sea manual o automático, para acelerar un motor desde el reposo hasta la velocidad normal y para detener el motor.
<b>Autotransformador</b>	Transformador en el que al menos dos devanados tienen una sección común.
<b>Bobina de campo</b>	Devanado aislado que se monta en un polo de campo para magnetizarlo.
<b>Brida</b>	Anillo que une dos superficies cilíndricas o tubos.
<b><i>Circuit breaker</i></b>	Cortacircuitos o interruptores de circuito.
<b>Controlador</b>	Cualquier dispositivo que sirva para controlar la potencia del equipo al cual se conecta.
<b>Coordinación de protección</b>	El objetivo de la coordinación es hacer el mínimo número de fallas de aislamiento y por lo tanto, el número de interrupciones.
<b>Corriente de arranque (rotor bloqueado)</b>	Es la corriente que demanda el motor al arrancar, y que corresponde a condiciones de rotor bloqueado o velocidad cero. Aplicando tensión y frecuencias eléctricas nominales.
<b>Curva de magnetización (o de saturación)</b>	Curva característica que expresa el grado de saturación magnética como función de alguna propiedad de la excitación magnética.

<b>Curvas V</b>	Familia de curvas para un motor síncrono que muestran la relación entre la corriente de armadura y la de campo para valores constantes de cargas con FP en adelanto, en atraso y unitario.
<b>Deslizamiento</b>	Es la diferencia entre la frecuencia de rotación (velocidad) sincronía y de carga plena de un motor de inducción, expresada en por ciento.
<b>Dinamo</b>	Máquina electromagnética que convierte la energía mecánica en eléctrica y viceversa.
<b>Distribución</b>	Proceso por el cual se suministra la energía en forma local a varias estaciones de una zona a partir de una o mas estaciones de transmisión.
<b>Frecuencia</b>	Número de ciclos completos de variación senoidal por unidad de tiempo.
<b>Motor eléctrico</b>	Máquina rotatoria que transforma la energía eléctrica en energía mecánica.
<b>Motor de inducción</b>	Es un motor eléctrico del cual solamente una parte (estator), se conecta a la fuente de energía, la otra (rotor) funciona por inducción electromagnética.
<b>Motor jaula de ardilla</b>	Motor de inducción cuyo circuito secundario esta formado por barras colocadas en ranuras del núcleo secundario, permanentemente cerradas en corto circuito por medio de anillos en sus extremos dando la apariencia de una jaula de ardilla.
<b>Motor de rotor devanado</b>	Motor de inducción en el que el secundario consta de bobinas polifásicas cuyas terminales están en corto circuito o bien se sacan a través de anillos rozantes a un circuito cerrado externo.
<b>MV</b>	Voltaje medio, usualmente desde 1kV a menos de 100kV.

<b>Par (Torque)</b>	Fuerza que tiende a producir rotación.
<b>Par de arranque (rotor bloqueado)</b>	Es el par mínimo que desarrolla un motor al arrancar y corresponde al menor par medido con el rotor de frenado a velocidad cero, para varias posiciones angulares del mismo, aplicando tensión y frecuencia eléctricas nominales.
<b>Par máximo</b>	Es el máximo par disponible que desarrolla un motor alimentado con tensión y frecuencia eléctrica nominal, al acelerar del reposo a su velocidad de operación.
<b>Polo de campo</b>	Estructura de material magnetizado sobre la que se monta una bobina de campo.
<b>Prueba a circuito abierto (prueba en vacío)</b>	Sinónimo de cualquier prueba sin carga.
<b>Prueba en corto circuito</b>	Prueba en el que hace trabajar la máquina como generador con excitación reducida y se conectan sus terminales en corto circuito.
<b>Regulación de velocidad</b>	Variación de la velocidad desde sin carga hasta plena carga, expresada como porcentaje de la velocidad nominal.
<b>Sincronismo</b>	Estado en el que dos o más máquinas trabajan a la misma frecuencia y en el que los desplazamientos de los ángulos de fase entre los voltajes en ellas son constantes, o varían respecto a un valor promedio estable y permanente.
<b>Sobrecargas</b>	Las sobrecargas (no necesariamente son fallas – solo si superan los tiempos límites) en las instalaciones eléctricas corresponden a la circulación de corriente por arriba de los valores de régimen permanente.
<b>Tensión soportada</b>	Voltaje que el equipo eléctrico es capaz de soportar sin falla o descarga al probarse en condiciones especificadas.

<b>Transformador</b>	Dispositivo que cuando se usa eleva o baja el voltaje de corriente alterna de la fuente original.
<b>Variador de velocidad</b>	Elementos que convierten la energía que recibe el motor, convirtiendo magnitudes fijas de frecuencia y tensión en magnitudes variables.
<b>Velocidad síncrona</b>	Velocidad de rotación del flujo magnético que produce el devanado primario de una dinamo.
<b>Yugo</b>	Elemento de material ferromagnético que no está rodeado por devanados, que se usa para conectarlos núcleos o polos de una dinamo con el objeto de funcionar como parte del circuito magnético.

## RESUMEN

Actualmente una gran parte de la energía consumida proviene de los motores eléctricos. Son innumerables los ejemplos de aplicación que tienen en la industria y comercio, siendo los motores en mediana tensión los que han cobrado auge debido a sus características especiales de funcionamiento y que proporcionan ventajas económicas en lo que se refiere a la conversión de energía.

Es significativo el hecho que los motores eléctricos sean parte fundamental del suministro de energía de los accionamientos industriales, por ello es importante que se tome en consideración desde la selección apropiada del mismo, tanto en lo que se refiere a su tipo, como en lo que respecta a condiciones de arranque o regulación de velocidad, además de todas aquellas características de control y monitoreo que proporcionen el funcionamiento adecuado del motor.

A demás de lo anterior se debe tener en consideración que cualquier sistema motriz no está libre de fallas, ya sea por la alimentación, por el mismo o por el proceso; por ello es importante proporcionarle los medios para que realice su trabajo sin problema alguno, debido a esto no debemos olvidar la utilización de los mecanismos que permiten evitar averías importantes existentes en las condiciones anormales de funcionamiento, es decir protecciones, y que su elección esta en función de las exigencias de la aplicación, es así, que es necesario asegurar su coordinación para aprovechar al máximo sus posibilidades.



## OBJETIVOS

- **General**

Describir los motores de mediana tensión, así como su monitoreo, protecciones y tipos de control.

- **Específicos:**

1. Identificar los tipos de motores eléctricos de corriente alterna, tanto en sus características constructivas como también en las electromecánicas.
2. Definir el concepto de mediana tensión y determinar los tipos de arranque utilizados en ella, describiendo sus ventajas en sus diferentes aplicaciones.
3. Identificar los tipos de soluciones aplicables al control y monitoreo de motores en mediana tensión.
4. Definir el término protección, así como sus diferentes clasificaciones y características.
5. Evaluar que tipo de arranque de motor es el más adecuado por medio de cálculos matemáticos aplicados a un motor en particular.
6. Definir el término coordinación y su implicación en la disposición de los distintos tipos de protección.



## INTRODUCCIÓN

Siendo el motor eléctrico un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica, cuyos principios de construcción y funcionamiento se han mantenido a través de los años aunque, con algunas variaciones por la aplicación de nuevas tecnologías en su fabricación. Es importante mencionar que en los últimos años los motores de corriente alterna son los que poseen mayor demanda debido a su aplicación en la industria generando así el uso de tensiones menores a los 50kV en donde se considera como un rango medio de tensión, siendo los motores de mediana tensión una opción más favorable, debido a que se limitan las pérdidas ocurridas por calentamientos resistivos y en la conversión de energía, así como poseer la capacidad de modificarlos para usos particulares; superando así las desventajas de costo inicial y rendimiento que se obtienen con los de baja tensión. Es por ello que este trabajo está desarrollado para abordar el estudio de los motores de corriente alterna en mediana tensión, no solo concretándose a mencionar su construcción, funcionamiento, ventajas y aplicaciones; independientemente si son síncronos o asíncronos, si no también a aquellas características electromecánicas que determinan su utilización, sin olvidarnos de las pruebas necesarias para determinar la eficiencia de los mismos.

Como ya se mencionó, el uso de cierto rango de voltajes medios crea la necesidad de realizar durante este estudio una descripción de los límites de tensión relacionadas a la generación y distribución de energía, como también las normas que regulan dichos límites, así como el conocer las características y aplicaciones que hacen de ellos una mejor opción en lo que a funcionamiento se refiere. En relación a la tensión a manejar de estos motores es claro que no todos los tipos de arranque a los que se someten los motores de corriente

alterna en baja tensión son aplicables a mediana tensión, por ello se realiza una descripción de aquellos que son apropiados para este tipo de motores.

A demás en el mismo, se trata de identificar los diferentes tipos de control y determinar su relación con el monitoreo del motor, haciendo énfasis en que control del motor se refiere a el proceso de marcha, como el de frenado y monitoreo se refiere al aseguramiento de que este control se de. La descripción de los dispositivos y elementos utilizados en el control y monitoreo es de suma importancia para completar un proceso. Estos dispositivos permiten llevar el proceso de arranque de un motor no importando la actividad a desempeñar por el mismo, como también la aplicación de ellos en la acción de monitoreo.

Finalmente se desea determinar la importancia de saber seleccionar las protecciones que con llevan a mantener un proceso de funcionamiento a su termino sin ningún inconveniente, para ello su instalación dependerá de las condiciones de aplicación, la seguridad que se desee obtener y el tipo de carga a manejar, además de conocer como coordinarlas de manera correcta para aprovechar al máximo sus posibilidades.

# 1. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

El motor es una máquina eléctrica rotatoria que es capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica, suministrando energía eléctrica a los conductores y al devanado de campo magnético con el objeto de producir una fuerza electromagnética entre ellos y, así producir energía mecánica.

Existen muchos tipos de motores, pero aquí solo se tratarán los que por sus características en corriente alterna y su rendimiento en alta potencia son óptimos.

## 1.1 Motores síncronos

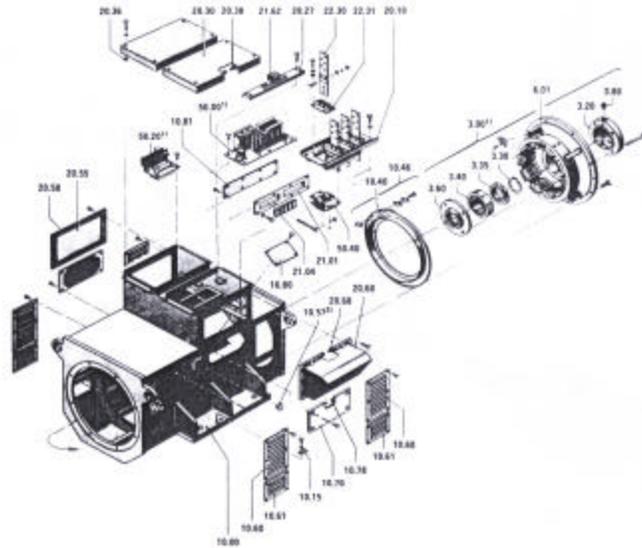
### 1.1.1 Aspectos constructivos

Para cualquier tipo de motor se encuentran partes estructurales como los son: la carcasa, las guías de aire, ventiladores externos e internos, los intercambiadores de calor (aire/aire, aire/agua), las cajas de empalme, las tapas de inspección, las bridas, los pies de fijación, etc.

Los materiales utilizados para la carcasa, los portacojinetes, las cajas de empalme y los ventiladores pueden ser de hierro de fundición o chapa de acero, las guías de aire, los intercambiadores de calor y las tapas de inspección suelen ser de chapa de acero, aunque algunas veces se suele observar el aluminio y la fibra de vidrio como materiales para algunos de estos componentes.



3.00 Conjunto de rodamiento (cojinete de guía)	8.10 Eje	20.38 Cierre
3.20 Tapa externa del rodamiento	8.21 Pequeño de chapas del rotor con arrollamiento de la máquina principal	20.55 Tapa
3.30 Anillo frenoje	8.22 Pequeño de chapas del rotor con arrollamiento de la excitación	20.58 Cierre
3.35 Disco centrífugo	10.00 Carcasa del estator (con paquete de chapas y arrollamiento)	20.80 Entrada de cables
3.40 Rodamiento de bolas (cojinete de guía)	10.15 Presilla de tierra	20.88 Cierre
3.60 Tapa interna del rodamiento con anillos de feltro	10.30 Detector del lado del accionamiento o de la punta del eje AS	21.01 Guía
3.80 Engrasador	10.36 Elementos de fijación	21.04 Tapón de goma
4.00 Conjunto de rodamiento (cojinete libre)	10.40 Deflector del lado contrario al accionamiento o a la punta del eje AS	21.62 Bloque de bornes para el circuito auxiliar
4.10 Anillo V	10.46 Elementos de fijación	22.30 Barra de empuje para el circuito principal
4.20 Tapa externa del rodamiento	10.57 Tapón	22.31 Carterera alata
4.30 Anillo haseaja	10.60 Chapa de persiana	20.40 Elemento de refrigeración aire/agua
4.35 Disco centrífugo	10.61 Chapa de persiana	50.00 Unidad de excitación
4.41 Rodamiento de bolas (cojinete libre)	10.70 Cubierta lateral	50.20 Regulador de tensión con circuito de potencia
4.45 Muelles de presión	10.75 Cubierta con cierre	50.40 Transformador de corriente
4.60 Tapa interna del rodamiento con anillos de feltro	10.78 Cierre	51.10 Anillo rectificador con módulos, completo
4.80 Engrasador	10.80 Tapa	51.11 Módulo variador
5.00 Tapa portacojinete lado del accionamiento o de la punta del eje	10.81 Tapa	51.12 Cubo
6.01 Tapa portacojinete, lado contrario al accionamiento o a la punta del eje AS, con anillo de corona y polca de excitación	20.10 Soporte de las barras	51.13 Anillos de empuje
7.20 Ruedo del ventilador	20.27 Barra de soporte	51.14 Módulo rectificador
7.30 Cubo del ventilador	20.30 Tapa	
8.00 Rotor completo	20.36 Anillo de seguridad (-O-Ring-)	



Los motores síncronos de corriente alterna se clasifican en dos:

### 1. armadura rotatoria y campo estacionario:

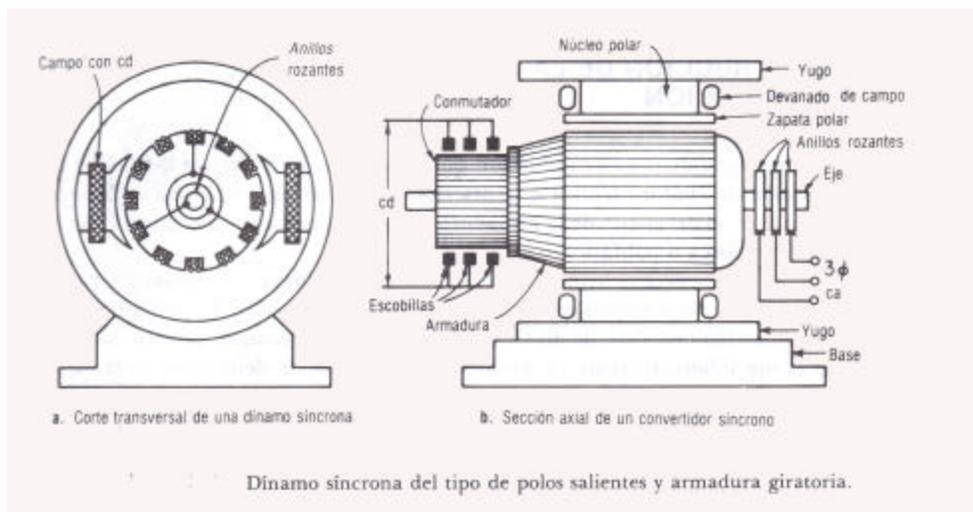
Estos motores poseen un estator formado por una armazón cilíndrica de acero vaciado, el cual sirve como soporte como también para crear una trayectoria de retorno al flujo para completar el circuito magnético creado por el devanado de campo (ver figura 2).

Devanados de campo: Son bobinas que proporcionan la fuerza magnetomotriz necesaria para producir un flujo que genera la Fem., los cuales se excitan por una fuente de CD.

Polos de campo: Su objetivo es distribuir el flujo y es por ello que poseen una parte curva y mas ancha para que este flujo sea uniforme.

En este tipo de maquina se le debe aplicar CA a los anillos rozantes para que funcione como motor.

**Figura 2. Motor síncrono de armadura rotatoria y campo estacionario**



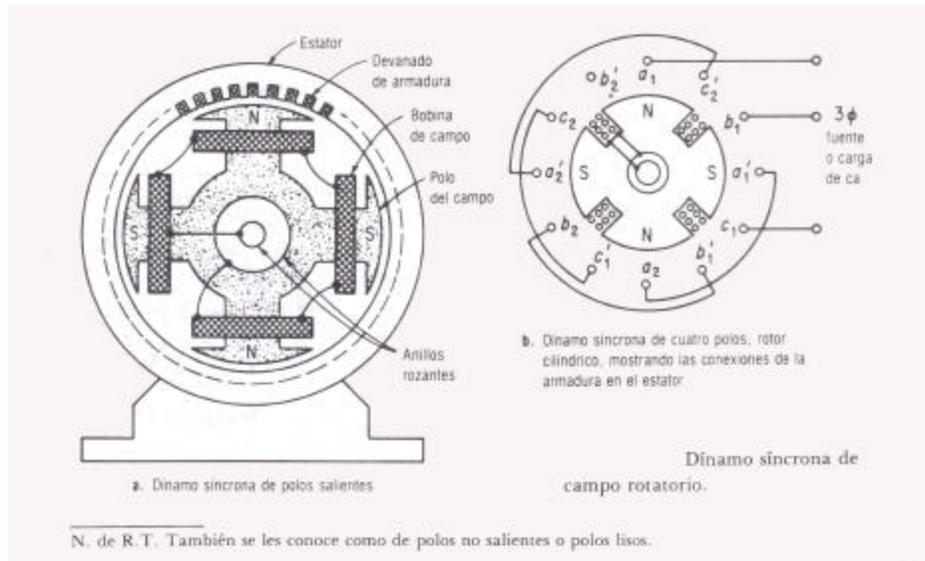
## 2. campo rotatorio y armadura estacionaria:

En esta maquina, una fuente de CD suministra corriente al devanado de campo mediante anillos rozantes, y la armadura se conecta en forma directa con una fuente de CA polifásica para que funcione como motor.

El rotor gira en sincronía a velocidad sincrónica con el campo giratorio que es generado por el devanado estatorico, el cual queda en función por el número de polos y la frecuencia de corriente suministrada.

Los tipos de rotores para este tipo de maquina pueden ser de polos salientes o bien cilíndricos (ver figura 3).

**Figura 3. Motor síncrono de campo rotatorio y armadura estacionaria**



### 1.1.2 Principios de funcionamiento

Los motores síncronos están constituidos por un inducido que suele ser fijo, formando por lo tanto el estator sobre el que se aplica una corriente alterna y por un rotor que esta compuesto de un cierto número de pares de polos magnéticos. El campo variable del estator hace girar el rotor a una velocidad fija y constante de sincronismo que depende de la frecuencia alterna aplicada, es por ello que se les llama síncronos.

Su funcionamiento inicia con una corriente de campo del motor el cual produce un campo magnético estacionario y las corrientes en el devanado producen un campo magnético uniformemente rotacional. Con la existencia de estos dos campos magnéticos el campo rotorico tendera a alinearse con el campo estatorico. En este tipo de motor al no tener arranque propio es necesario el devanado del estator, los polos están sujetos a un par electromagnético el cual hace que estos se muevan hacia un lado y luego de un tiempo hacia el otro debido al cambio de dirección de la corriente. Cuando se

hace mover por cualquier método, el rotor en una dirección a una velocidad cercana o igual a la de sincronismo los extremos de la bobina desarrollaran un par que hace que el rotor continúe moviéndose en esa dirección. Al colocar una carga en el eje del motor síncrono el par generado por la carga hará que el rotor desacelere pero continuara girándola a la misma velocidad con respecto al campo rotatorio del estator. La velocidad del rotor continua siendo sincrónica con respecto al campo rotatorio, pero el flujo del rotor en el entrehierro se reduce, debido al incremento de la reluctancia del entrehierro.

Otra forma de comprender este funcionamiento es a través de su circuito equivalente junto con su diagrama fasorial que se describe a continuación:

La corriente al fluir en los devanados del estator produce un campo magnético  $B_S$  propio, este a su vez produce un voltaje denominado  $E_S$ . Con dos voltajes presentes en los devanados estatoricos, el voltaje total de una fase es la suma del voltaje interior generado  $E_A$  y el voltaje de reacción del inducido  $E_S$ .

$V_F = E_A + E_S$  consecuentemente existe una suma de campos magnéticos

$B_N = B_R + B_S$  debido a que los ángulos de  $E_A$  y  $B_R$  son iguales y el  $E_S$  y  $B_S$  también lo son el campo magnético resultante coincidirá con el voltaje de fase. La tensión en el estator se encuentra a  $90^\circ$  atrás de la corriente de armadura y la tensión del estator es directamente proporcional a la corriente de armadura.

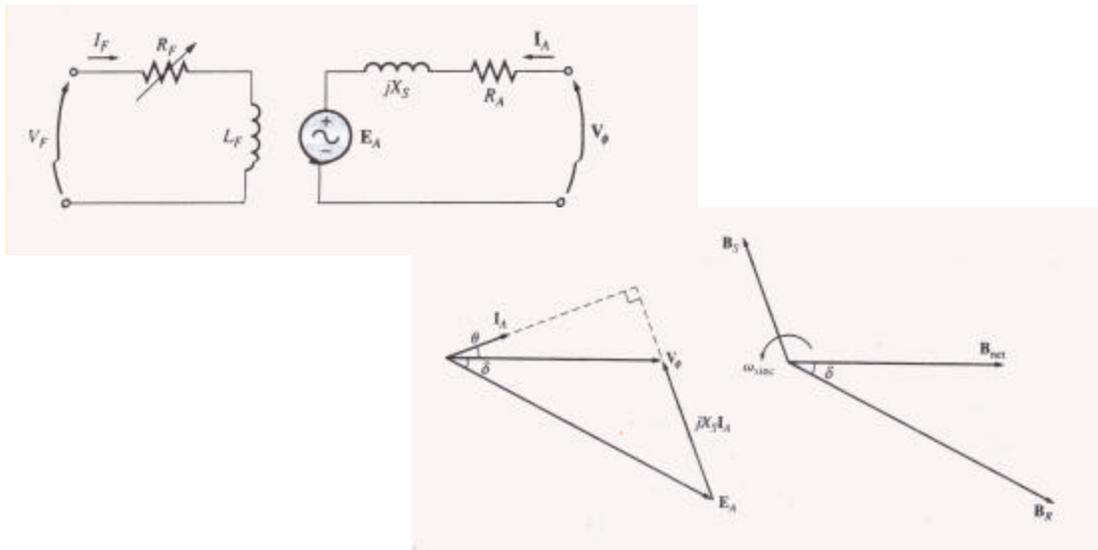
Si la reactancia es una constante de proporcionalidad el voltaje de reacción del inducido puede expresarse como  $E_S = jX I_A$  de lo cual  $V_F = E_A + jX I_A$  que corresponde al voltaje de reacción del inducido con una inductancia en serie con el voltaje interno generado.

Hay que considerar que el estator presenta una autoinductancia y una resistencia ( $X_A R_A$ ) obteniéndose  $V_F = E_A + jX I_A + jX_A I_A + R_A I_A$  donde

$X_S = X + X_A$  es conocida como reactancia sincrónica. Finalmente describiéndose la ecuación final del circuito equivalente (ver figura 4):

$$V_f = E_A + jX_S I_A + R_A I_A$$

**Figura 4. Circuito equivalente del motor síncrono, diagrama fasorial y de campo magnético**



### 1.1.3. Ventajas y aplicaciones

Como ventajas se puede considerar que los motores sincrónicos poseen:

1. Un rendimiento mayor que el motor de inducción en especial a baja velocidad angular.
2. Los motores sincrónicos pueden trabajar con factor de potencia capacitivo o unitario, además de poseer factor de corrección para campos sobreexcitados.
3. La velocidad angular es rigurosamente constante con la frecuencia de alimentación.
4. Los motores con polo de campo permiten el empleo de entrehierros más anchos que otros motores y por lo tanto necesitan tolerancias menos estrechas en sus cojinetes y por ello permiten el uso mas prolongado de ellos.

5. Son más económicos que otros motores para la misma potencia, velocidad y voltaje nominal.

Hay que considerar que la mayoría de estas ventajas son más apreciables a medida que aumenta el tamaño del motor.

Como desventaja se tiene el que no se puede poner en marcha con solo aplicarle corriente trifásica alterna debido a que en el instante en que se aplica aparece en el estator un campo magnético rotatorio de gran velocidad, esta pasa junto a los polos del rotor con tal rapidez que este no puede ponerse en movimiento.

Entre sus múltiples aplicaciones se utilizan para el funcionamiento de bombas, ventiladores, compresores, extrusores, maquinas centrifugas etc.

