

MOTORES

Tutorial para el trabajo en campo



giz



por encargo de

Ministerio Federal de
Cooperación Económica
y Desarrollo



México, D.F., Julio del 2015

El Comité Nacional de Productividad e Innovación Tecnológica, A.C. (COMPITE) agradece a la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH por la colaboración y asistencia técnica en la elaboración del presente documento. La colaboración de la GIZ se realizó bajo el marco del “Human Capacity Development” el cual se implementa por encargo del Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad del/ de los autor/es y no necesariamente representan la opinión de COMPITE y/o de la GIZ. Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando sea sin fines de lucro y se cite la fuente de referencia.

Instituciones editoras por ej.: GIZ
Motores – Tutorial para el trabajo en campo, México, D.F., julio de 2015

Edición y Supervisión: GIZ
Autor: Tecener SA de CV
Diseño: GIZ Mexico

Impreso en México

© El Comité Nacional de Productividad e Innovación Tecnológica, A.C. (COMPITE)
Manuel María Contreras 133 p7,
Col. Cuauhtémoc, Del. Cuauhtémoc
C.P. 06500, México D.F.
T +52 55 5322 0700
E promocion@compite.org.mx
I <http://www.compite.org.mx/>

© Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Dag-Hammerskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn/Alemania
www.giz.de

Oficina de Representación de la GIZ en México
Torre Hemicor, Piso 11
Av. Insurgentes Sur No. 826
Col. Del Valle, Del. Benito Juárez
C.P. 03100, México, D.F.
T +52 55 55 36 23 44
F +52 55 55 36 23 44
E giz-mexiko@giz.de
I www.giz.de / www.gtz.de/mexico

Tabla de Contenido

Resumen Ejecutivo	17
1 OBJETIVOS	19
2 BASES TEÓRICAS	21
2.1 Introducción.....	21
2.2 Conceptos básicos electricidad y magnetismo	21
2.2.1 Potencia y par motor	22
2.2.2 Fuerza electromotriz (fem).....	23
2.2.3 Corriente eléctrica	23
2.2.4 Intensidad de corriente eléctrica	23
2.2.5 Clases de corriente eléctrica	24
2.2.6 Resistividad	25
2.2.7 Conductividad eléctrica	25
2.2.8 Resistencia.....	25
2.2.9 Conductancia eléctrica	26
2.2.10 Ley de ohm	26
2.2.11 Leyes de Kirchhoff.....	27
2.2.12 Potencia y par motor	29
2.2.12.1 Potencia en corriente continua.....	29
2.2.12.2 Potencia en corriente Alterna.....	29
2.3 Cálculo de potencias para máquinas.....	32
2.3.1 Potencia para el motor de una bomba.....	32
2.3.2 Potencia para elevación de agua.....	32
2.3.3 Potencia para maquinas diversas (Parientativas)	33
2.3.3.1 Maquinas herramientas para metales	33
2.3.3.2 Industria de la construcción	33
2.3.3.3 Máquinas para trabajar Madera	33
2.3.3.4 Máquinas agrícolas.....	33
2.3.3.5 Potencia de motor para mecanismos de elevación	34
2.3.3.6 Potencia de un motor para mecanismos giratorios	34
2.3.3.7 Potencia de un motor para el accionamiento de grúas con accionamiento unilateral del carro.....	34
2.3.3.8 Potencia de un motor para mecánico de traslación.....	35

2.3.3.9	Potencia de un motor para un ascensor.....	35
2.3.3.10	Potencia absorbida por un ventilador.....	35
2.3.3.11	Potencia necesaria en una maquina.....	36
2.3.4	Potencia absorbida por un motor trifásico.....	36
2.3.5	Potencia desarrollada por un motor trifásico.....	36
2.3.6	Potencia absorbida por un motor de corriente continua.....	37
2.4	Bases de energía.....	37
3	TECNOLOGÍAS EN MOTORES.....	40
3.1	Introducción.....	40
3.2	Motor a corriente continua.....	41
3.2.1	Principio de funcionamiento.....	41
3.2.2	Componentes.....	43
3.2.2.1	El inductor.....	43
3.2.2.2	El inducido.....	44
3.2.2.3	Las escobillas.....	44
3.2.3	Tipo de motor a corriente continua.....	45
3.2.3.1	Motor a excitación independiente:.....	45
3.2.3.2	Motor a excitación paralela o derivada:.....	46
3.2.4	Motor a excitación en serie:.....	47
3.2.5	Motores a excitación compuesta:.....	49
3.2.6	Control de la velocidad de un motor a corriente continua.....	49
3.2.7	Balance de potencias y rendimiento:.....	50
3.2.7.1	Potencia absorbida.....	50
3.2.7.2	Pérdidas de cobre, potencia eléctrica interna y mecánica.....	50
3.2.7.3	Pérdidas en el hierro.....	50
3.2.7.4	Pérdidas mecánicas y potencia útil.....	51
3.2.7.5	Rendimiento.....	51
3.2.8	Arranque de los motores a corriente continua.....	51
3.2.9	Frenado de un motor a corriente continúa.....	52
3.2.10	Ventajas e inconvenientes:.....	52
3.3	Motores asíncronos.....	53
3.3.1	Componentes.....	53
3.3.1.1	Estator:.....	54
3.3.1.2	Rotor:.....	54

3.3.1.3	Otros componentes	55
3.3.2	Principio de funcionamiento.....	55
3.4	Características de un motor asíncrono: Deslizamiento, Par motor y Velocidad de rotación	58
3.4.1	Deslizamiento.....	58
3.4.2	Par motor	59
3.4.4	Control de la velocidad de rotación.....	60
3.5	Balance de potencias y rendimiento.....	61
3.5.1	Potencia absorbida.....	61
3.5.2	Pérdidas de cobre estator y potencia de creación del campo magnético.....	62
3.5.3	Pérdidas del núcleo y potencia que atraviesa el entrehierro	62
3.5.5	Pérdidas de cobre rotor y potencia mecánica en el rotor	63
3.5.6	Pérdidas por rozamiento y potencia útil.....	63
3.5.7	Rendimiento	63
3.5.8	Conexión del motor asíncrono trifásico	64
3.6	Arranque de los motores asíncronos	65
3.6.1	Arranque directo.....	65
3.6.1.1	Esquema	65
3.6.1.3	Gráficas:.....	66
3.6.2	Arranque estrella-delta	66
3.6.2.1	Esquema	66
3.6.2.2	Gráficas:.....	68
3.6.3	Arranque por resistencias estatóricas.....	68
3.6.3.1	Esquemas.....	68
Figura 46	Diagrama de circuito de potencia, mando y funcional - Arranque por resistencias estatóricas.....	69
3.6.3.1.2	Gráficas.....	70
3.7	Arranque rotórico:	70
3.7.1.1	Esquema	70
3.7.1.1.2	Gráficas.....	72
3.8	Frenado del motor asíncrono	72
3.8.1	Frenado contra corriente	72
3.8.2	Motor freno.....	73
3.8.3	Frenado dinámico.....	74
3.9	Ventajas e inconvenientes motor asíncrono trifásico	75

3.10 Motores síncronos.....	75
3.10.1 Principio de funcionamiento:.....	75
3.10.2 Componentes	77
3.10.2.1 El estator	77
3.10.2.2 El rotor	79
3.10.2.2.1 Rotor de imanes permanentes	79
3.10.2.2.2 Rotor embobinado.....	80
3.10.3 Control de la velocidad de rotación.....	80
3.10.4 Arranque del motor síncrono	82
3.10.4.1 Arranque del motor reduciendo la frecuencia eléctrica.....	82
3.10.4.2 Arranque como motor asíncrono:.....	82
3.10.4.3 Arranque del motor mediante un motor primario externo:	83
3.10.4.4 Arranque motor como motor asíncrono sincronizado	83
3.10.4.5 Arranque a través de un devanado amortiguador (rotor ranurado)....	83
3.10.5 Frenado de un motor trifásico síncrono	84
3.10.6 Ventajas e inconvenientes.....	84
3.11 Motor a inducción monofásico.....	84
3.11.1 Introducción.....	84
3.11.2 Componentes.....	85
3.11.3 Clasificación de los motores monofásicos de inducción	85
3.11.3.1 Motores de fase partida y arranque por resistencia	85
3.11.3.1.1 Control de velocidad.....	87
3.11.3.1.2 Usos.....	87
3.11.3.2 Motor de fase partida, capacitor de marcha o permanente	87
3.11.3.3 Motor de fase partida y capacitor de arranque.....	88
3.11.3.4 Motor con capacitor de arranque y marcha.....	90
3.11.3.5 Motor de polos sombreados.....	91
3.11.4 Características de los motores de inducción monofásicos.....	92
3.11.5 Arranque de motores monofásicos	93
3.11.6 Ventajas e inconvenientes del motor asíncrono monofásico.....	93
3.12 Otros motores	93
3.12.1 Motor síncrono monofásico	93
3.12.2 Motores universales	93
3.12.2.1 Motores mejorados	94

3.12.2.1.1	Motor a conmutación electrónica.....	94
3.12.2.1.2	Motor a reluctancia y conmutación.....	95
3.12.2.1.3	Motores de imanes permanentes.....	95
3.12.2.1.4	Motor Written Pole.....	96
3.12.2.1.5	Motor a corriente continua lineal.....	97
3.12.2.1.6	Motor a corriente alterna lineal.....	97
3.12.2.1.7	Motor híbrido (paso a paso).....	97
4	PROTECCIONES DE LOS MOTORES.....	99
4.1	Dispositivos de seccionamiento.....	99
4.2	Protección contra sobre intensidades.....	99
4.3	Protección contra sobrecargas.....	99
4.4	Otros tipos de protección.....	101
5	COMO REALIZAR EL LEVANTAMIENTO EN CAMPO.....	102
5.1	Características del motor.....	102
5.2	Características de la instalación.....	105
5.3	Mantenimiento.....	106
5.4	Horarios de funcionamiento.....	106
5.5	Gestión operativa.....	106
5.6	Mediciones en campo.....	107
6	FORMATO DE RECOPIACIÓN DE DATOS.....	108
7	MEJORAS ENERGÉTICAS.....	111
7.1	Selección apropiada de la potencia del motor.....	111
7.2	Mejora de la calidad de la energía.....	111
7.3	Tensiones cercanas a las nominales.....	112
7.4	Minimizar el desequilibrio de tensiones.....	112
7.5	Disminuir la distorsión armónica de la red.....	113
7.6	Reducir la carga mecánica sobre el motor.....	114
7.6.1	En Bombas y ventiladores.....	114
7.6.2	En sistemas de transmisión mecánica.....	115
7.7	Uso de motores de alta eficiencia.....	115
7.7.1	Ventajas.....	116
7.7.2	Limitaciones.....	116
7.7.3	Recomendaciones.....	116
7.7.4	Evaluación económica.....	117

7.8	Controladores electrónicos de velocidad	118
7.9	Usar métodos de mantenimiento centrados en la eficiencia	119
7.9.1	Reparación eficiente de motores eléctricos	119
7.9.2	Reemplazar en lugar de rebobinar.	119
7.10	Resumen.....	120
8	EJEMPLOS	121
8.1	Ejemplo 1	121
8.2	Ejemplo 2	122
8.3	Ejemplo 3	122
8.4	Ejemplo 4	123
8.5	Resumen de ejemplos anteriores	124
	Bibliografía	125
	ANEXO 1: Unidades y magnitudes.....	126

Lista de Tablas

Tabla 1 Propiedades eléctricas	28
Tabla 2 Normas motores	38
Tabla 3 Políticas energéticas.....	38
Tabla 5 tabla número de polos, frecuencia y R.P.M.	57
Tabla 6 Número de polos Motor, frecuencia y R.P.M	79
Tabla 7 Motores de inducción monofásicos.....	92
Tabla 8 Código NEMA clave KVA	104
Tabla 9 Clase de aislamiento	105
Tabla 10 Niveles de tensión en motor de inducción.....	112
Tabla 11 Unidades y magnitudes Corriente continua	126
Tabla 12 Unidades y magnitudes Corriente alterna monofásica	127
Tabla 13 Unidades y magnitudes Corriente alterna trifásica	129

Lista de Figuras

Figura 1 Fuerza ejercida sobre un conductor inmerso en un campo magnético	22
Figura 2 Analogía de par motor	23
Figura 3 Corriente continua	24
Figura 4 Corriente alterna.....	25
Figura 5 Ley de Ohm.....	26
Figura 6 Visualización gráfica Ley de Ohm.....	27
Figura 7 Gráfico de corriente vs voltaje para una resistencia constante de 1 Ohm.....	27
Figura 8 Gráfico de corriente vs resistencia para un voltaje constante de 1 Voltio.....	27
Figura 9 Comportamiento de la C.C.	29
Figura 10 Comportamiento de la corriente alterna.....	30
Figura 11 Desfase capacitivo	30
Figura 12 Triangulo de potencias	31
Figura 13 Principio de funcionamiento motor a corriente continua.....	42
Figura 14 Esquema motor a corriente continua	43
Figura 15 Esquema del inducido motor a corriente continua	44
Figura 16 Esquema motor a excitación independiente	45
Figura 17 Gráfica velocidad motor a excitación independiente	45

Figura 18 Gráfica del par motor a excitación independiente	46
Figura 19 Motor a excitación paralela.....	46
Figura 20 esquema Motor a excitación paralela	46
Figura 21 Gráfica velocidad motor a excitación paralela.....	47
Figura 22 Gráfica del par motor a excitación paralela.....	47
Figura 23 Motor a excitación en serie.....	48
Figura 24 Esquema motor a excitación en serie	48
Figura 25 Gráfica velocidad motor a excitación en serie.....	48
Figura 26 Gráfica del par motor a excitación en serie.....	48
Figura 27 Motor a excitación compuesta	49
Figura 28 Esquema motor a excitación compuesta	49
Figura 29 Diagrama de potencia y pérdidas - motor a corriente continua	51
Figura 30 Partes constitutivas de motor asíncrono tipo Jaula	53
Figura 31 Estator motor asíncrono	54
Figura 32 Rotor bobinado con anillos rozantes.....	54
Figura 33 Rotor de jaula de ardilla y estator	55
Figura 34 Esquema de fuerza, corriente y campo jaula de ardilla.....	56
Figura 35 Regla de los tres dedos de la mano derecha.....	56
Figura 36 Influencia del número de pares de polos sobre la velocidad de rotación y la forma del campo estatórico	56
Figura 37 Evolución de la oscilación campo magnético rotante.....	57
Figura 38 Gráfica par/velocidad tipo de motores asíncronos	59
Figura 39 Pilotaje de frecuencia y en tensión motor asíncrono.....	61
Figura 40 Diagrama de potencia y pérdidas Motor asíncrono.....	63
Figura 41 Conexión estrella-delta.....	64
Figura 42 Diagrama de circuito de potencia, mando y funcional, arranque directo	65
Figura 43 Curvas características corriente y par arranque directo.....	66
Figura 44 Diagrama de circuito de potencia, mando y funcional - Arranque estrella-delta	67
Figura 45 Curvas características corriente y par arranque estrella-delta	68
Figura 46 Diagrama de circuito de potencia, mando y funcional - Arranque por resistencias estatóricas	69
Figura 47 Curvas características corriente y par - Arranque por resistencias estatóricas	70
Figura 48 Diagrama de circuito de potencia, mando y funcional arranque rotórico	71
Figura 49 Curvas características corriente y par arranque rotórico.....	72
Figura 50 Esquema frenado contra corriente motor asíncrono	73

Figura 51 Esquema motor freno motor asíncrono.....	74
Figura 52 Esquema frenado dinámico motor asíncrono.....	74
Figura 53 Esquema motor síncrono.....	75
Figura 54 Fotos estator motor síncrono.....	77
Figura 55 Influencia del número de pares de polos sobre la velocidad de rotación y la forma del campo estatórico.....	77
Figura 56 Evolución de la oscilación campo magnético rotante.....	78
Figura 57 Motor síncrono a imanes permanentes ELPROM.....	79
Figura 58 : Motor síncrono. Fuente: Synchronous Machines (SM) Continentals.....	80
Figura 59 Variación de la velocidad a par constante motor síncrono.....	81
Figura 60 Arranque como motor asíncrono.....	82
Figura 61 Arranque como motor asíncrono, sincronizado.....	83
Figura 62 Esquema motor de fase dividida.....	86
Figura 63 Representación motor de fase partida con arranque por resistencias.....	86
Figura 64 Representación vectores intensidad motor con arranque por resistencias.....	86
Figura 65 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico de arranque por resistencias.....	87
Figura 66 Representación motor de fase partida con capacitor de marcha.....	88
Figura 67 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico con capacitor de marcha.....	88
Figura 68 motor PINNSUN YcYL de condensador de arranque.....	89
Figura 69 Esquema de motor con condensador de arranque.....	89
Figura 70 Representación motor con condensador de arranque.....	89
Figura 71 Representación vectores Intensidad motor con condensador de arranque.....	89
Figura 72 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico de arranque por capacitor.....	89
Figura 73 Motor ELPROM ASR de condensador de arranque y marcha.....	90
Figura 74 Esquema motor con condensador de arranque y marcha.....	90
Figura 75 Representación motor con condensador de arranque y marcha.....	90
Figura 76 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico con capacitor de arranque y marcha.....	91
Figura 77 Esquema motor de polos sombreados.....	91
Figura 78 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico de polos sombreados.....	92
Figura 79 Motor universal.....	94
Figura 80 Gráfica par y velocidad motor universal.....	94

Figura 81 Motor a conmutación electrónica ZIEHL ABBEGG	94
Figura 82 Gráficas características motor reluctancia y conmutación	95
Figura 83 SPPS Written-Pole®.....	96
Figura 84 Motor Writeen Pole.....	96
Figura 85 Linear DC Motor Electromehanic MOLDC05108901	97
Figura 86 Esquema motor hibrido	98
Figura 87 Motor hibrido GIIS Ingeniería.....	98
Figura 88 Relevador de sobrecarga SCHNEIDER LR2K.....	100
Figura 89 Relevador de sobrecarga térmica ABB EF19	100
Figura 90 Relevador de sobrecarga electrónico SIEMENS 3RB10.....	101
Figura 91 Placa motor	102
Figura 92 Gráfica NEMA letra de diseño DES	104
Figura 93 Mediciones en campo.....	107
Figura 94 Gráfica de tensión sobre la potencia nominal del motor	113
Figura 95 Gráfica de distorsión armónica sobre la potencia motor	114

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Fuerza sobre un conductor en un campo magnético.....	22
Ecuación 2 Potencia nominal	22
Ecuación 3 Intensidad de corriente eléctrica	24
Ecuación 4 Conductividad eléctrica	25
Ecuación 5 Resistencia	26
Ecuación 6 Corriente eléctrica.....	26
Ecuación 7 Conductancia.....	26
Ecuación 8 Potencia en C.C.....	29
Ecuación 9 Potencia en C.A.....	31
Ecuación 10 Potencia reactiva	31
Ecuación 11 Potencia aparente.....	32
Ecuación 12 Potencia eléctrica de una bomba	32
Ecuación 13 Potencia para elevación de agua	32
Ecuación 14 Potencia de motor para mecanismos de elevación	34
Ecuación 15 Potencia de un motor para mecanismos giratorios.....	34
Ecuación 16 Potencia de un motor para el accionamiento de grúas con accionamiento unilaterial del carro.....	34

Ecuación 17 Potencia de un motor para mecánico de traslación.....	35
Ecuación 18 Potencia de un motor para un ascensor.....	35
Ecuación 19 Potencia absorbida por un ventilador	35
Ecuación 20 Potencia necesaria en una maquina (a).....	36
Ecuación 21 Potencia necesaria en una maquina (b).....	36
Ecuación 22 Potencia absorbida por un motor trifásico (a).....	36
Ecuación 23 Potencia absorbida por un motor trifásico (b).....	36
Ecuación 24 Potencia absorbida por un motor trifásico (c).....	36
Ecuación 25 Potencia desarrollada por un motor trifásico	36
Ecuación 26 Potencia absorbida por un motor de corriente continua (a).....	37
Ecuación 27 Potencia absorbida por un motor de corriente continua (b).....	37
Ecuación 28 Potencia absorbida por un motor monofásico de corriente alterna (a).....	37
Ecuación 29 Potencia absorbida por un motor monofásico de corriente alterna (b).....	37
Ecuación 30 Tensión media aplicada motor corriente continua	49
Ecuación 31 Potencia absorbida motor a corriente continua	50
Ecuación 32 Pérdidas cobre motor a corriente continua.....	50
Ecuación 33 Potencia eléctrica interna motor a corriente continua.....	50
Ecuación 34 Potencia mecánica motor a corriente continua.....	50
Ecuación 35 Potencia útil	51
Ecuación 36 Rendimiento del motor a corriente continua	51
Ecuación 37 Intensidad del inducido	52
Ecuación 38 Intensidad de arranque motor a corriente continua	52
Ecuación 39 Deslizamiento motor asíncrono.....	58
Ecuación 40 Deslizamiento motor asíncrono porcentual	58
Ecuación 41 Velocidad del campo rotatorio motor asíncrono	58
Ecuación 42 par motor asíncrono.....	59
Ecuación 43 Potencia eléctrica.....	61
Ecuación 44 Potencia absorbida motor asíncrono.....	61
Ecuación 45 Pérdidas cobre estator motor asíncrono	62
Ecuación 46 Potencia del campo magnético motor asíncrono.....	62
Ecuación 47 Pérdidas del núcleo motor asíncrono	62
Ecuación 48 Pérdidas cobre rotor motor asíncrono.....	63
Ecuación 49 potencia mecánica motor asíncrono.....	63
Ecuación 50 Potencia útil motor asíncrono.....	63

Ecuación 51 Rendimiento motor asíncrono	64
Ecuación 52 velocidad del campo rotatorio motor síncrono	80
Ecuación 53 velocidad de rotación del eje del motor síncrono.....	80
Ecuación 54 Ahorro económico anual con motor de alta eficiencia	117
Ecuación 55 Valor presente	117
Ecuación 56 Factor de descuento	118

Listado de Abreviaturas

A	Amperio
A.C.	Corriente alterna, por sus siglas en inglés “Alternating Current”
°C	Grados Celsius
D.C.	Corriente directo, por sus siglas en inglés “Direct Current”
fem	Fuerza electromotriz
HP	Horse Power
Hz	Hertz
K	Grados Kelvin
kW	kilowatt
kWh	Kilowatt-hora
Lb-ft	Libras-pie
N	Newton
Nm	Newton-metro
PyME	Pequeñas y Medianas Empresas
RPM	Revoluciones por minuto
S/m	Siemes por metro
TEE	Taller de Eficiencia Energética
VA	Voltio Amperios
VSD	Por sus siglas en inglés Variable Speed Drive, variador de velocidad

Resumen Ejecutivo

1. Antecedentes:

En el marco del Proyecto de Desarrollo de Capacidades para el Fortalecimiento del Sector Privado para la Mitigación del Cambio Climático, diversas actividades se desarrollaron durante 2012 y 2013, a fin de formar consultores en eficiencia energética para brindar estos servicios al sector PyME. Como resultado de esta etapa de formación, COMPITE como organización que conduce estas actividades en México, ha desarrollado un nuevo producto de asistencia a las PyMEs basado en un Taller de Eficiencia Energética (TEE) que tiene como objetivo reducir los costos de la operación y de la energía al efficientar el uso de la misma, a través de mejores métodos de proceso y de trabajo.

Para apoyar este nuevo producto en el mercado, se llevaron a cabo experiencias piloto de implementación. Con base en la retroalimentación obtenida de esta primera fase de prueba, se prevé reforzar la capacitación brindada a los consultores de COMPITE a través de tutoriales. El presente material podrá ser utilizado por los consultores de COMPITE para fortalecer la metodología del Taller de Eficiencia Energética.

2. Objetivo y alcance:

Este tutorial sirve de herramienta para los consultores de COMPITE en el desarrollo de los Talleres de Eficiencia Energética, en particular para todo lo relacionado con los sistemas electromotrices.

3. Metodología:

Para elaborar el presente documento, se realizó en primera instancia una reunión con los consultores de COMPITE, con el objetivo de entender el contexto de ejecución de los Talleres de Eficiencia Energética, sus conocimientos en relación a la temática desarrollada y sobre todo sus expectativas en cuanto al contenido del tutorial. Posteriormente, se desarrollaron la guía del contenido y el índice del documento, tomando en cuenta el material existente así como las peticiones de los consultores de COMPITE. Finalmente, se investigó, en diferentes fuentes de información electrónica e impresa, los contenidos faltantes por desarrollar.

4. Estructura del documento:

Este documento se divide en una primera parte teórica sobre el funcionamiento de los motores y el cálculo de la potencia correspondiente. La segunda parte describe las diferentes tecnologías existentes de motores así como las protecciones de los mismos. En el quinto capítulo, los consultores podrán encontrar los datos que deben obtener o registrar para hacer el análisis energético correspondiente. El sexto capítulo contiene el formato de recopilación de

datos desarrollado en función de las recomendaciones indicadas en el capítulo anterior. Finalmente, se presentan las mejoras energéticas que se pueden identificar en los motores y la estimación de los ahorros asociados.

5. Resultados clave:

Con este tutorial, los consultores de COMPITE tienen una herramienta muy completa que les permite entender el principio de funcionamiento de los motores así como conocer y diferenciar todos los tipos de tecnologías. Con este conocimiento y la guía de mejoras energéticas presentada, podrán identificar, analizar y calcular las oportunidades de ahorros relacionados con los equipos de esta naturaleza instalados en una PyME.