## **1.2 Motores asíncronos**

### **1.2.1. Aspectos constructivos**

El núcleo del estator de los motores asíncronos suele formarse con un paquete de chapas de acero al silicio aisladas por una capa de barniz. El paquete de chapas puede establecerse como una pieza única o estar subdividido en varios paquetes más pequeños, montados sobre el eje con pequeños espacios entre ellos con la finalidad de proporcionar un sistema de paso de aire refrigerado. En las ranuras del estator se alojan las bobinas de arrollamiento trifásico. Aunque para motores de baja tensión, los hilos que forman el arrollamiento suelen ser de cobre o algunas veces de aluminio, de sección circular, aislados por capas de esmalte. En los motores

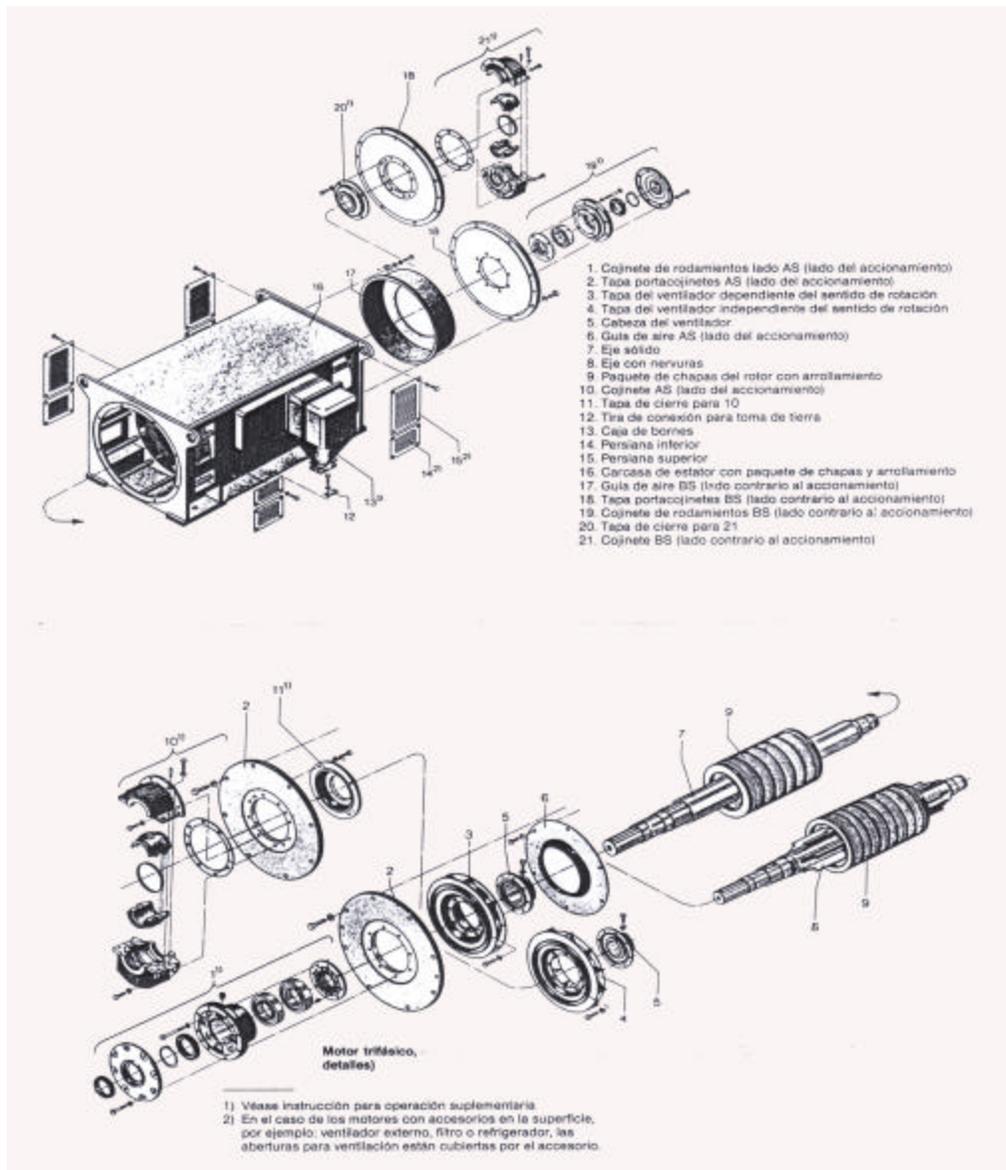
de media tensión, los conductores son de cobre, generalmente de sección rectangular, aislados con tiras de material aislante a base de mica o fibra de vidrio, aglomerados con resina sintética.

Cuando se insertan los arrollamientos en las ranuras se sujetan con cintas de fibra de vidrio y se someten a una impregnación con resina epóxica o poliéster, para proporcionarles mayor rigidez mecánica y dieléctrica.

El núcleo del rotor es similar al del estator pero en los motores asíncronos jaula de ardilla, este arrollamiento esta compuesto de barras de cobre o de mezcla de él insertadas en ranuras y soldadas en los extremos a anillos de corto circuito, también de cobre, aunque para algunos de baja potencia pueden ser de aluminio fundido.

Dependiendo de las características del motor, las barras del rotor podrán tener una sección circular, rectangular, trapezoidal o tener forma de L. Pueden construirse rotores con dos jaulas independientes, una más cerca de la periferia del rotor y otra montada debajo de la primera. A continuación en la figura 5 se observa el despiece de un motor asíncrono.

**Figura 5. Despiece de un motor asíncrono de inducción tipo jaula**



### 1.2.2. Principios de funcionamiento

Cuando se habla de un motor asíncrono, podemos pensar en un transformador, debido a que el voltaje del rotor que produce la corriente y el campo magnético del rotor es inducido en los devanados de este, en lugar de

estar físicamente conectados a él a través de alambres, como sucedería con los devanados primario y secundario de un transformador. Por tener esta característica los motores asíncronos son llamados motores de inducción.

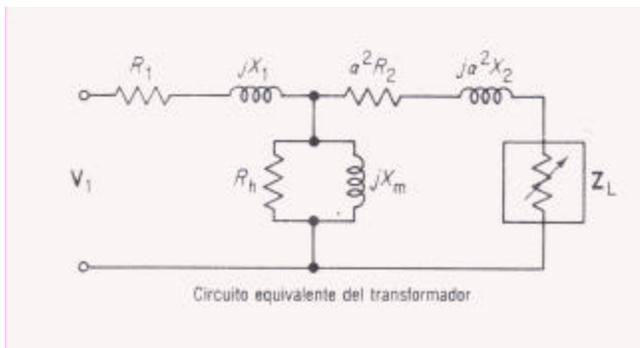
El funcionamiento del motor asíncrono comienza cuando al aplicar al estator un conjunto de voltajes trifásicos a su vez circulan las corrientes trifásicas correspondientes que producen un campo magnético en el estator cuya dirección de rotación depende de la secuencia de fases. Al existir un movimiento en el rotor con respecto al campo magnético del estator produce un voltaje inducido en las barras del rotor, originando un flujo de corriente hacia fuera de las barras. Debido a que el conjunto del rotor es de carácter inductivo, la corriente del rotor queda en atraso con relación al voltaje del rotor, además que el flujo de corriente del rotor crea un campo magnético en él. Sabiendo que el campo magnético en el estator depende de la secuencia de fases, el par generado hace que el rotor se acelere en esa misma dirección. Cabe mencionar que existe un límite para la velocidad del motor, si el rotor del motor estuviera rotando a velocidad sincrónica, las barras del rotor serían estacionarias con respecto al campo magnético y no habría voltaje inducido, de lo cual no habría corriente en el rotor ni tampoco campo magnético rotórico, sin este campo magnético el par inducido sería nulo y el rotor frenaría como resultado de las pérdidas por rozamiento. En consecuencia, un motor de inducción puede acelerar hasta la velocidad cercana a la sincrónica pero nunca alcanzarla por completo.

A continuación se hace un breve análisis del circuito equivalente del motor (figura 7), pero es conveniente recordar que por ser una máquina de inducción debido a la acción transformadora que se realiza en ella, podemos partir del modelo del transformador (ver figura 6) donde se observa la relación existente entre el devanado primario como en el secundario, junto con sus parámetros asociados. Se observa el valor de  $R_H$  que representa a las pérdidas en el

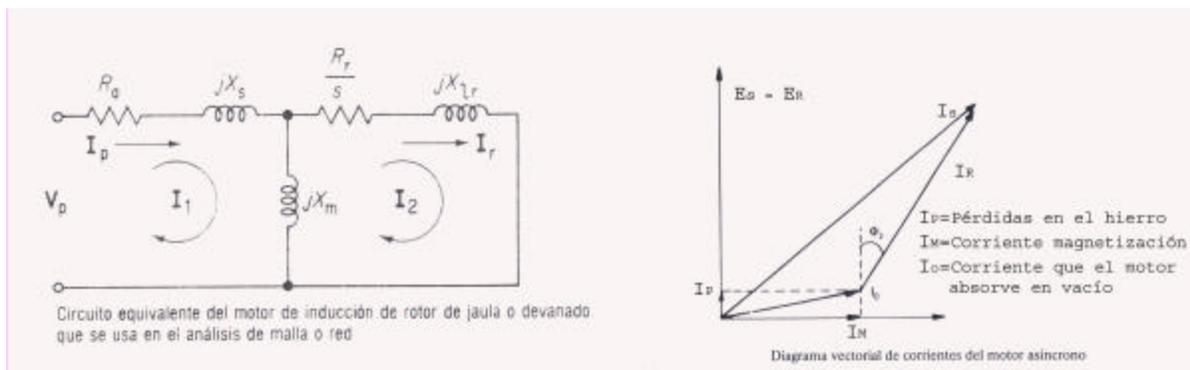
núcleo y la reactancia mutua  $AS_M$ , a representa el factor por el que se refleja la impedancia del secundario al primario.

En la figura 7 se muestra el circuito análogo del motor partiendo del equivalente del transformador, al ver este se observa que se omite la relación de vueltas, debido a que se supone que tanto el estator como el rotor tienen el mismo número de vueltas, porque los valores de impedancia fueron calculados partiendo de las mediciones del primario. Además se ve que el ramal que contiene a la reactancia mutua ya no incluye a las pérdidas en el núcleo, esto es porque conjuntamente con las pérdidas en el núcleo, el motor tiene pérdidas por fricción y pérdidas por cargas parásitas y se pueden determinar como parte de sus parámetros. Finalmente, se puede ver la similitud entre el secundario del transformador y el rotor del motor.

**Figura 6. Circuito equivalente en parámetros de un transformador**



**Figura 7. Circuito equivalente del motor asíncrono y diagrama fasorial**



### **1.2.3. Ventajas y aplicaciones**

Entre las ventajas del motor jaula de ardilla de inducción se encuentran las siguientes:

1. Su construcción simple y robustez
2. El número de polos del rotor es siempre igual al número de polos del estator con el cual está asociado.
3. No necesita fuente de excitación externa como el motor síncrono
4. Posee características especiales de par y corriente de arranque, así como de velocidad casi constante.
5. Al carecer de conmutador, anillos rozantes y contactos móviles entre el rotor y el estator, contribuye a que el factor de mantenimiento sea menor que el síncrono.

Su desventaja es que no son posibles las conexiones externas al rotor lo que hace que el control del motor debe efectuarse enteramente en el estator. Los motores asíncronos se pueden diseñar para tener buenas características de arranque que resultan en alta resistencia del rotor y al mismo tiempo las características positivas de la marcha normal que resultan de la baja resistencia del rotor, mediante el uso de rotores de doble jaula de ardilla y barras profundas.

Entre sus aplicaciones se tienen como impulsores de velocidad, ventiladores radiales, bombas centrifugas, compresores y molinos. Mas adelante se describirá algunas consideraciones para aplicaciones de los motores en base a una terminología creada por la NEMA que dispone de varios diseños de máquinas para propósitos especiales.

### **1.3. Motores asíncronos de anillos deslizantes**

#### **1.3.1 Aspectos constructivos**

La construcción de motores de anillos deslizantes o también llamados de rotor devanado, es muy similar al motor de inducción de jaula, la diferencia radica en la construcción del rotor. El rotor se fabrica de conductores de cobre, aislados del núcleo de hierro y se conectan en estrella en las máquinas trifásicas. El rotor posee devanados similares al estator, ya que posee el mismo número de polos que el estator aunque el número de fases no siempre es el mismo aunque regularmente sí lo es. Además de estas características las salidas del rotor están conectadas a tres anillos conductores, montados en el eje del motor y sobre los cuales se encuentran escobillas de carbón fijas a la estructura de la carcasa que permiten la inserción de resistores externos para el arranque o regulación de la velocidad.

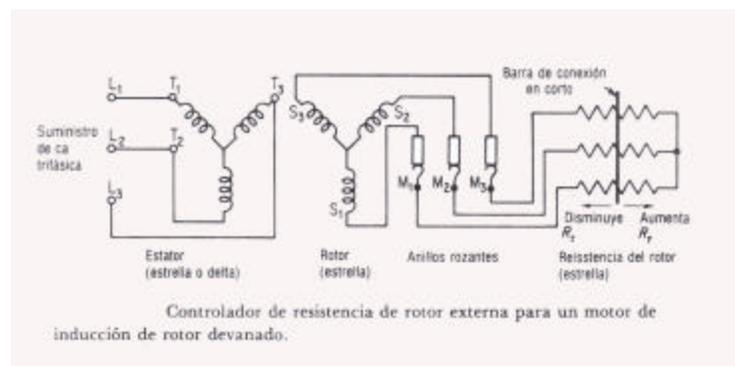
#### **1.3.2 Principios de funcionamiento**

Con respecto al funcionamiento es el mismo que el del motor de inducción jaula de ardilla, cuya característica esencial es que las corrientes secundarias son creadas únicamente por inducción. En sí utiliza un rotor que actúa como un conjunto de bobinas que se alimentan de la corriente inducida por las variaciones del campo creado por el estator y producen un campo que gira con él. Como ya se mencionó, su velocidad no puede ser la de sincronía pues si lo fuera, el rotor sería atravesado por un flujo constante y no se induciría corriente alguna. La diferencia radica en que en el de rotor de jaula no hay forma de introducir un cambio de resistencia en el rotor, una vez que se lo ha vaciado o fabricado. En el de rotor devanado es sencillo introducir una resistencia externa

en el circuito del rotor y es que los extremos del rotor están unidos a tres anillos eléctricamente unidos a unas escobillas, lo que permite controlar la intensidad que circula por el rotor conectando resistencias externas.

En la figura se muestra la conexión para este tipo de máquina. Si la barra de conexión en corto que se muestra en la figura, se mueve hacia el lado derecho, se introduce un máximo de resistencia de rotor en cada fase del rotor, conectado en estrella. Cuando esta barra se mueve hacia el lado contrario la resistencia externa es igual a cero, lo cual representa a la resistencia equivalente de un rotor de jaula. Durante el arranque se conectan las resistencias para reducir la intensidad y aumentar el par. A medida que aumenta la velocidad se reducen la resistencias hasta que se cortocircuitan completamente al acercarse a la velocidad de sincronismo. Como estas resistencias limitan la corriente en el circuito del rotor y como da mayor factor de potencia y par en el instante de arrancar, se reduce considerablemente la corriente de línea del estator.

**Figura 8. Circuito de conexión del rotor para un motor de inducción de anillos deslizantes.**



### **1.3.3 Ventajas y aplicaciones**

Entre las ventajas de los motores de inducción de rotor devanado o anillos deslizantes están las siguientes:

1. Poseen alto par de arranque.
2. Menores corrientes de arranque.
3. Se puede controlar la velocidad cuando estas son menores que la velocidad de sincronía.

Como desventaja se tiene el hecho que poseen un alto costo inicial y costos de mantenimiento altos es por ello que se utilizan cuando se necesitan características especiales de funcionamiento.

Entre sus aplicaciones se tienen las bombas y los ventiladores. Se emplean en todo rango de velocidades para malacates, elevadores, grúas puente y teleféricos, así como centrifugadoras, quebradoras, pulverizadores y otras cargas con inercia elevada.

## **1.4 Características electromecánicas de los motores**

### **1.4.1 Característica del par de arranque y la velocidad**

La característica par – velocidad es una curva representativa entre el par desarrollado por un motor eléctrico y su velocidad angular. En general esta curva es distinta para cada tipo de motor, otro aspecto importante a tomar en cuenta es la regulación de la velocidad de un motor y depende de

los valores asumidos para cada velocidad, su ecuación esta relacionada con el deslizamiento a plena carga y en vacío.

$$SR = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} * 100\% \quad \text{Donde:}$$

$n_{nl}$  = velocidad del motor sin carga (*no load*)  
 $n_{fl}$  = Velocidad del motor a plena carga (*full load*)  
SR = Factor de regulación

#### 1.4.1.1 Motor síncrono

Para los motores síncronos se tiene en consideración las siguientes definiciones para los pares descritos en las normas ANSI C50.11-1965 (ver Tabla I).

1. **Par inicial de arranque.** Es el par mínimo que desarrollara el motor síncrono en el reposo, para todas las posiciones angulares del rotor, con el voltaje nominal y a la frecuencia nominal aplicada.
2. **Par de sincronización.** Es el par máximo con carga constante con el cual el motor entrara en sincronismo, al voltaje y frecuencia nominales, cuando se aplica su corriente nominal de campo.
3. **Par de desincronización.** Es el par máximo sostenido que el motor desarrollará a la velocidad síncrona, con el voltaje y frecuencia nominal aplicada, y con la corriente nominal de campo.
4. **Par nominal de sincronización.** Es el valor al 95% de la velocidad síncrona, con el voltaje nominal y a la frecuencia nominal aplicada,

cuando el motor esta funcionando sobre los devanados amortiguadores.

5. **Par mínimo de aceleración.** Es el par mínimo desarrollado entre el punto de parada y el de sincronización. Este par debe sobrepasar al par de carga en un margen suficiente para garantizar la aceleración satisfactoria de la carga durante el arranque.
6. **Par de reluctancia.** Es una componente del par total, cuando el motor esta funcionando en forma síncrona. Es el resultado de lo que sobresale de los polos así como una manifestación de la tendencia de estos últimos a alinearse por si mismos con el campo magnético en el entrehierro. Puede equivaler hasta un 30% del par de desincronización.
7. **Par síncrono.** Es el par total disponible de estado estacionario, con la excitación del campo aplicada, para impulsar el motor y la carga a la velocidad síncrona, siendo el par de desaceleración desarrollado con un ángulo de potencia de  $90^\circ$ , siendo este el valor máximo.

**Tabla I Pares con rotor bloqueado, de sincronización y desincronización**

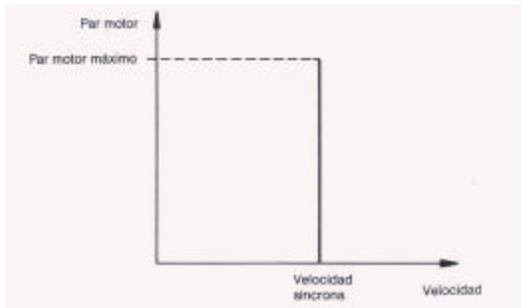
(Tomado de la norma ANSI C50.11-1965, tabla 2)

r/min	hp	Porcentaje del par nominal a plena carga*			
		Con rotor bloqueado	De sincronización (con base en $\frac{W}{k^2}$ normal de la carga)†	De desincronización†	
				1.0 fp	0.8 fp
514 a 1800	200 y menos; 1.0 fp	100	100	150	175
	150 y menos; 0.8 fp				
	250 a 1000; 1.0 fp	60	60	150	175
	200 a 1000; 0.8 fp				
	1250 y más	40	60	150	175
450 y menos	Todas las capacidades nominales	40	30	150	200

\*Los valores del par con otro voltaje nominal aplicado son aproximadamente iguales a los correspondientes a ese voltaje nominal multiplicados por la razón del voltaje real al voltaje nominal, en el caso del par de desincronización, y multiplicados por el cuadrado de esa razón, en el caso del par con rotor bloqueado y de sincronización.  
 †Con la corriente nominal de excitación aplicada.

Anteriormente, se indicó que un motor síncrono posee la ventaja de que su velocidad es constante con la frecuencia proporcionada por la red de alimentación, también cabe mencionar que esta es independiente de la potencia que lo solicita, como lo vemos en la figura 9 donde se muestra su curva característica de par – velocidad.

**Figura 9. Curva característica par-velocidad de un motor síncrono**



En este tipo de motor la velocidad de rotación del motor esta asociada a la frecuencia eléctrica aplicada, lo que hace que confirmemos que su velocidad es independiente de la carga. En la figura podemos observar que la velocidad en estado estacionario es constante desde el vacío hasta el par máximo que puede suministrar la maquina, la regulación de velocidad de este motor es del 0%.

La ecuación del par (T) es 
$$T = \frac{3V_f E_A \text{Sen}d}{\omega_m X_s}$$

Donde el par máximo ocurre cuando  $d = 90^\circ$ . Cuando el par aplicado en el eje del motor excede al par máximo el rotor no puede permanecer enlazado con el campo estatorico y neto, como el rotor empieza a disminuir la velocidad frente a ellos el campo estatorico se entre cruza repetidamente con él y la dirección del par inducido se invierte. Entonces ocurre una perdida de sincronización después que de que se ha excedido el par máximo y a esto se le conoce como deslizamiento de polos. La ecuación del par indica que cuanto mayor sea la corriente de campo, mayor será el máximo par del motor y por lo tanto existirá

estabilidad, si se opera el motor con una gran corriente de campo, es decir, una gran tensión de armadura.

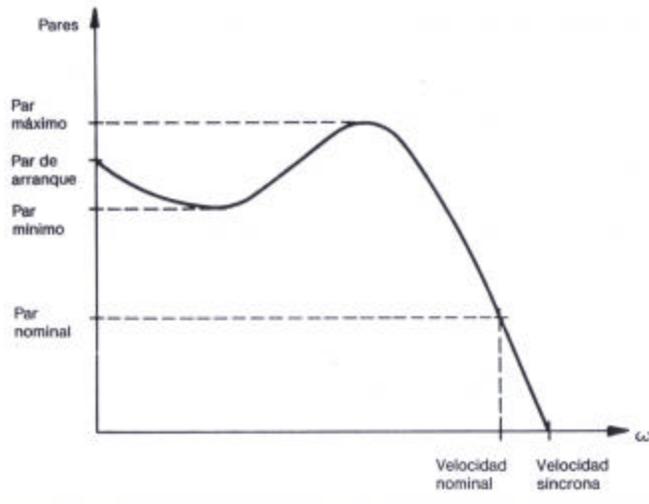
#### **1.4.1.2 Motor asíncrono**

##### **1.4.1.2.1 Motor asíncrono rotor jaula de ardilla**

La curva característica de un motor de inducción que se observa en la figura 10 se puede describir considerando tres regiones en las cuales se detalla su funcionamiento. La primera región de bajo deslizamiento de la curva, es en la cual el deslizamiento se incrementa casi linealmente con el aumento de la carga y la velocidad mecánica del rotor decrece casi linealmente con la carga. Considerando que la reactancia del rotor es casi despreciable en esta región de operación, el factor de potencia del rotor es cercano a la unidad mientras que la corriente del rotor aumenta linealmente con el deslizamiento. En consecuencia el rango normal completo de operación en estado estacionario esta incluido en esta región lineal de bajo deslizamiento.

La siguiente región del motor se puede llamar región de deslizamiento moderado, en la cual la frecuencia del rotor es mayor que antes y la reactancia del rotor es la misma en magnitud que la resistencia del rotor. La corriente del rotor no se incrementa con tanta rapidez como antes, y el factor de potencia empieza a decaer. El par máximo del motor ocurre cuando existe un incremento gradual de carga. La última región del motor se conoce como región de alto deslizamiento en la cual el par inducido disminuye realmente con el incremento de carga porque el aumento en la corriente del rotor no se percibe debido a la disminución en el factor de potencia del rotor.

**Figura 10. Curva característica par - velocidad del motor asíncrono**



Para cada tipo de motor de jaula de ardilla se tiene su propia curva característica par- velocidad a continuación se detalla los aspectos más importantes de cada diseño:

**Diseño clase A:** Sus características principales son par normal de arranque, corriente normal de arranque y bajo deslizamiento. Este diseño posee un rotor jaula de ardilla de baja resistencia. Su deslizamiento a plena carga es bajo y la eficiencia a plena carga es alta. El par máximo es en general más del 200% del par a plena carga, y se presenta a un deslizamiento bajo, menor del 20%. El par de arranque a voltaje pleno varía de un 200% del par a plena carga en motores pequeños y hasta el 100% en motores grandes. La alta corriente de arranque es la principal desventaja de este diseño. Cuando este tipo de motor es pequeño se puede emplear arranque directo de la línea, en los demás casos se debe usar arranque a voltaje reducido. Con este tipo de arranque a voltaje reducido se tiene un menor par de arranque debido a que este es proporcional a la entrada en voltamperes al motor.

**Diseño clase B:** Sus características son el poseer par normal de arranque, baja corriente de arranque, bajo deslizamiento. Este diseño posee casi el mismo par de arranque que el tipo clase A con solo el 75% de la corriente de arranque. Se puede utilizar con un arranque a voltaje pleno en tamaños mayores que los de clase A. La corriente de arranque se reduce por diseño para una reactancia de dispersión relativamente alta, y el par de arranque se mantiene, mediante el rotor de doble jaula o barras profundas. La eficiencia y deslizamiento a plena carga son buenos. Pero el uso en alta reactancia disminuye un poco el factor de potencia y se reduce el par máximo. Son utilizados cuando es necesario que la velocidad sea estrictamente constante, en los que no son muy importantes los requerimientos de par de arranque.