6. Conclusiones:

Esta herramienta refuerza los conocimientos de los consultores de COMPITE y les permite ser mejor preparados para llevar a cabo los Talleres de Eficiencia Energética en PyME, al entender el funcionamiento y los tipos de los motores y al identificar rápidamente las principales mejoras energéticas relacionadas.

1 OBJETIVOS

Existen una multitud de tipos de motores diferentes que se encuentran a nuestra disposición. Cada tipología se distingue por características específicas que otorgan una cierta adaptabilidad a cualquier tipo de aplicación o uso.

Esta guía presenta un primer acercamiento de los principales motores eléctricos que actualmente inundan el mercado, sin la ambición de convertir al lector en un experto pero más bien aportar una perspectiva sobre la eficiencia energética de los mismos,

Este tutorial ha sido elaborado para lectores de todo ámbito, desde el menos experimentado hasta el técnico especializado. Se ilustran aspectos técnicos y teóricos, mencionando una serie de ecuaciones necesarias para el correcto análisis de las tecnologías.

Este tutorial se estructura de la siguiente forma:

- Teoría de base
- Tipologías de los motores y tipo de mandos
- Toma de datos
- Medidas de eficiencia energética

2 BASES TEÓRICAS

2.1 Introducción

Todos los motores se componen de dos elementos esenciales que son:

- El estator correspondiente a la parte fija del motor. Este componente es el elemento que opera como base, permitiendo la rotación del motor. El estator no se mueve mecánicamente, pero sí magnéticamente.
- El rotor correspondiente a la parte móvil del motor. Esta parte es el elemento que transfiere la energía mecánica, ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a mecánica.

La concepción y tipo de construcción de estas dos partes definen el tipo de motor con sus características específicas. Existen otros elementos que lo componen tales como escobillas, anillos colectores, condensadores, interruptores, entre otros, que son componentes específicos para cada tipología de motor.

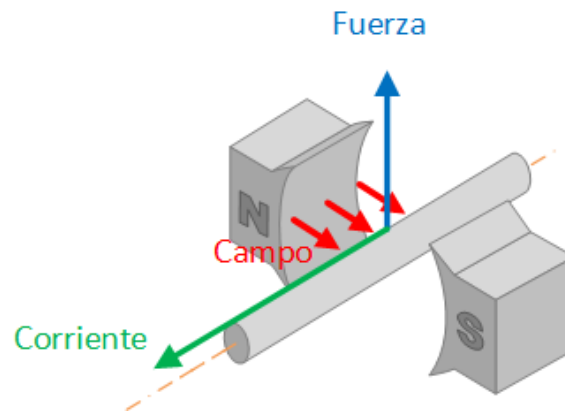
Todos los motores que se tratarán en este tutorial funcionan bajo el principio del electromagnetismo. Existen otros tipos de motores que se basan en las leyes de la electrostática y piezoeléctrica, pero que son de uso peculiar.

En este apartado de bases teóricas, se abordarán en una primera fase los conceptos básicos de electricidad y magnetismo, posteriormente se analizarán los cálculos de potencia de diversos equipamientos y se mostrarán las normas y políticas energéticas de los motores a nivel internacional.

2.2 Conceptos básicos electricidad y magnetismo

En un motor eléctrico, la amplitud de la fuerza varía proporcionalmente a la intensidad del campo magnético y a la intensidad de la corriente que atraviesa el conductor.

Figura 1 Fuerza ejercida sobre un conductor inmerso en un campo magnético



Ecuación 1 Fuerza sobre un conductor en un campo magnético

$$F=ILB$$

F Fuerza en Newtons [N]

I Intensidad de corriente en amperes [A]

L Longitud en metros [m]

B Flujo magnético [weber/m²]

El rotor de un motor eléctrico se pone en un campo magnético generado por el estator. El campo magnético induce una corriente en el interior del rotor y la fuerza resultante creada por los campos magnéticos en el estator y el rotor generan la rotación (par motor).

2.2.1 Potencia y par motor

La placa de identificación indica la potencia mecánica nominal de un motor eléctrico en caballos de fuerza [HP] o kilowatts eléctricos [kW].

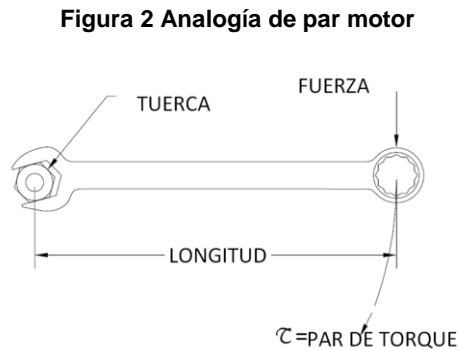
Ecuación 2 Potencia nominal

$$Potencia\ nominal = \frac{kW\ nominales}{0.746}$$

La velocidad y el par son dos factores importantes que determinan la potencia mecánica de un motor.

Torque es la medida de la fuerza para producir una rotación. A menudo se expresa en libras-pie [lb.ft] o newtons-metro [Nm].

Para entender mejor el concepto de par de torsión, imaginar una llave utilizada para aflojar una tuerca. La aplicación de una fuerza al final de la llave, será el par motor. Mientras la tuerca no ha empezado a girar, no se realiza trabajo. Cuando la tuerca comienza a girar, se realiza un trabajo; y suponiendo que seguimos aplicando la misma fuerza en el mango de la llave, la potencia es, por definición, el producto de la velocidad de rotación por el par de torsión aplicado.



Sobre el motor en marcha lenta y el par debe ser alto para proporcionar la misma potencia de salida. Para soportar este par superior, motores de baja velocidad requieren componentes más robustos y son generalmente más grandes, más pesados y más caros que los motores de velocidad alta de la misma potencia nominal.

2.2.2 Fuerza electromotriz (fem)

La fuerza electromotriz corresponde al trabajo que debe realizar un generador para mover las cargas eléctricas en un circuito. Se anota fem y su unidad es el volt.

No se debe confundir la fuerza electromotriz con la diferencia de potencial ya que la diferencia reside en que la fuerza electromotriz es la causa de movimiento en el generador mientras que la diferencia de potencial se sitúa en el circuito. Se origina manteniendo constante una diferencia de potencial en los bornes del generador. Esta diferencia se denomina tensión.

2.2.3 Corriente eléctrica

Se trata de la circulación de cargas o electrones a través de un circuito eléctrico cerrado, que se mueven del polo negativo al polo positivo de la fuente de suministro (generador fem).

2.2.4 Intensidad de corriente eléctrica

La intensidad de corriente eléctrica simbolizada por la letra I , corresponde a la cantidad o carga eléctrica (Q) que circula por un circuito en la unidad de tiempo (t). Su unidad es el amperio (A).

Ecuación 3 Intensidad de corriente eléctrica

$$I = \frac{Q}{t}$$

Donde,

I	Intensidad de corriente en ampers (A)
Q	Carga eléctrica en Culombs (C)
t	Tiempo en segundos (s)

2.2.5 Clases de corriente eléctrica

Existen dos tipos de corriente eléctrica, la corriente continua y la corriente alterna.

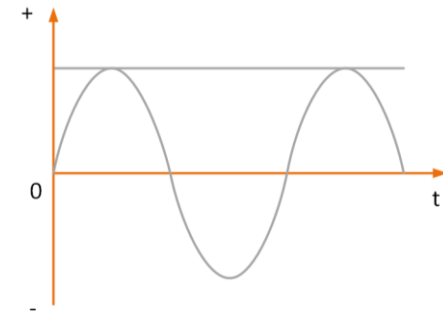
La corriente continua (C.C. o D.C: Direct Current en inglés) corresponde a la corriente que siempre circula en el mismo sentido y con un valor constante. Este tipo de corriente se produce por dinamos, pilas, baterías, acumuladores entre otros.

Figura 3 Corriente continua



La corriente alterna CA o AC abreviatura de “alternating current”, es una corriente eléctrica donde los electrones circulan en un sentido de forma alterna en una dirección y posteriormente en la otra a intervalos regulares llamados ciclos.

Figura 4 Corriente alterna



2.2.6 Resistividad

Se trata de la resistencia eléctrica correspondiente a un material específico. Se anota ρ y se mide en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$). Un valor alto de resistividad implica que el material no es buen conductor. Esta resistividad en los metales suele incrementarse con la temperatura y la de los semiconductores disminuye con la temperatura.

2.2.7 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica representa la capacidad de un cuerpo o medio para conducir la corriente eléctrica. En conductores metálicos o semimetálicos, son los electrones que transportan la carga mientras que en disoluciones de electrolitos se trata de iones. La conductividad es la inversa de la resistividad, siendo por lo tanto su unidad el siemens por metro anotado S/m. Su sigla es σ es la proporcionalidad entre el campo eléctrico y la densidad de corriente de conducción.

Ecuación 4 Conductividad eléctrica

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Donde,

σ Conductividad eléctrica en $1/(\Omega \cdot m)$
 ρ Resistividad en $\Omega \cdot m$

2.2.8 Resistencia

La resistencia corresponde a la oposición de un material al paso de la corriente eléctrica. Se anota R y su unidad es el ohmio. La relación para su cálculo es:

Ecuación 5 Resistencia

$$R = \frac{U}{I}$$

Y

Ecuación 6 Corriente eléctrica

$$I = \frac{U}{R}$$

Donde,

I	Intensidad de corriente en amperes (A)
U	Tensión en volts (V)
R	Resistencia del material en ohms (Ω)

2.2.9 Conductancia eléctrica

La conductancia eléctrica (G) de un conductor o material, es la inversa a la oposición que el material presenta al movimiento de los electrones, por lo tanto es la inversa de la resistencia.

Su unidad es el siemens.

Ecuación 7 Conductancia

$$G = \frac{1}{R}$$

Donde,

G	Conductancia eléctrica en siemens (S)
R	Resistencia del material en ohms (Ω)

2.2.10 Ley de ohm

Se trata de la ley que establece relaciones que existen entre el potencial eléctrico (voltaje), corriente eléctrica y resistencia. La ley de ohm menciona que la corriente eléctrica a través de un conductor será igual a la diferencia de potencial entre la resistencia que haya en dicho conductor. Por lo tanto, se expresa a través de la siguiente ecuación:

Figura 5 Ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R}$$

Donde,

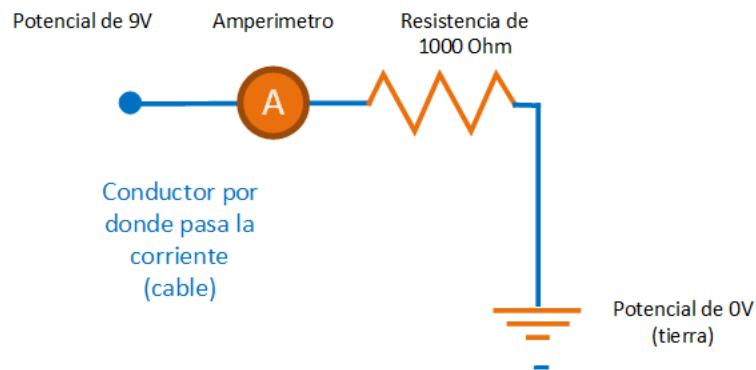
I	Intensidad de corriente en amperes (A)
---	--

V Potencial o voltaje medido en volts (V)
 R Resistencia del material en ohms (Ω)

Es necesario que para que haya una corriente eléctrica a través de un conductor, debe existir una diferencia de potencial entre 2 puntos.

En todo material o conductor siempre se encontrará una resistencia eléctrica, por lo que la corriente depende de dicha resistencia y del voltaje aplicado.

Figura 6 Visualización gráfica Ley de Ohm



La corriente que esta marcando el amperímetro es de 9 mA, es decir la misma corriente que se puede calcular con la ley de ohm.

Figura 7 Gráfico de corriente vs voltaje para una resistencia constante de 1 Ohm

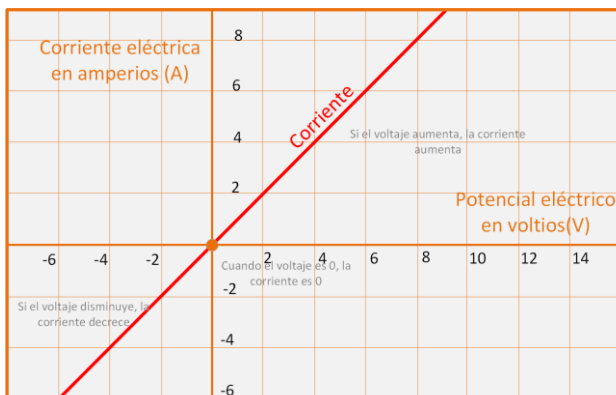
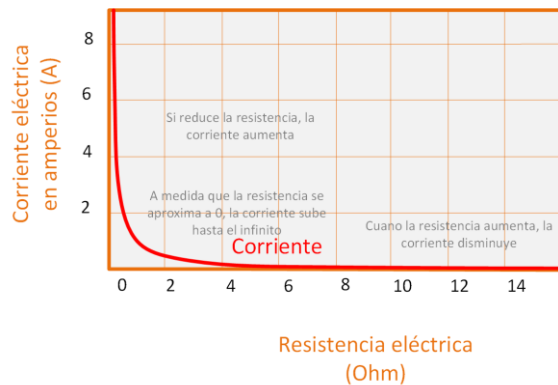


Figura 8 Gráfico de corriente vs resistencia para un voltaje constante de 1 Voltio



2.2.11 Leyes de Kirchhoff

En la teoría de los circuitos eléctricos, se suelen utilizar una serie de parámetros que representan las propiedades de ciertos materiales o conductores. Se ha mencionado anteriormente, la resistencia y la conductancia, sin embargo estas dos características no son las

únicas propiedades eléctricas de los elementos que se utilizan en el mundo eléctrico. Estas dos magnitudes son propiedades reales de los materiales, no obstante existen otras que no son números reales sino números complejos e imaginarios.

Número imaginario

Representa un número que no es miembro de los números reales y siempre viene acompañado de la letra i .

$$bi : 3i, 10i, 20i \dots ni$$

Número complejo

Es la combinación de un número imaginario asociado a un número real, tal como se menciona a continuación:

$$a \pm bi : 3 + 8i, \dots$$

A continuación se aportan las propiedades que usan comúnmente en el mundo eléctrico:

Tabla 1 Propiedades eléctricas

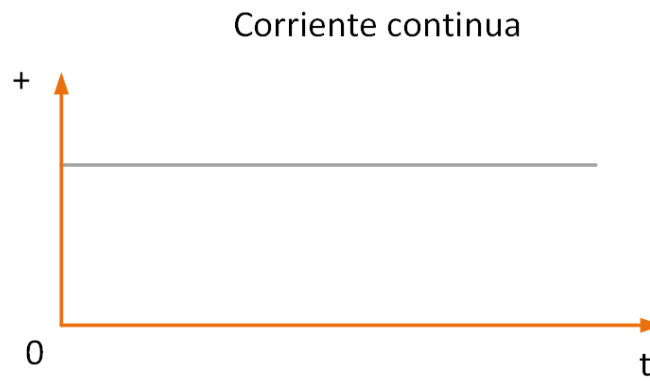
Propiedad	Símbolo	Tipo de número	Descripción
Impedancia	Z	Complejo	Oposición de un cuerpo al flujo de la corriente a través de él. Se mide en Ohms (Ω)
Resistencia	R	Real	Parte real de la impedancia y por extensión la oposición de un cuerpo al flujo de la corriente. Es causada por los elementos resistivos presentes en un circuito. Se mide en Ohms (Ω)
Reactancia	X	Imaginario	Parte imaginaria de la impedancia causada por los elementos inductivos o capacitivos presentes en un circuito. Se mide en Ohms (Ω)
Admitancia	Y	Complejo	Facilidad con que la corriente fluye a través de un circuito eléctrico. Es el inverso de la impedancia y se mide en Siemens.
Conductancia	G	Real	Parte real de la admitancia y a la vez el inverso de la resistencia. Se mide en Siemens.
Suceptancia	B	Imaginario	Parte imaginaria de la admitancia y a la vez el inverso de la reactancia. Se mide en Siemens.

2.2.12 Potencia y par motor

2.2.12.1 Potencia en corriente continua

La corriente continua, tal y como se mencionó anteriormente, la suministran las pilas, las baterías, acumuladores entre otros. Todo equipo que se conecte a este tipo de generadores son receptores de corriente continua.

Figura 9 Comportamiento de la C.C.



La ecuación para determinar la potencia en corriente continua es:

Ecuación 8 Potencia en C.C.

$$P = V \cdot I$$

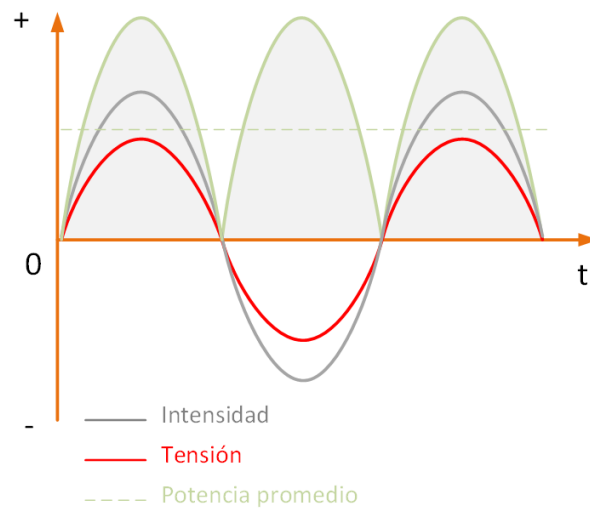
Donde,

I	Intensidad de corriente en ampers (A)
V	Potencial o voltaje medido en volts (V)
P	Potencia en watts (W)

2.2.12.2 Potencia en corriente Alterna

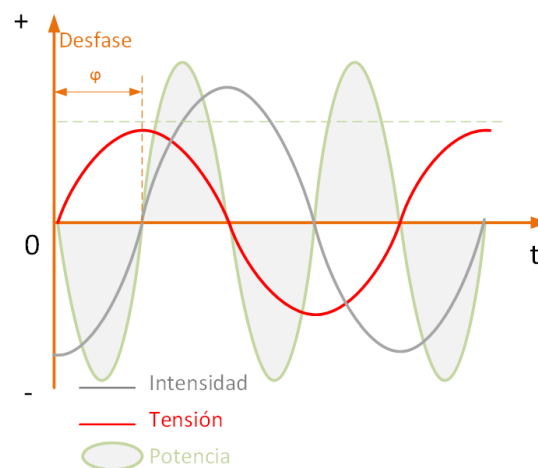
En circuito de corriente alterna, la tensión y corriente presentan una curva sinusoidal en una frecuencia de 60 Hz para México. Si la corriente y la tensión se encuentran en “fase”, es decir que oscilan a la misma frecuencia y encimadas, el producto de ambas unidades genera una potencia ondulada con un valor medio positivo.

Figura 10 Comportamiento de la corriente alterna



En el momento que las curvas sinusoidales de corriente y tensión presentan un desfase, su producto resulta positivo y negativo. Este desfase, puede producirse en los dos sentidos. Este desfase se produce en presencia de bobinas (motores, transformadores, entre otros) o condensadores (cables multiconductores, condensadores...) ubicadas en el circuito eléctrico. La presencia de bobinas genera un desfase inductivo mientras que los condensadores provocan un desfase capacitivo.

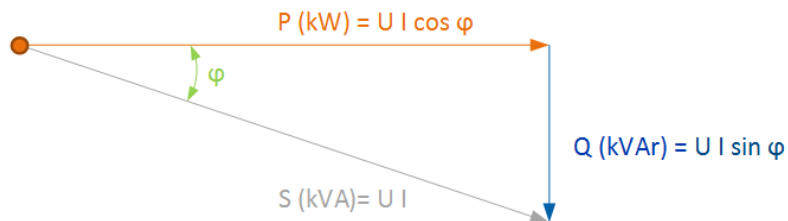
Figura 11 Desfase capacitivo



En la figura anterior, se observa que la potencia promedio es nula, lo que corresponde a pura energía reactiva.

Las potencias en juego en un circuito de corriente alternativa pueden representarse según un diagrama vectorial:

Figura 12 Triangulo de potencias



Donde, la potencia, en el sentido mecánico del término, cuya expresión corresponde a un trabajo realizado en un tiempo determinado, es la potencia activa que la suministra. Esta misma potencia activa puede ser transformada en calor o Luz. Su unidad física es el vatio (W).

Ecuación 9 Potencia en C.A.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Donde,

I	Intensidad de corriente en amperes (A)
U	Tensión en volts (V)
φ	Angulo en °
P	Potencia en watts (W)

Sin embargo la potencia reactiva Q no es una potencia que genera trabajo, calor o luz. El interés de identificarla reside en el hecho que permite evaluar la importancia de los receptores inductivos tales como motores, lámparas fluorescentes y los receptores capacitivos tales como condensadores en una instalación. Esta energía se expresa en VAR o VAr, abreviatura de “Voltios amperios reactivos”.

Ecuación 10 Potencia reactiva

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Donde,

I	Intensidad de corriente en amperes (A)
U	Tensión en volts (V)
φ	Angulo en °
Q	Potencia reactiva (VAr)

La potencia aparente correspondiente a la suma geométrica de la potencia activa y reactiva. Esta potencia es la utilizada para el dimensionamiento de los equipos y materiales eléctricos y su unidad es el Voltios amperios (VA).

Ecuación 11 Potencia aparente

$$S = U.I$$

Donde,

I	Intensidad de corriente en ampers (A)
U	Tensión en volts (V)
S	Potencia aparente (VA)

2.3 Cálculo de potencias para máquinas

En este apartado, se muestran las ecuaciones para determinar la potencia de diversos motores eléctricos destinados a diversas aplicaciones comunes.

2.3.1 Potencia para el motor de una bomba

Ecuación 12 Potencia eléctrica de una bomba

$$P = Q d \frac{h}{\eta}$$

Donde

P	Potencia en kW
Q	Caudal en m ³ /s
d	Peso específico en N/dm ³
h	Altura de la elevación en m
η	Rendimiento mecánico

2.3.2 Potencia para elevación de agua

Ecuación 13 Potencia para elevación de agua

$$P = Q \frac{h}{75 \eta}$$

Donde

P	Potencia en HP
Q	Caudal en m ³ /s
h	Altura de la elevación en m
η	Rendimiento mecánico

2.3.3 Potencia para maquinas diversas (Parientativas)

2.3.3.1 Maquinas herramientas para metales

Equipó	Potencia
Torno revólver	3 a 20
Torno paralelo	3 a 45
Fresadora	1 a 25
Rectificadora	1 a 30
Martillos pilón	10 a 100
Cizallas	1 a 40
Máquinas de cortar y roscar	1 a 20
Taladradoras verticales	1 a 10
Taladradoras radiales	10 a 40
Mandrinadoras	10 a 30

2.3.3.2 Industria de la construcción

Equipó	Potencia
Hormigoneras	3 a 6
Muela, perforadoras, sierras	1 a 3
Cintas transportadoras	2 a 5

2.3.3.3 Máquinas para trabajar Madera

Equipó	Potencia
Sierra de cinta	0.5 a 6
Sierra circular	2 a 6
Taladradoras	2 a 4
Cepilladoras	20 a 75
Tornos	1 a 15

2.3.3.4 Máquinas agrícolas

Equipó	Potencia
Empacadoras de paja	2 a 5
Trilladoras	7 a 15
Centrifugadoras de leche	0.5 a 3

Elevadores de granos	1 a 3
Elevadores de sacos	1 a 3
Limpiadores de grano	1 a 3

2.3.3.5 Potencia de motor para mecanismos de elevación

Ecuación 14 Potencia de motor para mecanismos de elevación

$$P = F \frac{v}{1000 \eta}$$

Donde

P	Potencia mínima del motor en kW
F	Fuerza resistente a la marcha en N ($F=m \cdot g$)
v	Velocidad en m/s
g	Aceleración 9.81 m/s ²
η	Rendimiento mecánico

2.3.3.6 Potencia de un motor para mecanismos giratorios

Ecuación 15 Potencia de un motor para mecanismos giratorios

$$P = M \frac{N}{9550 \eta}$$

Donde

P	Potencia mínima del motor en kW
M	Par de giro en Nm
N	Revoluciones por minuto ⁻¹

2.3.3.7 Potencia de un motor para el accionamiento de grúas con accionamiento unilateral del carro

Ecuación 16 Potencia de un motor para el accionamiento de grúas con accionamiento unilateral del carro

$$P = P_1 m_g + 2 \frac{m_c + m_{car}}{\sum m} P$$

Donde

P	Potencia en kW
P ₁	Potencia mínima necesaria en kW
m _g	Masa de la grúa en kg ⁻¹
m _c	Masa del carro en kg
m _{car}	Masa de la carga en kg

2.3.3.8 Potencia de un motor para mecánico de traslación

Ecuación 17 Potencia de un motor para mecánico de traslación

$$P = m_T w \frac{v}{2\pi \cdot 9550 \eta}$$

Donde

P	Potencia en kW
m_T	Peso total en N ¹
w	Resistencia de traslación 0.007 cojinetes de rodillo 0.020 de fricción
v	Velocidad de traslación en m x min ⁻¹
η	Rendimiento mecánico

2.3.3.9 Potencia de un motor para un ascensor

Ecuación 18 Potencia de un motor para un ascensor

$$P = \frac{1}{2} F \frac{v}{1000 \eta}$$

Donde

P	Potencia en kW
F	Fuerza en N
v	Velocidad en m/s
η	Rendimiento mecánico

En elevadores y montacargas, el peso de la cabina y la mitad de la carga útil quedan compensados por el contrapeso.

2.3.3.10 Potencia absorbida por un ventilador

Ecuación 19 Potencia absorbida por un ventilador

$$P = Q Pr \frac{9.811}{1000 \eta}$$

Donde

P	Potencia en kW
Q	Caudal del aire en m ³ /s
Pr	Presión del aire en mmca
η	Rendimiento mecánico

2.3.3.11 Potencia necesaria en una maquina

Ecuación 20 Potencia necesaria en una maquina (a) **Ecuación 21 Potencia necesaria en una maquina (b)**

$$P = M \frac{N}{9\,550 \eta_m}$$

$$P = F \frac{v}{1000 \eta_m}$$

Donde

P	Potencia en kW
M	Par de giro de la máquina en NM
N	Número de revoluciones por minuto ⁻¹
η_m	Rendimiento de la máquina
F	Fuerza (peso, fricción) en N

2.3.4 Potencia absorbida por un motor trifásico

Ecuación 22 Potencia absorbida por un motor trifásico (a)

Ecuación 23 Potencia absorbida por un motor trifásico (b)

Ecuación 24 Potencia absorbida por un motor trifásico (c)

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \frac{\varphi}{735}$$

$$P_3 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \frac{\varphi}{1000}$$

Donde

P_1	Potencia en W
P_2	Potencia en HP
P_3	Potencia en kW
V	Tensión nominal en V
I	Intensidad nominal en A
$\cos \varphi$	Factor de potencia

2.3.5 Potencia desarrollada por un motor trifásico

Ecuación 25 Potencia desarrollada por un motor trifásico

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \frac{\eta}{1000}$$

Donde

P	Potencia en kW
η	Rendimiento del motor a la potencia nominal

2.3.6 Potencia absorbida por un motor de corriente continua

Ecuación 26 Potencia absorbida por un motor de corriente continua (a)

$$P = V \cdot I$$

Ecuación 27 Potencia absorbida por un motor de corriente continua (b)

$$P_1 = V \frac{I}{1000}$$

Donde

P	Potencia en W
P ₁	Potencia en kW
I	Intensidad nominal en A
V	Tensión de inducido en V

Potencia absorbida por un motor monofásico de corriente alterna

Ecuación 28 Potencia absorbida por un motor monofásico de corriente alterna (a)

$$P = V \cdot I \cos \varphi.$$

Ecuación 29 Potencia absorbida por un motor monofásico de corriente alterna (b)

$$P_1 = V \frac{I}{1000} \cos \frac{\varphi}{1000}$$

Donde

P	Potencia en W
P ₁	Potencia en kW
I	Intensidad nominal en A
V	Tensión de inducido en V
Cos φ	Factor de potencia

2.4 Bases de energía

La normativa relativa a los motores eléctricos depende del país donde se fabriquen y comercialicen.

A continuación, a título indicativo, se adjuntan las diversas normas aplicables al país o zona de influencia:

Tabla 2 Normas motores

Norma	Entidad	País	Referencia
NEMA	National Electrical Manufacturers Association	EE.UU	NEMA MG1 Seguridad NEMA MG1 Eficiencia energética, valores mínimos
CSA Standards	Canadian Standards Association	Canadá	C22.2 N°100-M1985 Seguridad C390-93 Eficiencia energética + ensayo, valores mínimos
UL Standards	Underwriters Laboratories Inc.	EE.UU	UL 1004 Seguridad
IEEE Standards	Institute of electrical	International	IEEE1 12 B Método de ensayo
IEC Standards	International electro technical Commission	International	IEC 60034-1 General IEC 60034-2 Método de ensayo
CENELEC	European Committee for Electrotechnical	U.E	EN 60034-1 General EN 60034-2 Método de ensayo

En cuanto a políticas energéticas sobre los motores, destacan los siguientes reglamentos:

Tabla 3 Políticas energéticas

Título	Denominación	País	Fijación de valores mínimos	Norma
Epact	Energy Policy Act	EE.UU	Ley	NEMA MG1
EEAct	Energy Efficiency Act Energy Efficiency Regulations	Canadá	Ley	C390-93
EU Agreement	Acuerdos de los fabricantes europeos y la Dirección general de la Energía DG XVII	U.E	Acuerdo voluntario	EN 60034-2 IEC-2

3 TECNOLOGÍAS EN MOTORES

3.1 Introducción

Un motor eléctrico corresponde a un dispositivo rotativo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Estos sistemas se construyen en todo tipo de tamaño y pueden ajustarse a la mayoría de las aplicaciones requeridas.

La gran mayoría de los motores eléctricos son máquinas reversibles pudiendo operar como generadores, convirtiendo energía mecánica en eléctrica.

Existen diversas tipologías de motores y sus características energéticas mejoran día a día con los avances tecnológicos constantes. Los principales componentes de un motor son:

1. La carcasa o caja que envuelve las partes eléctricas del motor, es la parte externa.
2. El inductor, llamado estator cuando se trata de motores de corriente alterna, consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado estatótico, que es una parte fija y unida a la carcasa.
3. El inducido, llamado rotor cuando se trata de motores de corriente alterna, consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado rotórico, que constituye la parte móvil del motor y resulta ser la salida o eje del motor.

La conversión de energía en un motor eléctrico se debe a la interacción entre una corriente eléctrica y un campo magnético. Un campo magnético, que se forma entre los dos polos opuestos de un imán, es una región donde se ejerce una fuerza sobre determinados metales o sobre otros campos magnéticos. Un motor eléctrico aprovecha este tipo de fuerza para hacer girar un eje, transformándose así la energía eléctrica en movimiento mecánico.

Los dos componentes básicos de todo motor eléctrico son el rotor y el estator. El rotor es una pieza giratoria, un electroimán móvil, con varios salientes laterales, que llevan cada uno a su alrededor un bobinado por el que pasa la corriente eléctrica.

El estator, situado alrededor del rotor, es un electroimán fijo, cubierto con un aislante. Al igual que el rotor, dispone de una serie de salientes con bobinados eléctricos por los que circula la corriente.

Cuando se introduce una espira de hilo de cobre en un campo magnético y se conecta a una batería, la corriente pasa en un sentido por uno de sus lados y en sentido contrario por el lado opuesto. Así, sobre los dos lados de la espira se ejerce una fuerza, en uno de ellos hacia arriba y en el otro hacia abajo. Si la espira de hilo va montada sobre el eje metálico, empieza a dar vueltas hasta alcanzar la posición vertical. Entonces, en esta posición, cada uno de los hilos se encuentra situado en el medio entre los dos polos, y la espira queda retenida.

Para que la espira siga girando después de alcanzar la posición vertical, es necesario invertir el sentido de circulación de la corriente. Para conseguirlo, se emplea un conmutador o colector, que en el motor eléctrico más simple, el motor de corriente continua, está formado por dos

chapas de metal con forma de media luna, que se sitúan sin tocarse, como las dos mitades de un anillo, y que se denominan delgas.

Los dos extremos de la espira se conectan a las dos medias lunas. Dos conexiones fijas, unidas al bastidor del motor y llamadas escobillas, hacen contacto con cada una de las delgas del colector, de forma que, al girar la armadura, las escobillas contactan primero con una delga y después con la otra.

Cuando la corriente eléctrica pasa por el circuito, la armadura empieza a girar y la rotación dura hasta que la espira alcanza la posición vertical. Al girar las delgas del colector con la espira, cada media vuelta se invierte el sentido de circulación de la corriente eléctrica. Esto quiere decir que la parte de la espira que hasta ese momento recibía la fuerza hacia arriba, ahora la recibe hacia abajo, y la otra parte al contrario. De esta manera la espira realiza otra media vuelta y el proceso se repite mientras gira la armadura.

El esquema descrito corresponde a un motor de corriente continua, el más simple dentro de los motores eléctricos, pero que reúne los principios fundamentales de este tipo de motores.

En el presente documento, se describen las siguientes tecnologías en motores:

- Motores de corriente continua
- Motores asíncronos trifásico
- Motores síncronos trifásico
- Motores de inducción monofásico
- Otros motores

3.2 Motor a corriente continua

3.2.1 Principio de funcionamiento

El motor de corriente continua se compone de:

- Inductor o estator
- Inducido o rotor
- Colector y escobillas

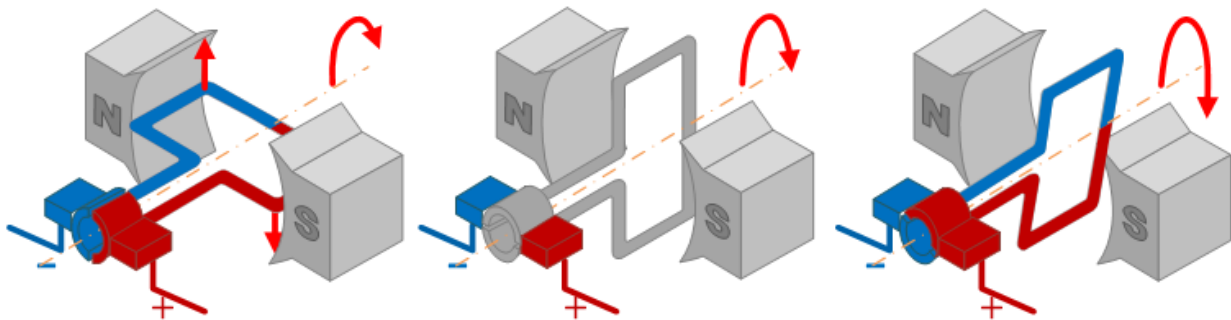
Figura 1 Motor a corriente continua



Fuente: Tuveras.com

Cuando una bobina del inductor del motor es alimentada por una corriente continua, como para un motor de imanes permanentes, crea un campo magnético (flujo de excitación) de dirección Norte-Sur.

Figura 13 Principio de funcionamiento motor a corriente continua



Una espira capaz de girar sobre el eje de rotación es instalada en el interior del campo magnético.

Esta espira está formada por dos conductores que se encuentran conectados eléctricamente a un medio colector y alimentados por corriente continua a través de las escobillas.

Con base en la ley de Laplace, donde se menciona que todo conductor recorrido por una corriente e introducido en campo magnético es sometido a una fuerza.

Si el sistema escobilla-colectores no existiera y solamente fuera una espira alimentada eléctricamente por corriente continua, la espira se detendría en la posición vertical sobre el eje llamado comúnmente línea de neutro. El sistema escobilla-colector tiene como función conmutar el sentido de la corriente entre los dos conductores al paso de la línea de neutro. La corriente siendo invertida, las fuerzas motrices sobre los conductores también lo son, permitiendo proseguir la rotación de la espira.

Para motores de una cierta potencia, el número de pares de polos es multiplicado con el fin de reducir las dimensiones del equipo y optimizar la penetración del flujo magnético dentro del inducido.

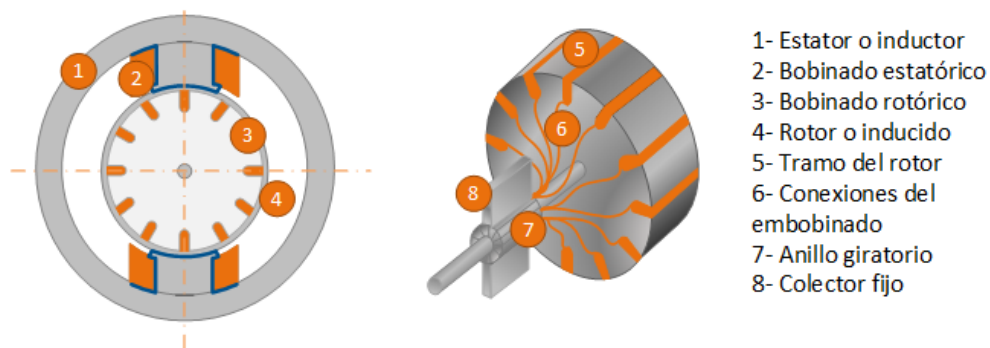
3.2.2.2 El inducido

El inducido de un motor a corriente continua se compone de un eje en el que es empilado un conjunto de discos ferromagnéticos. Una serie de muescas están ubicadas en la periferia del cilindro compuesto por los discos.

En esas muescas, las bobinas del inducido son enrolladas según un esquema complejo y muy preciso que requiere de una mano de obra especializada, elevando los costos. Por esa razón, los usuarios suelen dirigirse a motores de corriente alterna más robustos y simples en su concepción.

Cada bobinado está compuesto de una serie de secciones y que a su vez se caracterizan por una serie de espiras. Una espira es un bucle abierto donde la ida es ubicada en una muesca del inducido y el retorno en la muesca diametralmente opuesta. Para que las bobinas sean atravesadas por una corriente, estos conductores de ida y de retomo deben estar conectados a las láminas del colector (cilindro ubicado en el eje y compuesto en toda su periferia por una sucesión de láminas de cobre espaciadas por un aislante).

Figura 15 Esquema del inducido motor a corriente continua



La transmisión entre la alimentación a corriente continua y el colector del inducido es asegurada por las escobillas.

3.2.2.3 Las escobillas

Las escobillas tienen como función permitir el paso de la corriente eléctrica entre la alimentación y los bornes del inducido mediante un contacto por frotamiento. Las escobillas son de grafito y son elementos consumibles. El grafito cuando se desgata libera un polvo que debe ser limpiado en las tareas de mantenimiento.

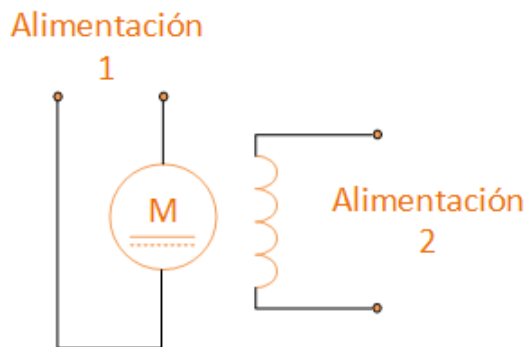
El punto de contacto entre las escobillas y el colector constituyen el punto débil del motor a corriente continua.

3.2.3 Tipo de motor a corriente continua

3.2.3.1 Motor a excitación independiente:

Se distinguen dos circuitos eléctricos independientes, el de la excitación o inductor y la del inducido.

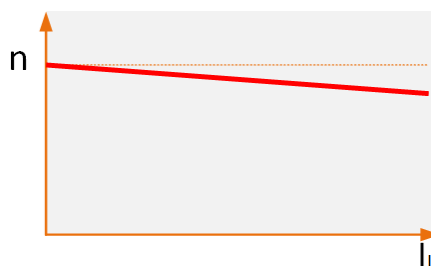
Figura 16 Esquema motor a excitación independiente



Las curvas características de este tipo de motor son las que a continuación se mencionan:

- Característica de velocidad: que representa la velocidad de giro en función de la intensidad del inducido, considerando una intensidad constante de excitación.

Figura 17 Gráfica velocidad motor a excitación independiente



- Característica del par: que representa la variación del par en función de la intensidad del inducido, considerando la intensidad de excitación constante.

Figura 18 Gráfica del par motor a excitación independiente



La inversión del sentido de giro del motor se obtiene cambiando las conexiones del inductor e inducido.

3.2.3.2 Motor a excitación paralela o derivada:

El devanado inductor se encuentra conectado en paralelo con el del inducido, por lo que la tensión alimenta ambos elementos y la intensidad es dividida entre los dos componentes. La mayor parte de la corriente se deriva hacia el inducido y una mínima corriente se destinara a la intensidad de excitación, implicando que este circuito dispondrá de una gran resistencia.

Figura 19 Motor a excitación paralela

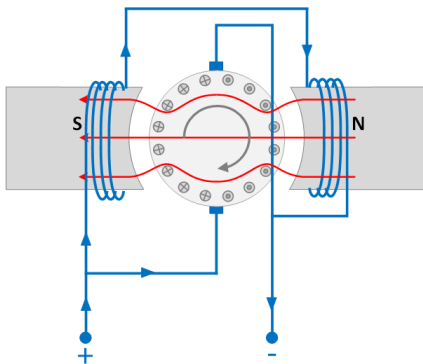


Figura 20 esquema Motor a excitación paralela

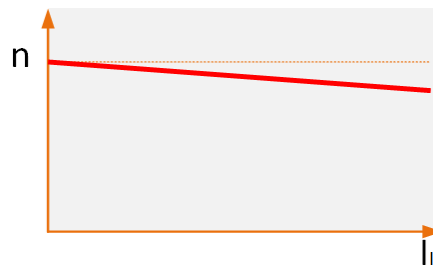


La potencia absorbida de la red será por lo tanto repartida para crear el campo inductor y las pérdidas en el inducido por efecto Joule. Estos dos conceptos se denominan, pérdidas de potencia en el cobre.

Las curvas características al igual que para la excitación independiente son:

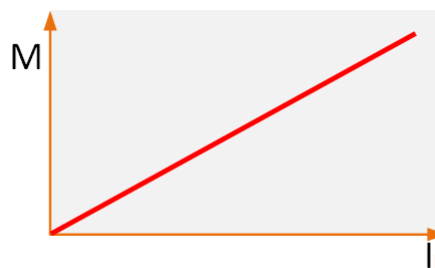
- Curva de características de velocidad :

Figura 21 Gráfica velocidad motor a excitación paralela



- Curva de características del par.

Figura 22 Gráfica del par motor a excitación paralela



Ambas curvas presentan mucha similitud con las gráficas del motor a corriente continua con excitación independiente, ya que se representan de forma lineal y la velocidad varía de forma muy leve al aumentar la carga. Son equipos de gran precisión y confiables, siendo utilizados para herramientas tales como fresadoras, tornos, entre otros. Sin embargo, presentan un par de arranque muy bajo frente a los motores con excitación en serie.

3.2.4 Motor a excitación en serie:

El devanado del inductor está conectado en serie con el del inducido, ofreciendo un solo circuito eléctrico. La intensidad del inducido y de la excitación es idéntica. La intensidad es elevada de tal forma que se ocasionen caídas de tensión elevadas.

Figura 23 Motor a excitación en serie

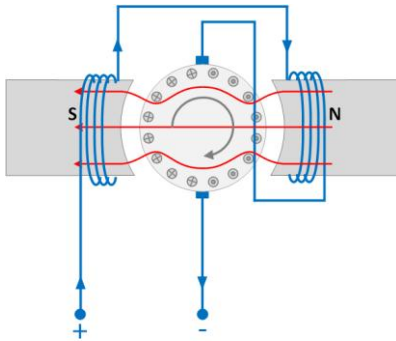


Figura 24 Esquema motor a excitación en serie



Las curvas características de este tipo de equipamientos son:

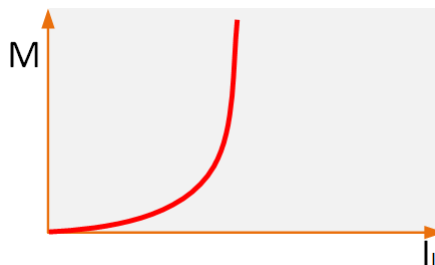
- Característica de velocidad representada por una hipérbola.

Figura 25 Gráfica velocidad motor a excitación en serie



- Característica del par es representada por una parábola, considerando que la intensidad del inducido y de excitación es la misma.

Figura 26 Gráfica del par motor a excitación en serie



Este tipo de equipamiento ofrece un gran par de arranque, permitiendo por lo tanto un arranque en carga. Su velocidad es variable con base en la carga del motor. Cuanto más carga más lento. Este tipo de equipamiento se suele utilizar en tracción eléctrica (ferrocarriles, tranvías, entre otros).

3.2.5 Motores a excitación compuesta:

Para aprovechar las características que tiene cada uno de los dos motores anteriores, se recurre al montaje de un sistema de excitación que los combina, es llamado compound, o compuesto, y puede ser largo o corto, según que el devanado derivación comprenda o no al devanado serie.

En estos motores, parte del devanado excitador se coloca en serie y parte en paralelo.

Presentan características intermedias entre el motor serie y shunt, mejorando la precisión y estabilidad de marcha del serie y el par de arranque del shunt y no corre el riesgo de embalsarse al perder la carga.

Figura 27 Motor a excitación compuesta

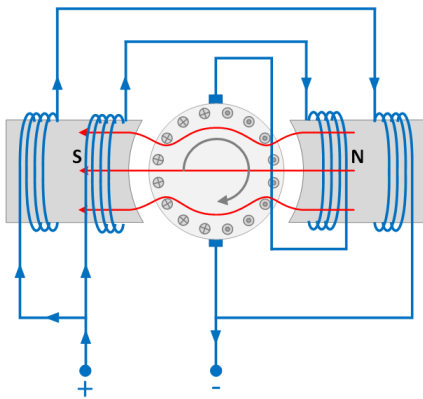
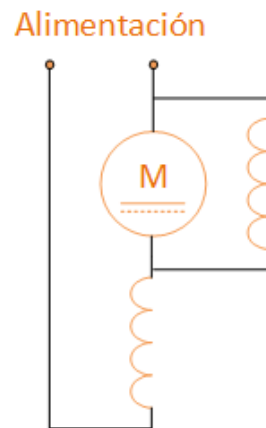


Figura 28 Esquema motor a excitación compuesta



3.2.6 Control de la velocidad de un motor a corriente continua

Tal y como hemos visto anteriormente, la configuración más usada es la de excitación independiente, pudiendo destacar las siguientes características:

La velocidad es proporcional al valor de la tensión media de la corriente continua. (Siempre y cuando las condiciones de excitación y del par mecánico sean constantes).

El valor de la tensión media aplicada a las conexiones se distribuye con base en:

Ecuación 30 Tensión media aplicada motor corriente continua

$$U = (R \cdot I) + E$$

Donde

U	Tensión media aplicada en V
R.I	Caída de tensión debido a la corriente que circula por el inducido
E	Fuerza contra electromotriz inducida

Con base en la primera característica, podemos concluir que la velocidad se puede variar empleando rectificadores controlados para proporcionar en todo momento la tensión media pertinente. Para medir esa velocidad, con base en la segunda característica mencionada, un método alternativo a la dinamo taco métrica.

3.2.7 Balance de potencias y rendimiento:

3.2.7.1 Potencia absorbida

La potencia absorbida por el motor que corresponde al producto de la tensión de la línea de alimentación del equipo por la intensidad:

Ecuación 31 Potencia absorbida motor a corriente continua

$$P_{ab} = U \cdot I$$

3.2.7.2 Pérdidas de cobre, potencia eléctrica interna y mecánica

Las pérdidas en el cobre que se producen por efecto Joule, cuando el conductor es atravesado por una corriente eléctrica. Se trata de las pérdidas por excitación (devanado del inductor), que se calculan con base en la resistencia del devanado de excitación por el cuadrado de la intensidad de excitación:

Ecuación 32 Pérdidas cobre motor a corriente continua

$$P_{Cu\ ex} = R_{ex} \cdot I_{ex}^2$$

La potencia eléctrica interna correspondiente a la potencia absorbida menos las pérdidas del devanado del motor o de cobre. También es el resultante de la fuerza electromotriz por la intensidad que recorre el inducido:

Ecuación 33 Potencia eléctrica interna motor a corriente continua

$$P_{ei} = E \cdot I_i$$

La potencia mecánica resultante de la conversión de la potencia eléctrica en mecánica, se calcula a partir del par en el eje del motor y la velocidad de giro:

Ecuación 34 Potencia mecánica motor a corriente continua

$$P_{mi} = M_i \omega$$

3.2.7.3 Pérdidas en el hierro

Las pérdidas en el hierro representan las pérdidas magnéticas que se producen tanto por la aparición de las corrientes de Foucault, como por el ciclo de histéresis en los núcleos. Estas pérdidas difíciles de estimar.

3.2.7.4 Pérdidas mecánicas y potencia útil

Las pérdidas mecánicas causadas por el rozamiento entre los elementos mecánicos del motor (rodamientos, cojinetes, escobillas, entre otras). Son datos del fabricante que no pueden ser calculadas.

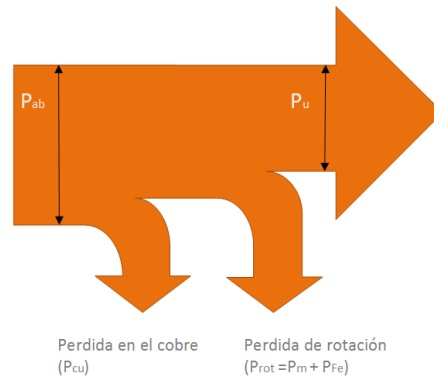
La potencia útil correspondiente a la potencia mecánica disponible en el eje del motor, siendo el resultado de la potencia mecánica interna menos las pérdidas de hierro y mecánicas.

Ecuación 35 Potencia útil

$$P_u = P_{ei} - (P_{FE} + P_m)$$

3.2.7.5 Rendimiento

Figura 29 Diagrama de potencia y pérdidas - motor a corriente continua



Se define el rendimiento de un motor de corriente continua como el cociente entre la potencia útil disponible en el eje y la potencia eléctrica absorbida.

Ecuación 36 Rendimiento del motor a corriente continua

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}}$$

3.2.8 Arranque de los motores a corriente continua

Cuando el motor está en fase de arranque, la velocidad de giro es nula y por lo tanto su fuerza contraelectromotriz también. Este efecto implica que la tensión de alimentación atraviesa el devanado del inducido, y por lo tanto que la intensidad que recorre el motor sea muy elevada. ($10 I_n$)

La intensidad que recorre el inducido se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 37 Intensidad del inducido

$$I_i = \frac{U - E - 2U_e}{R_i}$$

Como en la fase de arranque $E=0$ y $w=0$, obtenemos:

Ecuación 38 Intensidad de arranque motor a corriente continua

$$I_{Arranque} = \frac{U - 0}{R_i}$$

Esto implica la necesidad de incorporar una resistencia en serie con el inducido, para limitar la corriente de arranque. Esta resistencia se basa en un reóstato de arranque con varios escalones. Estos escalones van extrayéndose según el motor entra en régimen. Esta extracción se puede realizar de forma manual o bien automáticamente a través de sistemas electrónicos.