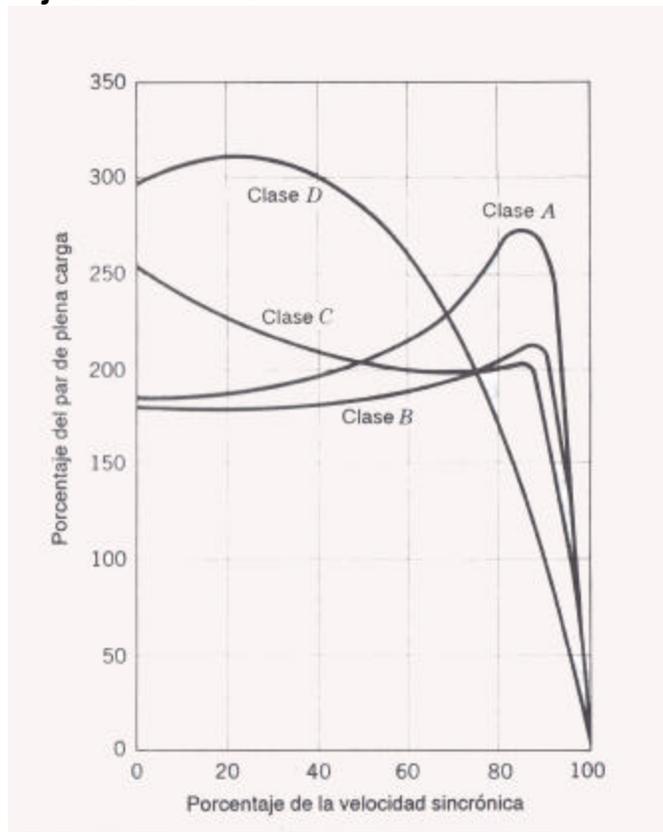
**Diseño clase C:** Posee alto par de arranque con baja corriente de arranque. Esta máquina emplea un rotor de doble jaula con mayor resistencia al rotor que el diseño clase B. Esto permite un mayor par de arranque con menor corriente de arranque, pero una eficiencia normal menor y mayor deslizamiento que los dos diseños anteriores.

**Diseño clase D:** Este tipo de motor posee alto par de arranque y alto deslizamiento, siendo esta máquina la que posee un rotor jaula de ardilla sencilla y alta resistencia. Genera un alto par de arranque con baja corriente, así como un par máximo alto entre 50% y 100% de deslizamiento, trabaja a alto deslizamiento a plena carga debido a la alta resistencia rotórica y en consecuencia tiene menor eficiencia en condiciones normales. Son utilizados cuando se necesita acelerar cargas de inercias altas y para impulsar cargas de alto impacto. Cuando se utiliza para impulsar cargas de alto impacto se le ayuda al motor con un volante que suministra dicho impacto y reduce las pulsaciones de la potencia que se toma del sistema eléctrico de suministro. Esto se realiza mediante un motor cuya velocidad baje apreciablemente con

aumento en par para que el volante se pueda desacelerar y ceder algo de su energía cinética hasta la aproximada utilización.

Además de los anteriores diseños, la NEMA especifica las clases de diseño E y F los cuales son conocidos como motores de arranque suave. Estos diseños se distinguen por poseer bajas corrientes de arranque y se utilizan para cargas de bajo par de arranque en condiciones en que las corrientes de arranque son un problema. A continuación en la figura se muestra las curvas par-velocidad de los motores anteriormente descritos.

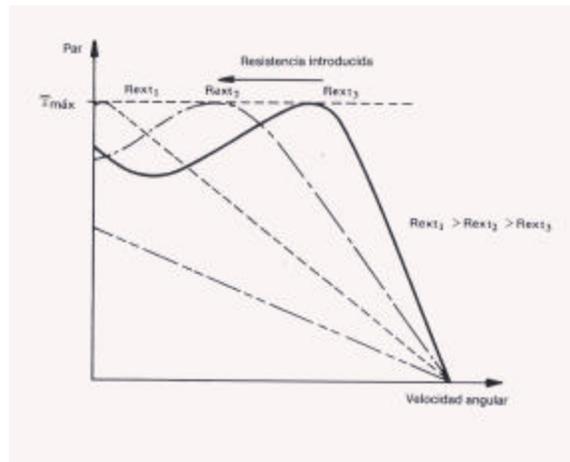
**Figura 11. Curvas par-velocidad para motores de inducción con rotor jaula de ardilla**



#### 1.4.1.2.2 Motor asíncrono con rotor devanado

Para este tipo de motores de inducción la curva par-velocidad se ve diferente por la inserción de una resistencia externa en el arrollamiento rotórico, a medida que esta resistencia intercalada aumenta, la velocidad con que se desarrolla el par máximo se hace menor sin que este se altere significativamente, hasta que el par máximo pasa a producirse en la condición de arranque, por la inserción de mayor resistencia en el rotor existe un decrecimiento en el par de arranque.

**Figura 12. Curva par-velocidad para motores de inducción con rotor devanado, para diferentes valores de resistencias externas insertadas**



#### 1.4.2 Características de la carga mecánica

Cuando se tiene un sistema que posee un movimiento de rotación donde

$$P = T \mathbf{v}$$

Donde P es la potencia desarrollada

T es el par de motor

? es la velocidad angular del movimiento.

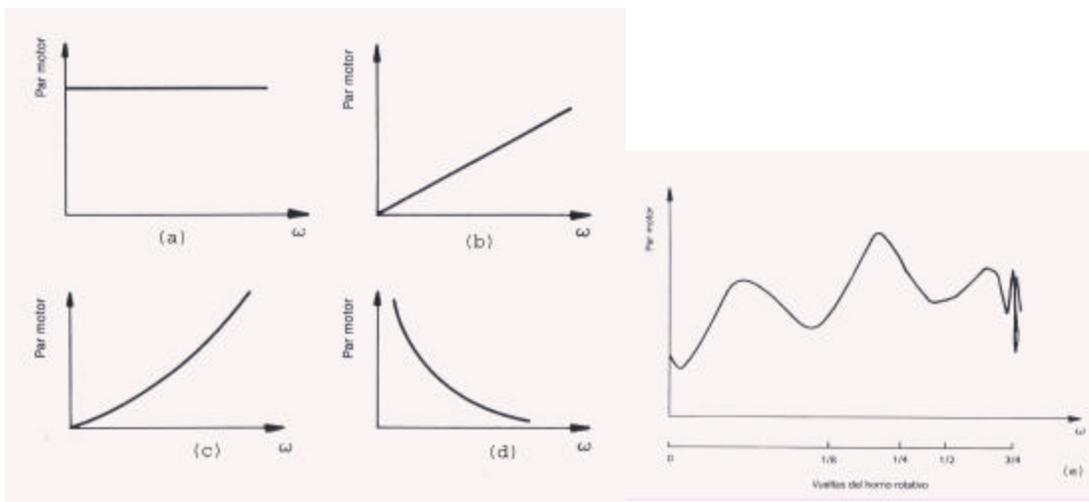
Comúnmente se menciona que se necesita un cierto tipo de potencia y esto es equivalente a decir que la carga necesita un par (T) dado con una velocidad de rotación (? ) dada. Las curvas par-velocidad muestran la dependencia que cada parámetro tiene entre si, siendo esto una característica fundamental en el proceso de selección del motor adecuado al accionamiento, con mira a un funcionamiento económico, satisfactorio y estable.

La función de las características par-velocidad se puede dividir las cargas mecánicas en varios grupos y estos son:

1. Par constante, son prácticamente independientes de la rotación (figura 13.a.) y entre estos se encuentran las grúas, transportadores de correas bajo carga constante.
2. Par que varía linealmente con la rotación (figura 13.b.) entre estos se encuentran los molinos de rodillos, bombas de pistón, cepillos y sierras para madera.
3. Par que varía con el cuadrado de la velocidad de rotación (figura 13.c.) entre ellos, las mezcladoras, ventiladores, centrifugadoras, bombas centrífugas, bombas de vacío y compresores.
4. Par que varía inversamente con la rotación, resultando potencia constante (figura 13.d.) están entre ellos las maquinas herramienta como fresadoras y mandrinadoras.
5. Par que varía de forma no uniforme con la rotación (figura 13.e.) tenemos como aplicación los hornos rotativos.
6. Cargas que no solicitan pares (volantes), siendo el propósito del volante el liberar la mayor parte de la energía cinética almacenada para los

máximos de demanda de energía por parte de la máquina utilizada. Lo que conlleva a que debe transferir la energía cuando ocurre el par máximo y luego restaurar su volante a la velocidad original, lo cual se lleva a cabo entre máximos de carga. Las prensas de perforación y estampado profundo, no hidráulicas constituyen máquinas que aplican este funcionamiento.

**Figura 13. Características par-velocidad de cargas mecánicas**



### 1.4.3 Características de la corriente y la velocidad del motor

#### 1.4.3.1 Motores síncronos

Para poder analizar su característica corriente-velocidad es importante el conocer que existe una magnitud que puede ajustarse con facilidad, y es la corriente de campo.

Cuando se tiene un motor sincrónico, al incrementar la corriente de campo se incrementa la magnitud de la tensión de armadura, pero esta no afecta la potencia real suministrada por el motor. Esta potencia cambia únicamente cuando cambia el par de carga aplicado al eje. Debido a que un cambio en la corriente de campo no afecta el deslizamiento mecánico y dado a que la carga en el eje no cambia, la potencia real suministrada no se altera. El voltaje entre terminales es constante y mantiene constante la fuente de potencia que alimenta al motor. Al incrementarse la corriente de campo inmediatamente se incrementa la tensión de armadura, pero esto solo puede realizarse cuando existe una potencia constante (ver figura 14.a.).

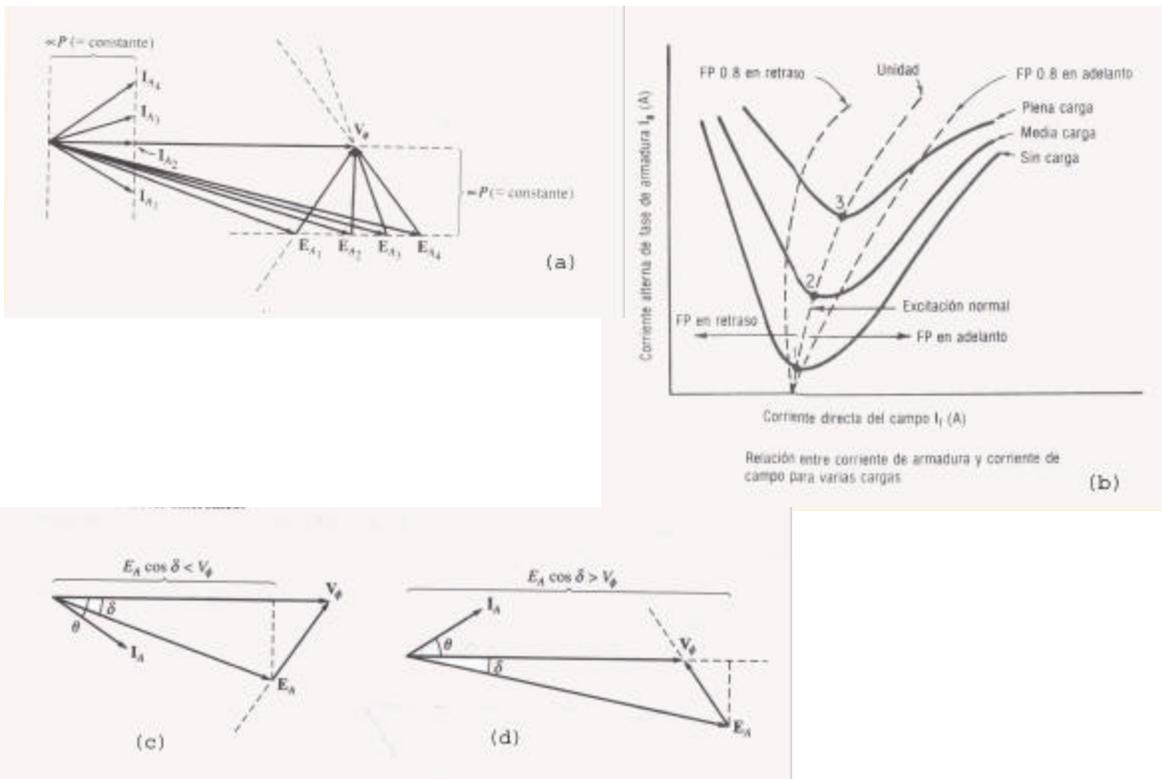
Al aumentarse la tensión de armadura y la corriente de campo, primero disminuye la corriente de armadura y luego se incrementa. Si la tensión de armadura es baja, la corriente de campo está en atraso y el motor se convierte en una carga inductiva, actuando como un sistema que consume potencia reactiva ( $Q$ ). A medida que la corriente de campo aumenta, la corriente de armadura se alinea con el voltaje de fase y el motor se torna resistivo. Luego al aumentar la corriente de campo, la corriente de armadura se coloca en adelanto y el motor se convierte en una carga capacitiva y en consecuencia consume potencia reactiva negativa ( $-Q$ ).

Las curvas en  $V$  del motor síncrono se muestran en la figura 14.b. y muestran la relación de la corriente de armadura versus la corriente de campo, en donde se observan los distintos niveles de potencia real suministrada a una máquina síncrona. Para cada curva, la mínima corriente de armadura ocurre con factor de potencia 1, cuando solo se suministra potencia real al motor. Para cualquier otro punto se puede ver que se encuentra, ya sea suministrando potencia reactiva al motor o este suministrándola. Cuando se tiene corrientes de campo mayores que el valor mínimo de la corriente de armadura dados se tiene que esta se encuentra en adelanto y suministra potencia reactiva al motor como lo haría un condensador, si la corriente de campo es menor a la corriente

de armadura dada, la corriente de armadura esta en atraso y consume potencia reactiva. Entonces se puede concluir que al variar la corriente de campo de un motor puede controlarse la potencia reactiva suministrada o consumida por el sistema de potencia.

Cuando existe una corriente pequeña de campo y el motor consume potencia reactiva es decir que la corriente esta en atraso, el motor se encuentra subexcitado. Por otro lado, cuando la corriente de campo es grande y la corriente esta en adelante, proporcionando un factor de potencia en adelante se dice que la maquina se encuentra sobreexcitado, sus diagramas fasoriales se encuentran representados en las figuras 14.c y d.

**Figura 14. a) Efecto de aumentar la corriente de campo sobre la operación del motor. b) Curvas V del motor sincrónico. c) Diagrama fasorial de un motor subexcitado. d) Diagrama fasorial de un motor sobreexcitado.**



### 1.4.3.2 Motor asíncrono

#### 1.4.3.2.1 Motor asíncrono de rotor jaula

Para un motor asíncrono con rotor jaula de ardilla su comportamiento va desde que se encuentra sin carga cuya velocidad es ligeramente menor a la síncrona, hasta que se le aplica una carga que va en aumento.

Cuando el motor se encuentra **sin carga o en vacío**, el deslizamiento es muy pequeño al igual que la reactancia del rotor y la frecuencia. De lo cual la corriente en el rotor es pequeña y solo la suficiente para producir el par sin carga, siendo la corriente en el estator la suma fasorial de su corriente de excitación y un componente de carga primario inducido en el rotor por efecto de transformación. Su factor de potencia en este momento está en atraso.

Para el caso de **media carga**, la velocidad disminuye un poco en el momento que se le aplica la carga. La pequeña disminución de velocidad causa un aumento en el deslizamiento, la frecuencia y en la reactancia del rotor. El aumento de la corriente inducida en el rotor se refleja como un aumento de corriente primaria en el estator. Esta corriente primaria produce potencia. La suma fasorial de la corriente sin carga y el componente con carga produce una corriente en el estator con un factor de potencia mejorado, con ello la corriente del estator ha aumentado desde que no tenía carga y el ángulo del factor de potencia ha disminuido, el hecho que la corriente haya aumentado y el ángulo disminuido, esto determina la producción de más potencia mecánica en la armadura y a tomar más potencia de las barras de distribución.

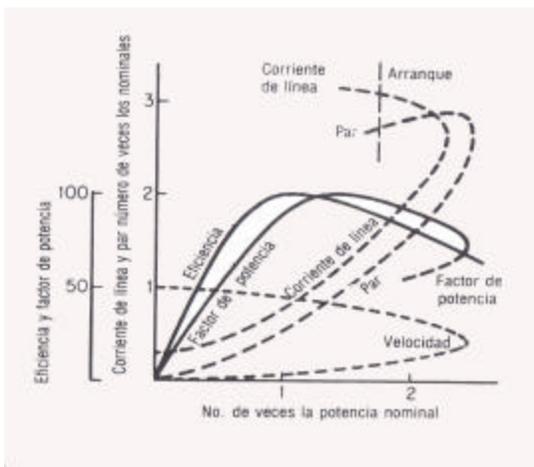
Si el motor se encuentra en la condición de **plena carga**, este motor girará con un deslizamiento que genera un equilibrio entre el par desarrollado y el par

aplicado, al aplicarle mas carga, el par del eje de motor exige mucha mas corriente del estator siendo esta mucho mayor en comparación a la que existiría sin la carga.

Cuando el motor se encuentra **más allá de plena carga** en el motor existe un aumento de carga y deslizamiento, la frecuencia del rotor continúa aumentando y el aumento en la reactancia del rotor produce una disminución en el factor de dicho rotor. Sabiendo que el motor de inducción se relaciona con el transformador, se puede decir que el secundario posee una carga en retraso, lo cual hace que también en el lado primario se retrase. De lo anterior se determina que cuando las cargas son mayores que la plena carga, el factor de potencia se aproxima a un máximo, para disminuir después rápidamente.

Las características anteriores se observan en la figura 15, donde la eficiencia y el factor de potencia están en un máximo aproximadamente a la salida nominal y en donde la corriente de línea y el par continúan aumentando hasta el par máximo. Después de la falla o par máximo, la corriente de línea aumenta, pero el par disminuye debido a que la rapidez de disminución del factor de potencia es mayor que la rapidez de aumento de la corriente.

**Figura 15. Efectos de la corriente primaria y el factor de potencia del estator en un motor rotor jaula de ardilla.**



Hay que tener en cuenta que para cada uno de los diseños de los motores con rotor jaula de ardilla estas características puede variar.

**Motores clase A:** Este tipo de motor al ser un jaula de ardilla normal, está diseñado para velocidad constante. Durante su arranque, la densidad de corriente es alta en las cercanías del rotor, durante el período de marcha esta corriente se distribuye uniformemente en la máquina, debido a este proceso se origina que tenga un alto par de arranque y baja resistencia del rotor produciendo una aceleración rápida hacia la velocidad nominal. Este motor tiene una mejor regulación de velocidad, pero su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal normal, haciéndolo menos estable en el arranque en línea, que es mas apreciable en motores de gran capacidad. Este tipo de motor resulta adecuado en donde los arranques y los paros no son frecuentes, por lo que es posible que se requiera un arranque reducido debido a la elevada corriente con rotor bloqueado.

**Motores clase B:** Se les conoce como de propósito general, posee ranuras en el rotor un poco más profundas que en el diseño anterior y esto hace que aumente la reactancia en el arranque y marcha del rotor. Este aumento reduce el par y la corriente de arranque. Sus corrientes de arranque varían entre 4.5 y 5 veces la corriente nominal. Estos motores suelen arrancarse en línea a pleno voltaje, al acelerarlos hasta llevarlos a plena velocidad, con cualquier carga que puedan arrancar. Estos motores son adecuados para cargas estables y continuas, donde no se necesite parar y arrancar continuamente.

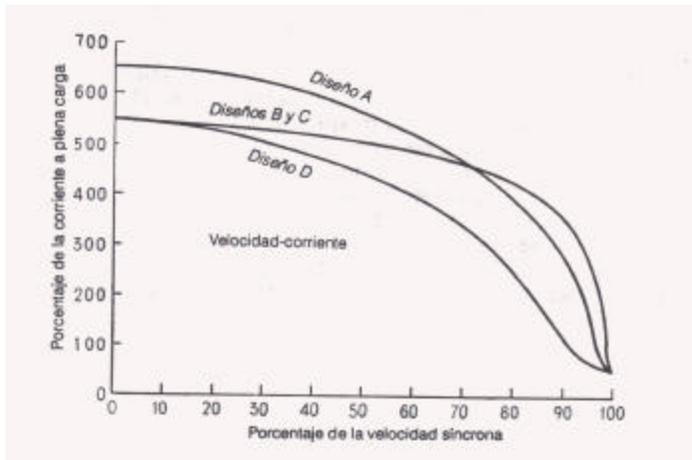
**Motores clase C:** Poseen un rotor de doble jaula, desarrollan un alto par de arranque y una menor corriente de arranque, de 3.5 a 5 veces la corriente nominal. Debido a su característica acelera rápidamente, pero cuando poseen cargas con alta inercia, se limita la disipación térmica debido al que casi toda la corriente se concentra en el devanado superior. Este motor se utiliza para condiciones en donde es difícil el arranque y mueva cargas repentinas, pero de baja inercia.

**Motores clase D:** Son conocidos como motores de alto par y alta resistencia. Poseen una corriente de arranque entre 3 y 8 veces la carga nominal, esta diseñado para servicio pesado en el arranque, pero no se recomienda para arranques frecuentes debido a su poca capacidad de disipación. Su regulación de velocidad esta considerada como la menos apropiada en la clasificación de motores jaula de ardilla. Estos motores arrancan a pleno voltaje, su corriente de rotor bloqueado es la misma que el motor clase B.

**Motores clase F:** A estos motores se les conoce como doble jaula y bajo par. Están diseñados como motores de baja corriente de arranque, menor que todos los demás diseños, poseen una resistencia muy alta en el rotor lo que hace que aumenta la impedancia de arranque y marcha, y reduce la corriente de marcha y de arranque. Fue diseñado para sustituir a la clase B, ya que posee bajas corrientes de arranque aproximadas entre 2 y 4 veces la nominal. Poseen menos regulación de velocidad y baja capacidad de sobrecarga y en general baja eficiencia en lo que respecta a su funcionamiento. Arrancan con grandes cargas y baja corrientes eliminando la necesidad de equipo para voltaje reducido.

A continuación se muestra las curvas características de velocidad-corriente para motores de inducción jaula de ardilla, así como una tabla en donde se describe una lista de corrientes para los distintos tipos de motores de inducción.

**Figura 16. Curvas características velocidad-corriente para motores de inducción jaula de ardilla.**



**Tabla II Corriente de plena carga, para motores trifásicos de corriente alterna.**

Corriente de plena carga*									
Motores trifásicos de corriente alterna									
HP	Motor de inducción de jaula de ardilla y rotor devanado					Motor síncrono			
	Amperes					Factor de potencia unidad (†) Amperes			
	115V	230V	460V	575V	2300V	230V	460V	575V	2300V
1/2	4	2	1	.8					
3/4	5.6	2.8	1.4	1.1					
1	7.2	3.6	1.8	1.4					
1 1/2	10.4	5.2	2.6	2.1					
2	13.6	6.8	3.4	2.7					
3		9.6	4.8	3.9					
5		15.2	7.6	6.1					
7 1/2		22	11	9					
10		28	14	11					
15		42	21	17					
20		54	27	22		53	26	21	
25		68	34	27					
30		80	40	32		63	32	26	
40		104	52	41		83	41	33	
50		130	65	52		104	52	42	
60		154	77	62	16	123	61	49	12
75		192	96	77	20	155	78	62	15
100		248	124	99	26	202	101	81	20
125		312	156	125	31	253	126	101	25
150		360	180	144	37	302	151	121	30
200		480	240	192	49	400	201	161	40

Para corrientes de plena carga de motores de 208 y 200 volts, aumentar 10 y 15 por ciento, respectivamente, la corriente de plena carga de los motores correspondientes de 230 volt.

\* Estos valores para la corriente de plena carga son para motores que trabajen a velocidades normales en los motores con banda y aquellos con características normales de par. Los motores construidos especialmente para bajas velocidades o altos pares podrán necesitar más corriente en trabajo normal, y los motores de varias velocidades tendrán la corriente de plena carga variable con su velocidad, en cuyo caso se debe emplear la corriente nominal de placa.

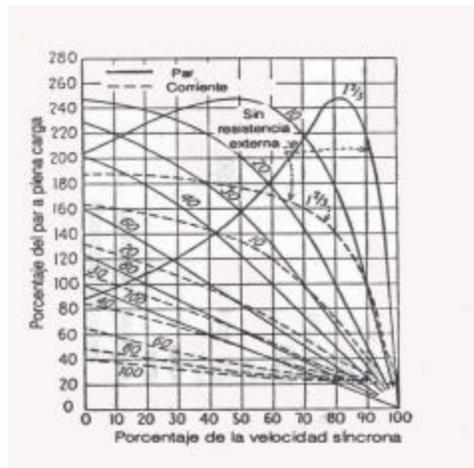
† Para factores de potencia de 90 por ciento, se deben multiplicar las cifras anteriores por 1.1 y 1.25 respectivamente.

Los voltajes de la lista son voltajes de motor. Las corrientes de la lista se deben permitir para límites de voltaje del sistema de 110 a 120, 220 a 240, 440 a 480, y 580 a 600 volts.