Esta tecnología de reóstatos puede ser sustituida con variadores de tensión basados en tiristores, donde se alimenta el equipo en tensión alterna que la convierte en tensión continua variable, permitiendo realizar el arranque con una corriente y un par limitados.

3.2.9 Frenado de un motor a corriente continúa

Para detener a un motor de corriente continua, no basta con desconectarlo de la red debido a su inercia de giro. Existen diversas técnicas de las cuales mencionaremos las tres más comunes:

- **Frenado dinámico**
Se hace funcionar al motor como generador, transformando la energía mecánica de rotación en energía eléctrica, que puede ser inmediatamente consumida en unas resistencias conectadas al efecto (**frenado reostático**), o bien se cede a la red de alimentación eléctrica (**frenado regenerativo**).
- **Frenado en contramarcha**
Para lo que se precisa invertir el sentido del par electromagnético mientras el motor está en marcha.
- **Frenado en contramarcha**
Para lo que se precisa invertir el sentido del par electromagnético mientras el motor está en marcha.

3.2.10 Ventajas e inconvenientes:

Como principales ventajas podemos destacar:

- Conectado a un variador de frecuencia electrónico, se puede regular en un rango de 1 a 100%
- Regulación y control muy precisos
- Considerando que es independiente de la frecuencia de red, este tipo de tecnología puede ser utilizada en numerosas aplicaciones

Los principales inconvenientes son:

- Tecnología poco robusta frente a tipologías de máquinas asíncronas
- Se requiere de una fuerte inversión y alto nivel de mantenimiento

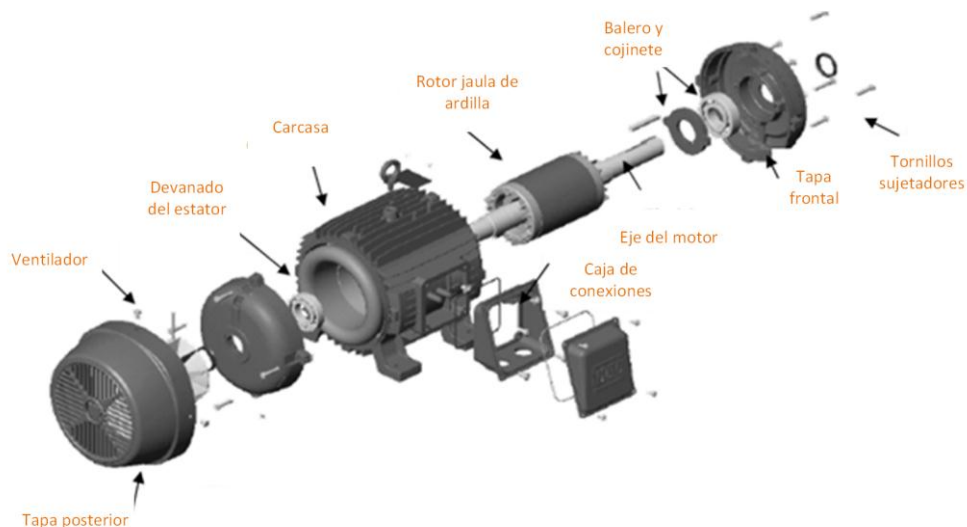
3.3 Motores asíncronos

Los motores son unos de los mayores consumidores de energía eléctrica en el sector industrial (cerca del 60%), ya que son parte importante de numerosas instalaciones. Dada su importancia e impacto en los costos energéticos, resulta necesario identificar y evaluar posibles oportunidades de ahorro. Por ello, analizaremos los principios básicos del motor asíncrono trifásico, aportando algunas líneas de mejora que minimicen esos costos operativos.

3.3.1 Componentes

El motor asíncrono es uno de los equipos más utilizados en el sector industrial tanto por sus características constructivas que aportan un mantenimiento reducido, como por una simplicidad técnica y una robustez del material.

Figura 30 Partes constitutivas de motor asíncrono tipo Jaula



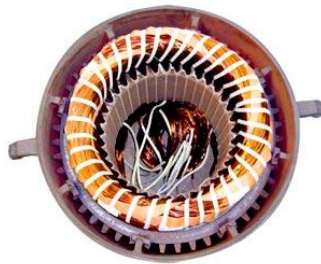
El motor asíncrono se compone básicamente de:

3.3.1.1 Estator:

El estator de un motor trifásico corresponde a la parte fija del motor asíncrono. Este elemento está constituido por:

- Un núcleo de hierro laminado cuya función es la de canalizar el flujo magnético
- Devanados o bobinas de cobre (tres fases) alojadas en las ranuras del núcleo.

Figura 31 Estator motor asíncrono



3.3.1.2 Rotor:

El rotor corresponde a la parte móvil del motor y puede ser:

- Bobinado (o de anillos): rotor constituido por varios devanados similares a los del estator y escobillas que generan resistencias. Este tipo de rotor resulta complejo, de gran volumen y requiere de un mantenimiento periódico.

Figura 32 Rotor bobinado con anillos rozantes



- Jaula de ardilla (o Cortocircuito): rotor constituido por barras cerradas en cortocircuito, que otorga robustez y sencillez. Existen variantes a este tipo de rotor.

Figura 33 Rotor de jaula de ardilla y estator



En ambos casos, el circuito rotórico está en cortocircuito por anillos o reóstato.

El motor asíncrono de jaula está muy extendido en el sector industrial debido a su bajo costo y sus características constructivas que otorgan fiabilidad y durabilidad. El rango de potencia de las máquinas asíncronas se extiende desde unos cientos de vatios a varios decenas de megavatios.

3.3.1.3 Otros componentes

Además del rotor y estator, existen otros componentes que conforman el motor:

- Cojinetes que se encuentran instalados sobre el estator y cuya función es la de mantener el eje del motor.
- Carcasa que combinada con las aletas, se destinan a proteger el equipo tanto mecánicamente como térmicamente, ya que disipan el calor generado.
- Ventilador que su función es la de permitir la evacuación del calor.

3.3.2 Principio de funcionamiento

El motor asíncrono es un motor de corriente alterna en el que la frecuencia de rotación es menor a la frecuencia de suministro (es decir no es síncrono).

Como resultado de la alimentación en corriente alterna del estator, se produce un campo magnético rotante de la misma frecuencia que la de suministro. El campo electromagnético del rotor induce una fuerza electromotriz al rotor que genera corrientes, que de acuerdo a la ley de Lenz provoca un par motor que hace girar al rotor, idealmente esta rotación debería estar en sincronía con la frecuencia del campo magnético. Lo que en realidad ocurre, es que debido a las pérdidas en el motor y al rozamiento de los cojinetes, hay un concepto de deslizamiento como diferencia de la rotación del campo magnético y el rotor.

Existe una regla comúnmente llamada regla de los tres dedos de la mano derecha que permite establecer el sentido de la fuerza motriz, campo magnético y corriente, tal y como se observa en el esquema adjunto:

Figura 34 Esquema de fuerza, corriente y campo jaula de ardilla

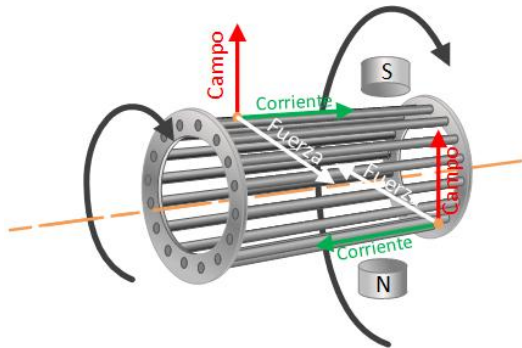
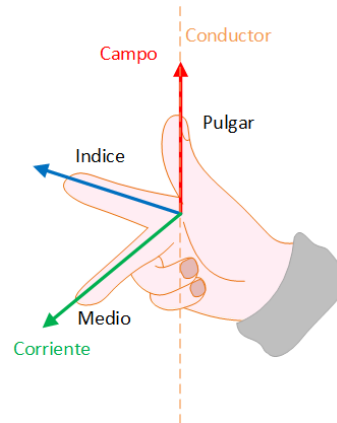


Figura 35 Regla de los tres dedos de la mano derecha



Como se puede comprobar en el esquema anterior, el campo rotante, en un momento concreto es orientado hacia arriba. Si se consideran dos conductores ubicados diametralmente en oposición, se comprueba que las corrientes inducidas en esos dos conductores son de sentido inverso y, asociados al campo magnético, crean fuerzas motrices de sentido inverso, permitiendo la rotación de la jaula de ardilla.

En un motor trifásico, existen un mínimo de tres devanados que se encuentran desfasados uno de otro de 120° como se muestra en el esquema adjunto.

Figura 36 Influencia del número de pares de polos sobre la velocidad de rotación y la forma del campo estático

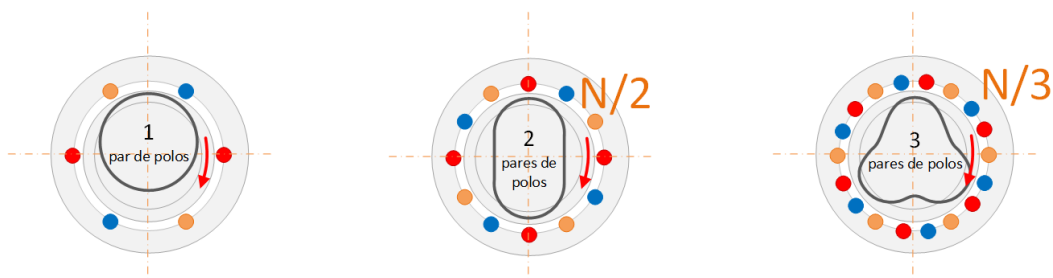
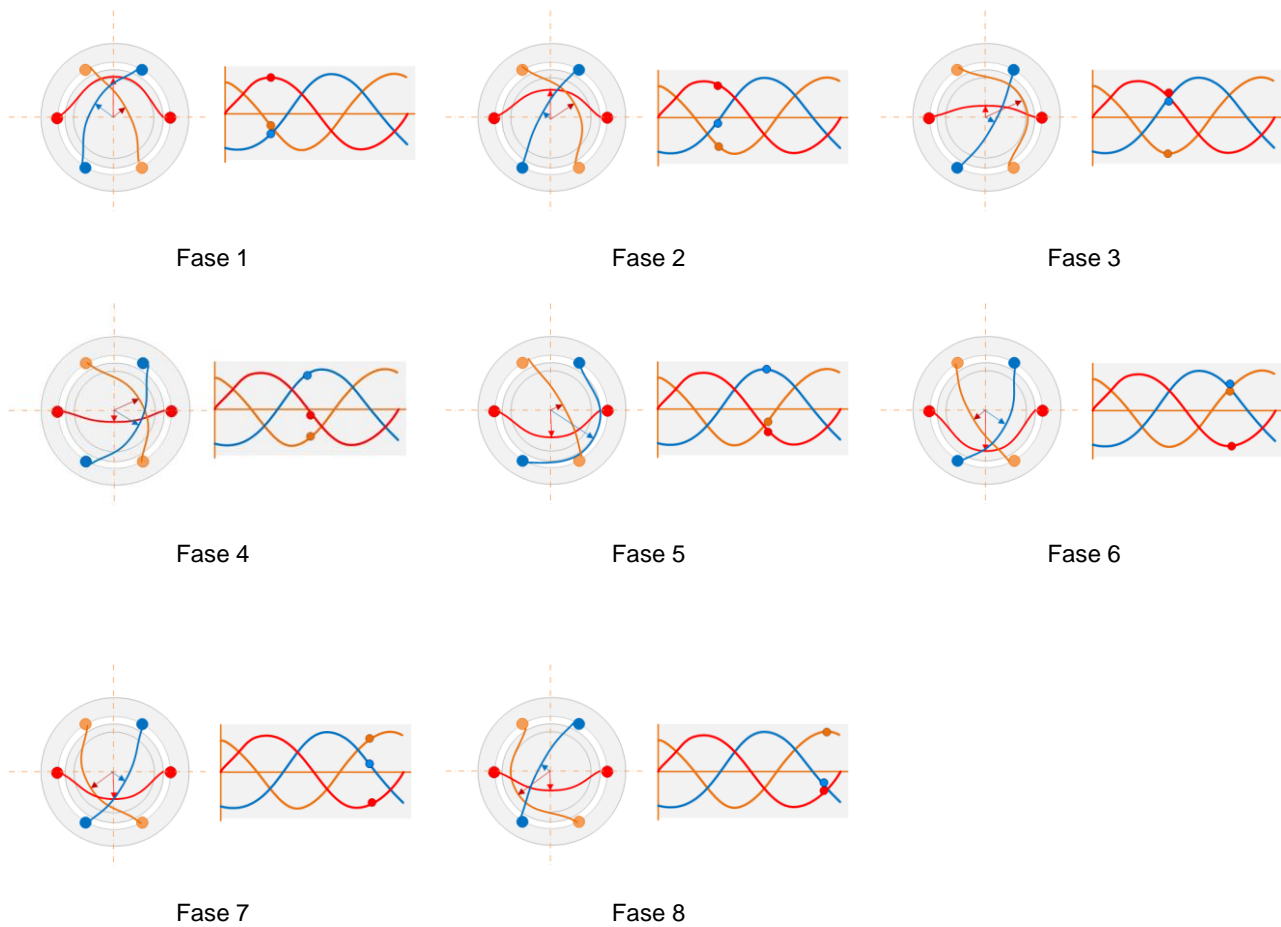


Figura 37 Evolución de la oscilación campo magnético rotante



En el momento que los devanados del estator son recorridos por una corriente trifásica, se genera un campo magnético rotante a la velocidad de sincronismo. Esta velocidad es función de la frecuencia de alimentación (60 Hz en México) y del número de pares de polos. En vista de que la frecuencia es fija, la velocidad de rotación del campo magnético rotante del motor podrá únicamente variar en función del número de pares de polos.

Tabla 4 tabla número de polos, frecuencia y R.P.M.

N° de polos	50 Hz	60 Hz
2 Polos	3000	3600
4 polos	1500	1800
6 Polos	1000	1200
8 polos	750	900

12 Polos	500	600
16 Polos	375	450
24 Polos	250	300

3.4 Características de un motor asíncrono: Deslizamiento, Par motor y Velocidad de rotación

3.4.1 Deslizamiento

Como se detalló anteriormente, la velocidad de rotación del eje del motor es diferente a la velocidad de sincronismo (velocidad del campo magnético rotante). Esta diferencia de velocidad se denomina deslizamiento y se encuentra sujeta a la siguiente ecuación:

Ecuación 39 Deslizamiento motor asíncrono

$$s = n_0 - n_n$$

Donde,

n_0 Velocidad del campo giratorio
 n_n Velocidad de rotación del eje

El deslizamiento es generalmente expresado en porcentaje de la velocidad de sincronismo n_0 .

Ecuación 40 Deslizamiento motor asíncrono porcentual

$$s = \frac{n_0 - n_n}{n_0}$$

La velocidad de sincronismo, se calcula con base en la frecuencia de la red y del número de pares de polos, tal y como se observa en la siguiente ecuación:

Ecuación 41 Velocidad del campo rotatorio motor asíncrono

$$n_0 = \frac{f * 60}{p}$$

Donde,

n_0 Velocidad del campo giratorio
 f Frecuencia de la red (60 Hz)
 p Número de par de polos

3.4.2 Par motor

El par motor M de un motor asíncrono es función de la potencia P y de la velocidad de rotación n del motor y se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 42 par motor asíncrono

$$M = \frac{P * 9550}{n}$$

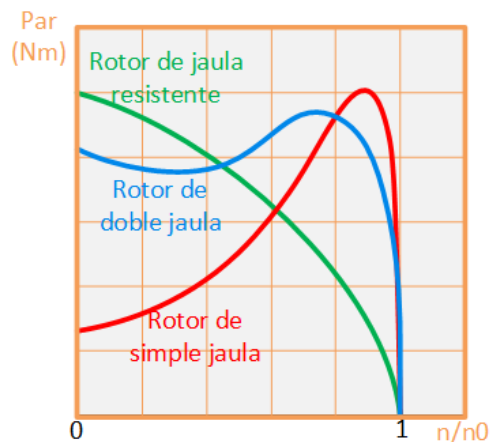
Donde,

P Potencia del motor en kW

n Velocidad de rotación del motor en r.p.m.

Una de las gráficas más características de los motores asíncronos es la del par con base en el deslizamiento.

Figura 38 Gráfica par/velocidad tipo de motores asíncronos



En la gráfica anterior, se observa que se debe seleccionar el tipo de motor con base en la tipología de rotor ya que ofrecen variaciones significativas.

Una de las características importantes de los motores asíncronos, es que en ciertas condiciones, se pueden transformar en generadores eléctricos.

3.4.4 Control de la velocidad de rotación

El control de la velocidad de rotación de un motor asíncrono es indispensable para muchas aplicaciones donde se utilicen esta tipología de equipos. Por lo tanto, resulta interesante, reflejar los parámetros que influyen en esta velocidad, a través de la siguiente ecuación:

$$s = \frac{n_0 - n_n}{n_0}$$

Donde,

s	Deslizamiento en %
n_0	Velocidad del campo giratorio
n_n	Velocidad de rotación del eje

$$n = \frac{(1 - s) * f}{p}$$

Donde

f	Frecuencia de la red (60 Hz)
p	Número de par de polos

Con base en lo anterior se deduce que la velocidad de rotación, puede ser controlada por:

1. El número de pares de polos (motor de dos velocidad por ejemplo):
La mayoría del tiempo son motores donde el rotor se compone de dos números diferentes de par de polos. Las bobinas o devanados se encuentran dispuestos de una forma particular en las ranuras del estator. Esta configuración hace complejo la estructura del motor. Los diferentes acoplamientos por pares de polos permiten obtener diferentes velocidades.
2. El deslizamiento del motor (motor de anillos)
3. La frecuencia de la red:

Actualmente, el control de la velocidad de los motores asíncronos se realiza electrónicamente a través de variadores de velocidad. Se puede controlar la velocidad de rotación del motor modificando la frecuencia ya que la velocidad del campo rotante a nivel del estator cambia. Para poder conservar el par motor, se debe cambiar la tensión con relación al cambio de frecuencia manteniendo una constante, tal y como se observa en la ecuación siguiente.

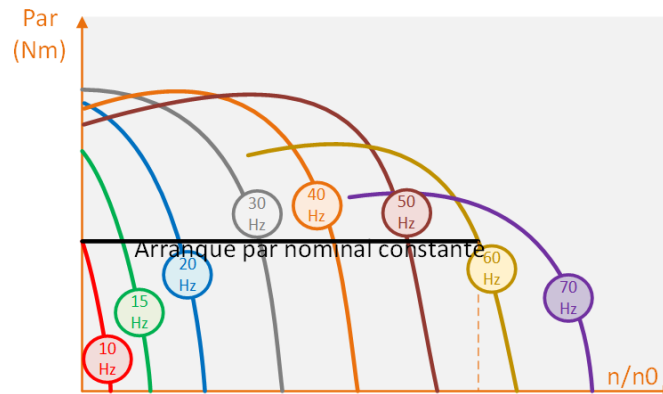
$$M \approx (U - f) * I$$

Donde,

M	Par motor en N.m
U	Tensión en V
I	Corriente absorbida por el motor en A

Si la relación entre la tensión y frecuencia se mantiene constante, el par se mantendrá de igual forma constante.

Figura 39 Pilotaje de frecuencia y en tensión motor asíncrono



El control del motor por variación de frecuencia y tensión ofrece grandes ventajas tales como:

- Limitación de las corrientes pico de arranque en torno a 1.5 la corriente nominal.
- Un par motor relativamente constante durante las variaciones de velocidad del motor.

3.5 Balance de potencias y rendimiento

3.5.1 Potencia absorbida

El cálculo de la potencia eléctrica se determina por la relación:

Ecuación 43 Potencia eléctrica

$$P = V I \cos \varphi$$

En un motor asíncrono polifásico la potencia se determina de la siguiente manera:

Ecuación 44 Potencia absorbida motor asíncrono

$$P = m V I \cos \varphi$$

Donde

I	Intensidad de corriente en amperios (A)
V	Tensión en voltios (V)
φ	Angulo en °
P	Potencia en vatios (W)
m	Número de fases

3.5.2 Pérdidas de cobre estator y potencia de creación del campo magnético

Cualquier elemento conectado a la red eléctrica tiene pérdidas debidas al efecto Joule. Estas pérdidas se denominan en nuestro balance las pérdidas de cobre, por lo que en el devanado estatórico disponemos de:

Ecuación 45 Pérdidas cobre estator motor asíncrono

$$P_{Cu1} = m I_1^2 R_1$$

Donde

I_1	Intensidad de corriente en amperios (A) que circula por el estator
R_1	Resistencia del devanado estatórico

Conociendo estas pérdidas en el estator, disponemos de la potencia disponible para la creación del campo magnético, que se expresa:

Ecuación 46 Potencia del campo magnético motor asíncrono

$$P_C = P - P_{Cu1}$$

3.5.3 Pérdidas del núcleo y potencia que atraviesa el entrehierro

Las pérdidas del núcleo de hierro debido a la histéresis y las corrientes de Foucault se denominan P_{fe} y son difíciles de calcular (dato fabricante) y restándolas a la potencia del campo magnético, disponemos de la potencia que atraviesa el entrehierro.

Ecuación 47 Pérdidas del núcleo motor asíncrono

$$P_a = P_C - P_{FE}$$

3.5.5 Pérdidas de cobre rotor y potencia mecánica en el rotor

De igual forma que para el estator disponemos de pérdidas por efecto Joule, en el rotor que se calculan con base en:

Ecuación 48 Pérdidas cobre rotor motor asíncrono

$$P_{Cu2} = m I_2^2 R_2$$

Donde

I_2 Intensidad de corriente en amperios (A) que circula por el rotor
 R_2 Resistencia del rotor

Conociendo las pérdidas en el estator, disponemos de la potencia mecánica en el rotor disponible a través de:

Ecuación 49 potencia mecánica motor asíncrono

$$P_m = P_a - P_{Cu2}$$

3.5.6 Pérdidas por rozamiento y potencia útil

Son las pérdidas mecánicas causadas por el rozamiento entre los elementos mecánicos del motor (rodamientos, cojinetes, escobillas, entre otras). Son datos del fabricante que no pueden ser calculados.

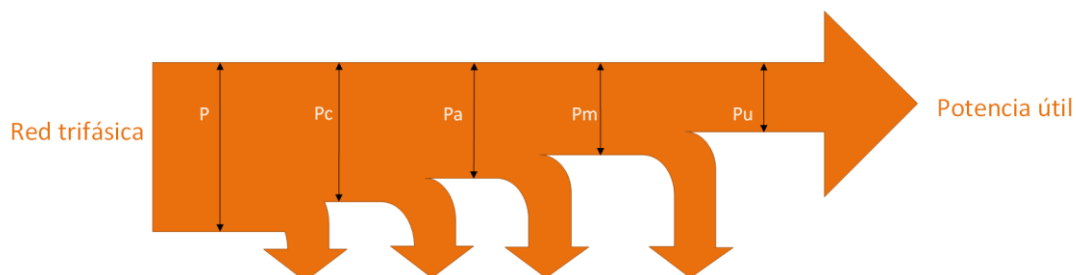
Al restar las pérdidas a la potencia mecánica, se obtiene la potencia útil:

Ecuación 50 Potencia útil motor asíncrono

$$P_u = P_m - P_{roz}$$

3.5.7 Rendimiento

Figura 40 Diagrama de potencia y pérdidas Motor asíncrono



El rendimiento se calcula a través de:

Ecuación 51 Rendimiento motor asíncrono

$$\eta = \frac{P_u}{P}$$

3.5.8 Conexión del motor asíncrono trifásico

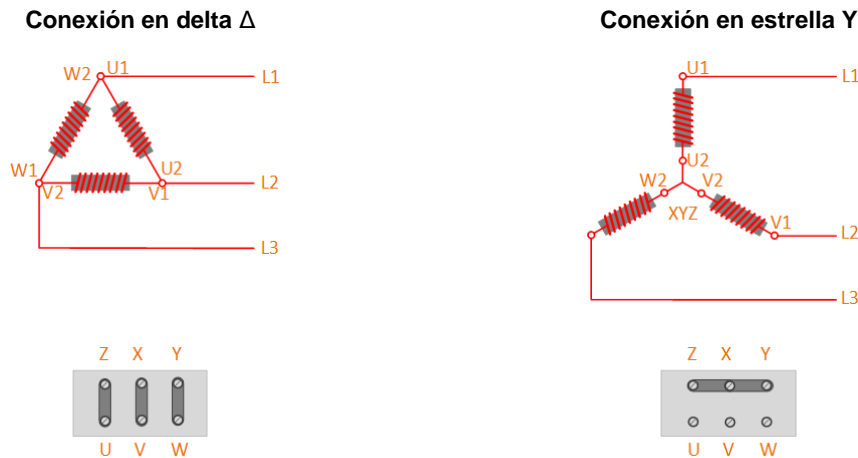
El estator de un motor asíncrono trifásico dispone de tres devanados que pueden ser conectados:

- En estrella (Y)
- En delta (Δ)

La selección de la conexión depende exclusivamente de:

- Las tensiones de la red de alimentación
- Las indicaciones reflejadas en la placa de datos que mencionan las condiciones normales de funcionamiento.