### 1.4.3.2 Motor asíncrono con rotor devanado

Para los motores con rotor devanado como se puede apreciar en la figura 17, los números sobre las curvas se refieren al porcentaje de la resistencia externa, el 100% de la resistencia proporciona el par nominal de frenado. Normalmente en este tipo de motores su arranque es por medio de una resistencia externa relativamente alta y esta resistencia se pone en cortocircuito gradualmente, conforme el motor adquiere velocidad. Con este proceso se permite que el motor entre altos pares de arranque y de aceleración y, sin embargo extraiga una corriente de línea relativamente baja. En la figura 17 se observa que para cada valor de resistencia externa, el motor tiene características variables de velocidad, por lo cual para cada cambio de carga así varía la velocidad. Entre mas baja sea la velocidad de operación, mas pronunciado es el efecto, de no modo que no resulta útil operar a menos del 50% de la velocidad plena, así como la perdida de potencia en el rotor y el resistor externo es proporcional al deslizamiento, la eficiencia se reduce en proporción directa a la reducción de la velocidad.

**Figura 17. Curvas características de velocidad-corriente para un motor asíncrono de rotor devanado.**



## **1.5 Pruebas de los motores de mediana tensión**

Las pruebas o test se realizan en base a normativas descritas por la ANSI y la IEEE tanto para los motores síncronos, como los asíncronos. Aunque estas pruebas sirven para determinar la eficiencia en los motores armados en fábrica, a diferencia de las máquinas síncronas cuyas pérdidas rotacionales son en función de la velocidad y la frecuencia, así como las pérdidas eléctricas en el estator y rotor son funciones de la carga, siendo constantes, es por ello que se considera el empleo de otros métodos para determinar la eficiencia en los motores asíncronos. Estos métodos de prueba son los conocidos como prueba en vacío y a rotor bloqueado, cuyo procedimiento se describirá a continuación como pruebas de funcionamiento.

### **1.5.1 Pruebas de funcionamiento**

#### **1.5.1.1 Prueba en vacío**

Esta prueba es similar a la que se realiza a un transformador en circuito abierto y proporcionan información con respecto a la corriente de excitación y a las pérdidas sin carga (pérdidas rotacionales). La prueba consiste en la aplicación de voltajes en las terminales del estator, tomando las lecturas al voltaje nominal, después de que el motor haya trabajado lo suficiente para que los cojinetes se hayan lubricado en forma correcta. Las pérdidas rotacionales totales de voltaje y frecuencia nominales se consideran constantes e iguales a sus valores sin carga. Al no haber carga, la corriente del rotor es un valor pequeño, pero suficiente para producir un par que supere la fricción mecánica y la fricción por aire. Las pérdidas en vacío del rotor son muy pequeñas pero apreciables debido a su mayor corriente de excitación.

Si no se tiene en cuenta las pérdidas  $I^2R$  del rotor, las pérdidas rotacionales  $P_R$  para las condiciones normales de funcionamiento son

$$P_R = P_{nl} - q_s I_{nl}^2 R_s$$

Donde  $P_{nl}$ = consumo total de potencia sin carga

$I_{nl}$ = corriente por fase

$q_s$ = número de fases en el estator

$R_s$ = Resistencia del estator por fase

Debido a que el deslizamiento de vacío es muy pequeño, la resistencia del rotor es muy grande. La reactancia aparente o sin carga, llamada también reactancia propia del estator, medida en las terminales del estator en vacío es casi igual a la suma de la reactancia del estator y la reactancia de magnetización

$$X_s + X_m = X_{nl}$$

La reactancia del estator se puede calcular a partir de los instrumentos sin carga, teniendo en cuenta lo anterior la magnitud de la impedancia por fase sin carga será entonces

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3}I_{nl}}$$

Donde el voltaje está tomado en terminales de línea a línea en la prueba de vacío. La resistencia sin carga se calcula de la siguiente forma

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3I_{nl}^2}$$

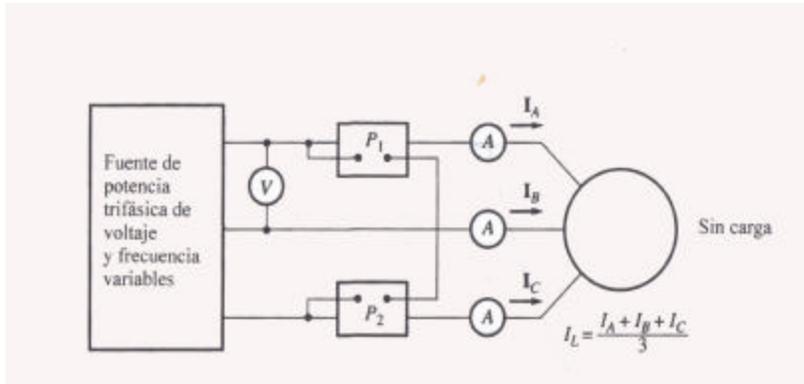
Siendo la potencia sin carga el consumo total de potencia trifásica en vacío.

El factor de potencia de vacío es muy pequeño lo que hace que la reactancia en vacío es casi igual a la impedancia sin carga.

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2}$$

A continuación se muestra las conexiones de un motor de inducción bajo su condición en vacío.

**Figura 18. Conexiones para prueba de vacío de un motor de inducción**



### 1.5.1.2 Prueba a rotor bloqueado

Este tipo de prueba provee información con respecto a las impedancias de dispersión. El motor se inmoviliza para que no se pueda hacer girar su rotor y se aplican entonces voltajes bajos en las terminales del estator hasta que se llegue a la corriente nominal de línea que aparece en la placa del motor, suele hacerse también para medirse el par a rotor bloqueado.

Ya que se ha determinado el voltaje y la frecuencia para las pruebas, el flujo de corriente en el motor se ajusta con rapidez cerca del valor nominal, midiéndose entonces la potencia, el voltaje y la corriente de entrada antes de que el rotor se caliente demasiado.

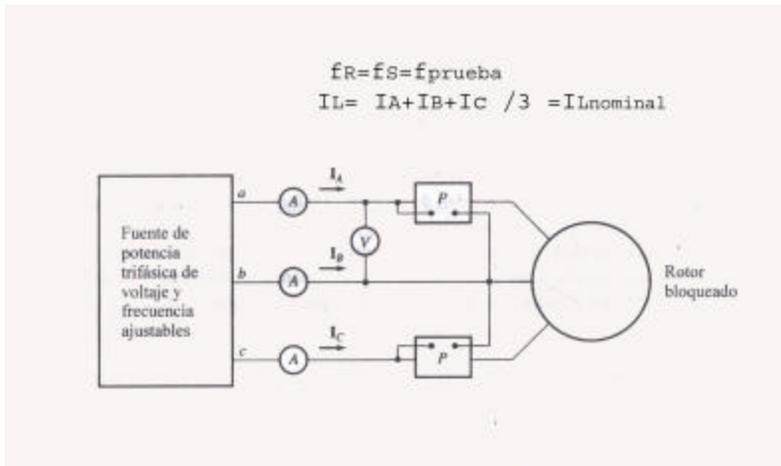
Este procedimiento es similar al que se realiza a un transformador al colocarlo en corto circuito. Las pérdidas en el núcleo son despreciables y las pérdidas mecánicas no existen debido a que el motor se encuentra inmóvil. La potencia total que toma el motor determina las pérdidas eléctricas en el cobre, a plena carga en el estator y en el rotor, estas pérdidas corresponden en su mayoría por efecto Joule en los arrollamientos del motor.

Se debe tener en cuenta que esta prueba se debe realizar en por lo menos tres posiciones angulares del rotor ya que estas diferencias en la

potencia absorbida indican posibles fallas de fundición en las barras que forman al rotor.

En la figura 19 se muestra las conexiones para realizar la prueba.

**Figura 19. Conexiones para prueba de rotor bloqueado en un motor de inducción**



Para determinar el valor de la resistencia a rotor bloqueado se debe considerar que la potencia de entrada esta determinada por  $P = \sqrt{3} V_T I_L \cos \phi$ .

La potencia a rotor bloqueado es por lo tanto:

$$PF = \cos \phi = \frac{P_{entrada}}{\sqrt{3} V_T I_L}$$

lo que lleva a encontrar la impedancia total del circuito a rotor bloqueado.

$$Z_{LR} = \frac{V_T}{I_S} = \frac{V_T}{\sqrt{3} I_L} = R_{LR} + jX_{LR}$$

La resistencia y la impedancia a rotor bloqueado estarán calculadas a frecuencia de prueba en términos del estator y del rotor.  $R_{LR} = R_S + R_R$

La reactancia total del rotor referida al estator también se puede encontrar por medio de la siguiente expresión  $X_{LR} = X_S + X_R$

$$X_{LR} = \frac{f_{nominal}}{f_{prueba}} X_{LR} = X_S + X_R$$

Se debe considerar realizar el procedimiento que sugiere las Pruebas IEEE, en donde la frecuencia de prueba debe de ser de aproximadamente el 25% de la frecuencia nominal y recomienda la distribución empírica de reactancias mostrada en la siguiente tabla.

**Tabla III Distribución de las reactancias en motores de inducción**

Diseño del rotor	Descripción	Xs y XR como función de XLR	
		Xs	XR
Rotor devanado		0.5 XLR	0.5 XLR
Clase A	Par normal de arranque, corriente normal de arranque	0.5 XLR	0.5 XLR
Clase B	Par normal de arranque, baja corriente de arranque	0.4 XLR	0.6 XLR
Clase C	Alto par de arranque, baja corriente de arranque	0.3 XLR	0.7 XLR
Clase D	Alto par de arranque, alto deslizamiento	0.5 XLR	0.5 XLR

### 1.5.2 Pruebas dieléctricas

La capacidad que posee una máquina para soportar un fallo en su dieléctrico es importante para el perfecto funcionamiento del mismo es por ello que la prueba dieléctrica se realiza para el devanado de la armadura y se realiza durante un tiempo aproximado de un minuto, un voltaje rms de corriente alterna de 1000 voltios, más dos veces el voltaje nominal entre una fase y las otras dos conectadas a tierra.

La prueba dieléctrica para el devanado de campo depende de la conexión para el arranque. Para un devanado de campo en corto circuito, el voltaje rms de prueba de CA suele ser de 10 veces el voltaje nominal de excitación, pero no menor de 2500V, ni mayor a 5000V. Para un devanado de campo cerrado a través de un resistor, el voltaje rms de prueba en CA es el doble del valor rms

de la caída IR, evitando el que no sea menor a 2500V, en donde la corriente es el valor que circularía con un devanado en corto circuito.

Los motores nuevos poseen valores de tensión especificados para cada arrollamiento en función de su tensión nominal y potencia, estas pruebas no se deben de realizar más de una vez, pero cuando es necesario realizarla por cualquier razón, se debe reducir el valor de tensión al 80% de los niveles originales. En el caso de los motores con arrollamientos reparados y no totalmente sustituidos, se aplica el 75% de la tensión de ensayo prevista para un motor nuevo, pero bajo cualquier condición esta no debe de ser inferior a 500V. Se suele tener en cuenta el tiempo de aplicación para esta prueba de un minuto a excepción en motores con la altura de la punta del eje igual o inferior a 315mm deberá durar entre 1 y 5 segundos.

Como observación final, esta prueba se debe realizar siempre que sea posible, a su temperatura de régimen (motor caliente) y por ello se debe realizar rápidamente después de realizar la prueba de elevación de temperatura.

## 2. ARRANQUE DE MOTORES DE MEDIANA TENSIÓN

### 2.1 Generalidades sobre la tensión media

En la actualidad los sistemas eléctricos relacionados con la producción, transporte, distribución y alimentación, funcionan mayormente en corriente alterna trifásica. En muchos países los parámetros relacionados con potencia, tensión, corriente y frecuencia son importantes para determinar el buen uso del equipo en servicio, debido a que sus valores pueden variar de país en país, como sucede con la frecuencia que se establece en algunos países con un valor de 60Hz y en otros 50Hz.

Hay que tener en cuenta que para cualquier potencia los parámetros de tensión y corriente están en relación inversa. Otro aspecto importante son los límites en el valor de corriente a circular por los conductores, a conectar y desconectar con los dispositivos de maniobra a controlar. Es por ello que a medida que se entra en consideración potencias mas elevadas, se hace necesaria utilizar también tensiones cada vez mayores, a fin de poder mantener la corriente dentro de límites técnica y económicamente admisibles.

Con lo que respecta a las tensiones se clasifican en:

- Baja tensión (BT) hasta 1000V valor eficaz en corriente alterna y 1500V en corriente continua.
- Alta tensión (AT) a partir de 1001V en corriente alterna.

Algunas normas como la CIE-71 establece que las tensiones de AT se clasifican a su vez en:

- Gama A  $1 \text{ kV} < U < 52 \text{ kV}$
- Gama B  $52 \text{ kV} = U < 300 \text{ kV}$
- Gama C  $U = 300 \text{ kV}$

Aunque generalmente las empresas generadoras y distribuidoras de energía eléctrica, utilizan los términos siguientes:

- Media tensión (MT)  $1 \text{ kV} < U = 50 \text{ kV}$
- Alta tensión (AT)  $50 \text{ kV} < U = 300 \text{ kV}$
- Muy alta tensión (MAT)  $300 \text{ kV} < U < 800 \text{ kV}$

De lo cual, la media tensión (MT) corresponden prácticamente a la Gama A de la norma CIE-71. La AT y MAT se utilizan para grandes líneas de transporte, desde las centrales generadoras, hasta las zonas de consumo.

La media tensión (MT) es utilizada para las líneas de distribución y para motores de potencia elevada que se alimentan directamente en mediana tensión en su gama baja que corresponde a valores de 1.5 kV a 11kV, preferentemente 3-5-6 kV, con el objetivo de mantener el valor de la intensidad dentro de ciertos límites.

Lo anterior es con lo que respecta a los límites de tensión media, pero cabe hacer mención que en lo que se refiere a los motores eléctricos en mediana tensión son operados con tensiones superiores a los 600Voltios ac y capacidad en algunos casos especiales de entre 100 y 200 HP , estos motores constituyen una ventaja en donde las potencia y la corriente de motores de baja tensión no cumplen satisfactoriamente su operación.

Poseen como característica conductores de tamaños mas pequeños en su entrada, mejor economía en lo que se refiere a la conversión de potencia,

pueden operar con cargas elevadas y corriente de arranque baja superando así sus aspectos negativos como costo elevado y su eficiencia un poco mas baja que los motores de baja tensión . En lo que respecta a su construcción los motores aplicados a mediana tensión poseen un marco de hierro fundido o acero dependiendo del motor a utilizar, así como sus devanados están recubiertos con una resina epoxíca con una impregnación de presión vacua (VPI) que luego es procesada y horneada, que contribuye a una mejor desempeño del mismo.

Otra razón para utilizar motores de tensión media, es su capacidad de personalizarse para cada aplicación, así como la limitación de pérdidas que ocurren por el calentamiento resistivo en los devanados. Los motores de mediana tensión son una opción cuando se tiene mecanismos de control de voltaje medio. A continuación se presenta una tabla con las características y aplicaciones de los motores jaula de ardilla a valores fijos de frecuencia determinada por la publicación de normas NEMA MG 10-2001 para la selección de motores polifásicos de inducción.

**Tabla IV Características y aplicaciones de los motores de inducción jaula de ardilla para tensión media y frecuencia fija.**

Características polifásicas	Torque a rotor bloqueado (porcentaje de torque con carga)	Torque de arranque (porcentaje de torque con carga)	Torque de frenado (porcentaje de torque con carga)	Corriente a rotor bloqueado (porcentaje de corriente de carga)	Deslizamiento	Aplicaciones típicas	Eficiencia relativa
Diseño A Estado normal a rotor bloqueado y alta corriente a rotor bloqueado	70-275*	65-190*	175-300*	No definido	0.5-5%	Ventiladores, sopladores, bombas centrífugas, compresores, cuando torque de arranque sea necesariamente bajo	Media o alta
Diseño B Torque normal a rotor bloqueado y corriente a rotor bloqueado normal	70-275*	65-190*	175-300*	600-800	0.5-5%	Ventiladores, sopladores, bombas centrífugas, compresores, cuando torque de arranque sea necesariamente bajo	Media

## Continúa

Diseño C Torque alto a rotor bloqueado y corriente a rotor bloqueado normal	200-285*	140-195*	190-225*	600-800	1-5%	Transportadoras, moledoras, máquinas agitadoras, compresores, cuando el arranque bajo carga sea requerido	Media
Diseño D Torque alto a rotor bloqueado y alto deslizamiento	275	No definido	275	600-800	=5%	Cargas altas con o sin volantes, como prensas cortadoras, elevadores, extractores, montacargas.	Media
IEC diseño H Alto torque a rotor bloqueado y alta corriente a rotor bloqueado	200-285*	140-195*	190-225*	800-1000	1-5%	Transportadoras, moledoras, máquinas agitadoras, compresores, cuando el arranque bajo carga sea requerido	Media
IEC diseño N Torque normal a rotor bloqueado y alta corriente a rotor bloqueado	75-190*	60-140*	160-200*	800-1000	0.5-3%	Ventiladores, sopladores, bombas centrífugas, compresores, cuando torque de arranque sea necesariamente bajo	Medio o alta

Nota: Estas características típicas están representadas en motores de uso común-para detalles específicos de los estándares consultar términos de fabricación

\*Los valores mas altos son para motores con clasificación de bajo caballaje.

## 2.2 Arranque directo

### 2.2.1 Motores síncronos

La mayoría de veces en los que se requiere arrancar un motor sincrónico, se puede utilizar cualquiera de los arranques aplicados a los motores asíncronos, solamente teniendo en cuenta que los motores sincrónicos mayores a 20HP tienen características similares a los motores de rotor devanado.

Estos motores al tener características especiales, no poseen estándares de desempeño o conexiones, pero en los motores de rango entre los 30HP y por debajo de este valor, poseen altas corrientes de rotor bloqueado. Como se ha mencionado sus aplicaciones están relacionadas cuando se desea mejorar el factor de potencia.

Cuando se desee aplicar en el un arranque a voltaje reducido se debe considerar que este tiene un rango de ajuste en el tiempo, lo que permite que el motor se aproxime a la velocidad de rango y así se reducen los kVA máximos en el momento de la interrupción, lo que termina en concluir que no hay mucha variación entre un voltaje reducido y uno con arranque completo.

Cabe mencionar que en algunas aplicaciones la corriente inicial es tan baja que el motor no comienza a girar ni en la primera como en la segunda conexión.

### **2.2.2 Motores asíncronos**

El arranque directo de un motor se realiza cuando a sus bornes se aplica directamente la tensión nominal a la que debe trabajar.

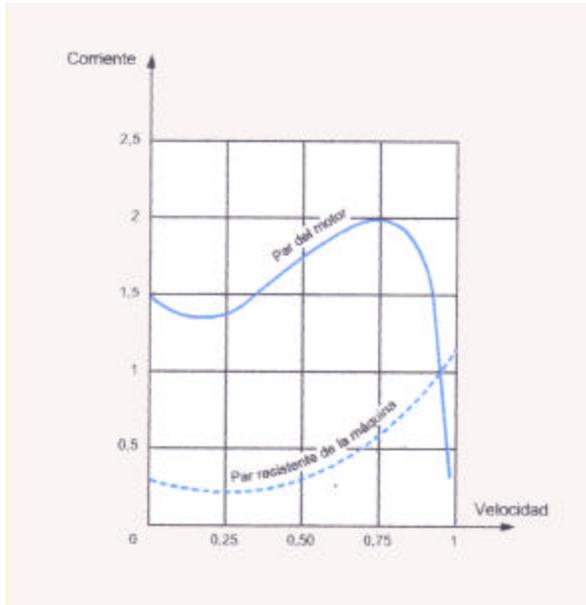
Si el motor arranca a plena carga, el bobinado tiende a absorber una cantidad de corriente muy superior a la nominal, lo que hace que las líneas de alimentación incrementen considerablemente su carga y como consecuencia directa se produzca una caída de tensión. La intensidad de corriente durante la fase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

El par se considera máximo cuando el motor alcanza el 80% de su velocidad, en ese momento, el pico de intensidad esta considerablemente amortiguado.

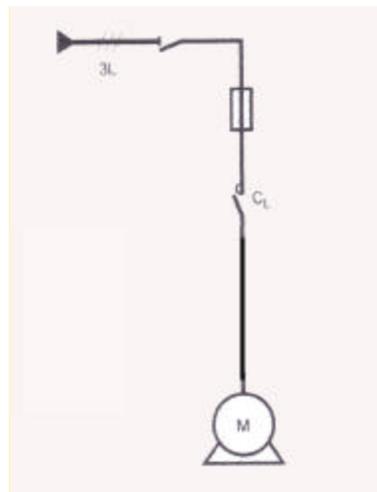
Siempre que sea posible conviene arrancar los motores a plena tensión por el gran par de arranque que se obtiene, pero si se tuvieran muchos motores de media y gran potencia que paran y arrancan en forma intermitente, se tendrá un gran problema de perturbaciones en la red eléctrica.

A continuación se muestra la curva corriente velocidad en arranque directo así como su diagrama de fuerza.

**Figura 20. Curva característica corriente-velocidad en un arranque directo**



**Figura 21. Diagrama de fuerza para un arranque directo**



### **2.3 Arranque a voltaje reducido**

Este método se utiliza para motores que no necesiten un gran par de arranque. El método consiste en producir en el momento del arranque una tensión menor que la nominal en los arrollamientos del motor. Al reducirse la tensión se reduce proporcionalmente la corriente, la intensidad del campo magnético y el par motriz.

Este tipo de arranque se puede llegar a cumplir teniendo en consideración lo siguiente:

1. La corriente a rotor bloqueado es proporcional al voltaje, es decir que si se reduce el voltaje a la mitad la corriente se reduce a la mitad.
2. El par a rotor bloqueado es proporcional al cuadrado del voltaje, es decir que si se reduce el voltaje a la mitad, el par se reduce a la cuarta parte.

### **2.4 Arranque con reactancia primaria**

Debido a que los motores de gran capacidad pueden llegar a tomar una corriente de arranque de 5 a 8 veces la corriente nominal, es necesario en muchas aplicaciones disminuir este efecto. Es por ello que este tipo de arranque es utilizado en tensión media y alta debido a sus ventajas en el arranque. El sistema ocupa muy poco espacio debido a que no necesita muchos elementos en su circuito principal como se observa en su diagrama de fuerza.

Desde el inicio el par de arranque es bajo y pueden permanecer así aun teniendo carga. Uno de los hechos sobre el motor asíncrono es que su par varía con relación al cuadrado del voltaje de alimentación y la corriente varía de forma proporcional con el voltaje tal y como se muestra a continuación:

$$C_d' = C_d \left[ \frac{U_d}{U_n} \right]^2$$

$$I_d' = I_d \frac{U_d}{U_n}$$

Donde  $C_d'$ : Par de arranque a voltaje reducido

$C_d$ : Par de arranque a voltaje pleno

$U_d$ : Voltaje de arranque

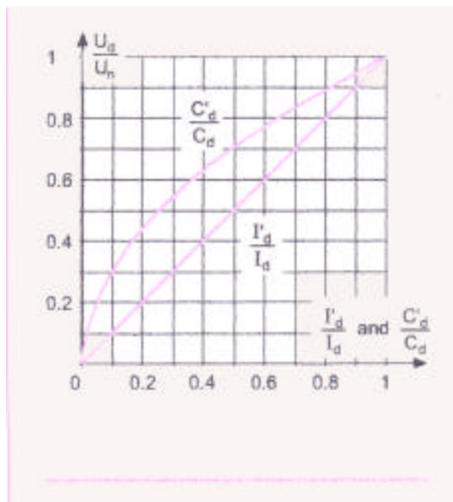
$U_n$ : Voltaje nominal

$I_d'$ : Corriente de arranque a voltaje reducido

$I_d$ : Corriente de arranque a voltaje pleno.

Las siguientes curvas muestran las variaciones que sufren sus características corriente y par en función de la proporción voltaje de arranque y voltaje nominal.

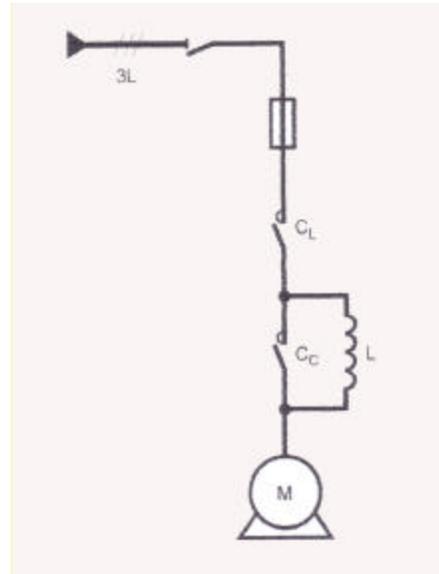
**Figura 22 Curva característica de arranque a voltaje reducido por reactancia**



El voltaje entre terminales del motor es incrementado gradualmente durante el arranque, lo que resulta en un arranque suave.

La operación de este sistema se detalla mediante la visualización de su diagrama de fuerza.

**Figura 23. Diagrama de fuerza, para un arranque a voltaje reducido por reactancia**



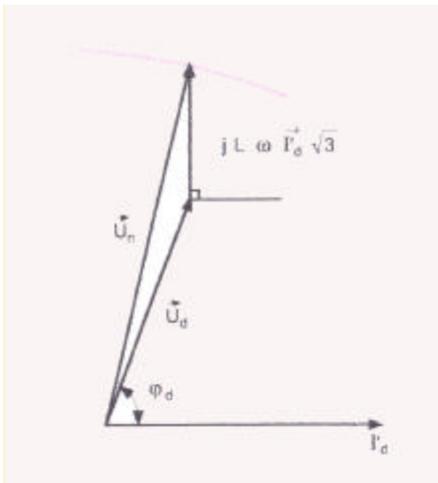
Este diagrama muestra al inicio las tres líneas de alimentación y por consiguiente los grupos de contactos localizados en cada conductor de entrada. El conjunto  $C_L$  que se cerrara primero esta en serie con las reactancias. La corriente de entrada debe pasar a través de estas reactancias de manera que se produce una caída de voltaje, reduciendo de esta manera el voltaje aplicado al motor, arrancando este bajo carga con una velocidad reducida. Después de un determinado tiempo el otro conjunto de contactos cerrara  $C_C$ , cortocircuitando y dejando fuera las reactancias, aplicando así el voltaje pleno para acelerar al motor a plena velocidad.

Para la determinación de la reactancia de arranque se considera que el voltaje de arranque se establece por la máxima corriente de arranque permitida por la línea.

$$U_d = U_n \frac{I_d^s}{I_d}$$

Si se observa el diagrama vectorial, se ve que el voltaje de fase a fase en la reactancia tiene el valor de  $U_n - U_d = j\sqrt{3}LV * I'_d$

**Figura 24. Diagrama vectorial de arranque a voltaje reducido por reactancia**



En donde el valor de la reactancia puede ser descrita como:

$$LV = \frac{U_n - U_d}{\sqrt{3}I'_d}$$

Ya que el factor de potencia es relativamente el mismo, el conocimiento de tiempo de marcha y el rango de operación son requeridos para determinar la potencia reactiva.

## 2.5 Arranque de rotor

Este tipo de arranque soluciona virtualmente todos los problemas que pueden ocurrir en el arranque, como suelen ser:

1. Reducción de corriente de arranque de línea con incremento en el par motor.
2. Adaptación del par motor al par de carga.

### 3. Arranques progresivos y largos (cargas con alta inercia).

Este método reduce la corriente de arranque con relación a la corriente absorbida por el método de arranque directo, aunque presenta los inconvenientes siguientes:

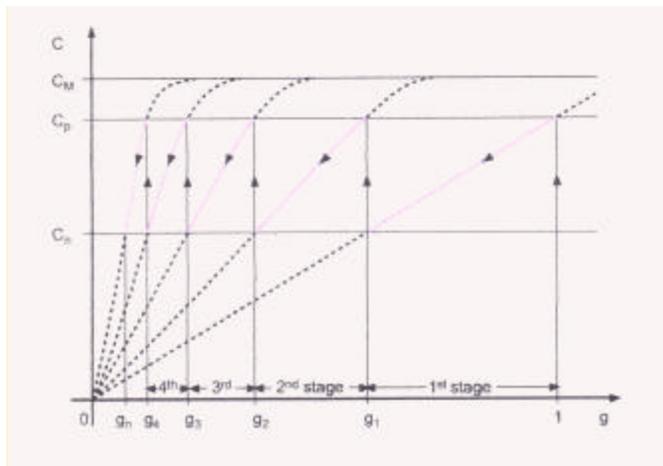
- a) El motor deja de alimentar durante el cambio de una tensión a otra
- b) aumenta el tiempo de arranque
- c) Es un método caro, debido a que ya se mencionó que el motor de rotor devanado es mucho más costoso que uno jaula de ardilla.

Siendo este modo de arranque para ser utilizado en motores asíncronos de anillos deslizantes (rotor devanado) y particularmente con carga.

Como se menciona los motores asíncronos de rotor devanado tienen la característica de poder ajustar mediante una resistencia externa al rotor el par de arranque para que pueda llegar hasta el par máximo del motor.

El par motor varía dependiendo de la cantidad de resistencia aplicada al rotor desarrollando una nueva curva característica par-velocidad como se presenta a continuación.

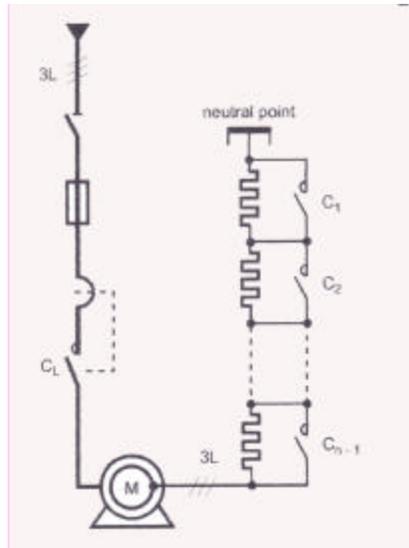
**Figura 25. Curvas características par-velocidad para un arranque de rotor**



En el proceso en el que la máquina llega a su par máximo se van adicionando estas resistencias para que finalmente se cortocircuiten produciendo que simplemente la resistencia retórica llegue a ser igual a la resistencia interna del rotor.

En el diagrama de fuerza se puede observar el funcionamiento de este método de arranque.

**Figura 26. Diagrama de fuerza para un arranque de rotor**



El motor es conectado a la alimentación por medio del cierre del contactor  $C_L$  nótese que se encuentra con su resistencia máxima en el rotor. A continuación en la siguiente etapa se cortocircuita la primera sección de resistencia retórica por medio del contactor  $C_1$ , siguiéndole posteriormente  $C_2$  y así sucesivamente hasta que se lleguen a cortocircuitar todas las resistencias ( $n$  etapas).

El número de etapas siempre será mayor que uno y así será la cantidad de contactos a utilizar además del de alimentación.

Este número está determinado por la fórmula

$$n = \frac{\log \frac{g_n}{C_p}}{\log \frac{C_n}{C_p}}$$

$$\frac{C_n}{C_p} = \sqrt[n]{g_n}$$

Donde:  $C_p$ : Par máximo

$g_n$ : tasa de deslizamiento

Según sea el caso,  $n$  puede ser deducido del par máximo o viceversa.

## **2.6 Arranque con variador de velocidad**

El arranque con variador de velocidad es de gran importancia ya que hay procesos en los que se requieren un control preciso de velocidad.

La regulación de velocidad puede realizarse por métodos mecánicos, como poleas o engranajes, o por medios eléctricos que es la aplicación de un variador de velocidad.

Este método utiliza por lo general, el motor de rotor jaula de ardilla, aunque este motor necesita poco mantenimiento presenta el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad, y esta depende de la forma constructiva, así como de la frecuencia de alimentación, pero al ser esta constante, solo se podría variar mediante el cambio en el número de polos o el deslizamiento. Es por ello que el método más eficiente de controlar la velocidad es por medio de un variador electrónico de frecuencia, el cual regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad.

Estos variadores son convertidores de energía encargados de modular la energía que recibe el motor, es decir convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de la red en magnitudes variables.

Son utilizados cuando se necesite un dominio del par y la velocidad, regulación sin golpes mecánicos y movimientos complejos, así como cuando se desee garantizar la aceleración y desaceleración progresiva.

Ya que los motores asíncronos presentan algunos inconvenientes en el arranque como la alteración en el funcionamiento de otros equipos debido a las corrientes altas en el proceso de arranque, así como las sacudidas en el arranque y parada de los motores que ocasionan problemas de seguridad, es por ello que es conveniente la utilización de esta tecnología dependiendo de la clase del motor.

Existen varios factores a tener en cuenta en el momento que se requiera un sistema de regulación de velocidad:

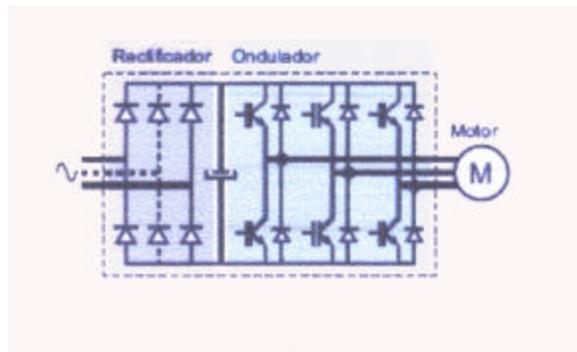
- a) Límites y flexibilidad de regulación
- b) Rentabilidad económica
- c) Estabilidad de funcionamiento a una velocidad dada
- d) Tipo de carga a manejar
- e) Condiciones de arranque y frenado
- f) Tipo de motor
- g) Rangos de funcionamiento
- h) Consideraciones de la red (factor de potencia, fluctuaciones de tensión, corriente de línea disponible)

Básicamente se componen de una fuente de alimentación de corriente directa, una etapa de filtrado, un ondulator compuesto de transistores, tiristores y diodos.

El ondulator convierte la tensión continua regulada en tensión alterna trifásica con la frecuencia variable. Su regulación de velocidad se obtiene haciendo girar un potenciómetro, así como mediante de un selector se puede escoger el sentido de giro.

Al modificar de forma automática la tensión y la frecuencia, para tener en cuenta la carga del motor, con lo cual se obtiene una disminución en el calentamiento del motor en vacío y a baja velocidad, asegurando al mismo tiempo un par adicional por si fuera necesario, obteniendo una velocidad prácticamente constante por la corrección de frecuencia en función de la carga. A continuación se puede observar un circuito equivalente de un convertidor.

**Figura 27. Esquema equivalente de un variador**



Los variadores de velocidad presentan algunas características especiales frente a otras características de los motores asíncronos en su uso normal y son:

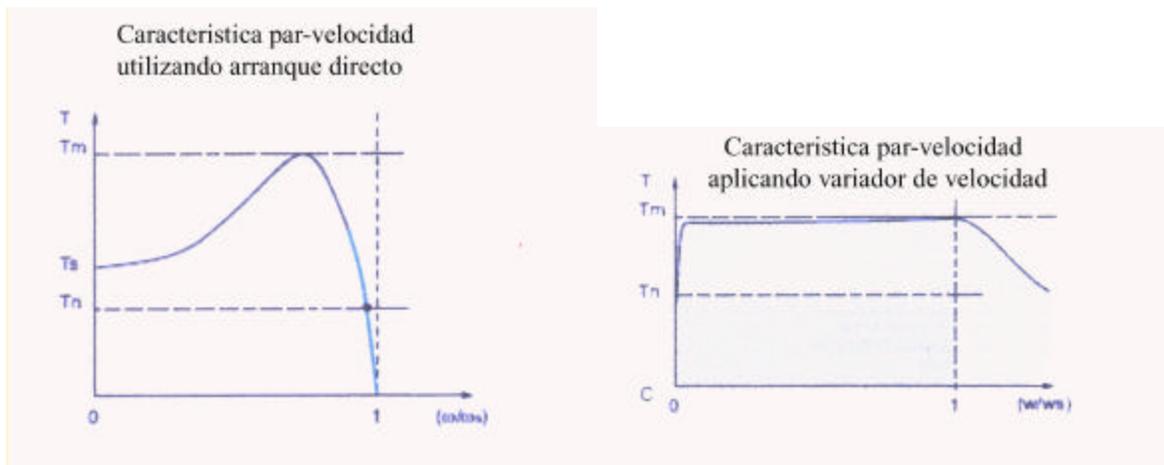
**Tabla V Cuadro comparativo entre el uso normal de un motor y con variador de velocidad**

Motor asíncrono	... en uso normal	... con variador
Corriente de arranque	Muy alta, entre 5 a 8 veces la corriente nominal	Limitado a cerca de 1.5 veces la corriente nominal
Par de arranque $C_d$	Elevado y no controlado, de entre 2 a 3 veces el par nominal $C_n$	Del orden de 1.5 veces el par nominal $C_n$ y controlado durante toda la aceleración
Arranque	Brusco, cuya duración depende de las características del motor y la carga	Progresivo y controlado con una rampa línea de velocidad
Velocidad	Variando ligeramente según la carga	Variación posible desde 0 hasta un valor superior a la velocidad de sincronismo

Continúa

Par máximo $C_m$	Elevado entre 2 y 3 veces el par nominal $C_n$	Elevado para todo el rango de velocidades
Frenado eléctrico	Relativamente complejo, necesita protecciones y un esquema particular	Fácil
Inversión de sentido de marcha	Complicado en tableros de control	Fácil, debido a que es posible invertir su sistema de fases por medio de la conversión electrónica de DC a AC
Riesgo de bloqueo	En caso de exceso de par o bajada de tensión	No
Funcionamiento del motor	ver figura 28	ver figura 28

**Figura 28. Comparación de características de par-velocidad con y sin empleo de variador de velocidad**



Las principales funciones de un variador de velocidad son:

1. Aceleración y desaceleración controlada
2. Variación de velocidad
3. Regulación de velocidad
4. Inversión de sentido de marcha
5. Frenado
6. Protección integrada

### 2.6.1 Tipos de variadores

**Convertidor de frecuencia para motor asíncrono:** Suministra a partir de una red de corriente alterna de frecuencia fija, una tensión alterna trifásica de valor eficaz y frecuencia variable. Estos convertidores alimentan a los motores de jaula de ardilla con todas sus ventajas, su único límite en su empleo es el funcionamiento a baja velocidad porque reduce la ventilación. Si se requiere un funcionamiento a baja velocidad es necesaria la utilización de un motor con ventilación forzada independiente.

**Regulador de tensión para arranque de motores:** Suministra a partir de una red de corriente alterna, una corriente alterna de frecuencia fija igual a la de la red, mediante el control eficaz de la tensión, por medio de la modificación del ángulo de retardo de disparo de los semiconductores de potencia.

### 2.6.2 Modos de funcionamiento

**Funcionamiento a par constante,** los cuales no importa cual sea su velocidad ya que su par no varía. Para este tipo de aplicaciones el variador debe tener la capacidad de proporcionar un par de arranque de 1.5 veces o mas el par nominal, para así vencer los rozamientos y acelerar la máquina.

**Funcionamiento a par variable,** donde la velocidad varía con el par solicitado. Para este tipo es suficiente un par de arranque de 1.2 veces el par nominal del motor.

**Funcionamiento a potencia constante**, este es un tipo especial y se utiliza cuando se desea que el motor proporcione un par inversamente proporcional a la velocidad angular. Su margen de funcionamiento es limitado a baja velocidad por la corriente proporcionada por el variador, y a gran velocidad, por el par disponible del motor.

## **3. CONTROL Y MONITOREO DE MOTORES**

### **3.1 Definición de control**

Aunque no existe una definición exacta a cerca de control, se puede decir que, se entiende por control a todo aquello que gobierna, manda o regula. Lo anterior proporciona la definición de control en una máquina, como todos aquellos controles que realizan varias funciones de gobierno en funcionamientos específicos como lo son el arranque, aceleración, regulación de velocidad y de potencia, así como la protección y freno. En consecuencia cualquier elemento utilizado para realizar estas acciones se llama componente de control.

### **3.2 Tipos de control**

Existen tres tipos de control y estos son:

1. Control manual.
2. Control semiautomático.
3. Control automático.

#### **3.2.1 Control manual**

Este tipo de control esta referido al mando o regulación que se ejecuta de forma manual. Se utiliza donde es necesario la función de control para la puesta en marcha y parada del motor, aunque su costo es relativamente bajo, este sistema proporciona generalmente solo protección contra sobrecarga y desenganche de tensión mínima pero no así contra baja tensión.

El control manual se caracteriza por el hecho que debe existir un operador debe mover un interruptor o pulsar un botón para que se efectuara cualquier cambio en las condiciones de funcionamiento de la máquina.

### **3.2.2 Control semiautomático**

Este tipo de control requiere de un operador que inicie cualquier cambio en la posición o condición de funcionamiento de la máquina a operar. Los controladores que pertenecen a esta clasificación además de utilizar el arrancador electromagnético utilizan uno o más dispositivos pilotos manuales, se utiliza principalmente para facilitar las maniobras de mando y dar flexibilidad a las maniobras de control en aquellas instalaciones donde no es posible utilizar el control manual.

### **3.2.3 Control automático**

Este tipo de control no se requiere de un operador que inicie los cambios de funcionamiento debido a que estos ya están incluidos en el sistema de control. Los controladores automáticos están formados por un arrancador electromagnético cuyas funciones están controladas por uno o más dispositivos automáticos. En algunos casos puede existir una combinación de dispositivos manuales y automáticos en un circuito de control.

## **3.3 Dispositivos y elementos usados en control**

Estos dispositivos son utilizados normalmente para arrancar un motor que va a desempeñar una actividad en particular. Cualquier circuito de control por simple o complicado que este sea, esta conformado por una serie de

componentes básicos conectados entre si para cumplir con un funcionamiento determinado. Su principio de operación es el mismo aunque su tamaño varia dependiendo el tamaño de motor que va a controlar.

### **3.3.1 Descripción y características de los dispositivos de control**

#### **3.3.1.1 Seccionadores e interruptores**

Los dispositivos de conexión y desconexión que se emplean en el control de motores se clasifican en dos formas. El primero es el seccionador cuyas características son solo de intensidad y de tensión, lo cual implica que no son aptos para la ruptura ni el cierre por lo que no deben ser utilizados en las conexiones y desconexiones bajo carga.

El segundo es el interruptor, el cual es capaz de interrumpir la corriente del motor bajo sobrecargas normales, teniendo como característica nominal la intensidad o potencia que pueden conectar o interrumpir.

Los disyuntores ó interruptores automáticos poseen un mecanismo de desenganche térmico, de forma que una vez pasada la sobrecarga se pueden nuevamente a conectar, lo cual ofrece una función de conexión, desconexión y protección contra cortocircuito, así como sobrecarga, lo cual lo hace mas útil que tener un interruptor y fusible por separado.

#### **3.3.1.2 Contactor**

El contactor se utiliza para realizar la función de arranque y parada en donde no se necesite protección adicional en su accionamiento. Se le conoce como interruptor de accionamiento electromagnético y esta compuesto de un

juego de contactos fijos, un juego de contactos móviles que se cierran por efecto electromagnético y se clasifican de la siguiente manera:

- Del tipo armadura: sus contactos son retenidos por efecto de las piezas polares del electroimán, son articulados para que puedan desplazarse hasta tocar los contactos fijos.
- Del tipo solenoide: sus contactos son accionados por el extremo superior del núcleo magnético de un solenoide, al ser excitado el solenoide, el núcleo es atraído hacia el interior elevando así los contactos hasta encontrar los contactos fijos.

Cualquiera que sea el tipo a utilizar su función es la de mantenerse cerrado cuando se aplica una tensión y abierto cuando ya no la tienen.

### **3.3.1.3 Pulsadores**

Estos dispositivos se diferencian de los interruptores debido a que estos se cierran y abren circuitos solamente mientras actúa sobre ellos una fuerza exterior, recuperando su posición de reposo (inicial) al cesar dicha fuerza, esta acción se realiza por medio de un resorte o muelle.

### **3.3.1.4 Relés**

Los relés son elementos que poseen la particularidad que al ser alimentados con una corriente muy pequeña permiten el control de circuitos de corrientes mayores, es decir que funcionan como un amplificador mecánico.

Estos mecanismos se emplean generalmente para aceptar información de un mecanismo sensible y la convierten en un factor de amplificación para conseguir el resultado que se necesita en el circuito de control.

El tipo de relé a utilizar en un circuito de control depende del tipo de detector que le transmite la información.

### **3.3.1.5 PT's (Transformadores de potencial)**

Estos elementos poseen la función de transformar valores de voltaje sin tomar en cuenta la corriente y se utilizan para alimentar instrumentos de medición, control o protección que requieran señal de voltaje.

Están construidos para diferentes relaciones de transformación, pero el devanado secundario es generalmente de 115 volts.

El primario se conecta en paralelo con el circuito a controlar y el secundario se conecta en paralelo con las bobinas de tensión de los diferentes aparatos de medición y de protección que se necesita energizar.

### **3.3.1.6 CT's (Transformadores de corriente)**

Su función principal es cambiar el valor de la corriente de un valor específico a otro con el cual se puedan alimentar instrumentos de medición, control o protección.

La capacidad de estos transformadores es muy baja y se determina sumando las capacidades de los instrumentos que se van a alimentar.

Estos transformadores pueden estar construidos de manera que tengan uno o varios devanados secundarios, embobinados a su vez sobre uno o varios circuitos magnéticos, de tal manera que se comportan como si fueran varios transformadores diferentes, es decir que uno de ellos se puede utilizar para mediciones que requieren mayor precisión y los demás se pueden utilizar para protección. Conviene aclarar que las protecciones diferenciales y de distancia se conecten a transformadores independientes. Para el caso de los transformadores utilizados en protección con relevadores estáticos se requieren núcleos que provoquen menores saturaciones que en el caso de los

relevadores de tipo electromagnético, debido a que las velocidades de respuesta de las protecciones electrónicas son mayores.

Los transformadores de corriente se dividen de la siguiente forma:

#### **3.3.1.6.1 Transformadores de medición**

Su función es medir a manera de reproducir fielmente la magnitud y el ángulo de fase de la corriente. Su precisión debe ser desde una pequeña fracción de la corriente nominal del orden del 10%, hasta un exceso de la misma del orden del 20%, sobre su valor nominal.

#### **3.3.1.6.2 Transformadores de protección**

Su función es proteger un circuito, requieren conservar su fidelidad hasta un valor de veinte veces la magnitud de la corriente nominal.

Para el caso de los relevadores de sobrecorriente, importa mucho la relación de transformación, pero para otro tipo de relevadores se debe considerar la relación de transformación como el mantener el error del ángulo de fase dentro de valores predeterminados.

#### **3.3.1.6.3 Transformadores mixtos**

Poseen una combinación de transformadores de protección y de medición. Un circuito de núcleo de alta precisión para los circuitos de medición y uno o más circuitos adecuados para las protecciones.

### **3.4 Descripción de los sistemas de monitoreo**

Las funciones del equipo de control y monitoreo para motores son:

Energización y parada (control), desconexión del motor debido a una falla ocurrida (protección), Tener la capacidad de inicializar el arranque (monitoreo), actuar sobre la velocidad del motor (monitoreo), brindar información de status de motor y contribución de la protección (monitoreo).

#### **3.4.1 Relé de tensión**

Este dispositivo realiza su operación de cierre y apertura de contactos, siempre que se aplique a su bobina la tensión correcta. Los relés de tensión se utilizan frecuentemente para separar circuitos controlados por una fuente o cuando la tensión de control es diferente a la tensión de línea.

#### **3.4.2 Relé de intensidad**

Este relé emplea para abrir o cerrar circuitos en respuesta a la variación de intensidad de otro circuito, como las corrientes absorbidas por un motor. Este dispositivo está diseñado para que si se conecta en serie con el circuito que debe suministrar la señal a detectar, se activará cuando la corriente que pasa por su bobina alcanza un valor suficientemente alto para producir un flujo magnético necesario para accionar el dispositivo de contactos. La intensidad de conexión ocurre cuando esta llega al valor necesario que debe pasar por la bobina para activar su mecanismo, así como su intensidad de desconexión o de retorno ocurre cuando el valor de esta deja de actuar después de haber sido activado su mecanismo. Se llama porcentaje de retorno a la relación porcentual entre el valor de desconexión y el de funcionamiento.

### **3.4.3 Relé térmico**

Este dispositivo posee una lámina bimetálica u otro elemento que al calentarse por efecto de una resistencia conectada en serie con el circuito al que debe ser sensible. El relé térmico bimetálico se fundamenta en la dilatación de dos metales diferentes cuando la corriente que pasa por dichas láminas o por la resistencia encargada de calentarlas, es suficiente, estas se dilatan y debido a diferentes coeficientes de dilatación, se curva el conjunto formado por las dos láminas actuando de esta forma sobre los contactos (abriéndolos). Como por ejemplo de estos relés puede citarse los empleados para protección de sobrecarga en motores.

### **3.4.4 Relé de frecuencia**

El relé de frecuencia se utiliza para producir la conexión de la excitación de campo en los motores síncronos durante la maniobra de arranque y para el control de aceleración de los motores de rotor bobinado. Algunos de estos elementos se componen de dos bobinas equilibradas que actúan sobre una armadura común. Estas bobinas actúan comparando una frecuencia de referencia con la del circuito en la que se utiliza el relé, de forma que la armadura se mueve de un lugar a otro según las frecuencias difieren en su valor determinado o dicha diferencia sea mayor que la establecida.

### **3.4.5 Relé temporizado**

El relé temporizado es un relé de tensión con la adición de un elemento de acción diferida que puede ser del tipo membrana con todo el aire o de tipo de cilindro con embolo amortiguador empleando aire o un líquido y que retarda la acción de sus contactos respecto al momento en que actúa el electroimán.

Este retardo en la acción puede ser cuando el relé se excita o se deja de excitar. Si el retardo se produce al excitar el relé se dice que esta temporizado al cierre y si se produce lo contrario que esta temporizado a la apertura. Ambos tipos están provistos de un ajuste para poder regular el tiempo de retardo para los límites determinados. Los contactos se representan siempre en la posición correspondiente al relé desactivado, tanto si son temporizados al cierre como a la apertura.

### **3.4.6 Relé de sobrecarga**

El relé de sobrecarga se utiliza en todos los arrancadores de motores, la adición de alguna forma de protección contra las sobrecarga a un contactor ordinario lo convierte en un arrancador de motor. Esta unidad realiza la función de protección contra sobrecarga y la protección contra fallo de la fase en el circuito del motor. El requisito básico para la protección contra las sobrecargas es que el motor puede trabajar a potencia nominal pero se impide su funcionamiento al producirse cualquier sobrecarga prolongada o importante. Cuando un motor esta sobrecargado mecánicamente, su corriente aumenta, lo que a su vez hace que aumente la temperatura del propio motor y sus devanados. También se produce un aumento de corriente y de temperatura a consecuencia de la falla de una fase en los motores polifásicos o de un defecto en los devanados del motor. Para obtener una protección completa contra las sobrecargas es necesario detener o medir la corriente absorbida por el motor e interrumpir el circuito si esta corriente excede el valor nominal del mismo.