Figura 41 Conexión estrella-delta



Si la más pequeña tensión de la placa de datos del motor corresponde a la tensión entre fases de la red.

Si la más grande tensión de la placa de datos del motor corresponde a la tensión entre fases de la red.

3.6 Arranque de los motores asíncronos

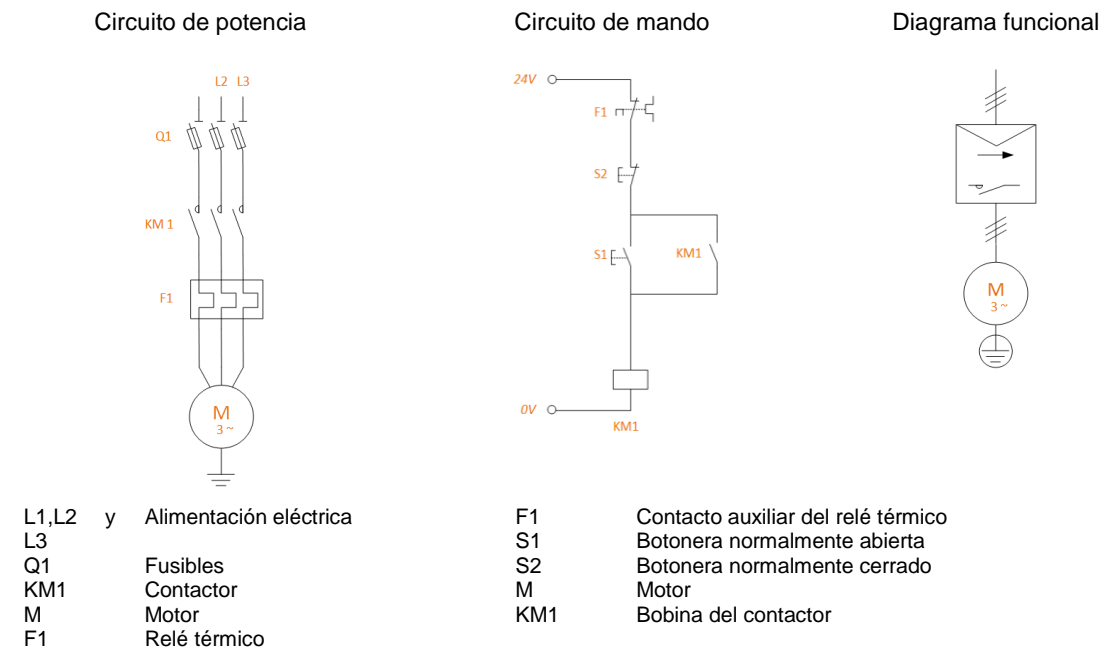
Independientemente de los arrancadores electrónicos que ya fueron tratados anteriormente, analizaremos los cuatro procesos electromecánicos más utilizados para garantizar el arranque de los motores asíncronos trifásicos. Tienen como interés limitar la corriente de arranque y asegurar una puesta en marcha suave y menos brusca. Para cada uno de estos procesos, existen circuitos de potencia, circuitos de mando y diagramas funcionales.

3.6.1 Arranque directo

En este proceso, el estator del motor se encuentra conectado directamente a la red de alimentación trifásica. El arranque se realiza en un solo tiempo. Hay que destacar, que únicamente los motores asíncronos trifásicos con rotor en corto circuito de jaula de ardilla pueden ser arrancados de esta forma.

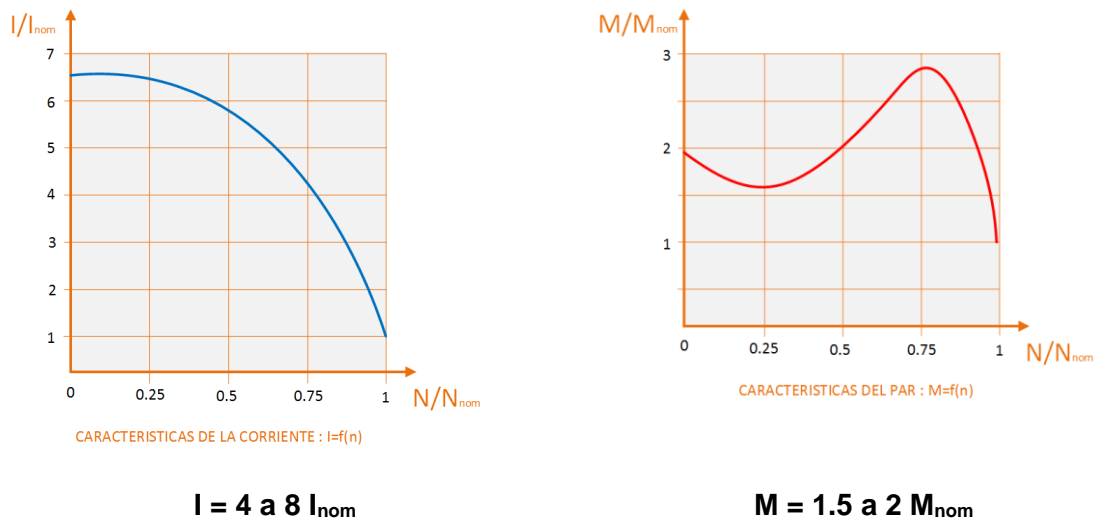
3.6.1.1 Esquema

Figura 42 Diagrama de circuito de potencia, mando y funcional, arranque directo



3.6.1.3 Gráficas:

Figura 43 Curvas características corriente y par arranque directo



3.6.2 Arranque estrella-delta

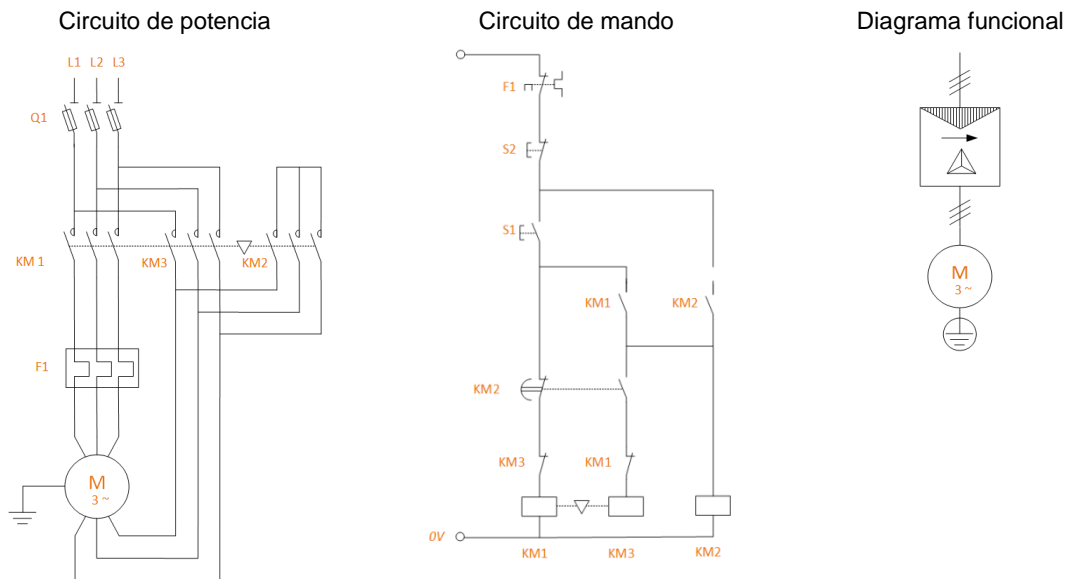
El principio de funcionamiento del arranque estrella-delta consiste en sub-alimentar el motor durante casi todo el periodo de arranque, poniéndolo en conexión estrella. Por lo tanto, se debe utilizar un motor que se encuentre normalmente conectado en delta y donde todas sus extremidades de devanados vuelvan a la placa de bornes.

3.6.2.1 Esquema

Se dispone sobre el arrancador tres contactores:

- KM1 que acopla el motor en estrella al inicio del arranque
- KM3 que acopla el motor en triángulo al finalizar el arranque
- KM2 contactor de línea cuya función consiste en controlar el motor

Figura 44 Diagrama de circuito de potencia, mando y funcional - Arranque estrella-delta



L1,L2 y L3 Alimentación eléctrica
 Q1 Fusibles
 KM1 Contactor
 M Motor
 F Relé térmico

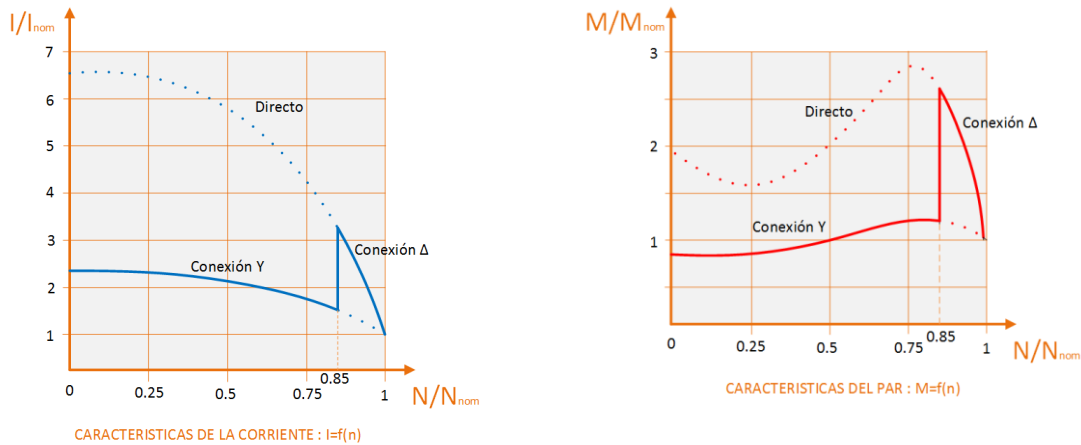
F Contacto auxiliar del relé térmico
 S1 Botonera normalmente abierta
 S2 Botonera normalmente cerrada
 M Motor
 KM1,2,3 Bobinas de los contactores

1° tiempo: se debe alimentar el motor a través de KM2 manteniendo el acoplamiento en estrella a través de KM1.

2° tiempo: mantenemos la alimentación del motor por medio de KM2, KM1 es remplazado por KM2 que asegura el acoplamiento del motor en triangulo. Cada devanado debe situarse entre dos fases diferentes.

3.6.2.2 Gráficas:

Figura 45 Curvas características corriente y par arranque estrella-delta



$$I = 1.3 \text{ a } 2.6 I_{nom}$$

$$M = 0.5 \text{ a } 0.7 M_{nom}$$

Se comprueba que el par motor e intensidad en el arranque son reducidos en torno a 3 veces menos frente a una conexión directa. En vista de la disminución del par motor al arranque, limitando al inicio su funcionamiento con carga. Además existe un corte de alimentación entre las posiciones estrella y delta.

3.6.3 Arranque por resistencias estáticas

El arranque por resistencias estáticas, como para el arranque estrella-delta, tiene como función sub alimentar el motor durante casi todo el proceso de inicio de funcionamiento, poniendo en serie unas resistencias con el motor.

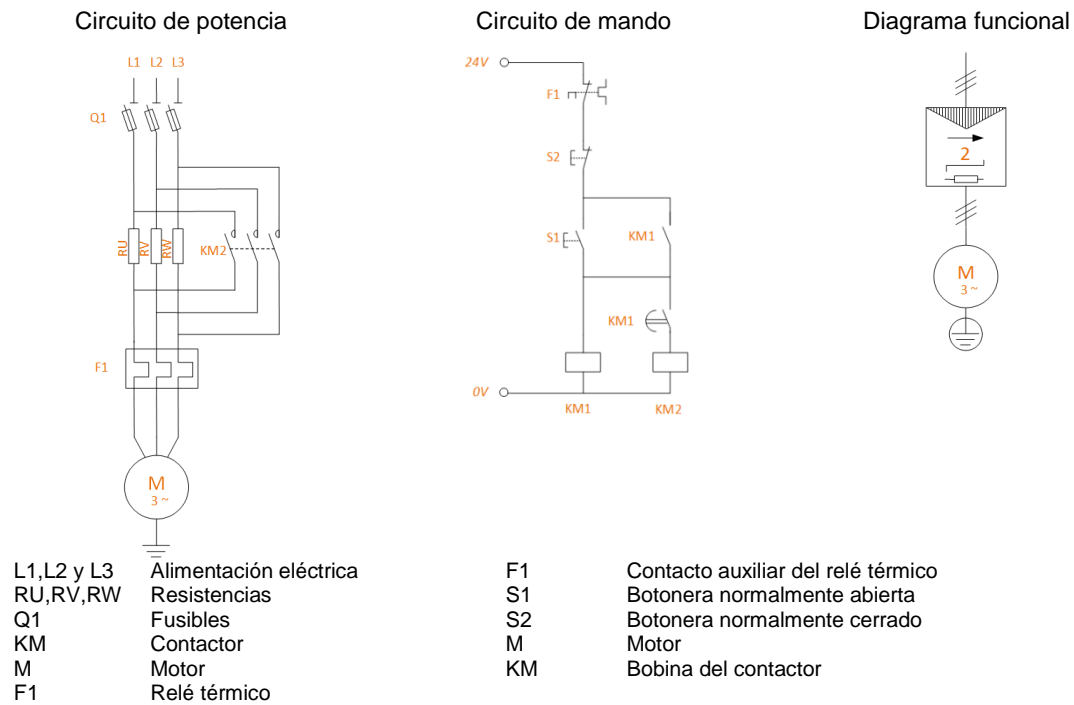
Este tipo de proceso de arranque, suele ser utilizado en máquinas donde el par motor es más débil que el nominal, como por ejemplo los ventiladores.

3.6.3.1 Esquemas

Se dispone por lo tanto de dos contactores KM1 y KM2 y tres resistencias RU, RV y RW.

- KM1 es el contactor de línea
- KM2 tiene como función cortocircuitar las resistencias una vez el motor arrancado

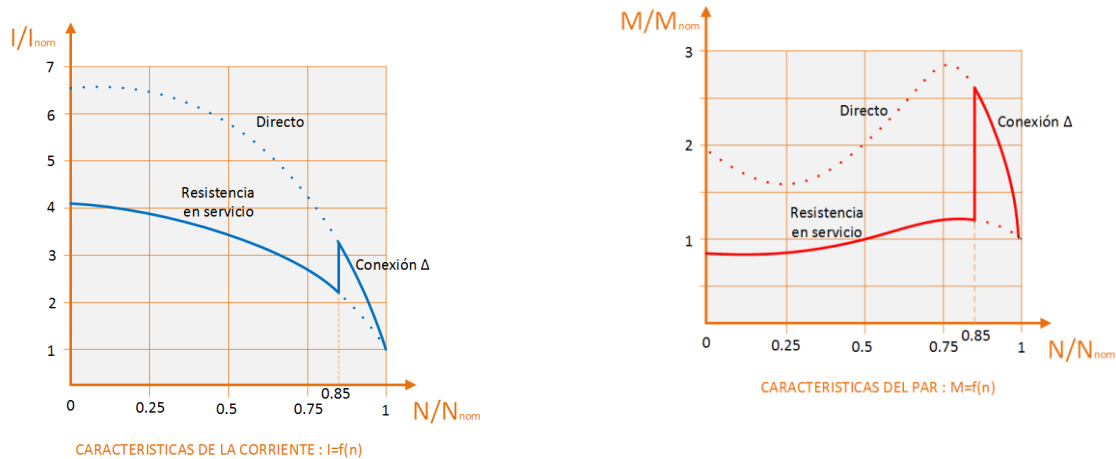
Figura 46 Diagrama de circuito de potencia, mando y funcional - Arranque por resistencias estáticas



- 1° tiempo: se debe en un primer momento alimentar el motor a través de las tres resistencias. Únicamente KM1 es utilizado.
- 2° Tiempo: se debe mantener la alimentación del motor a través de KM1, y posteriormente utilizar KM2 para eliminar las tres resistencias del circuito de potencia.

3.6.3.1.2 Gráficas

Figura 47 Curvas características corriente y par - Arranque por resistencias estáticas



$$I = 4.5 I_{nom}$$

$$M = 0.75 M_{nom}$$

La ventaja de este modo de arranque es que no existen cortes de alimentación eléctrica en el periodo de puesta en marcha. La característica del par motor son sensiblemente similares a las obtenidas con el arranque estrella-delta. Sin embargo la corriente al momento del arranque se mantiene elevada.

3.7 Arranque rotórico:

El arranque rotórico tiene como función limitar las corrientes rotóricas que circulan en el inducido. El motor se comporta como un transformador, la corriente en línea también se encuentra limitada.

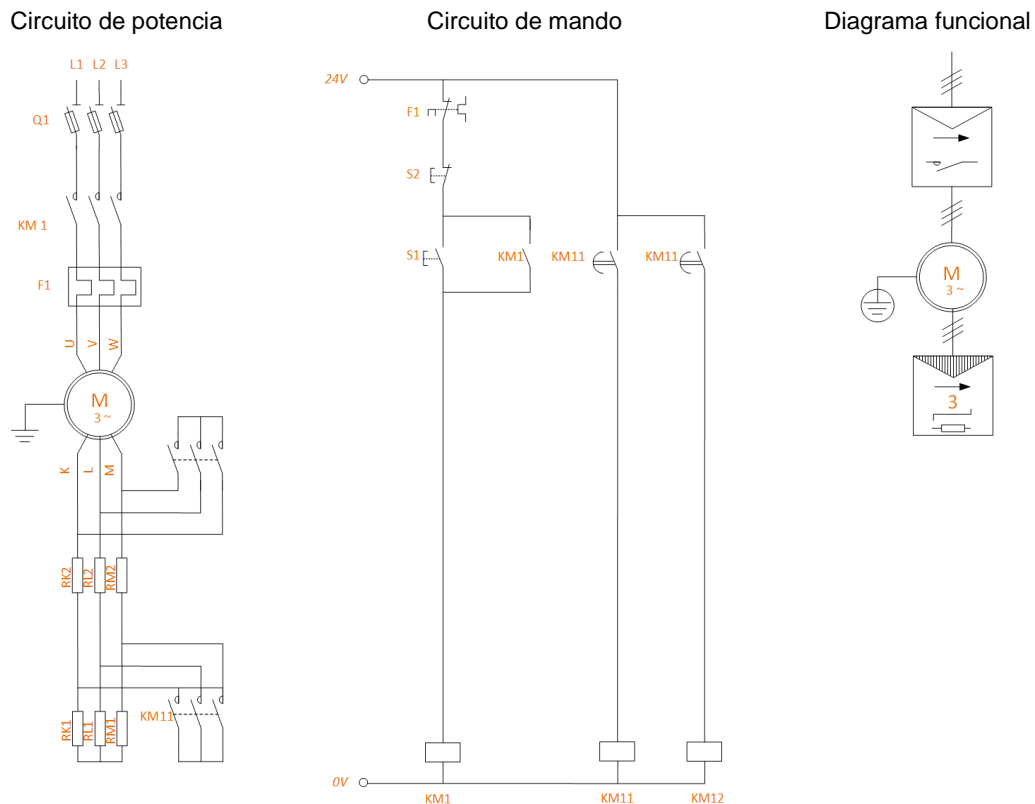
El uso de este tipo de arranque es en máquinas de potencia superiores a 100 kW como por ejemplo compresores a pistón rotativos, bombas, entre otros.

3.7.1.1 Esquema

Con el arrancador que se muestra en el esquema adjunto, el motor inicia su funcionamiento en tres fases. Se dispone de tres contactores:

- KM1 que representa el contactor de línea
- KM11 y KM12 que cortocircuitan los dos juegos de tres resistencias rotóricas.

Figura 48 Diagrama de circuito de potencia, mando y funcional arranque rotórico



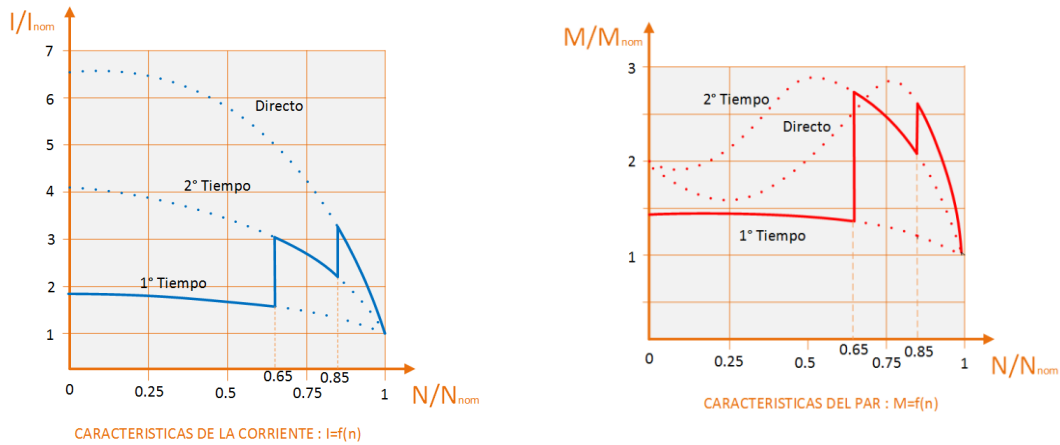
L1,L2 y L3 Alimentación eléctrica
 RK,RL,RM Resistencias
 Q1 Fusibles
 KM Contactor
 M Motor
 F1 Relé térmico

F1 Contacto auxiliar del relé térmico
 S1 Botonera normalmente abierta
 S2 Botonera normalmente cerrado
 M Motor
 KM Bobina del contactor

- 1º tiempo: se alimenta el motor limitando las corrientes rotóricas al máximo, introduciendo los dos juegos de resistencias en el circuito del inducido. Se debe, por lo tanto alimentar KM1 únicamente.
- 2º tiempo: se elimina el primer juego de tres resistencias a través del contactor KM11.
- 3º tiempo: se elimina el segundo juego de tres resistencias a través del contactor KM12.

3.7.1.1.2 Gráficas

Figura 49 Curvas características corriente y par arranque rotórico



$$I < 2.5 I_{nom}$$

$$M = 2.5 M_{nom}$$

La corriente absorbida es sensiblemente proporcional al par motor entregado.

Obtenemos a menudo pares de arranque iguales a 2.5 veces al par motor nominal sin sobre intensidades excesivas. También se pueden reducir estas sobre intensidades aumentando el número de arranques.

3.8 Frenado del motor asíncrono

A continuación se presentan los métodos de frenado más comunes en los motores asíncronos, distinguiendo lo siguiente:

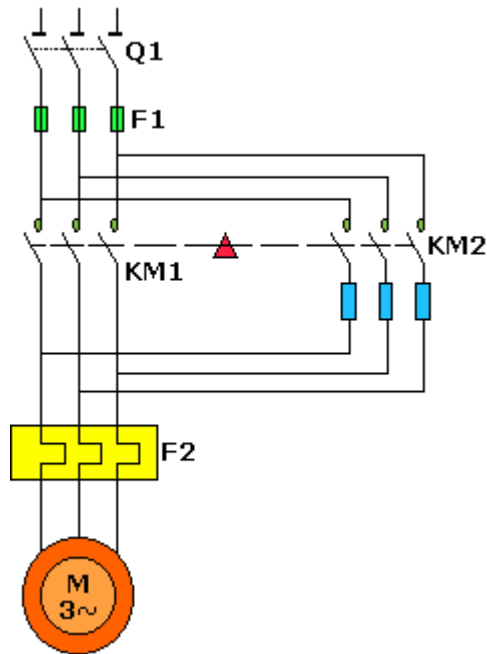
- Frenado contra corriente
- Motor freno
- Frenado dinámico

3.8.1 Frenado contra corriente

Cuando se frena, hay apertura de del contacto KM1 y cierre de KM2, haciendo que el motor se encuentre alimentado por una campo estático. Los picos de corriente son sumamente importantes y es aconsejable insertar unas resistencias para limitar esa corriente. KM2 se abre

tras el paro del motor, para evitar un nuevo arranque en sentido inverso. Es por lo tanto, necesario disponer de un captador que detecta la ausencia de giro.

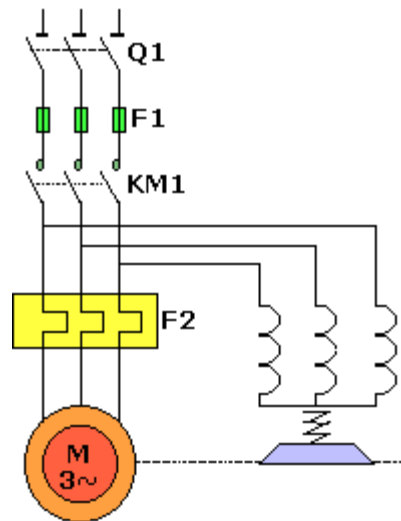
Figura 50 Esquema frenado contra corriente motor asíncrono



3.8.2 Motor freno

El motor está equipado de un freno electromagnético a disco instalado en el lado opuesto al eje de salida. En ausencia de corriente (apertura de KM1 o corte de suministro), un resorte permite asegurar el frenado. Es un elemento clave de seguridad, en particular en las máquinas de elevación.