Existen dos tipos de relés de sobrecarga, el primero utiliza un metal con bajo punto de fusión que retiene una rueda dentada que al ser liberada produce la apertura de un juego de contactos intercalados en el circuito de la bobina del arrancador.

El segundo tipo utiliza una lámina bimetálica para el desenganche del mecanismo de disparo y abrir los contactos del circuito de la bobina.

Los elementos térmicos utilizados en los relés de sobrecarga poseen por si mismo, un retardo en su acción que es inversamente proporcional a la sobrecarga a la que este sometida. Cuando la sobrecarga es ligera el motor sigue funcionando durante algún tiempo sin que actúe el relé, pero si la sobrecarga es grande actuará casi inmediatamente desconectando el motor de su fuente de alimentación y evitando que se deteriore.

La intensidad de corriente necesaria para producir el funcionamiento del relé esta determinado por el tamaño del elemento calefactor utilizado, influyendo por lo tanto la temperatura del aire que los rodea.

El tercer tipo de relé de sobrecarga es el electromagnético. Su elemento básico es una bobina conectada de modo que sea sensible a la corriente del motor mediante el uso de transformadores de corriente o por conexión directa. Cuando la corriente excede el valor nominal del motor, la bobina del relé produce el desplazamiento del núcleo móvil situado en el interior y abre los contactos del circuito de control. Los relés electromagnéticos de sobrecarga encuentran generalmente en arrancadores de motores grandes.

Después de cada disparo o actuación del relé de sobrecarga debe volverse a su anterior posición (reenganche), ya sea automática o manualmente. El tipo de reenganche automático solo se emplea en los casos que no presenta peligro al conectarse nuevamente al circuito a la red sin haber revisado la causa del disparo del relé. Después de haber disparado el relé de sobrecarga necesita algún de tiempo para enfriarse, por lo que siempre hay algún retardo antes de que se pueda realizar la reposición o reenganche.

### **3.4.7 Dispositivos piloto**

Estos dispositivos podrían denominarse más apropiadamente dispositivos sensibles o detectores a causa de que generalmente se les utiliza para detectar magnitudes tales como la presión, la temperatura, el nivel líquido o la presión aplicada a un pulsador. La función de estos dispositivos piloto es convertir la información que detectan en función del dispositivo con el cual están conectados.

### **3.4.8 Interruptor de flotador**

Los interruptores de flotador pueden tener formas diversas en lo respecta a su construcción mecánica o física. Sin embargo, en esencia se componen de uno o más juegos de contactos normalmente abiertos o normalmente cerrados, accionados mediante un sistema de palancas. Muchos interruptores de flotador, así como otros dispositivos piloto, emplean un interruptor de mercurio en lugar de uno de contactos metálicos. Los interruptores de flotador requieren algún medio de ajuste del margen de funcionamiento, es decir, la distancia de desplazamiento del flotador entre el cierre y la apertura de los contactos. En el interruptor de flotador simple, esto se consigue ordinariamente suspendiendo el flotador de una varilla que pasa a través de un agujero del propio interruptor. Entonces si se colocan topes encima y debajo de los brazos de la varilla del flotador, la distancia que este recorre antes de que se habrá el interruptor se puede ajustar separando o acercando los topes.

Otro sistema que se emplea en la construcción del interruptor de flotador para obtener mayor margen de ajuste es suspender el flotador de una cadena o cable que se arrolla a una polea. La acción del flotador se transforma entonces en un movimiento giratorio que acciona el interruptor del tipo del tambor. Sin

embargo hay que señalar que también se construyen interruptores de flotador con contactores más dimensionados que permiten el control primario de los motores de potencia fraccionaria.

Cuando se le utiliza para control primario se conectan entre la línea y el motor, siendo su misión simplemente establecer e interrumpir el circuito del motor en respuesta a la acción del flotador.

### **3.4.9 Interruptores de presión**

Son aparatos que accionan circuitos eléctricos, al transformar cambios, de presión de instalaciones neumáticas o hidráulicas, en señales eléctricas.

Los interruptores de presión, lo mismo que los de flotador, son considerados en general dispositivos piloto. No obstante, también se construyen para control primario de motores de potencia fraccionaria. Con estos interruptores, como sucede con todos, también existen grandes diferencias de diseño mecánico de unos a otro. Pueden clasificarse en tres tipos fundamentales según su mecanismo detector. Los pertenecientes al primer grupo se basan en la acción de fuelle que se expande o contrae en respuesta al aumento o disminución de presión.

Los contactos están montados en el extremo de una palanca que es empujada hacia arriba por el fuelle. El fuelle se expande moviendo a la palanca y esta establece o interrumpe los contactos, dependiendo de que estén normalmente abiertos o normalmente cerrados.

El segundo tipo se utiliza en lugar del fuelle, la acción del interruptor es idéntica tanto con fuelle como con diafragma. La ventaja de un tipo sobre otro depende mayormente de la instalación y de las presiones que intervienen y esto habrá que considerarlo en cada instalación. Un tercer tipo de interruptor de presión, tubo bourdon, emplea un tubo de forma semicircular y diseño de modo que cuando la presión aumenta tiende a enderezarse. Esta acción se transforma en

un movimiento giratorio por un varillaje que dispara un interruptor de mercurio montado de la caja o envolvente.

### **3.4.10 Finales de carrera o interruptores de posición**

Son aparatos destinados a controlar la posición de una parte en una máquina o la misma máquina.

En cuanto a los contactos, tienen uno cerrado y uno abierto y se comportan exactamente como los de un pulsador de conexión-desconexión

Su aplicación va dirigida a la parada o inversión del sentido de desplazamiento de las máquinas, por lo que se convierten en dispositivos de los que depende la seguridad de la máquina, el material y el mismo personal.

Al actuar una fuerza mecánica por lo regular un elemento de la misma máquina, actúa sobre la parte saliente del interruptor de posición, desplazando los contactos por lo que se abren o cierran determinados circuitos.

Una forma de estos elementos son los MICROINTERRUPTORES. Se denominan así por ser de pequeñas dimensiones y se emplean como conmutadores de corriente del circuito de mando para fuerzas de accionamiento mínimas o pequeños desplazamientos.

Los interruptores de posición o finales de carrera se caracterizan por:

- La apertura y cierre de sus contactos debe ser muy rápida (corte brusco) aun para movimientos lentos.
- Una duración mecánica y eléctrica máximas
- Un fácil ajuste y conexión

1. Al trabajo: si sus contactos temporizados actúan después de cierto tiempo de haber sido energizado.

2. Al reposo: sus contactos temporizados actuaran solamente después de cierto tiempo de que el temporizador haya sido desenergizado.

### **3.4.11 Detectores de proximidad**

Son dispositivos electrónicos empleados para el control de presencia, ausencia, fin de recorrido, etc., sin necesidad de entrar en contacto directo con las piezas.

Se emplean cuando las velocidades de ataque y funcionamiento son elevadas, el entorno exterior de los piezas es severo, existe presencia de polvos, aceite de corte, agentes químicos, humedad, vibración, choque, etc., o cuando las piezas son pequeñas o frágiles.

Estas características hacen que su uso sea muy útil en máquinas de ensamblaje, máquinas herramientas, máquinas transportadoras, prensas, etc.

#### **3.4.11.1 Detectores de proximidad inductivos**

Se usan para objetos metálicos. Se basan en la variación de un campo electromagnético al acercarse un objeto metálico.

#### **3.4.11.2 Detectores de proximidad capacitivos**

Se emplean para objetos de cualquier naturaleza. Su principio de funcionamiento radica en la variación de un campo eléctrico al acercarse un objeto cualquiera.

### **3.4.12 Detectores fotoeléctricos**

Son dispositivos electrónicos compuestos esencialmente de un emisor de luz asociado a un receptor fotosensible. Para detectar un objeto, es suficiente que este interrumpa o haga variar la intensidad del haz luminoso.

#### **3.4.12.1 Detectores fotoeléctricos de barrera**

Son dispositivos en los cuales el emisor y detector están separados. Se usan particularmente para alcances largos, o en la detección de objetos cuyo poder reflexivo no permiten la utilización del sistema reflex.

#### **3.4.12.2 Detectores fotoeléctricos tipo *reflex***

En este sistema el emisor y el receptor van incorporados en un mismo dispositivo. El retorno del haz de luz se obtiene mediante un reflector montado frente al detector.

#### **3.4.12.3 Detectores fotoeléctricos de proximidad**

En este caso también el emisor y receptor están incorporados en una misma caja. El haz de luz, en este caso, es parcialmente reflejado hacia el receptor por cualquier objeto que se encuentre en su proximidad.

#### **3.4.13 Interruptor de caudal**

La finalidad de un interruptor de caudal es detectar el caudal líquido, aire o gas a través de una tubería o conducto y transformarlo en la acción de apertura o cierre de un juego de contactos. Este tipo de interruptor utiliza una palanca con contactos en uno de sus extremos y una paleta o aspa en el otro. El extremo de la paleta se introduce en el tubo de modo que el flujo líquido o gas actuando sobre esta haga oscilar la palanca y abra o cierre los contactos del accionador por el otro extremo.

Otro tipo de interruptor de caudal utiliza la diferencia de presión producida al pasar el líquido del orificio de un plato o diafragma instalado en el tubo. Desde

cada lado del orificio parte un tubo hasta el interruptor de presión. La correspondiente diferencia de presión actúa sobre el interruptor de presión en un sentido o en otro abriendo o cerrando sus contactos lo que depende de su disposición.

### **3.5 Soluciones electromecánicas**

El escoger entre varios dispositivos tales como switch, interruptores de circuito (*circuit breaker*) o contactores depende de:

Tasa de operación, Tolerancia eléctrica, potencia del motor. Por ello podemos escoger entre:

#### **3.5.1 Fusibles y switches**

En cualquier diseño la capacidad de interrupción, tolerancia eléctrica y mecánica es baja. Por ello son utilizados en potencias pequeñas,  $I_n$  (corriente nominal) aproximadamente 50 amps y 5,500 volts, y operaciones no máximas de tres. Por su baja capacidad interruptiva el escoger dispositivos de protección se hace problemático.

#### **3.5.2 Interruptores de circuito (*Circuit breakers*):**

Son generalmente utilizados en motores de altas potencias arriba de 300 amps, con pequeños valores de operación, voltajes no mayores de 6.6 Kv.

### 3.5.3 Fusibles y contactores

Estos son simples mecanismos de control combinados con la robustez y simplicidad de los contactos los cuales tienen una alta tasa de operación, Algunas instalaciones utilizan contactores con enclavamiento mecánico para asegurar el consumo permanente del electromagneto de cierre. Esto puede reducir la duración como resultado de la gran complejidad de la cadena cinética.

La potencia de corto circuito de la red realmente no afecta a los contactores gracias a la presencia de fusibles colocados inmediatamente después del switch de aislamiento o a continuación de los contactos de desconexión sobre el lado del bus de barra. Estos fusibles con alta capacidad interruptiva limitan las corrientes de corto circuito. Estas características especiales significan que si potencia de la red incrementa los cubículos alimentadores de motor pueden ser mantenidos. Los soportes de los buses de barras deben ser reforzados si se necesita.

Características especiales de utilizar fusibles o interruptores de circuito:

- a) En operaciones de una fase se espera una operación del fusible lo cual no sucede algunas veces, hoy esta característica es de bajo riesgo pero puede ser mejorada con el uso de dispositivos de protección adicionales tales como: dispositivos de detección de bajo voltaje o relays de desbalances.
- b) Discriminación del equipo en la parte superior de la protección puede ser difícil cuando los fusibles son de alto valor 200 ó 250 amps y el alimentador protegido por estos fusibles considera una larga fracción de la potencia suplida por el breaker principal. Por ello, la alta capacidad de interrupción de las cámaras de disipación de arco de los contactores combinada con los fusibles permite el uso de pequeños

livianos reles de sobrecorriente para el retardo de tiempo, para asegurar la discriminación. La discriminación es fácil de mejorar si el alimentador es protegido por un interruptor de circuito pero para altas corrientes de corto circuito la corriente no será limitada por lo que incrementara el estrés térmico.

- c) Algunos tipos de dispositivos en especial los contactores de vacío generan sobre voltajes al energizar y detener un motor, para proteger estos sobrevoltaje que progresivamente dañan el aislamiento del motor algunos fabricantes colocan limitadores de sobrevoltaje de ZnO si se requiere.

A continuación podemos ver un resumen de la aplicación de los dispositivos de interrupción.

**Tabla VI Aplicación de dispositivos de interrupción**

Dispositivo	Tasa media de arranques	Duración de operación	Potencia de motor
Switch - fusible	Bajo: 2-3 días	2000	Bajo $\leq$ 50 amps
Interruptor de circuito.	Bajo: 10 días	10,000	Alto $\geq$ 7.2 KVA > 300 amps
Contactador-fusible	Alto > 10/h	> 10,000	Promedio $\leq$ 300 amps

### 3.6 Soluciones electrónicas

Estas proveen a los usuarios de motores de mediana tensión posibilidades y ventajas tales como:

Velocidad variable, posibilidad de velocidad de regulación, altas tasas de operación y ahorro de energía.

Debe tomarse en cuenta que la solución electrónica raras veces se utiliza solamente para la limitación de arranque. Antes de detallar los casos estándar de dispositivos electrónicos, debemos señalar ciertas precauciones constructivas que debemos tomar en cuenta a nivel motor:

- a) Margen de seguridad de temperatura por armónicas, un 15% de margen sobre la corriente es generalmente suficiente.
- b) Es recomendada la ventilación forzada ya que los motores pueden rodar a velocidades bajas, según la aplicación.
- c) Refuerzo del aislamiento entre devanados debido al gradiente de voltaje generado por el switcheo de tiristores

A continuación se mostrara los principios generales de las soluciones electrónicas mas utilizadas:

### **3.6.1 Rectificadores e inversores autónomos**

Ellos tienen la capacidad de manejar voltaje y frecuencia variable garantizando un control completo de velocidad y torque, son utilizados en motores asíncronos los cuales tienen las siguientes características:

- a) El torque es proporcional a  $V^2$  si  $f$  y  $N$  son constantes
- b) El torque es inversamente proporcional a  $f$  para un voltaje y velocidad específico.

Los rectificadores e inversores existen en tres tipos:

- a) Rectificador/ inversor de voltaje; en este el rectificador tiristor coloca el voltaje, proporciona la corriente alterna a una frecuencia variable.

La configuración de estos es similar a la de los UPS utilizados en computadores para fuentes de bajo voltaje. Dicho inversor de voltaje es utilizado en motores de alta reactancia y algunas veces requiere un filtro entre drive-motor además necesita frenos regenerativos si el rectificador es reversible.

- b) Rectificador/inversor con modulación de ancho de pulso (PWM); los diodos rectificadores alimentan al inversor, este genera pulsos de voltaje que reproducen la onda senoidal con periodo y amplitud variable. Una característica interesante es que permite una amplia gama de velocidades, la velocidad máxima es limitada por la máxima frecuencia de switcheos permitidos por los tiristores inversores. Para poder mejorar la velocidad de conmutación se utilizan transistores de potencia o IGBT, estos permiten operación reversible
- c) Rectificador/ inversor de corriente. En estos el rectificador es combinado con una bobina de choque la cual actúa como un generador DC, el inversor switchea la corriente por turnos el motor utiliza capacitores, por lo que la frecuencia y su velocidad dependen de la velocidad de switcheo. Estos inversores operan en los cuatro cuadrantes, además de trabajar con motores de baja reactancia.

### **3.6.2 Cascada subsíncrona**

Motores asíncronos de anillos deslizantes son normalmente alimentados por la red. Su velocidad es ajustada utilizando la corriente del rotor por medio de un puente rectificador/inversor, el rectificador coloca energía al circuito del rotor incrementando su deslizamiento. La energía proporcionada depende del set de conducción colocado a los tiristores del inversor lo cual reinyecta energía a la red. La cascada subsíncrona habilita la variación continua con un máximo de deslizamiento alrededor del 40%. La potencia convertida es baja comparada

con la potencia del motor y la energía regenerada es puesta en operación después del arranque por resistencia del rotor. Este arreglo puede operar a velocidades mayores de la velocidad síncrona (supersíncrona) en el caso de cargas de transporte.

### **3.6.3 Rectificador e inversor autocontrolado**

Las fases del motor estator en el caso síncrono son alimentadas en turnos al igual que las corrientes de conmutación de rectificadores/inversores autónomos. La conmutación de una fase del estator al próximo es auto controlado por la velocidad del motor por medio de un sensor. Hay una correspondencia entre el flujo de excitación y el flujo de armadura, como en las máquinas de DC y el riesgo de salida es cero. Este presenta problemas de conmutación en el arranque y bajas velocidades, esta solución es ideal para motores síncronos.

### **3.6.4 Ciclo convertidor**

A cada fase del motor es alimentada por un doble puente rectificador trifásico. El primer puente es utilizado para proporcionar la corriente a través del ciclo positivo sobre cada una de las fases de la red de acuerdo a la frecuencia requerida. El segundo puente es utilizado por corrientes inversas durante la alternancia negativa a cada una de las fases. El ciclo convertidor produce una pseudo alimentación trifásica por lo que requiere filtraje y una frecuencia variable entre 0 % y una tercera parte de la frecuencia de la red.

**Tabla VII Características y aplicaciones de los motores eléctricos con respecto al tipo de controlador de velocidad**

<b>Motor</b>	<b>Carga</b>	<b>Variación de velocidad</b>	<b>Potencia</b>	<b>Eficiencia en conjunto</b>	<b>Tipo de controlador de velocidad</b>
asíncrono o síncrono	Bombas, ventiladores, compresores, extrusores.	0 % arriba de 100%.	De 10 Kw hasta 100 Kw	0.85 a 0.90	Rectificador e inversor autónomo
Asíncrono anillos deslizantes	Bombas, ventiladores, compresores, extrusores.	60% a 100 %	De 100 Kw a algunos Mw.	0.90 a 0.95	Cascada subsíncrona.
Síncrono	Bombas, ventiladores, compresores, extrusores, maquinas centrífugas, TGV bogies	0 % y varias veces arriba del 100%	100 Kw hasta 10 Mw	0.90 a 0.95	Rectificador e inversor auto controlado
Asíncrono o síncrono	Aceiteras, molinos, klins de cementeras (baja velocidad)	0% a +- 33%	100 Kw a algunos 10 Mw	0.85 a 0.90	Cyclo convertidor.

## **4. PROTECCIÓN DE MOTORES DE MEDIANA TENSIÓN**

### **4.1 Definición de protección**

Un conjunto de protección de motor agrupa los dispositivos que permiten evitar averías importantes inherentes a las condiciones anormales de funcionamiento a nivel de la alimentación, motor o proceso.

### **4.2 Principios de protección**

La elección de las protecciones a instalar se hace en función: De las condiciones de aplicación, de la importancia del servicio que asegura el motor, del grado de seguridad deseado, del coste relativo de la protección respecto al motor, de la probabilidad de que se manifiesten los defectos considerados.

Pero también dependen del tipo de carga arrastrada, de las perturbaciones que pueden aparecer en la red y del tipo de motor protegido.

Los motores trifásicos como sabemos pueden ser clasificados en dos tipos:

Asíncronos o de inducción y síncronos.

Independientemente de que tipo sea cualquier falla conllevará costos de reparación o reemplazo, traslado, instalación y pérdida de producción. Muchas de las fallas de motor y falla de sus componentes son relacionadas al sobre calentamiento de este. El estrés térmico puede potencialmente ser la causa de la mayoría de fallas de sus componentes: Estator, Rotor, cojinetes, eje y carcasa (frame).

### **4.2.1 Clasificación de los sistemas de protección**

Los sistemas de protección de motor son asociados a relevadores o dispositivos que se puede energizar por una señal de corriente, una de voltaje o por ambas. Los cuales consisten en un elemento de operación y un grupo de contactos.

Según la anterior definición las protecciones pueden ser clasificadas en:

**4.2.1.1 Electromecánicas:** equipos de control con elementos electromagnéticos y mecánicos que son ajustados para verificar niveles de tensión, corriente o potencia.

**4.2.1.2 Estáticas:** Equipos de protección con elementos electrónicos análogos que son ajustados para verificar niveles de tensión, corriente o potencia.

**4.2.1.3 Microprocesador:** Equipos de protección con elementos electrónicos controlados por un microprocesador los cuales pueden ser programados para verificación de niveles de tensión, corriente y poder realizar con esta información estrategias de protección, son capaces de almacenar información y poder tomar decisiones ante fallas.

### **4.2.2 Características de una protección**

Las protecciones independientemente de la clasificación anterior, poseen las características siguientes:

**4.2.2.1 Selectividad:** Está relacionado con la velocidad de operación, pero realmente significa que el elemento de protección pueda

determinar con precisión el nivel de corriente para el cual debe ocurrir la señal de disparo o bien la distancia para una falla remota para la cual debe sacar de servicio el motor.

**4.2.2.2 Rapidez:** Está relacionado con la velocidad de operación del dispositivo de protección ya que su respuesta esta asociada a los tiempos y retardos de los elementos constructivos del elemento de protección y de los elementos externos asociados al equipo.

**4.2.2.3 Confiabilidad:** equipo de protección que sea confiable o segura su operación, que sepamos que operara cuando se necesita.

### **4.3 Principales protecciones y principales fallas**

Para los motores de inducción o asíncronos tenemos: sobrecargas, cortocircuitos, ruptura, inversión y desequilibrio de fases, falla de aislamiento entre espiras, estator a tierra, tensión mínima y máxima, arranque incompleto.

Para los motores síncronos tenemos: ruptura de sincronismo, perdida de excitación, masa rotor, marcha prolongada en asíncrono en el arranque, sobrecarga y cortocircuitos en el arrollamiento de excitación, retorno de potencia (marcha como alternador).

Existen otros defectos ligados al proceso o a la carga tenemos: arranques demasiado frecuentes, bloqueo de motor, mínimo de potencia o de corriente.

A continuación se mostrará los procesos de detección y protección referidos a los principales tipos de fallas:

#### **4.3.1 Protección de sobrecarga, protección por modelo térmico y temperatura de rotor**

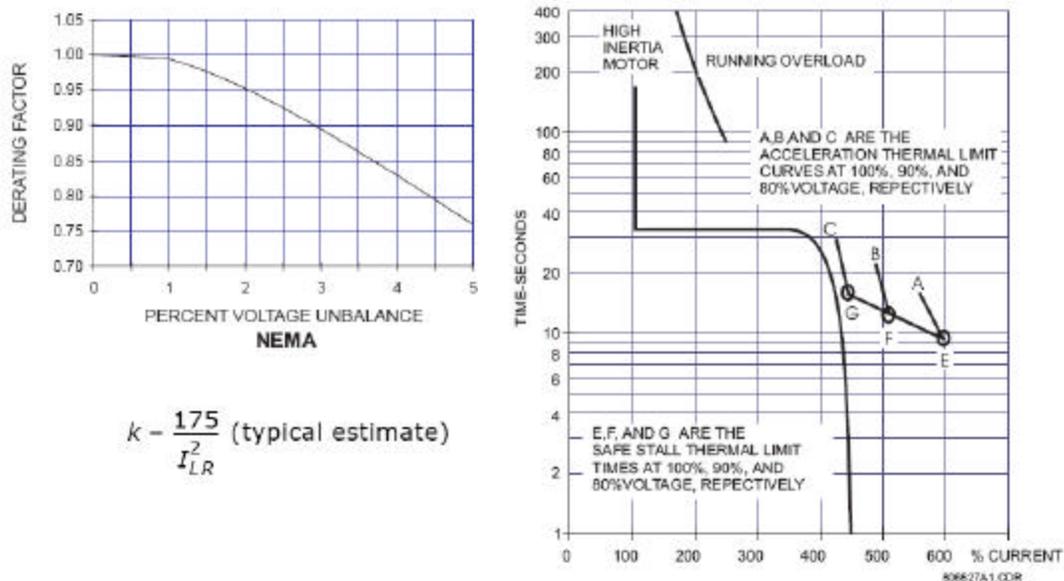
Motores trifásicos son diseñados de forma que las sobrecargas estén bajo el límite de daño térmico. Las curvas de límite térmico del motor con curvas que consisten de tres segmentos distintos, los cuales son basados en las tres condiciones del motor: Rotor bloqueado o condición de atrancamiento, aceleración de motor y motor operando con sobrecarga. Idealmente las curvas deben ser provistas para ambas condiciones de motor (frío y caliente). Para muchos motores los límites térmicos están formados dentro de una curva suave homogénea.

Las curvas de aceleración son una indicación de la cantidad de corriente asociada al tiempo en que acelera el motor desde una condición de parada hasta condición de operación normal. Usualmente para motores grandes hay dos curvas de aceleración: La primera es la curva de aceleración al 80% del voltaje de estator (arrancadores suaves son utilizados para reducir la cantidad de corriente durante el arranque). Arrancar el motor en un sistema débil puede resultar en una depresión de voltaje, proporcionando el mismo efecto de un arrancador suave. El elemento primario de protección para los relevadores de protección de motor es el elemento de sobrecarga térmica y es acompañada a través del modelo de imagen térmica. Este modelo debe existir para todos los procesos térmicos en el motor mientras este arranque, funcionando a carga normal, funcionando sobrecargado y si el motor se detiene. El algoritmo del modelo térmico del motor integra ambos, calentamiento del rotor y estator dentro de un modelo sencillo. Si el motor esta arrancando la corriente comienza a infringir sobre la curva de daño térmico o si el motor cae a manejar una carga de alta inercia la cual excede el tiempo de aceleración contra el tiempo de seguridad atrancado, por lo que ajustar las curvas de sobrecarga puede ser necesario. Corrientes de secuencia negativa (o corrientes de fase

desbalanceadas) causaran calentamiento adicional al rotor el cual no puede ser tomado en cuenta por relevadores electromecánicos y pueden también no ser tomados en cuenta en algunos relevadores electrónicos de protección. Las principales causas de corrientes desbalanceadas son: Fusibles quemados, pérdida de conexiones, fallas entre vueltas de estator, distorsión del sistema de voltaje y desbalance, también puede ser debidas a causas externas.

Los modelos térmicos pueden tener las siguientes mejoras: Inhibición del arranque del motor, curvas de sobrecarga dependientes de voltaje y ajustables, modelo térmico guiado por la medición de desbalance y RTDs, Constantes de tiempo térmico separadas en operación y parada de motor, detección independiente de desbalance de corriente, timer de limite de tiempo de aceleración, detección de sobrecarga mecánica, supervisión de arranque y re-arranque.

**Figura 29. Modelos térmicos de operación de corriente y voltaje**

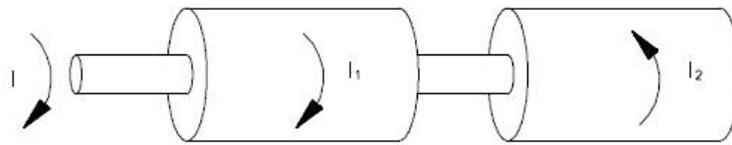


Cada motor tiene una curva de daño específica. Usualmente esta es llamada curva  $I^2 \cdot t$ . En motores de gran caballaje, la capacidad térmica es usualmente limitada por el rotor, esto es importante para monitorear el calentamiento de este. En motores AC, la corriente desbalanceada entre fases es lo que mas concierne a calentamiento adicional asociado al calentamiento del rotor con un componente de secuencia negativa provocada por una situación de desbalance. El desbalance de corriente es usualmente causado por desbalance de voltaje, el resultado de cargas de fase simples sobre un sistema trifásico y/o desbalance del bobinado del motor.

Cualquier desbalance de las corrientes o voltajes trifásicos pueden ser transformados matemáticamente en una combinación de componentes de secuencia positiva, negativa y cero. La medición de la corriente de fase (en cada fase) es la suma de tres componentes fasoriales de secuencia en esta fase. La secuencia cero es una componente de modo común la cual es igual en las tres fases, y requiere un camino o retorno a tierra o neutral. En un motor sin un retorno a neutral, no podemos ver corriente de secuencia cero a menos que exista una falla a tierra. Esto nos enfoca en las componentes de secuencia positiva y negativa las cuales pueden rutinariamente estar presentes.

Para analizar y entender, consideremos que el motor tiene dos rotores virtuales como se observa en la figura 30. Uno es el que maneja solo la corriente de secuencia negativa  $I_1$ , la cual es simétricamente balanceada. La otra es manejada solo por una corriente negativa en rotación contraria  $I_2$ , directamente relacionada a corriente desbalance el cual produce un torque proporcional en la dirección inversa. Si una corriente perfectamente balanceada y ángulos de fases simétricos existen en cantidades trifásicas, entonces  $I_1$  debe ser solo la componente de línea de corriente cuadrática sin efecto del segundo rotor. Esta secuencia positiva de corriente produce que la salida del motor proporcione torque y trabajo.

**Figura 30. Esquema motor a dos rotores**

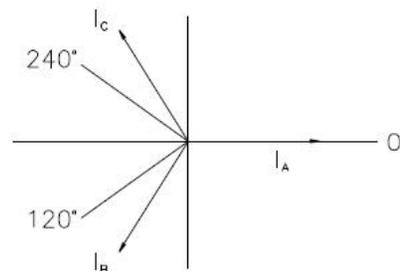


$$I^2 = I_1^2 + K I_2^2$$

La corriente de secuencia negativa  $I_2$  es una componente de corriente trifásica con una rotación inversa comparada con el surtidor de corriente AC. Esta corriente genera un torque inverso en el segundo rotor y trabaja sobre la acción principal del motor, haciendo trabajo negativo. Debido al trabajo negativo causado por  $I_2$  dentro del rotor, este es completamente absorbido como calor y tiene un efecto muy significativo sobre el calentamiento de rotor más que la  $I_1$  balanceada.

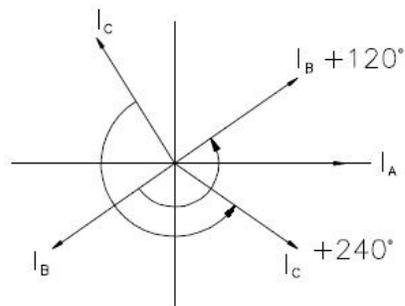
Utilizando análisis fasorial para determinar las corrientes de secuencia de un fasor de corriente de fase. Cada corriente AC trifásica sin tierra externa o camino de retorno a neutral puede ser representado por la suma de dos fasores  $I_1$  e  $I_2$  en cada fase. Como ejemplo, observemos las corrientes desbalanceadas en la figura 31, en este caso las corrientes trifásicas en el motor son  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , observemos que  $I_B$  e  $I_C$  son de la misma magnitud, pero desplazadas en posición de fase. Este es un ejemplo serio de condición de secuencia negativa la cual esta dañando el rotor pero no es reflejada en la corriente individual.

**Figura 31. Diagrama fasorial de corrientes en desbalance**



Para calcular la componente de secuencia positiva en la fase A, rote la fase B 120 grados en la dirección positiva y la fase C 240 grados en la dirección positiva. Como en la figura 32. La fórmula es:

**Figura 32. Diagrama fasorial de secuencia positiva**

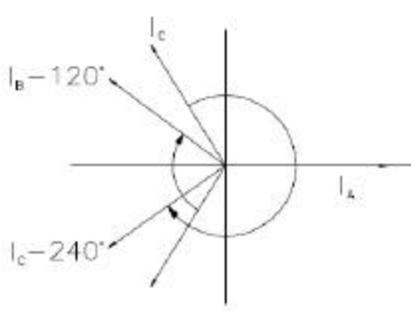


$$I_{A1} = \frac{I_A + (I_B \angle 120^\circ) + (I_C \angle 240^\circ)}{3}$$

Observemos que esta es una operación vectorial con un fasor resultante. La secuencia positiva estos fasores en B y C tienen la misma magnitud de la fase A (favor de secuencia positiva), pero atrasada exactamente 120 y 240 grados respectivamente. Este grupo balanceado mueve el motor de con trabajo útil.

Para calcular la componente de secuencia negativa en la fase A, rotemos el favor de fase B 120 grados en la dirección negativa y el favor de la fase C 240 grados en la dirección negativa. Si de observa la figura 33 junto con la ecuación,  $I_{A2}$  es:

**Figura 33. Diagrama fasorial de secuencia negativa**



$$I_{A2} = \frac{I_A + (I_B \angle -120^\circ) + (I_C \angle -240^\circ)}{3}$$

El fasor de secuencia negativa en las fases B y C tiene la misma magnitud que la fase A de secuencia positiva, pero adelantada por exactamente 120 y 240 grados respectivamente. Este conjunto de fasores balanceados representa el efecto neto de la magnitud o fase desbalanceada y solamente calienta el rotor.

Ciertas armónicas en las corrientes de fase producen torques en el rotor, como corrientes de secuencia positiva y negativa. En particular, la 7 y 13 y ciertas armónicas altas actúan con secuencia positiva, la 5 ,11 y otras armónicas altas actúan como secuencia negativa. Esto puede influenciar en la eficiencia del motor y su calentamiento. Algunos relevadores con microprocesador capturan estas armónicas e incluyen su efecto en el modelo térmico.

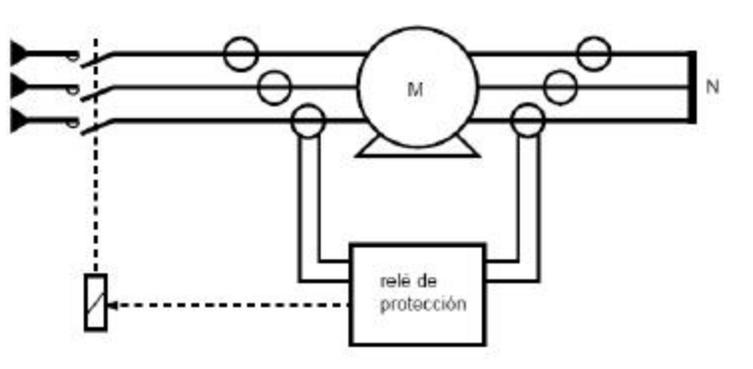
#### **4.3.2 Protección diferencial**

Esta protección es utilizada comúnmente para proteger motores de inducción y motores síncronos de fallas de fase a fase. Esta función requiere dos cts. Uno en el alimentador del motor y otro en el punto de arranque. La protección diferencial puede ser considerada la primera línea de protección para fallas internas de fase a fase o fallas a tierra. En estos eventos de falla la protección diferencial responde rápidamente lo cual limita el daño al motor si no se utilizara este.

La protección diferencial puede ser utilizada sólo si ambos lados de cada estator se encuentran fuera en conexiones externas del motor para poder medir corrientes entrantes y salientes de este. El elemento diferencial sustrae la corriente entrante de cada fase de la corriente que sale de esta y compara que sea menor que el *pick up* diferencial programado. Si esta diferencia es igual o más grande que el nivel de pick up un disparo es ejecutado.

Durante el arranque de un motor los valores de los dos CT's de fase pueden no ser perfectamente idénticos y corrientes asimétricas pueden causar que los CT's tengan diferentes salidas. Para prevenir disparos indebidos en esta configuración, el nivel diferencial podría ser menos sensitivo o el tiempo de retardo diferencial puede ser extendido para que el problema sea eliminado. El retardo diferencial puede ser afinado en una aplicación la cual responde muy rápido y es sensitivo a corrientes bajas diferenciales. El método de protección diferencial por Bias permite diferentes relaciones para sistema/línea y CT's de neutral. Este método tiene una característica de doble curva para prevenir operaciones erróneas causadas por desbalance entre CT's durante fallas externas. Desbalances de CT's dan como resultados errores de precisión o saturación.

**Figura 34. Protección diferencial**



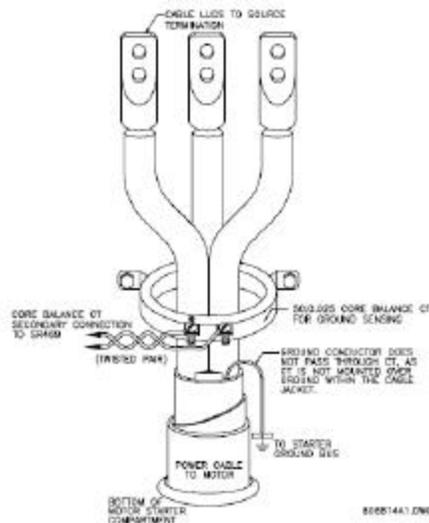
#### **4.3.3 Protección de falla a tierra**

Daño al aislamiento de los conductores de fase además de cortos circuitos internos causados por partículas dentro del motor son causas comunes de fallas a tierra. Una estrategia típica usada para limitar el nivel de corriente de falla a tierra es conectar una impedancia entre el punto neutral del motor y tierra. Esta impedancia puede tener la forma de un resistor o un transformador

de aterrizado diseñado para asegurar que la máxima corriente de falla a tierra sea limitada a un nivel que reducirá el daño del motor.

Estas son algunas formas por lo cual una falla a tierra debe ser detectada. El método mas deseable es el uso de CT's de secuencia cero, lo cual es considerado como el mejor método de detección, este es inmune al ruido. Los tres conductores de fase son pasados a través de la ventana de un CT simple referido como CT de secuencia cero. Bajo condiciones normales, las corrientes trifásicas sumaran cero dando como resultado secuencia cero en el secundario.

**Figura 35. Protección de falla a tierra- CT's de secuencia cero**



Si alguna de las fases del motor esta cortocircuitada a tierra la suma de las corrientes de fase será mayor que cero causando que una corriente fluya en el secundario del CT. Esta corriente será detectada por el relevador del motor como una falla a tierra.

Si los cables son muy grandes para entrar en la ventana de un CT de secuencia cero, la configuración de falla a tierra residual puede ser utilizada. Esta configuración es menos sensitiva que la configuración de secuencia cero

por el hecho de que los CT's de fase no son perfectamente iguales. Durante el arranque del motor, la corriente de fase típicamente sobrepasa magnitudes de seis veces la corriente de plena carga, La ligera diferencia de los CT's, combinada con las magnitudes grandes producen una falsa corriente residual, la cual puede ser vista por el relevador. Esta corriente puede ser malinterpretada por el relevador del motor como una falla a tierra a menos que el elemento de falla a tierra sea puesto lo suficientemente alto para descartar este error.

#### **4.3.4 Protección de desbalance**

Cargas no balanceadas en el caso de motores AC es el principal resultado de un desbalance de la fuente de alimentación. La reactancia de secuencia negativa de las tres fases es de 5 a 7 veces mas pequeña que la reactancia de secuencia positiva y aun un pequeño desbalance en la fuente de alimentación puede causar altas corrientes de secuencia negativa. Por ejemplo, un motor de inducción con una corriente seis veces la plena carga, un componente del 1% de secuencia negativa de voltaje corresponde a una secuencia negativa de corriente de 6%. Las corrientes de secuencia negativa inducen un campo en el rotor, el cual rota en dirección opuesta a la dirección mecánica y causa una elevación en la temperatura. Las principales causas de desbalance de corriente son: Distorsión de voltaje en el sistema y desbalances, fallas entre vueltas del estator, fusibles dañados, perdida de conexiones y otras fallas internas.

#### **4.3.5 Protección de corto circuito**

Los elementos de corto circuito proveen protección para excesiva corriente en las fallas. Cuando un motor arranca, la corriente de arranque

(típicamente arriba de seis veces la de plena carga) tiene componentes asimétricos. Estas corrientes asimétricas pueden causar que una fase se vea como 1.7 veces la corriente RMS de arranque. Como resultado el elemento de corto circuito debe ser mayor que el máximo de corriente asimétrica de arranque visto desde el CT que permite el disparo inadecuado. El *breaker* o contactor como el relevador es el control bajo condiciones deben tener una capacidad interruptiva igual o mas grande que el máximo permitido para las fallas de corriente.

#### **4.3.6 Bajo voltaje**

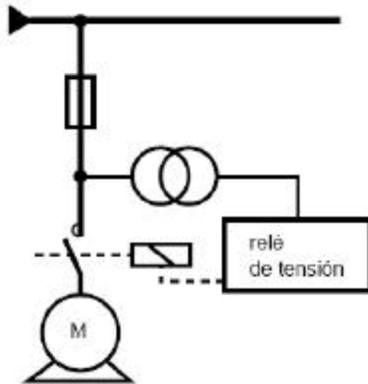
Si un motor de inducción opera a plena carga esta sujeto a condiciones de bajo voltaje, sucederá que la velocidad de plena carga y la eficiencia disminuirán además el factor de potencia, la corriente de plena carga y la temperatura aumentaran. El elemento de bajo voltaje puede considerarse como un respaldo de la protección térmica de sobrecarga. Si el voltaje disminuye, la corriente aumentara, causando un disparo. En algunos casos si un bajo voltaje existe podría ser deseable un disparo más rápido que el elemento de sobrecarga. Dicha condición da como resultado un incremento en la corriente y calentamiento del motor por lo que tendremos una reducción en el desempeño del motor.

#### **4.3.7 Sobrevoltaje**

Cuando el motor opera en una condición de sobrevoltaje el deslizamiento disminuye como esto es inversamente proporcional al cuadrado del voltaje, la eficiencia incrementara ligeramente. El factor de potencia disminuirá debido a la corriente que baja en el motor, la temperatura disminuirá debido a la corriente, basado en  $I^2 * t$ . Muchos motores nuevos están diseñados cerca de la

saturación, incrementando los V/hz lo que puede causar saturación del entrehierro causando calentamiento.

**Figura 36. Protección mínima y máxima de tensión**



#### **4.3.8 Interferencia o bloqueo mecánico**

El elemento de interferencia o bloqueo mecánico está diseñado para operar a cargas altas mecánicas las cuales dañan los cojinetes del motor. Cargas mecánicas pueden provocar rupturas y fallas. Este elemento es usado para desconectar el motor de condiciones de carga anormales antes del atrancamiento del motor. En términos de operación del relevador el elemento de interferencia mecánica previene que el motor proporcione el 100% de su capacidad térmica mientras una sobrecarga mecánica es detectada. Esto ayuda a evitar ruptura mecánica de la carga y reduce la espera de tiempo para reparar esto.

#### **4.3.9 Pérdida de carga**

Protección de baja corriente es útil para indicar un mal funcionamiento en la carga. Una reducción de corriente puede indicar problemas mecánicos tales como pérdida de succión en una bomba, flujo bloqueado en un ventilador,

presión negativa en una bomba, faja rota en un conductor o ruptura de un eje de acoplamiento. El segundo método de pérdida de carga es utilizada en un elemento de protección de baja potencia.

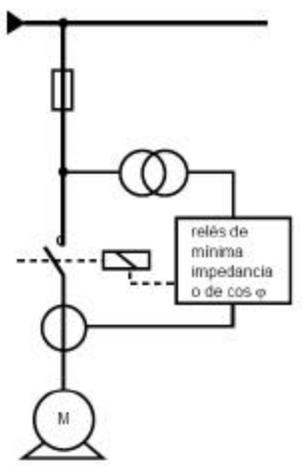
#### **4.3.10 Arranque incompleto o excesivamente prolongado**

Esta protección se justifica en los arranques en varios tiempos. Se realiza con un relevador temporizado que se pone en servicio al empezar el arranque y se desconecta al finalizar. La magnitud controlada puede ser la velocidad o la corriente. Así se evita la utilización prolongada del sistema de arranque, calculado para funcionar durante un tiempo dado.

#### **4.3.11 Ruptura de sincronismo**

Se trata de una protección importante en los motores síncronos. En efecto, la jaula de amortiguamiento de un motor síncrono es relativamente débil con relación a la corriente: Si el motor pierde sincronismo, esta jaula soporta fuertes corrientes inducidas que pueden destruirla si no se desconecta el motor. Esta pérdida de sincronismo se puede producir como consecuencia de una sobrecarga mecánica, de un mínimo de tensión o de una pérdida o reducción de la excitación. La detección de este defecto se realiza con relevadores de mínima impedancia o de factor de potencia alimentados por transformadores de tensión y por transformadores de corriente.

**Figura 37. Protección contra la ruptura de sincronismo**



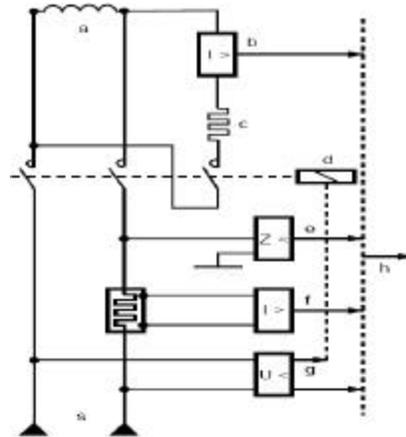
#### **4.3.12 Pérdida de excitación**

Esta pérdida debida por ejemplo a una ruptura del devanado rotorico, provoca la parada del motor, puede detectarse por la protección ruptura del sincronismo antes descrita o por un relevador a mínima tensión o a mínima corriente de excitación.

#### **4.3.13 Tierra en el rotor de un motor síncrono**

Esta protección debe determinarse en función del esquema de alimentación y del modo de producción de la corriente continua. Si el conjunto del circuito de excitación de corriente continua esta aislado de la masa, un primer defecto de aislamiento no afecta al funcionamiento del motor. Pero si se produce un segundo defecto se puede provocar una sobrecarga o un cortocircuito con todas sus consecuencias. Los relevadores de detección de este defecto son en general aparatos a inyección de corriente alterna de baja frecuencia 10 ó 20 hz.

**Figura 38. Protección del rotor en el arranque y en funcionamiento de motores síncronos**



- a. devanado de excitación
- b. protección térmica: marcha prolongada en asincronismo
- c. resistencia de arranque
- d. contactor de excitación
- e. protección masa rotor
- f. protección a máxima intensidad de excitación
- g. protección a mínima tensión de excitación
- h. hacia la desconexión del contactor
- s. fuente de corriente continua

#### 4.3.14 Marcha prolongada en asíncrono en el arranque

En los motores síncronos una duración excesiva del arranque provoca un calentamiento exagerado de la jaula de amortiguamiento.

Se utiliza la protección arranque incompleto.



## 5. DETERMINACIÓN DEL MODO DE ARRANQUE

### 5.1 Soluciones de arranque

Como es bien conocido sabemos que para los motores de inducción se tienen como soluciones de arranque:

Directo (*across line*), por reactancia, autotransformador y las soluciones electrónicas como: Variador de frecuencia y arrancadores suaves.

Acá nos concentraremos en los primeros tres tomando como criterios de aceptación los siguientes:

**Tabla VIII Soluciones de arranque**

<b>Solución de arranque</b>	<b>Criterio de aceptación</b>
Directo	Pico de potencia compatible con la red eléctrica.
Reactancia	a) par de arranque superior al par resistente de puesta en marcha. b) Pico de corriente, aceptable para la red eléctrica al aplicar plena tensión al motor.
Autotransformador	Igual al anterior.