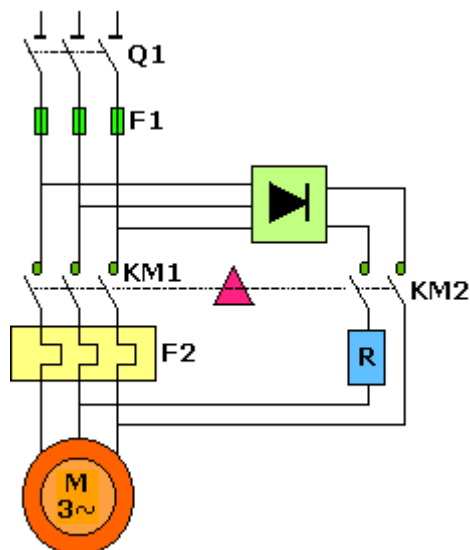
Figura 51 Esquema motor freno motor asíncrono



3.8.3 Frenado dinámico

En el momento de la fase de frenado, KM1 se abre y KM2 se cierra. Una corriente continua se envía en el estator. El motor se comporta como un alternador cuyo inductor es el estator, y el inducido el rotor en corto circuito.

Figura 52 Esquema frenado dinámico motor asíncrono



3.9 Ventajas e inconvenientes motor asíncrono trifásico

Como ventajas destacamos lo siguiente:

Son motores que se caracterizan porque son mecánicamente sencillos de construir, lo cual los hace muy robustos y sencillos, apenas requieren mantenimiento, son baratos y, en el caso de motores trifásicos, no necesitan arrancadores (arrancan por sí solos al conectarles la red trifásica de alimentación) y no se ven sometidos a vibraciones por efecto de la transformación de energía eléctrica en mecánica, ya que la potencia instantánea absorbida por una carga trifásica es constante e igual a la potencia activa. Pudiendo resaltar además de lo ya mencionado las siguientes ventajas: elevado par de arranque, regulación de velocidad, capacidad de desarrollar par bajo la aplicación de brascas y fuertes cargas de inestabilidad.

Algunos de los inconvenientes a mencionar son:

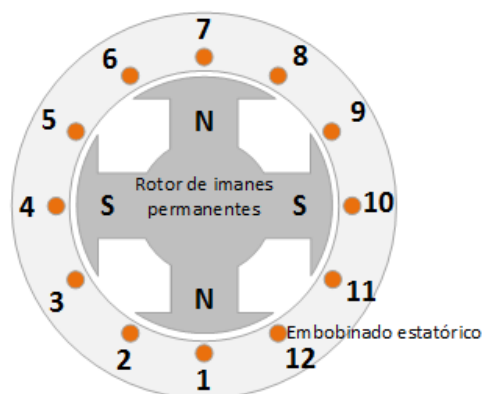
- Sin elementos externos su característica par-velocidad es fija
- La unión rígida a la frecuencia de la red puede ser un inconveniente

3.10 Motores síncronos

3.10.1 Principio de funcionamiento:

El motor síncrono se compone, de igual forma que para el motor asíncrono, de un estator y de un rotor separado por entrehierro. La única diferencia se sitúa a nivel de la concepción del rotor. En el esquema adjunto, se detalla un rotor con polos salientes formado por imanes permanentes o electroimanes alimentados por corriente directa.

Figura 53 Esquema motor síncrono



Después del arranque, el motor gira en sincronismo con el campo magnético giratorio. Sin carga, los ejes de los polos del campo giratorio y del rotor están sincronizados. En carga, los

ejes se encuentran ligeramente desfasados. La velocidad del motor de síncrono es constante, independientemente de la carga. Se deberá considerar:

- La carga no debe exceder el esfuerzo de arranque entre el rotor y el campo magnético giratorio.
- El par motor es proporcional a la tensión en sus bornes.

3.10.2 Componentes

3.10.2.1 El estator

Figura 54 Fotos estator motor síncrono



Fuente: energie-plus

El estator de un motor trifásico (el más común en medias y grandes potencias), como su nombre lo indica, corresponde a la parte estática del motor síncrono. Se asemeja al estator de un motor asíncrono. Se compone básicamente de:

- Un núcleo de hierro laminado cuya función es la de canalizar el flujo magnético
- Devanados o bobinas de cobre (tres fases) alojadas en las ranuras del núcleo.

En un motor trifásico, existen un mínimo de tres devanados que se encuentran desfasados uno de otro de 120° como se muestra en el esquema adjunto.

Figura 55 Influencia del número de pares de polos sobre la velocidad de rotación y la forma del campo estatórico

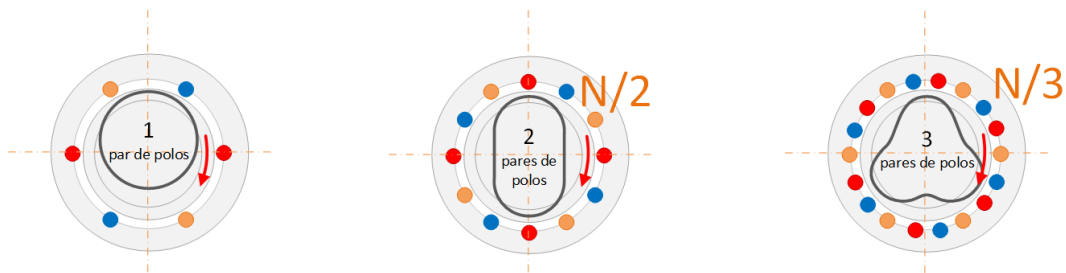
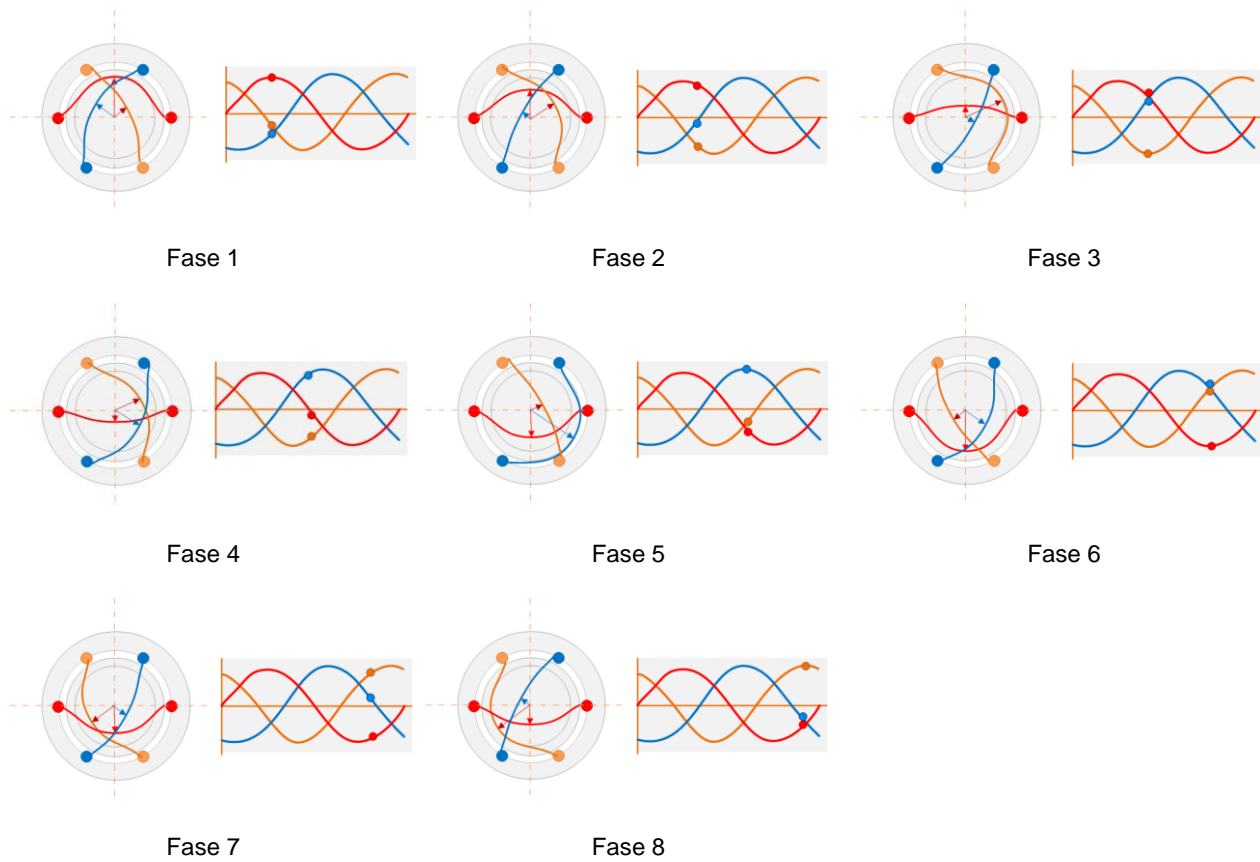


Figura 56 Evolución de la oscilación campo magnético rotante



En el momento que los devanados del estator son recorridos por una corriente trifásica, se genera un campo magnético rotante a la velocidad de sincronismo. Esta velocidad es función de la frecuencia de alimentación (60 Hz en México) y del número de pares de polos. En vista de que la frecuencia es fija, la velocidad de rotación del campo magnético rotante del motor podrá únicamente variar en función del número de pares de polos.

Tabla 5 Número de polos Motor, frecuencia y R.P.M

N° de polos	50 Hz	60 Hz
2 Polos	3000	3600
4 polos	1500	1800
6 Polos	1000	1200
8 polos	750	900
12 Polos	500	600
16 Polos	375	450
24 Polos	250	300

3.10.2.2 El rotor

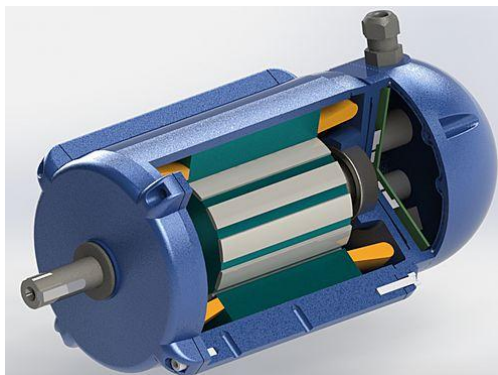
El rotor corresponde a la parte móvil del motor síncrono. Esta acoplado mecánicamente a sistema de poleas o elementos mecánicos, los cuales generan un par motor capaz de aportar el trabajo requerido en cada aplicación. Se compone de una serie de polos norte y sur intercalados bajo forma de imanes permanentes o embobinados de excitación recorridos por una corriente continua. Se distinguen principalmente dos tipo de motores:

- A imanes permanentes
- Embobinado

3.10.2.2.1 Rotor de imanes permanentes

Corresponden a los motores que toleran corrientes de sobrecarga importantes para disponer de un arranque rápido. Cuando se encuentran equipados de variadores de frecuencia electrónicos, se utilizan en aplicaciones que se requiera de aceleraciones rápidas.

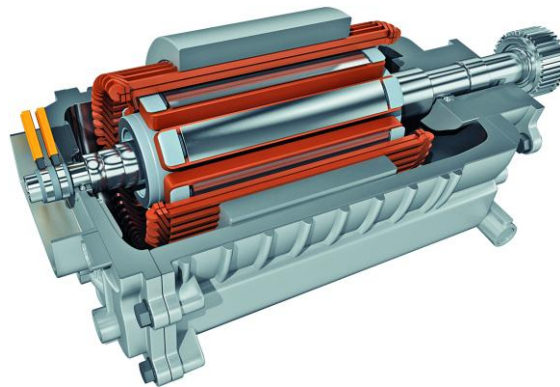
Figura 57 Motor síncrono a imanes permanentes ELPROM



3.10.2.2 Rotor embobinado

Este tipo de motor es reversible ya que puede funcionar en modo motor o en modo alternador. Para instalaciones de media y gran potencia, este tipo de motor asociado a un variador de velocidad resulta muy eficaz. En la Figura 58, se observa que el rotor está compuesto de un empilamiento de discos ferro magnéticos. Como el estator del motor, los embobinados se encuentran instalados en muescas en el rotor y conectados eléctricamente a los anillos del extremo del eje. La alimentación en corriente continua se suministra a través del conjunto anillo-escobilla.

Figura 58 : Motor síncrono. Fuente: Synchronous Machines (SM) Continentals



3.10.3 Control de la velocidad de rotación

El control de la velocidad de rotación de un motor síncrono es indispensable para muchas aplicaciones donde se utilicen esta tipología de equipos. Las siguientes relaciones permiten visualizar cuales son los parámetros que influyen en la velocidad de rotación.

Ecuación 52 velocidad del campo rotatorio motor síncrono

$$n_0 = n$$

Donde,

n_0 Velocidad del campo giratorio en RPM
 n Velocidad de rotación del eje del motor en RPM

O bien

Ecuación 53 velocidad de rotación del eje del motor síncrono

$$n = \frac{f}{p}$$

Donde,

f Frecuencia del suministro eléctrico en Hz
p Número de par de polos del estator

Se puede por lo tanto controlar la velocidad de rotación, interviniendo en:

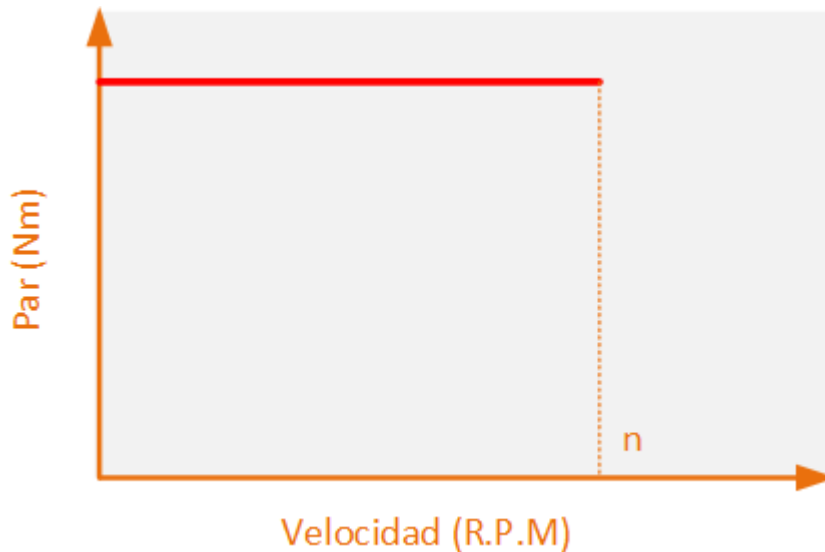
- El número de par de polos (motores con número de par de polos variable)
- La frecuencia de suministro

En la actualidad, el control de velocidad de los motores síncronos se realiza de forma electrónica a través de variadores de velocidad. Por esta razón, solamente trataremos el control de frecuencia que es la técnica más utilizada. En vista de que el motor síncrono requiere de un sistema auxiliar para ser arrancado, el variador de frecuencia asociado a un motor síncrono permite el arranque con una frecuencia estática casi nula.

Sin pérdida de potencia, se puede controlar la velocidad de rotación del motor haciendo variar la frecuencia ya que la velocidad del campo rotatorio en el estator cambia.

Se debe destacar que el par de un motor síncrono no cambia con base en la velocidad ya que no existe deslizamiento.

Figura 59 Variación de la velocidad a par constante motor síncrono



Pilotaje en frecuencia y en tensión

El control del motor por variación de frecuencia muestra una serie de ventajas, tales como:

- Limitación de las corrientes pico de arranque en torno a 1.5 la corriente nominal
- Un par motor constante durante las variaciones de velocidad del motor.

3.10.4 Arranque del motor síncrono

Existen diversas formas de arranque de los motores síncronos. A continuación se reflejan las más comunes.

3.10.4.1 Arranque del motor reduciendo la frecuencia eléctrica

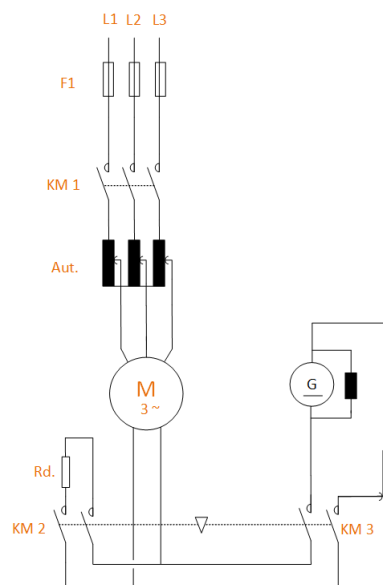
Se trata de reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor suficientemente bajo para que el rotor pueda acelerar y se enlace con él durante la rotación del campo magnético. Esto se puede llevar a cabo reduciendo la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada.

3.10.4.2 Arranque como motor asíncrono:

El motor síncrono requiere de la instalación de arrollamiento especial de arranque dispuesto en rueda polar. Este componente está conectado al arrancador a través de anillos rozantes. En cuanto la excitación se conecta, el motor entra en sincronismo.

En este tipo de arranque se requiere de un autotransformador (Aut) y de una resistencia de descarga Rd. La función del transformador es la de reducir la intensidad absorbida por el motor durante la fase de arranque, a través de la reducción de la tensión nominal (30%). El rol de la resistencia corresponde a evitar efectos perjudiciales en las bobinas polares. Esta resistencia es puesta fuera del circuito en cuanto el motor logra su régimen de funcionamiento.

Figura 60 Arranque como motor asíncrono



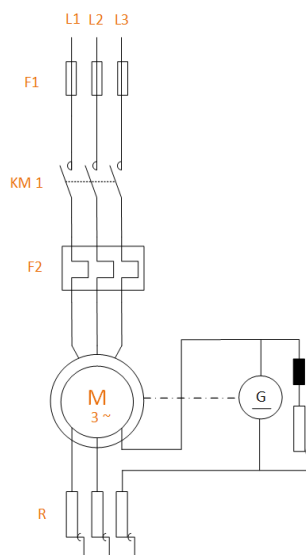
3.10.4.3 Arranque del motor mediante un motor primario externo:

Consiste en fijarle un motor externo de arranque y llevar la máquina sincrónica hasta su velocidad plena con ese motor. Entonces la máquina síncrona puede ser emparalelada con un sistema de potencia como un generador, y el motor de arranque puede desacoplarse del eje de la máquina.

3.10.4.4 Arranque motor como motor asíncrono sincronizado

Se requiere de un arrancador, de igual forma que para los motores de anillos rozantes. Cuando el motor logra su velocidad de sincronismo, se excita la excitatriz permitiendo que el motor entre en sincronismo.

Figura 61 Arranque como motor asíncrono, sincronizado



3.10.4.5 Arranque a través de un devanado amortiguador (rotor ranurado)

Es la técnica más utilizada para el arranque de motores síncronos. Los devanados amortiguadores son barras especiales que se disponen en ranuras ubicadas en el tórtor del motor síncrono y conectados en cortocircuito en cada extremidad por un anillo.

La función de este tipo de devanado es que el motor en fase de arranque sea como un motor asíncrono e impide la oscilación de velocidad.

3.10.5 Frenado de un motor trifásico síncrono

Este tipo de motor puede ser frenado a través de:

- Variación de la carga hasta obtener una intensidad absorbida lo más reducida posible y permitiendo su desconexión eléctrica.
- Regulando el reóstato, lo que varía la intensidad absorbida. Permitiendo desconectar el motor sin riesgo alguno.

Otra forma de llevar a cabo el paro del motor, es llegando a su punto crítico de funcionamiento correspondiente al momento en el que la carga supera el par del motor. En ese instante el motor se detiene pero genera sobrecalentamientos.

3.10.6 Ventajas e inconvenientes

Este tipo de motores tienen las siguientes ventajas:

- Garantizan la estabilidad de la velocidad.
- Disponen de un buen rendimiento.
- Pueden utilizarse como dispositivos para corregir el factor de potencia, variando la excitación del rotor.
- Pueden conectarse de forma directa en alta tensión sin requerir de transformadores.
- Pueden funcionar como generadores de energía reactiva (condensadores síncronos).

Las principales desventajas de este tipo de motores son:

- Se deben arrancar en vacío
- Requieren de una puesta en marcha extensa y particular
- Tienen una sola velocidad que es constante y que es la de sincronismo
- No admiten variaciones de carga bruscas pudiendo perder su velocidad de sincronismo

3.11 Motor a inducción monofásico

3.11.1 Introducción

Los motores monofásicos se emplean en múltiples aplicaciones, tanto en electrodomésticos, como en pequeñas máquinas y aparatos muy diversos, como lavadoras, frigoríficos, máquinas, herramientas, fotocopiadoras, impresoras, escáneres, máquinas de afeitar, etc.

La mayoría de los motores monofásicos son motores de baja potencia o caballaje fraccionario (menor a 1 HP). Sin embargo, existen motores con tamaños normalizados de 1.5,2,3,5,7.5 y 10 HP alimentados tanto en 110 V, 220V y en ciertos casos 440 V.

Este tipo de motor tiene un gran inconveniente ya que solo existe una fase en el devanado del estator, implicando la no rotación del campo magnético. Para suplir eso, lo que se realiza es un pulso de gran intensidad seguido de uno de menor intensidad, pero siempre en la misma dirección. Al no disponer de campo magnético giratorio, el motor no dispone del par de arranque, implicando la necesidad de incorporar sistemas de arranque que inician el giro del rotor. Este tipo de técnicas permiten clasificar los motores monofásicos.

3.11.2 Componentes

El motor de inducción monofásico dispone de un rotor de tipo jaula de ardilla.

No existe conexión física entre el rotor y el estator, ya que se encuentran separados uniformemente (entrehierro).

En vista de que este tipo de motor no genera par de arranque, se encuentra equipado de dos devanados: el de marcha o principal, y el auxiliar o de arranque cuya función es producir el giro del motor.

Ambos devanados están distribuidos en ranuras o muescas espaciadas uniformemente alrededor del estator. El devanado de arranque se sitúa en ranuras con orientación desplazada de 90° con respecto al devanado principal.

Este tipo de motor se caracteriza por sufrir vibraciones y no arrancan solos debido a que el par de arranque es nulo.

3.11.3 Clasificación de los motores monofásicos de inducción

El motor de inducción monofásico no tiene par de arranque intrínseco. Requiere de una serie de técnicas para obtener que uno de los campos giratorios tenga más fuerza que el otro, permitiendo por lo tanto:

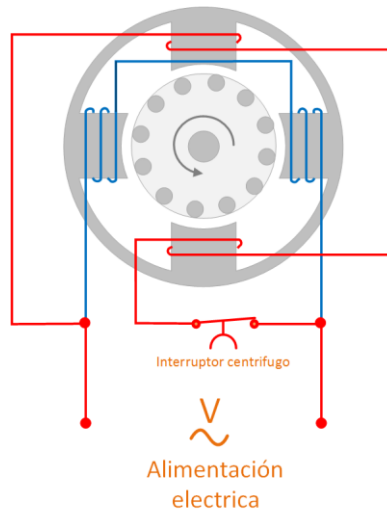
- Devanados de fase partida
- Devanados con capacitor
- Polos estatóricos sombreados

3.11.3.1 Motores de fase partida y arranque por resistencia

Este tipo de técnica, se basa en colocar un bobinado auxiliar desplazado físicamente de 90° del principal. Se trata de un devanado de arranque que presenta una alta resistencia y baja reactancia, y generalmente se compone de un alambre de cobre de menor sección que el devanado de marcha y con menores vueltas. El devanado de marcha dispone de más espiras y tiene una baja resistencia y alta reactancia. La corriente que recorre el devanado de marcha es mayor que la del devanado de arranque. La corriente que atraviesa el devanado de arranque

dispone de un retraso de 15° con respecto a la tensión de suministro, y en el devanado de marcha, este desfase se sitúa en 40° con respecto al voltaje monofásico.

Figura 62 Esquema motor de fase dividida



Al sumar los campos principal y auxiliar, se tiene un vector giratorio que forma una elipse. Este tipo de campo, no dispone de una magnitud constante pero permite impulsar por si solo al rotor de arranque.

Figura 63 Representación motor de fase partida con arranque por resistencias

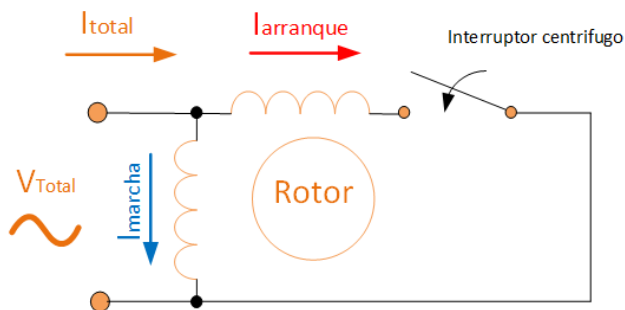
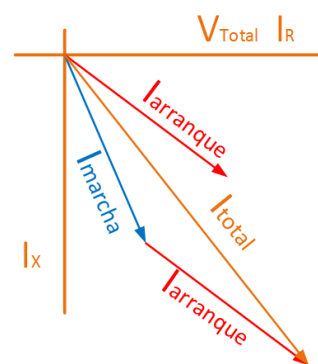
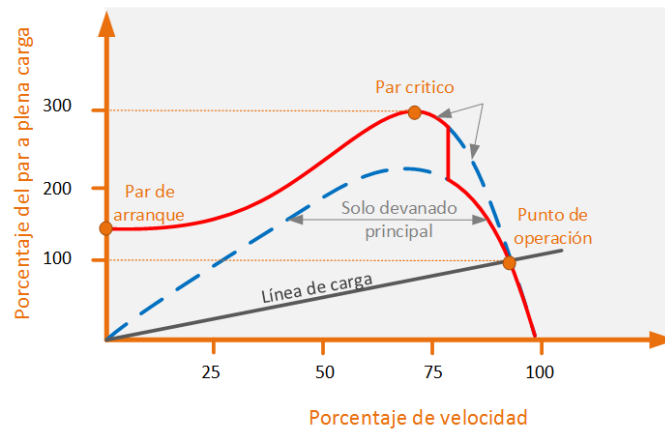


Figura 64 Representación vectores intensidad motor con arranque por resistencias



El devanado auxiliar permite que uno de los campos magnéticos estatóricos giratorios opuestos sea mayor que el rotor, obteniendo un par de arranque para el motor.

Figura 65 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico de arranque por resistencias



3.11.3.1.1 Control de velocidad

El control de la velocidad de este tipo de equipos es relativamente complicado ya que la velocidad sincrónica del campo rotatorio del estator está determinada por la frecuencia y el número de polos del devanado de marcha del estator.

3.11.3.1.2 Usos

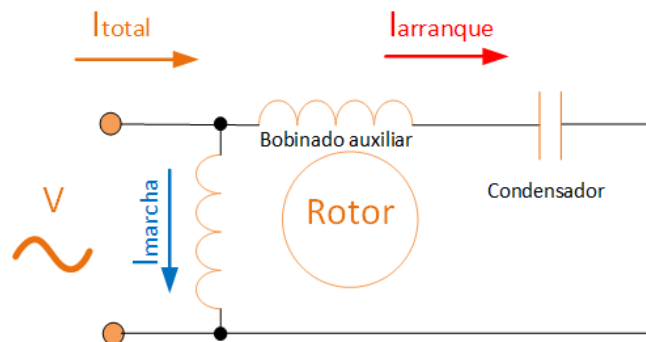
El par de arranque de un motor con arrancador auxiliar es suficiente en muchos casos tales como ventiladores de cámaras de refrigeración y ciertas herramientas eléctricas. Este tipo de motor es económico y por ello se fomenta su uso por los fabricantes de equipamientos. Su potencia suele situarse en $\frac{1}{2}$ HP.

3.11.3.2 Motor de fase partida, capacitor de marcha o permanente

Numerosos motores monofásicos incluyen un capacitor en serie con el bobinado del estator con el fin de optimizar el desfase del campo magnético en el arranque. Las corrientes capacitivas desfasan la tensión $> 90^\circ$. En el caso de incorporar capacitores, se logra un desfase de corriente en el devanado con respecto al rotor, obteniendo un par de arranque muy elevado que un motor con devanado auxiliar no puede lograr.

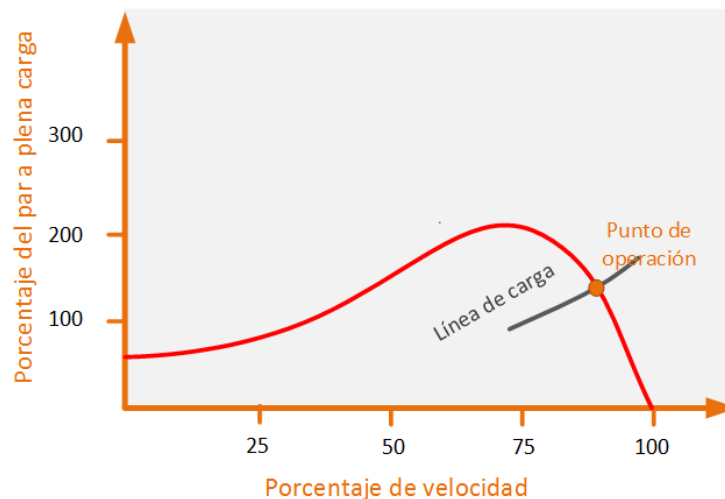
Este tipo de motor dispone de devanados permanentes que en general se realizan con alambre del mismo diámetro y con el mismo número de vueltas. No presenta un alto par de arranque.

Figura 66 Representación motor de fase partida con capacitor de marcha



Este tipo de motor se presta al control de velocidad por variación del voltaje de alimentación. Se utilizan diversos métodos para regular el voltaje aplicado al estator y generar un control de velocidad, tales como transformadores con varias salidas, potenciómetros y resistencias, o reactores de varias salidas.

Figura 67 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico con capacitor de marcha



Este tipo de tecnología se utiliza mucho en aplicaciones de aire acondicionado y ventilación debido a la posibilidad de controlar la velocidad.

3.11.3.3 Motor de fase partida y capacitor de arranque

En los motores con capacitores de arranque, un condensador se encuentra conectado en serie con el devanado de arranque y se encuentra dimensionado de tal forma que se optimice el par de arranque. El bobinado de arranque es puesto fuera de servicio por un interruptor centrífugo o relevador electrónico cuando el motor llega a su velocidad de funcionamiento. El par de arranque es más elevado que en el motor de capacitor de marcha pero manteniendo las características de funcionamiento semejantes a la de un motor con bobinado auxiliar de arranque.

Figura 68 motor PINNSUN YcYL de condensador de arranque



Figura 69 Esquema de motor con condensador de arranque

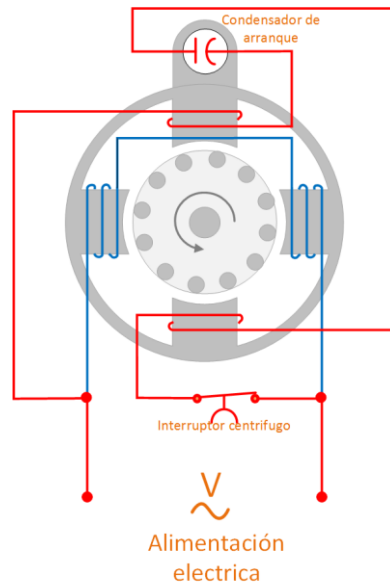


Figura 70 Representación motor con condensador de arranque

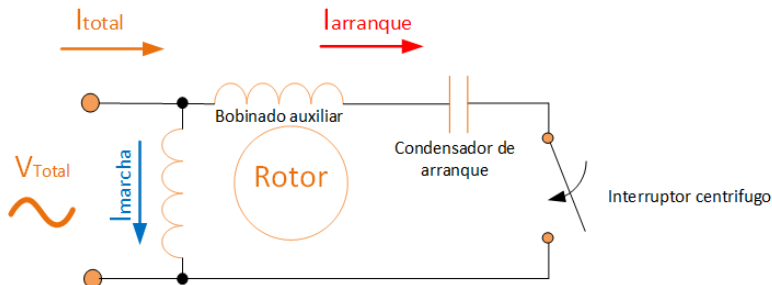
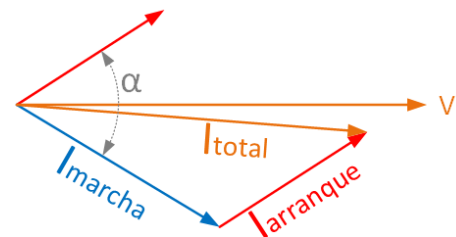
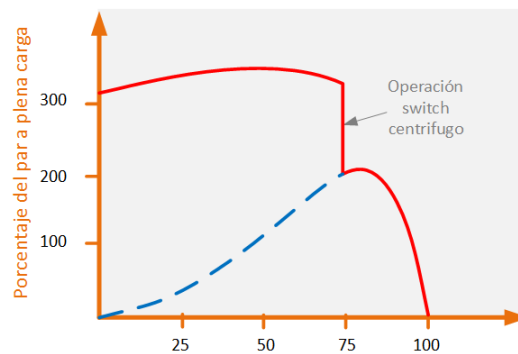


Figura 71 Representación vectores Intensidad motor con condensador de arranque



El condensador suele situarse en la carcasa del motor. Para el cambio de sentido de giro del motor, se requiere de la inversión de la polaridad de la corriente en el dispositivo auxiliar.

Figura 72 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico de arranque por capacitor



Este tipo de tecnología se utiliza en aplicaciones que requieren de un fuerte par de arranque, por ejemplo en compresores, climatización, lavadoras grandes, entre otras. Su potencia ronda los 10 HP.

3.11.3.4 Motor con capacitor de arranque y marcha

Este tipo de motor utiliza un capacitor conectado en serie con el devanado principal del estator, mejorado para las características de funcionamiento. Un segundo condensador instalado en serie con el devanado de arranque mejora el par de arranque, El condensador de arranque es pues

El motor de capacitor de marcha dispone de un par de arranque muy bajo. Este tipo de tecnología ofrece ventajas tales como un funcionamiento sin ruido y de control de velocidad limitado del capacitor de marcha con el alto par de arranque del motor de arranque por capacitor. El condensador de arranque se pone fuera del circuito cuando el motor llega a su velocidad de funcionamiento.

Figura 73 Motor ELPROM ASR de condensador de arranque y marcha

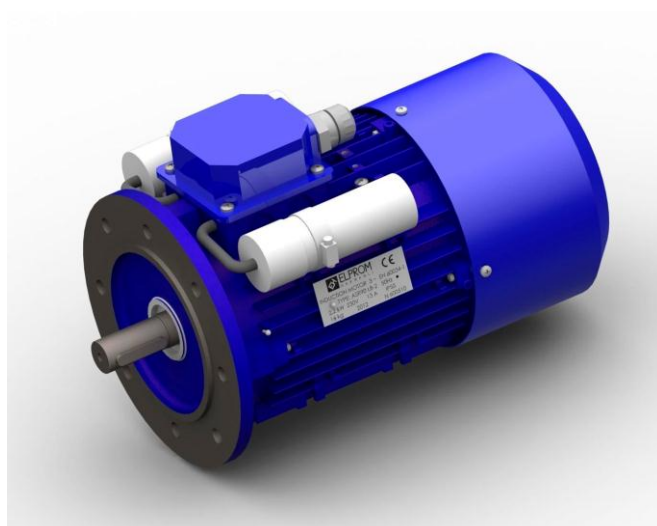


Figura 74 Esquema motor con condensador de arranque y marcha

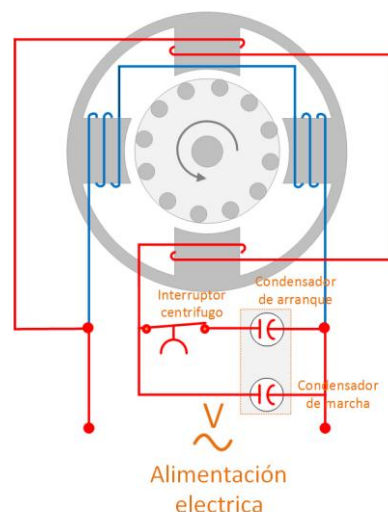


Figura 75 Representación motor con condensador de arranque y marcha

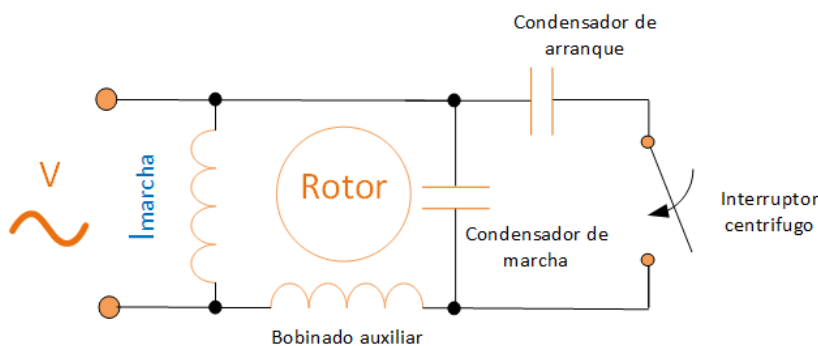
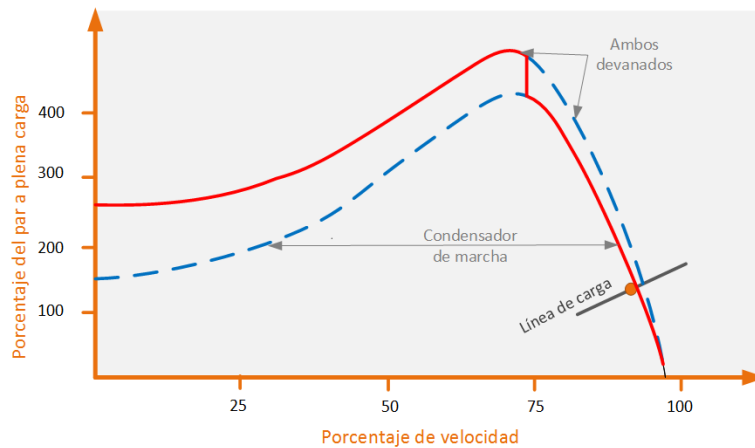


Figura 76 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico con capacitor de arranque y marcha



Este tipo de motor es común en unidades domésticas de acondicionamiento de aire. Los motores hasta una potencia de 2 HP suelen ser utilizados para el accionamiento de máquinas electrodomésticas, herramientas y maquinaria para la construcción, así como frigoríficos y lavadoras.

3.11.3.5 Motor de polos sombreados

Se trata del sistema más simple de arranque de los motores monofásicos. Los polos sombreados se forman a través de un aro de alambre de cobre en cortocircuito y/o alojado en unas muescas. Esta zona demora la formación del campo magnético producido por el devanado del estator.

El flujo magnético en el área sin anillo aumenta con la intensidad de corriente que atraviesa el devanado. El aumento del campo magnético en la zona del anillo es desfasado con un retraso debido a la corriente inducida en el anillo de cobre. El campo magnético atraviesa la cara del polo, luego la zona sin anillo y para terminar el área con el anillo, desarrollando un par en la jaula de ardilla.

Con el objetivo de mejorar el par, el rotor se encuentra equipado de una resistencia elevada.

Figura 77 Esquema motor de polos sombreados

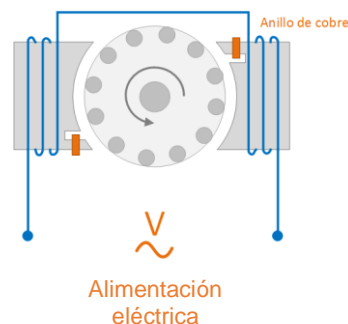
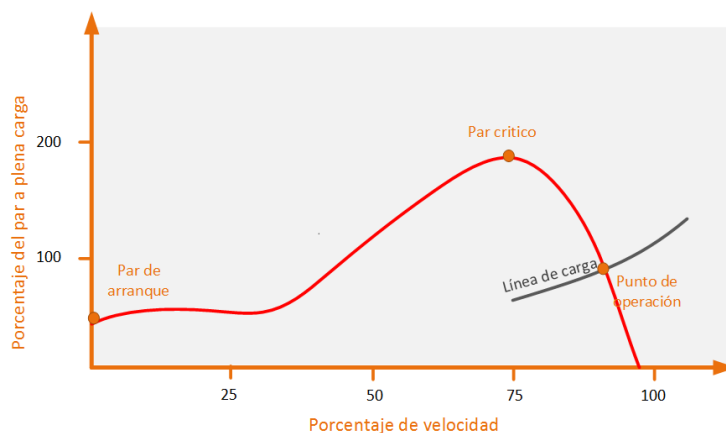


Figura 78 Gráfica de características par-velocidad motor monofásico de polos sombreados



Su uso es común en aplicaciones tales como ventiladores de extracción de aire (baños) y pequeños sistemas de bombeo. Además su bajo par de arranque, permite su uso en aplicaciones tales como proyectores de cine, asadores eléctricos, máquinas expendedoras, tornamesas y servomecanismos.

3.11.4 Características de los motores de inducción monofásicos

A continuación, se refleja una tabla resumen de los motores de inducción monofásicos, resaltando su tipología, usos, rendimiento y par motor.

Tabla 6 Motores de inducción monofásicos

Tipología			
Con anillos de desfase	Poco elevado	Medio	Ventiladores con transmisión directa
Con devanado auxiliar de arranque	Poco elevado	Medio	Ventiladores con transmisión directa, compresores de aire y de refrigeración, grandes electrodomésticos
	Medio	Medio	Ventiladores con transmisión por polea, compresores de aire y de refrigeración, grandes electrodomésticos
A arranque con condensador	Medio	Medio	Ventiladores con transmisión por poleas, compresores, bombas centrífugas, aparatos industriales, agrícolas, grandes electrodomésticos, electrodomésticos comerciales, equipamiento de oficina.
	Elevado	Medio	Bombas volumétricas, compresores de aire y de refrigeración
A condensador de arranque y marcha	Medio	Elevado	Ventilador con transmisión por poleas, bombas centrífugas
	Elevado	Elevado	Bombas volumétricas, compresor de aire y de refrigeración, aparatos industriales, agrícolas, grandes electrodomésticos, equipos de limpieza comercial, equipamiento de oficina
A condensador permanente	Poco elevado	Elevado	Ventiladores con transmisión directa, compresores de refrigeración, equipamiento de oficina.

3.11.5 Arranque de motores monofásicos

Los motores monofásicos presentan normalmente una potencia que se sitúa por debajo de los 10 HP. Los arrancadores van desde un simple interruptor para los pequeños equipos y de arrancadores magnéticos para los motores de mayor potencia.

Los arrancadores a semiconductores pueden servir a arrancar los motores sin picos de corriente con el fin de limitar esa corriente de arranque, además de ejercer funciones de variación de velocidad. Este tipo de arrancador resulta particularmente útil en aplicaciones de tipo agrícolas, ya que permite el uso de motores un poco más potentes en redes eléctricas limitadas.

3.11.6 Ventajas e inconvenientes del motor asíncrono monofásico

El motor monofásico asíncrono es muy sencillo en construcción y por lo tanto económico en precio de adquisición y costos de mantenimiento.

Puesto que hay una sola fase en el bobinado del estator, el campo magnético de este motor no gira; en cambio, pulsa, al principio con gran intensidad que va disminuyendo luego, pero permaneciendo en la misma dirección. Como no hay campo magnético giratorio en el estator, un motor de inducción no tiene par de arranque.

3.12 Otros motores

3.12.1 Motor síncrono monofásico

En este tipo de motor, el rotor se compone de una jaula de ardilla donde ciertas barras han sido desplazadas con objeto de favorecer un recorrido particular del flujo magnético.

En el momento del arranque, el rotor presenta un cierto retraso con respecto al campo magnético giratorio, como para el motor a inducción.

Cuando el motor, se acerca a su velocidad de sincronismo, el par de reluctancia (par inducido en un objeto en presencia de un campo magnético externo) engendra la sincronización del rotor con el campo magnético giratorio del estator. Este tipo de motor es muy común en aplicaciones de baja potencia que requieren de velocidad síncrona.

3.12.2 Motores universales

Los motores universales son motores embobinados de tipo serie, cuyos devanados del rotor son comparables a los de los motores a corriente continua.

El término universal proviene del hecho que puede funcionar de forma indistinta con corriente alterna como continua. Su funcionamiento y construcción se asemejan a los motores de corriente continua, aunque sus elementos están concebidos para un mejor rendimiento cuando se encuentran alimentados por corriente alterna bajo ciertas frecuencias.

Su rango de velocidades de funcionamiento se sitúa entre 3,000 y 15,000 R.P.M. Su velocidad disminuye en función del aumento de su carga.

Se caracterizan por una relación elevada entre potencia y tamaño, además de requerir más mantenimiento por hora de funcionamiento que el resto de motores en vista de sus escobillas.

Figura 79 Motor universal

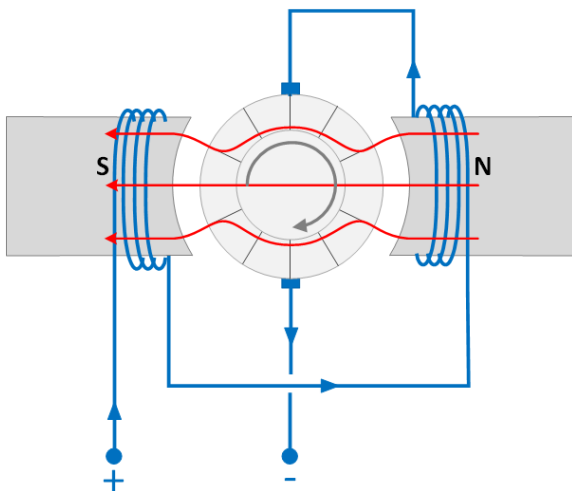
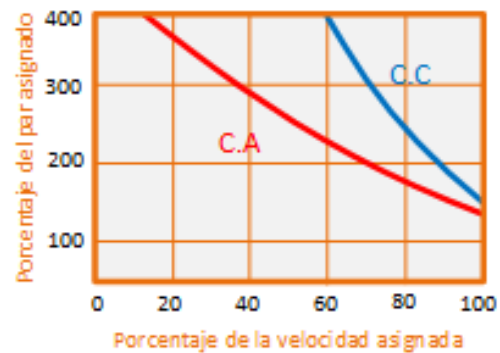


Figura 80 Gráfica par y velocidad motor universal



3.12.2.1 Motores mejorados

3.12.2.1.1 Motor a conmutación electrónica

Un motor a conmutación electrónica es un motor de corriente continua con imanes permanentes que dispone de un sistema de conmutación electrónica. Este depósito entrega a los devanados unas tensiones controladas con precisión y utiliza captadores de posición para la sincronización.

Figura 81 Motor a conmutación electrónica ZIEHL ABBEGG



El mando electrónico puede programarse de tal forma que permita la variación de las características par-velocidad del motor para adecuarse a una multitud de aplicaciones. Sin embargo, estos equipos son costosos frente a las tecnologías convencionales, pero que gracias a su rendimiento elevado y sus características funcionales los hacen interesantes para ciertas aplicaciones.

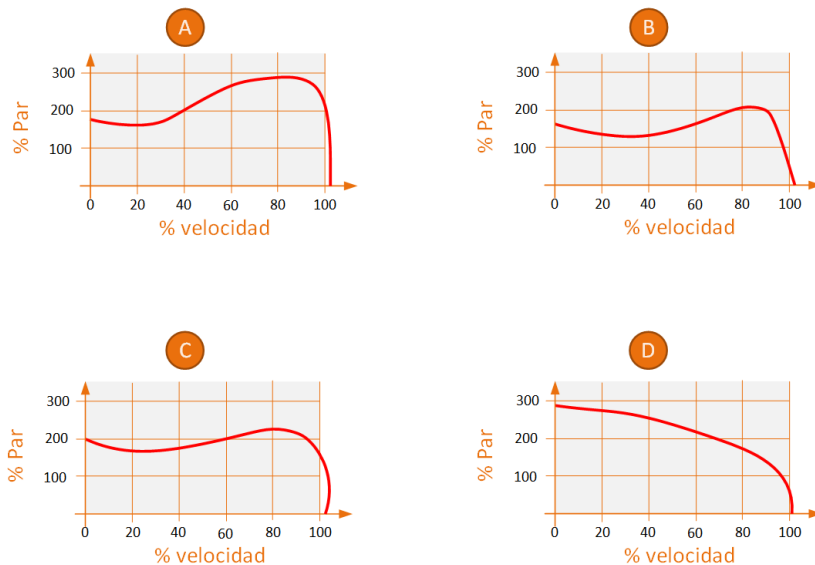
Su uso es muy común en ventiladores, sistemas de bombeo, refrigeración y aparatos electrodomésticos.

3.12.2.1.2 Motor a reluctancia y conmutación

Los motores a reluctancia y conmutación presentan la ventaja de disponer un par elevado a baja velocidad y en un rango muy extenso.

Como en el caso del motor de conmutación electrónica, un dispositivo electrónico asegura la alimentación de los devanados en una secuencia precisa y dispone de captadores de posición de rotación para la sincronización.

Figura 82 Gráficas características motor reluctancia y conmutación



Los motores a reluctancia y a conmutación se emplean en lavadoras de alta gama, eliminando los sistemas de transmisión.

3.12.2.1.3 Motores de imanes permanentes

Si se combina la electrónica de potencia con materiales novedosos de intensidad magnética elevada, se obtiene motores de alto rendimiento a velocidad variable en el que la gama de potencias de 1 HP a varios HP.

3.12.2.1.4 Motor Written Pole

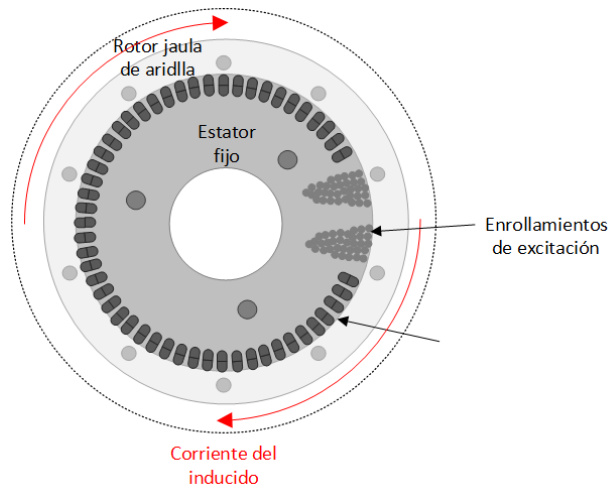
Este tipo de motores son equipos a corriente alterna monofásicos especiales en los que la posición de los polos magnéticos puede ser modificada durante su funcionamiento.

Figura 83 SPPS Written-Pole®



En estos motores, los polos de imanes permanentes están integrados de manera continua e instantánea sobre una capa del rotor por un enrollamiento de excitación dispuesto en el estator. Los polos magnéticos son integrados en un punto diferente sobre el rotor a cada vuelta mientras que la velocidad del rotor varía. La configuración de los polos se conserva a una velocidad polos/segundo constante.

Figura 84 Motor Writteen Pole



A diferencia con los motores tradicionales, este tipo de motor está compuesto de un rotor exterior que gira alrededor del estator interno. Esta configuración invertida engendra un efecto de volante de inercia que permite al equipo de hacer frente a las perturbaciones de corta duración. Un generador trifásico incorporado al motor, suministra la energía a cargas exteriores durante un periodo a plena carga de 15 segundos.