Para ilustrar se utiliza como ejemplo un motor asíncrono utilizado en un tandem de picadoras de caña, con los siguientes datos:

**Tabla IX Datos reales de funcionamiento de un motor asíncrono**

Customer: <b>INGENIO LA UNION</b>		Date: <b>12/18/2006</b>	Item # <b>2</b>
Output Power	<b>1500 HP</b>	Type	<b>K</b>
Number of Poles	<b>4</b>	Mounting	<b>Horizontal</b>
Voltage	<b>2400/4160 V</b>	Frame (estimated)	<b>8411S</b>
Frequency	<b>60 Hz</b>	Enclosure	<b>TEAAC</b>
Number of Phases	<b>3</b>	Service Factor	<b>1.15</b>
Synchronous Speed	<b>1800</b>	Insulation Class	<b>F</b>
Rated Speed	<b>1775</b>	Altitude (ft)	<b>3300</b>
Ambient Temperature (°C)	<b>40</b>		
Method of Temperature Measurement	<b>Resistance</b>		
Temperature Rise at S.F. 1.00 (°C)	<b>100</b>	Efficiency (%) - Rated Load	<b>93.5</b>
Noise (sound) Level (dBA)	<b>95</b>	Efficiency (%) - 3/4 Load	<b>93.1</b>
Starting Method	<b>Across the line</b>	Efficiency (%) - 1/2 Load	<b>91.8</b>
Minimum Starting Voltage (%V)	<b>90</b>	Power Factor (%) - Rated Load	<b>90</b>
Maximum Consecutive Starts (Cold/Hot)	<b>2/1</b>	Power Factor (%) - 3/4 Load	<b>88</b>
Rated Current (Amps)	<b>184 @ 4160 V</b>	Power Factor (%) - 1/2 Load	<b>84</b>
Locked Rotor Current (% Rated Current)	<b>750%</b>	Safe Stall Time (100% Voltage) - Cold	<b>15</b>
Locked Rotor Torque (% Rated Torque)	<b>150</b>	Safe Stall Time (100% Voltage) - Hot	<b>11</b>
Breakdown Torque (% Rated Torque)	<b>250</b>		
Bearing Type	<b>Antifriction</b>	Rotation View from ODE	<b>Dual</b>
Lubrication	<b>Self-cooled lubricated grease</b>	Estimated Load WK2 (lb-ft <sup>2</sup> )	<b>4712</b>
Rotor Construction	<b>Bar Copper</b>	Rated Torque (lb-ft)	<b>4437</b>
<b>ACCESSORIES AND SPECIAL FEATURES</b>			

Copper Rotor Bars

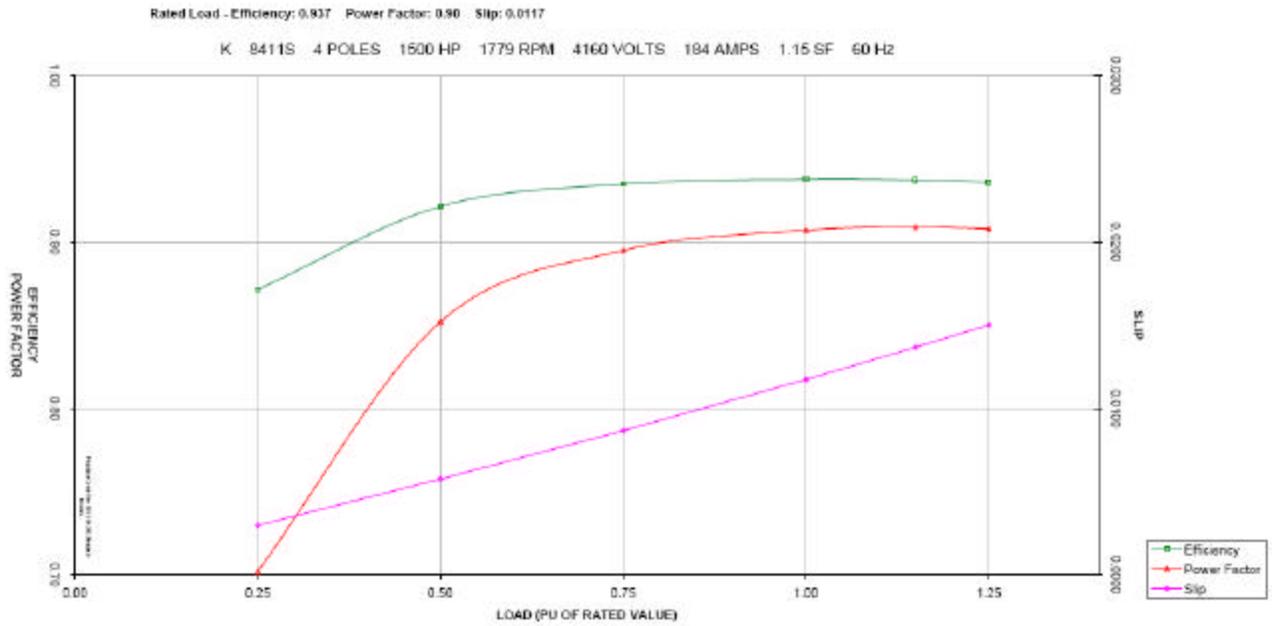
Space Heaters - Space Heaters - Standard Temperature

Stator - Temperature Detector - Stator Platinum RTD (100 Ohm) - Qty: 6

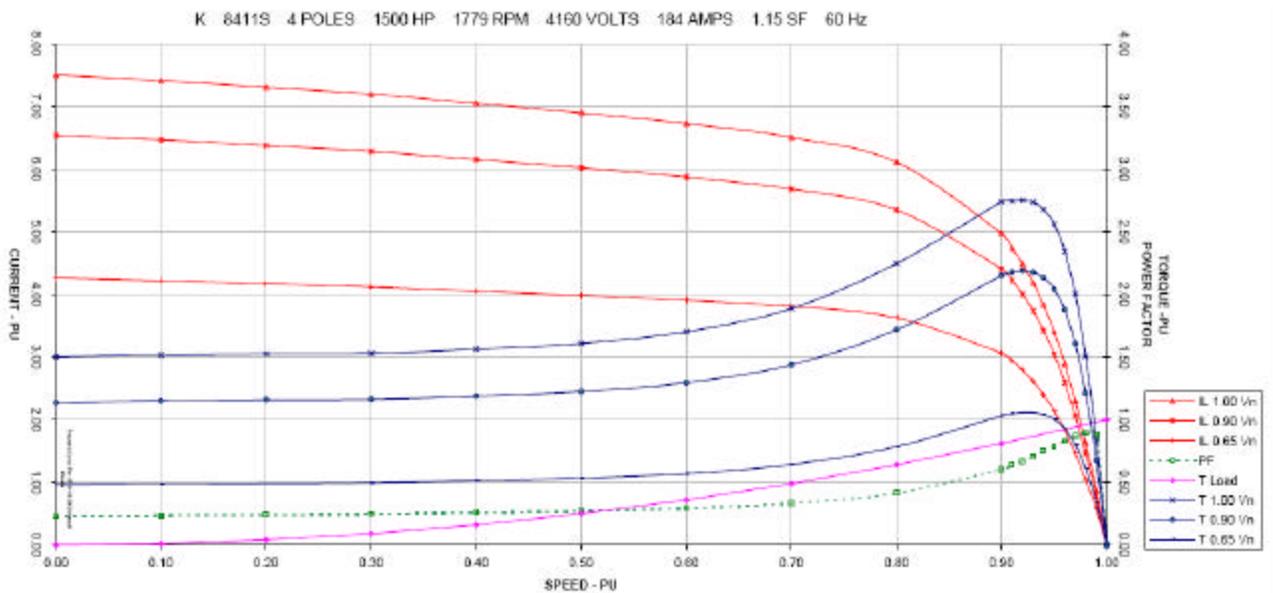
Current Transformer - Current Transformers (50:5 ratio), differential protection, set of 3

Surge Protection - Lightning Arresters

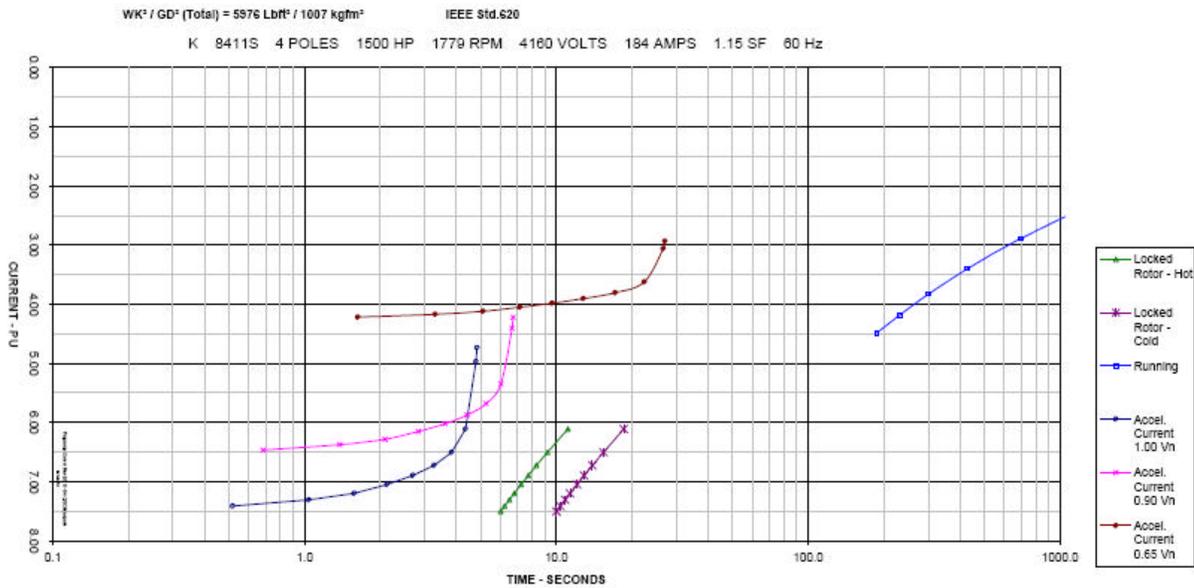
**Figura 39. Curva característica carga-deslizamiento-eficiencia**



**Figura 40. Curva característica velocidad-torque-corriente**



**Figura 41. Curva característica tiempo-corriente**



**Tabla X Datos asociados para el análisis de arranque de un motor**

$P_n = 1500 \text{ hp o } 1117.5 \text{ Kw}$
$V_n = 4160 \text{ Volts.}$
$E_f \times F_p = 0.935 \times 0.9 = 0.8415$
$T_c = 4712 \text{ WK}^2$
$T_r = 4437 \text{ WK}^2$
$T_t = 5976 \text{ WK}^2$
$T_c / T_t = 0.788$
$I_{arr} / I_{nom} = 7.5$
Par de puesta en marcha con respecto a la nominal: $0.3 T_n$
$S_t$ del transformador asociado a este motor 15 MVA, potencia aparente máxima soportada por la red del transformador $S_{tm} = 10 \text{ MVA}$ . Descontando las otras cargas asociadas.

Evaluaremos por ser las más comunes el arranque directo y el auto-transformador.

### 5.1.1 Arranque directo

$$S_m = \frac{P_n}{(Ef * fp)} * \frac{I_{arr}}{I_n} = \frac{1117.5}{0.8415} * 7.5 = 9959.84 \text{KVA}$$

Donde:  $S_m$  Potencia aparente máxima

$P_n$  Potencia nominal

$Ef$  Eficiencia

$Fp$  Factor de potencia

$I_{arr}$  Corriente de arranque

$I_n$  Corriente nominal

Este valor está muy cercano al  $S_{tm}$  (potencia aparente máxima producida por el transformador) por lo que descartaremos el arranque directo ya que en algún momento el transformador podría no dar la carga necesaria para el arranque.

### 5.1.2 Arranque por auto transformador

La potencia disponible aparente es de 10 MVA, de este valor debe deducirse la potencia magnetizante del auto transformador  $S_{mg}$  que en el primer instante del arranque se suma aritméticamente a la potencia aparente del motor. Regularmente la  $S_{mg}$  es del orden de 0.2 a 0.4 veces la potencia nominal aparente del motor, considerando el peor de los casos:

$$S_{mg} = \frac{0.4 * P_n}{Ef * fp} = 531 \text{KVA}$$

El coeficiente de la reducción de potencia para en este caso a ser:

$$\frac{(S_d - S_{mg})}{S_m} = \frac{(10,000 - 531)}{9959.84} = 0.95$$

A voltaje constante  $V_n$  la punta de corriente de la red es  $0.95 I_d$ . Ahora determinamos la tensión reducida de arranque  $V_d$ .

La igualdad de potencias primaria y secundaria del autotransformador permite escribir:

$$0.95 * I_d * V_n = I_d * \frac{V_d}{V_n} * V_d$$

Por lo tanto:

$$\left[ \frac{V_d}{V_n} \right]^2 = 0.95$$

Es decir que

$$V_d = 0.97 * V_n$$

El nuevo par de arranque será:

$$0.788 * T_n * \left[ \frac{V_d}{V_n} \right]^2 = 0.7486 * T_n$$

Con el valor anterior, es obvio que es suficiente para el arranque, pero tomemos en cuenta que es una reducción del 0.97 veces el voltaje nominal, para los arrancadores con auto transformador sus taps de reducción viene en 80%, 65 % y 50 %.

Si utilizamos 80 % tendremos:

$$0.788 * T_n * (0.8)^2 = 0.504 * T_n$$

Lo cual aún es aceptable para permitir el arranque, por lo que utilizamos esta solución.

## 6. COORDINACIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

### 6.1 Generalidades de la protección

Se define la coordinación de protecciones como el establecer selectividad temporal entre las protecciones de sobrecorriente que ven una misma falla es decir conseguir que una falla sea despejada por la protección de sobrecorriente que esta más próxima a ella en el sentido del flujo de la corriente.

Para el caso de motores la coordinación de las protecciones es el arte de asociar un dispositivo de protección contra cortocircuitos, con un contactor y un dispositivo de protección contra sobrecarga. Tiene por objetivo interrumpir a tiempo y sin peligro para las personas e instalaciones una corriente de sobrecarga (1 a 10 veces la  $I_n$  del motor) o una corriente de corto circuito.

La norma IEC 947-4 define tres tipos de coordinación que aceptan un deterioro aceptable y previsto para aparatos después de un cortocircuito.

Coordinación tipo 1: En condición de cortocircuito, el material no debe causar daños a personas e instalaciones. Se aceptan daños en el contactor y relevador de sobrecarga; el arrancador puede quedar destruido. Habrá que rearmar la protección contra cortocircuitos del disyuntor o en caso de protección por fusibles, habrá que sustituirlos todos.

Coordinación tipo 2: En condición de cortocircuito no se deberán ocasionar daños a las personas e instalaciones. El relevador de sobrecarga no deberá sufrir ningún daño. Los contactos del contactor podrán sufrir alguna pequeña soldadura, fácilmente separable. El rearme del contactor o cambio de fusibles es similar al caso anterior.

Coordinación tipo 3 o total: Según la norma IEC 947-6-2 en caso de cortocircuito no se acepta ningún daño ni riesgo de soldadura, sobre ninguno de los aparatos que componen la salida. Esta norma es válida el concepto de "continuidad de servicio"

¿Según lo anterior cual escoger?

Tipo 1.

- Servicio de mantenimiento calificado,
- Volumen y coste del equipo de protección reducidos,
- No es imprescindible la continuidad del servicio o bien se puede conseguir conmutando a otro motor.

Tipo 2.

- Es imprescindible la continuidad del servicio,
- No hay servicio de mantenimiento,
- Las especificaciones lo exigen.

Algo importante es tener presente que la coordinación es fruto de estudios y ensayos minuciosos. Por lo que se deben consultar detenidamente los catálogos y seguir los consejos de fabricantes para escoger los aparatos destinados a la protección de motores.

El estudio de la coordinación entre los distintos dispositivos se efectúa en forma gráfica. Para poder realizar el mismo se deben tener los siguientes datos:

1. Curva corriente – tiempo del relevador térmico o curvas de protección del relevador.
2. Curva de corriente – tiempo del fusible de respaldo, guarda motor magnético o relevador de protección del alimentador.
3. Curva de corriente de arranque del motor.
4. capacidad de ruptura del contactor o *breaker*.
5. capacidad de sobrecarga y resistencia al cortocircuito del cable de alimentación.

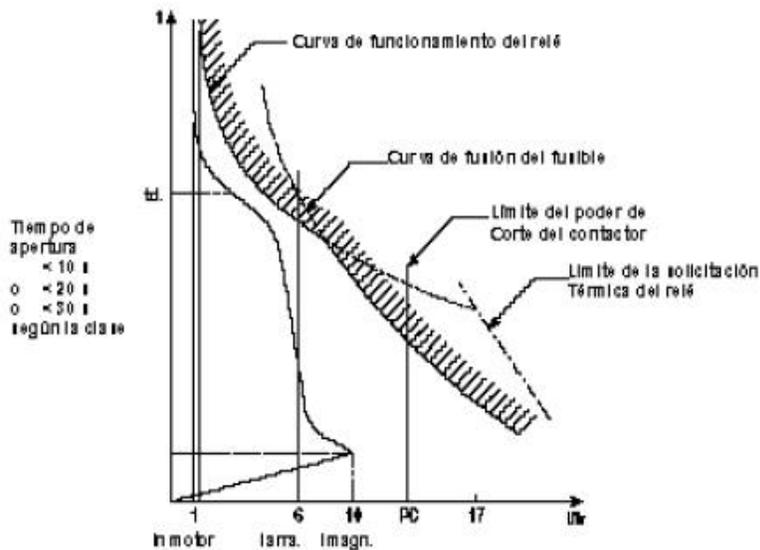
Las condiciones que se deben cumplir con la coordinación son las siguientes:

1. Permitir el arranque del motor, pero si el arranque se demora o el motor queda atrancado debe operar el relevador.
2. Para corrientes de falla mayores que la capacidad de ruptura del contactor, debe actuar primero la protección magnética (fusible o *breaker* alimentador) ya que de lo contrario el contactor no estaría en condiciones de abrir la corriente indicada por el relevador.
3. Para corrientes arriba de 25 In, la recta  $I^2t$  del relevador térmico debe estar siempre por encima de la corriente del dispositivo que lo protege contra cortocircuitos (fusibles o *breaker* alimentador).
4. La corriente de arranque con un factor de seguridad 2 en tiempo, durante el tiempo de arranque, no debe alcanzar la curva característica de la protección contra cortocircuito, para así tener en cuenta el estado de precarga y los arranques sucesivos.

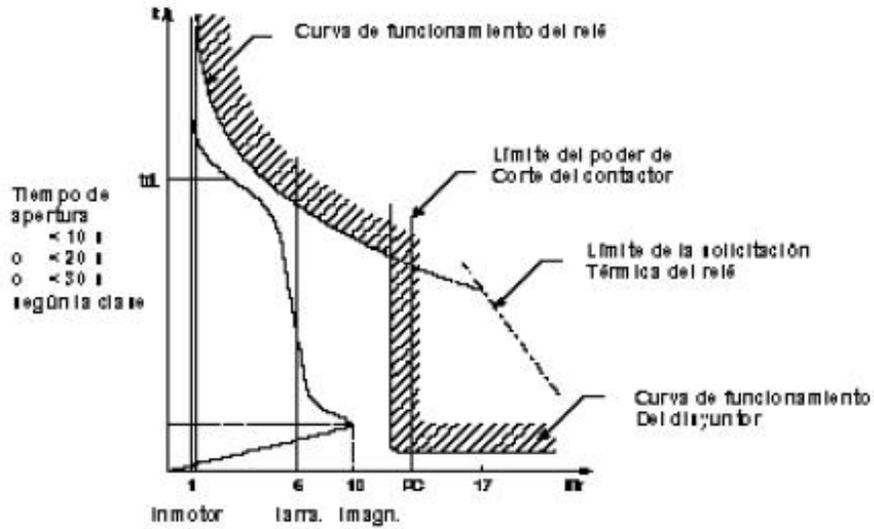
A continuación se observara gráficamente la coordinación para distintos tipos de salidas:

- Figura 42, contactor + relevador + fusibles
- Figura 43, contactor + relevador + *breaker* alimentador o guarda motor magnético en el caso de baja tensión.
- Figura 44, contactor + *breaker* alimentador o guarda motor magneto térmico en el caso de baja tensión.
- Figura 45, coordinación de tres elementos para motores en baja tensión.

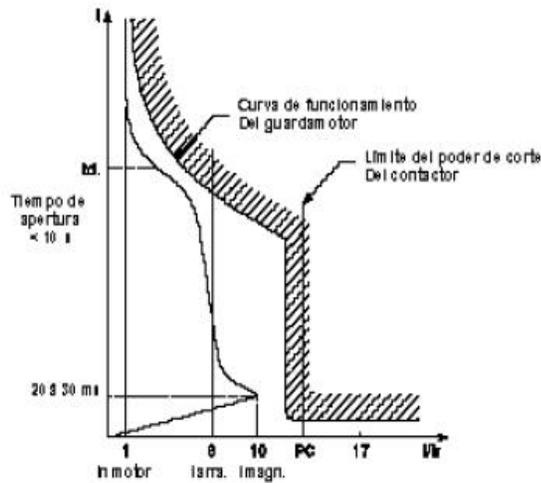
**Figura 42. Curva de funcionamiento de contactor, relevador y fusible**



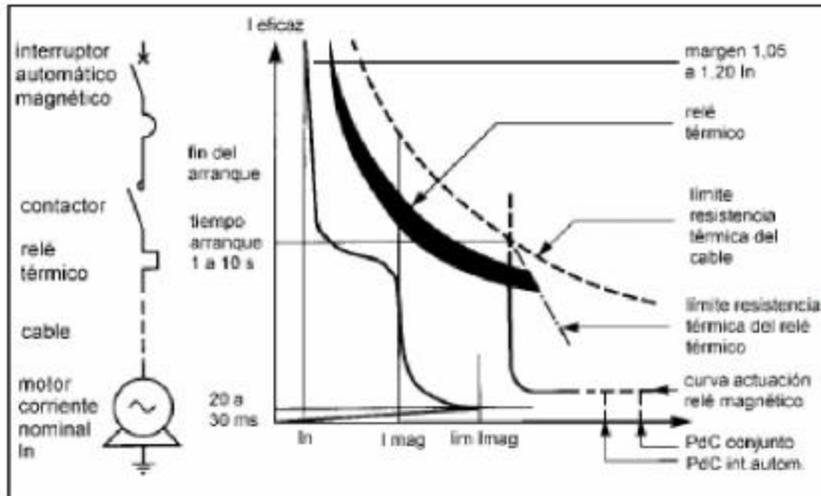
**Figura 43. Curva de funcionamiento de contactor, relevador, breaker alimentador o guarda motor magnético en el caso de baja tensión**



**Figura 44. Curva de funcionamiento de contactor, *breaker* alimentador o guarda motor magneto térmico en el caso de baja tensión**



**Figura 45. Coordinación de tres elementos para motor en baja tensión**



Cuando se ha realizado la elección de las protecciones en función de las exigencias de la aplicación, es necesario asegurar su coordinación para aprovechar al máximo sus posibilidades. Debe buscarse un equilibrio entre una desconexión intempestiva y un retardo en la eliminación de un defecto. El estudio de las curvas  $I^2(t)$  del relevador, del fusible y del poder de ruptura del contactor resuelve el problema de la coordinación de las protecciones.

## CONCLUSIONES

1. Los motores eléctricos utilizados en corriente alterna son muy diversos en características constructivas como electromecánicas, pero es importante el analizar detenidamente la aplicación del mismo y sus condiciones de operación ya que esto repercute en su costo de instalación y mantenimiento.
2. La tensión media es un parámetro de tensión que va desde 1kV hasta los 50kV y cuya utilización esta destinada por lo general a las líneas de distribución, con excepción a motores de potencia elevada que se alimentan directamente de esta tensión y que proveen a estos usuarios un costo relativamente mas bajo comparado con el de baja tensión.
3. Con la existencia de varios métodos de arranque su utilización depende de la función a desempeñar por el motor, por ello el uso de variadores de velocidad de ultima generación, proporcionan grandes ventajas como lo son el arranque y paradas suaves, su control de velocidad posee límites de torque, lo cual es una medida de protección tanto para el motor, como para los elementos mecánicos conectados a el, así como la inversión de sentido de marcha, pero pese a estas características es importante el considerar que tan rentable es dependiendo de las características de operación del motor.

4. Es conveniente tener en cuenta que para cualquier motor es necesario aplicar un adecuado control y monitoreo para poner en evidencia la aparición de situaciones anómalas o defectos que provoquen que las máquinas sean sometidas a condiciones de funcionamiento excesivas que impliquen en daños permanentes.
  
5. La elección del modo de arranque radica en la disponibilidad que el sistema proporcione la potencia necesaria para alimentar la carga de arranque, por lo que se deben realizar los cálculos pertinentes para determinar que opción sea la más recomendable.
  
6. La protección de un motor la constituyen un conjunto de dispositivos que mantienen vigilancia permanente y cuya función es eliminar o disminuir los daños que pueda recibir el equipo cuando se presente una falla y su elección depende de características que se basan en la sensibilidad, selectividad, velocidad, confiabilidad y costo.

## RECOMENDACIONES

1. Debido a que existe una gran variedad de motores asincrónicos en cuanto a sus características constructivas y funcionales, para estas máquinas resulta particularmente difícil describir todas las variaciones, es por ello que se debe tener a consideración que en el momento que se utilice un motor en particular se debe disponer de registros de fallas y de las posibles causas que las provocaron, se puede construir un cuadro de relaciones que ayuda a vincular en base a la experiencia, causas y efectos. Esta información es de gran apoyo en los programas de mantenimiento, ya que optimizan la frecuencia de las intervenciones y permitir juzgar la importancia de las distintas acciones llevadas a cabo en cada intervención.
  
2. Cuando se requiera la elección de un motor para una operación específica se debe considerar las exigencias de la instalación donde se le va a utilizar, considerando que el motor tendrá ciertos límites que no deberán ser superados para no incurrir en fallas que puedan afectarlo permanentemente. Teniendo en cuenta que para su selección con relación a las características de la instalación y del motor se deben considerar los siguientes aspectos:
  - a) Condiciones ambientales.
  - b) Condiciones de acoplamiento y forma constructiva.
  - c) Condiciones de alimentación y de arranque.
  - d) Condiciones de servicio y características electromecánicas diversas.

- e) Condiciones de orden económico (costo inicial, gastos de funcionamiento, mantenimiento y durabilidad).
- f) Condiciones de instalación (dispositivos de monitoreo, control y protecciones)

## BIBLIOGRAFÍA

1. Chapman, Stephen. **Máquinas Eléctricas**. 3ª edición. Colombia: McGraw Hill, 2000. 768pp.
2. Blanc, J. Y. **Control, mando y protección de motores en AT (Cuaderno Técnico No. 165)**. España: Schneider electric, 1996. 30pp.
3. Enríquez Harper, Gilberto. **ABC de las instalaciones eléctricas industriales**. 3era. Reimpresión. México: Limusa, 1989. 577pp.
4. Fink, Donald y Beaty, H. Wayne. **Manual de Ingeniería Eléctrica**. 13 ediciones. México: McGraw Hill, 1996.
5. Kosow, Irving. **Máquinas Eléctricas y Transformadores**. 2ª edición. México: Prentice Hall Hispanoamérica, 1993. 704pp.
6. Lobosco, Orlando Silvio y Pereira da Costa Dias, Jose Luiz. **Selección y Aplicación de Motores Eléctricos**. España (1): Siemens-Marcombo, 1989.372pp.
7. McIntyre, R.L. **Control de Motores Eléctricos**. México: Editorial Marcombo S.A., 1992.382pp.
8. Moeller. **Manual de Esquemas (automatización y distribución de energía)**. Alemania: Editorial Moeller GMBH, 1999.
9. Schonek, Jacques. **Protecciones BT y variadores de velocidad (Cuaderno Técnico No. 204)**. España: Scheneider electric, 2004. 33pp.
10. Siskind, Charles. **Electrical Control, systems in industry**. EEUU: McGraw Hill, sa. 496pp.

## Referencias en Internet

1. Página de la National Electrical Manufacturer Association.  
19 de junio de 2006. <http://www.nema.org/>
2. Página del Institute of Electrical and Electronics Engineers.  
19 de junio de 2006. <http://odysseus.ieee.org/>
3. Página de Scheneider Electric  
21 de mayo 2007. [http://www.schneider-electric.com/cahier\\_technique/](http://www.schneider-electric.com/cahier_technique/)
4. Página Rockwell Automation  
8 de abril 2007. <http://www.rockwellautomation.com.mx>
5. Página de Reliance Electric  
15 de mayo 2008. <http://www.reliance.com/>