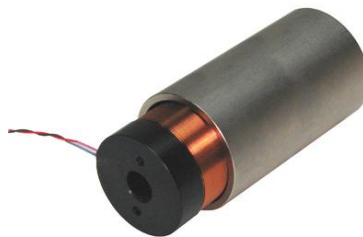
El rotor constituido de imanes permanentes disminuye la corriente de arranque en torno a 3 veces menos que los motores a inducción convencionales.

3.12.2.1.5 Motor a corriente continua lineal

De la misma forma que un motor, a corriente continua, rotatorio, este equipo lineal engendra una fuerza mecánica por la interacción de la corriente que recorre los conductores y el campo magnético producido por los imanes permanentes.

Los motores de corriente continua lineales se componen de un estator constituido de láminas de acero que incorporan enrollamientos de conductores dispuestos en las ranuras transversales. Este tipo de motor puede lograr una precisión de 0.1 micrones y no sufre daños ni desgastes durante su uso. Este concebido para manejar directamente cargas un amplio rango de empuje y recorridos.

Figura 85 Linear DC Motor Electromechanic MOLDC05108901



3.12.2.1.6 Motor a corriente alterna lineal

Los motores de corriente lineal se encuentran en los transportes ferroviarios. Las bobinas del estator se encuentran encastradas a lo largo de las vías. Este tipo de motor permite obtener velocidades cercanas a los 400 km/h.

3.12.2.1.7 Motor híbrido (paso a paso)

Los motores híbridos combinan las propiedades de los motores a reluctancia variable y los motores a imanes permanentes, lo que permite disponer de las características interesantes de cada uno de ellos. Disponen de un par de expansión elevado así como un excelente par de retención y dinámico, y pueden funcionar a velocidades elevadas. Presentan comúnmente ángulos de paso de 0.9 a 5. Si las fases se ponen bajo tensión de una en una y en un orden preestablecido, el rotor gira con incrementos de 1.8 °. Este tipo de tecnología, permite su alimentación a través de dos fases simultáneas, implicando un incremento del par.

Figura 86 Esquema motor híbrido

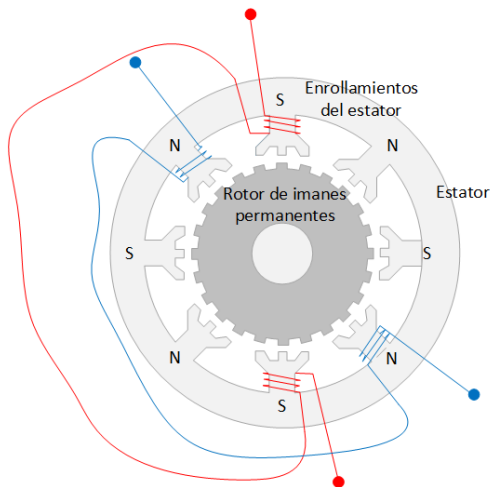
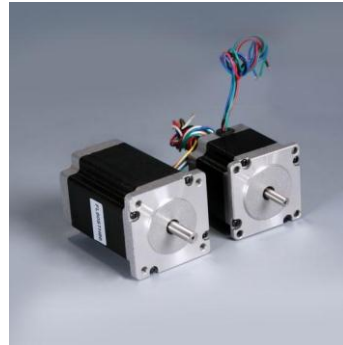


Figura 87 Motor híbrido GISS Ingeniería



4 PROTECCIONES DE LOS MOTORES

Los dispositivos de protección tienen como función la de proteger el motor, el circuito de alimentación y las personas contra diversas condiciones anormales de funcionamiento.

4.1 Dispositivos de seccionamiento

Las reglas eléctricas implican la instalación de un dispositivo de seccionamiento adecuado y de potencia suficiente, ubicado cerca del motor. Este dispositivo de seguridad tiene como rol el de poner fuera de tensión las líneas eléctricas de alimentación del equipo y permitir a los operarios acceder a los componentes sin riesgo de electrocución.

4.2 Protección contra sobre intensidades

Las protecciones contra las sobre intensidades cortan la alimentación eléctrica cuando existe un pico de corriente excesivo en la red de alimentación del equipo. Estos dispositivos, se componen en la mayoría de los casos, de fusibles o disyuntores, que se disparan en caso de corto circuito o sobrecargas elevadas.

4.3 Protección contra sobrecargas

Las protecciones contra las sobrecargas tienen como función proteger el motor contra condiciones de sobrecargas mecánicas. Se distinguen comúnmente 4 tipos de protecciones que son:

- Relevador de sobrecarga
- Relevador de sobrecarga térmica
- Relevador de sobrecarga electrónica
- Fusibles

El relevador de sobrecarga funciona bajo el efecto de una acción magnética de corriente de carga que recorre una bobina. Cuando la carga sobrepasa un cierto valor, un núcleo situado en el interior de la bobina es atraído hacia la parte superior y corta el circuito. El rango de arranque se regula modificando la posición inicial del núcleo con respecto a la bobina.

Figura 88 Relevador de sobrecarga SCHNEIDER LR2K



El relevador de sobrecarga térmica utiliza un elemento ubicado en serie con la alimentación del motor que se caliente por el paso de la corriente. La cantidad de calor aumenta proporcionalmente con la intensidad que lo recorre. En caso de sobrecarga, el calor producido provoca la apertura de contactos que interrumpen la alimentación eléctrica. El valor de disparo de este tipo de equipo puede ser modificado cambiando el elemento que se caliente hasta el valor de disparo deseado. Este tipo de protección resulta muy eficaz ya que el elemento que se calienta refleja el calentamiento de los devanados en el motor, evitando posibles aumentos en caso de que no se enfríe.

Figura 89 Relevador de sobrecarga térmica ABB EF19



El relevador de sobrecarga electrónico analiza la corriente de carga y calcula el efecto térmico sobre el motor. En condiciones de sobrecarga, el circuito de detección interrumpe el circuito de alimentación del motor. El valor de corriente de disparo puede ser regulado en función de la aplicación prevista, El relevador de sobrecarga electrónica asegura además funciones complementarias de protección, como por ejemplo aterrizado a tierra y protección contra las pérdidas de fases.

Figura 90 Relevador de sobrecarga electrónico SIEMENS 3RB10



4.4 Otros tipos de protección

La protección con la caída de tensión funciona cuando la tensión de alimentación es inferior a un valor preestablecido. El motor deberá ser puesto en marcha después de que la tensión de alimentación vuelva a su valor de origen.

El disparo por caída de tensión interrumpe el circuito cuando el valor de la misma baja de un límite preestablecido. Posteriormente, a la recuperación de la tensión, el dispositivo se rearma automáticamente.

La protección contra la inversión de fases se dispara cuando se detecta una inversión de fase en el circuito trifásico. Se suele encontrar este tipo de protección en los elevadores ya que el funcionamiento del motor en sentido inverso podría generar un riesgo importante tanto en el equipamiento como en los usuarios.

Una protección contra el aterrizado a tierra se dispara en el caso que una de las fases del motor sea puesta a tierra. Este dispositivo impide que las corrientes de intensidad elevada dañen los devanados del estator o del núcleo magnético.

Existen otros dispositivos de protección de los motores, tales como los detectores de temperatura de los devanados, los relevadores diferenciales de corriente y los detectores de vibraciones.

De forma general, el nivel de protección de un motor aumentará proporcionalmente con la capacidad del mismo. Por lo tanto, los motores de una potencia inferior a 20 HP, comúnmente solo se encuentran equipados de protecciones contra sobrecarga y sobreintensidades (a menos que el equipo sea parte de un proceso crítico).

5 COMO REALIZAR EL LEVANTAMIENTO EN CAMPO

Los motores eléctricos son parte fundamental de los procesos de buena parte de las PyMEs y representan un consumo considerable de energía eléctrica.

A continuación se presenta una guía para la recolección de los datos importantes de los motores con el fin de identificar áreas de oportunidad para el ahorro de energía.

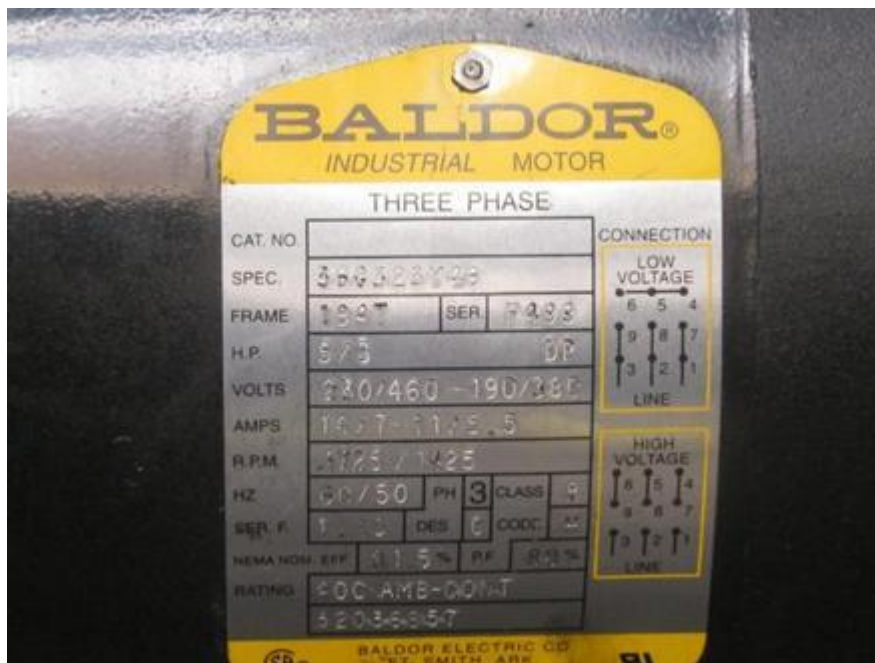
5.1 Características del motor

Los motores trifásicos deben disponer de una placa de datos visible y sujeta al motor. Las placas suelen ser de acero inoxidable con las características grabadas para poder leer los datos aunque se desgaste la pintura.

En cuanto a los motores monofásicos, se debe disponer de una placa de datos de poliéster o acero.

A continuación, se reflejan las principales características de una placa de motor.

Figura 91 Placa motor



- **CAT N°:** Modelo o número de catálogo
Se trata de la nomenclatura del fabricante del motor modelo o número de catálogo
- **HP o kW:** Potencia nominal en HP o kW

Corresponde a la potencia máxima de salida en el eje del motor. Este valor no incluye las pérdidas. La unidad puede ser en HP o kW.

- **Spec**
Corresponde a la identidad (ID) del motor
- **VOLTS** : Tensión nominal en volts
Es el voltaje de funcionamiento del motor. Puede disponer de más de un valor si el motor soporta varias configuraciones en su caja de bornes.
- **AMPS o FLA**: Corriente nominal a plena carga en amperios
Corresponde a los amperios a carga plena (Full load Amperes), es decir la intensidad consumida por el motor cuando funciona a carga nominal.
- **RPM**: Revoluciones por minuto a plena carga (R.P.M.)
Corresponde a las revoluciones por minuto
- **FRAME**: Marco de la carcasa
Indica el tamaño de la carcasa del motor según NEMA. Se trata de las dimensiones físicas del equipo.
- **Hz**: Frecuencia eléctrica en Hz
Indica la frecuencia de alimentación eléctrica que requiere el motor (50 Hz o 60 Hz)
- **PH**: Número de fases PH
Corresponde al tipo de fuente de alimentación requerido en su diseño. Puede ser trifásica o monofásica, hasta en ciertos casos bifásicos.
- **Serv.F**: Factor de Servicio
Corresponde a número multiplicador que indica la cantidad esperada de sobrecarga que puede disponer el motor. (1.15 corresponde a que puede manejar un 15% más de carga de su potencia nominal)
- **CODE**: Letra de clave para KVA de rotor bloqueado por kW/HP
Corresponde a la letra de código que especifica la corriente con el rotor bloqueado o corriente de irrupción que demanda un motor en su arranque.

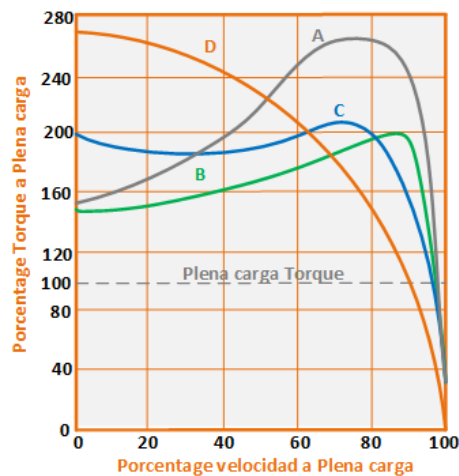
Tabla 7 Código NEMA clave KVA

Letra	Rango KVA/HP	Valor aproximado de mitad de rango	Letra	Rango KVA/HP	Valor aproximado de mitad de rango
A	0.00-3.15	1.6	L	9.0-10.0	9.5
B	3.15-3.55	3.3	M	10.0-11.2	10.6
C	3.55-4.00	3.8	N	11.2-12.5	11.8
D	4.0-4.5	4.3	P	12.5-14.0	13.2
E	4.5-5.0	4.7	R	14.0-16.0	15.0
F	5.0-5.6	5.3	S	16.0-18.0	17.0
G	5.6-6.3	5.9	T	18.0-20.0	19.0
H	6.3-7.1	6.7	U	20.0-22.4	21.2
J	7.1-8.0	7.5	V	22.4-ARRIBA	
K	8.0-9.0	8.5			

- **DES:** Letra de diseño DES

Letra de diseño según NEMA que corresponde a las características de par/velocidad que tiene el motor en el arranque y en baja carga. Generalmente, esta letra es la B (uso industrial)

Figura 92 Gráfica NEMA letra de diseño DES



- **CLASS:** Clase de aislamiento CLASS
Clase de aislamiento según NEMA y en base las temperaturas de operación. Se clasifica por letras, tal y como se muestra en la tabla adjunta.

Tabla 8 Clase de aislamiento

NEMA	Máxima temperatura de operación permitida	
	°C	°F
A	105	221
B	130	266
F	155	311
H	180	356

- **NEMA NOM EFF:** La eficiencia nominal a plena carga en porcentaje (2 dígitos enteros y 1 decimal)
Indica el valor del rendimiento en porcentaje de la potencia de entrada con respecto al trabajo de salida en el eje del motor.
- **P.F.:** Factor de potencia
Corresponde al porcentaje del factor de potencia. (Medición correspondiente al amperaje magnetizante para un motor específico)
- **RATING:** Temperatura de ambiente
Corresponde a la máxima temperatura de ambiente a la que el motor se encuentra en condiciones seguras funcionando a plena carga. El dato más común es de 40°C)
- **CC:** Tipo servicio (continuo o intermitente)
Corresponde al tipo de servicio. En la mayoría de los casos es continuo.
- **BEARINGS:** Rodamientos
Indica el número de rodamientos a nivel del eje de salida y lado opuesto. (DE: lado del eje, ODE lado opuesto al eje)
- **ENCL:** Logos de certificaciones
Indica el tipo de carcasa del motor

En caso de no contar el equipo con datos de placa se procederá a tomar los datos más importantes con los equipos de medición adecuados.

5.2 Características de la instalación

Para poder evaluar el potencial de ahorros energéticos, es necesario realizar un levantamiento detallado de los equipos con el fin de determinar la carga por motor eléctrico conectado.

Se tendrán que identificar con cuantos tipos de motores cuenta la instalación y qué potencia manejan, si se encuentran en el interior o en el exterior, que tipo de máquina accionan (bombas, ventiladores, trituradoras, etc.), tipo de acoplamiento con que cuentan, bases y/o antivibratorios y tipo de control.

5.3 Mantenimiento

Un motor eléctrico debe de contar con buen mantenimiento preventivo ya que contribuye en gran medida a que el equipo trabaje de manera óptima desarrollando el trabajo para el que fue desarrollado.

En este apartado tenemos que verificar que el motor se encuentre operando, bien lubricado, que el sistema de transmisión se encuentre alineado y firme, que no se encuentre sucio o con polvo, que se encuentre firme en su base.

Pregunte al personal operativo si existe un programa de mantenimiento y en que consta por ejemplo: si se realiza mantenimiento preventivo como limpieza, cambio de rodamientos, lubricación, etc.

Si se realiza solo mantenimiento correctivo investigue cuántas reparaciones o rebobinados lleva el motor, o si este fue cambiado recientemente.

5.4 Horarios de funcionamiento

Pregunte los horarios de funcionamiento del motor, días a la semana y semanas del año en los cuales se opera, si solo se encienden ocasional mente cuanto tiempo duran encendidos al día.

5.5 Gestión operativa

Pregunte quién realiza el encendido y apagado de los motores: el mismo personal o usuario del área de trabajo, el personal de limpieza, el personal de vigilancia, etc. Investigue si existe un sistema de control automático de encendido de los motores.

Observe los usos y costumbres de los usuarios, en particular del personal operativo.

5.6 Mediciones en campo

Realice las siguientes mediciones en los equipos, siempre utilizando el aparato de medición apropiado así como también el equipo de seguridad.

Figura 93 Mediciones en campo

Parámetro a medir	Equipo de medición
Voltaje	Voltímetro (la medición se realiza en paralelo a la carga)
Corriente	Amperímetro o amperímetro de gancho (en caso de disponer de equipo con puntas de medición debe colocarse en serie a la carga a medir, en caso de contar con amperímetro de gancho, debe pinzarse cada fase del conductor que alimenta la carga)
Temperatura de trabajo	Termómetro de contacto, termómetro laser o infrarrojo, termopar, (debe medirse la carcasa del motor, procurando que la parte medida tenga una capa delgada de pintura)
RPM	Tacómetro (las revoluciones deben medirse en el eje del motor, evitando los reductores, para que pueda cotejarse contra el dato de placa)

6 FORMATO DE RECOPIACIÓN DE DATOS

Se propone utilizar el siguiente formato para recolectar los datos indicados en la sección anterior, durante el recorrido de las instalaciones y la entrevista con el personal de la PyME.

FORMATO DE RECOPIACIÓN DE DATOS SISTEMAS ELECTROMOTRICES

Razón social _____

Fecha del taller de Eficiencia Energética _____

I. Datos de motores

Completar las tablas siguientes con los datos de cada uno de los motores

		Motor				
		1	2	3	4	5
Nombre, área, Zona o Máquina						
Marca						
Modelo						
Serie						
Tipo de servicio						
Armazon						
Frecuencia (Hz)						
Número de fases						
Factor de servicio						
Letra de diseño						
Tipo de arrancador						
Clase de aislamiento						
Potencia (HP / kW)	Nominal					
	Calculada					
Voltaje (Volts)	Nominal					
	Medido					
Corriente (Amps)	Nominal					
	Medido					
Factor de potencia (%)	Nominal					
	Calculado					
Eficiencia (%)	Nominal					
	Calculado					
Temperatura de trabajo	Nominal					
	Medida					
Revoluciones por minuto (R.P.M)	Nominal					
	Medidas					

**FORMATO DE RECOPIACIÓN DE DATOS
 SISTEMAS ELECTROMOTRICES**

Razón social _____

Fecha del taller de Eficiencia Energética _____

I. Características de los motores

Completar las tablas siguientes con los datos de cada motor

Motor	El equipo se encuentra limpio (SI/NO)	Tiene algun recubrimiento de pintura (SI/NO)	Tipo de acoplamiento	Se tiene alineado (SI/NO)	Cuenta con base (SI/NO)	La base tiene antivibratorios (SI/NO)	Es de alta eficiencia (SI/NO)	Cuenta con variador de velocidad (SI/NO)	Frecuencia del mantenimiento
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									

Motor	Horas de operación / año (hrs)	Ha sido rebobinado (SI/NO)	Cuántas veces se rebobinó?	Antigüedad (años)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

7 MEJORAS ENERGÉTICAS

En este apartado, se mencionan una serie de opciones ligadas a la eficiencia en el uso de la energía eléctrica para motores de una PyME y la reducción de costos asociados al consumo eléctrico.

7.1 Selección apropiada de la potencia del motor

La primera acción a tener en cuenta para la eficiencia energética de un motor, es que la potencia nominal del motor sea la correcta y se ajuste a las necesidades del proceso. Un buen dimensionamiento de motor corresponde a un ligero sobredimensionamiento de la potencia en un 5% a 15% frente a la potencia solicitada por la instalación, logrando un rendimiento y factor de potencia idóneos para un buen funcionamiento, si se sobrepasa ese dimensionamiento, el factor de potencia disminuirá e incrementará la corriente del motor dejando como consecuencias un aumento en las pérdidas en las líneas y un consumo en la potencia reactiva.

Como ya se platicó en capítulos anteriores existen diferentes procedimientos para calcular la potencia del motor, pero todos dependen del tipo de carga a manejar.

7.2 Mejora de la calidad de la energía

Los motores deben funcionar a las condiciones nominales marcadas en la placa de características, y ser alimentados con sistemas trifásicos simétricos de tensiones de forma sinusoidal y de magnitud similar a la nominal; en pocas palabras, con una calidad de la energía eléctrica perfecta. Cabe destacar que en el sector industrial, esa calidad se ve alterada en simetría, formas de onda y magnitud, además de desequilibrios entre fases, los fenómenos de calidad de potencia eléctrica que se presentan con mayor frecuencia en las industrias son: tensión simétrica y de magnitudes mayores o menores que la tensión de placa, formas de onda de tensión distorsionada o tensión desequilibrada. Estos fenómenos alteran el funcionamiento del motor, reduciendo el rendimiento por el incremento de las pérdidas y generando un mayor desgaste que en condiciones nominales.

Debido a lo anterior, es importante verificar la calidad de la potencia eléctrica de las instalaciones eléctricas y solucionar cualquier variación o por lo menos conocerlas para poder operar con seguridad los motores.

7.3 Tensiones cercanas a las nominales

Se recomienda que la tensión no se desvíe de 5% en condiciones normales de operación, ya que de ser así, se afectan la eficiencia del motor, el factor de potencia y el tiempo de vida. Aunque algunos motores diseñados bajo normas NEMA pueden trabajar con una desviación máxima del 10%, no se recomienda sobre pasar del 5%.

La siguiente tabla muestra los efectos más comunes de los niveles de tensión sobre las características del motor de Inducción.

Tabla 9 Niveles de tensión en motor de inducción

% del Voltaje Nominal	90	95	100	105	110
Eficiencia a carga nominal	0.905	0.915	0.92	0.925	0.92
Factor de potencia a carga nominal	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86
Deslizamiento a carga nominal	1.23	1.11	1.00	0.91	0.83
Corriente a carga nominal	1.1	1.04	1.00	0.956	0.935
Carga para eficiencia máxima	0.73	0.81	0.9	1.00	1.10
Elevación de temperatura a carga nominal	1.11	1.05	1.0	0.925	1.01

Fuente: Linders J. Effects of Power Supply Variations on AC Motor Characteristics. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 1A-8, No.4, July-August 1972

Como se observa en la tabla, el efecto de funcionar a un 10% menos de tensión que la nominal, implica una pérdida de eficiencia entre el 2% y el 4%. La forma correcta de medir la tensión en los motores es directamente en sus terminales.

7.4 Minimizar el desequilibrio de tensiones

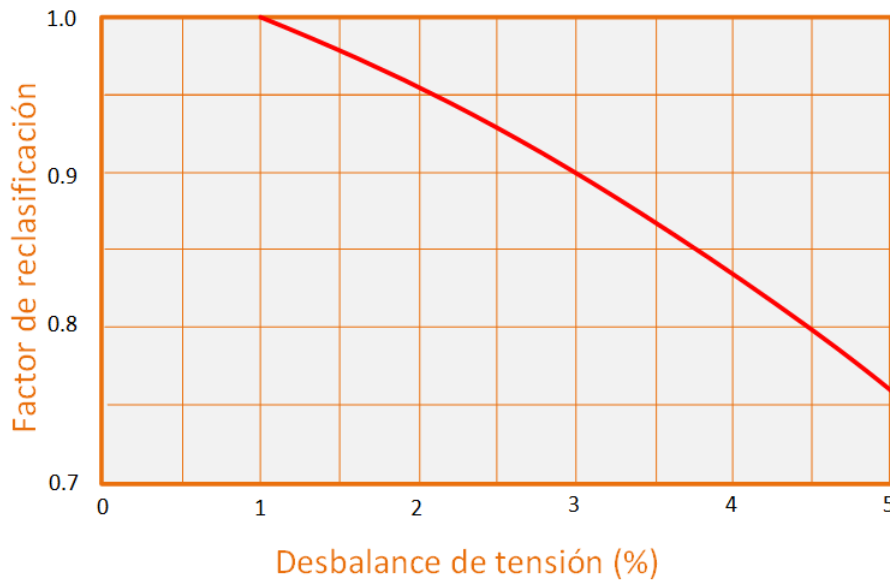
Las principales causas de desequilibrios de tensiones en una instalación, provienen del uso de secciones de cables diferentes, diferencia de cargas entre líneas, fallas de circuitos, entre otras.

Estos desequilibrios generan pérdidas importantes tanto en el sistema como en los motores, ya que aumentan las pérdidas por efecto joule afectando el rendimiento del equipamiento.

Las normas (NEMA MG1.1993 y IEC60034-2 de la Comisión Electrotecnia Internacional) estipulan que el uso de motores esté por debajo de su potencia nominal para evitar fallas por efecto joule.

La siguiente gráfica muestra los efectos de la tensión sobre la potencia nominal del motor:

Figura 94 Gráfica de tensión sobre la potencia nominal del motor



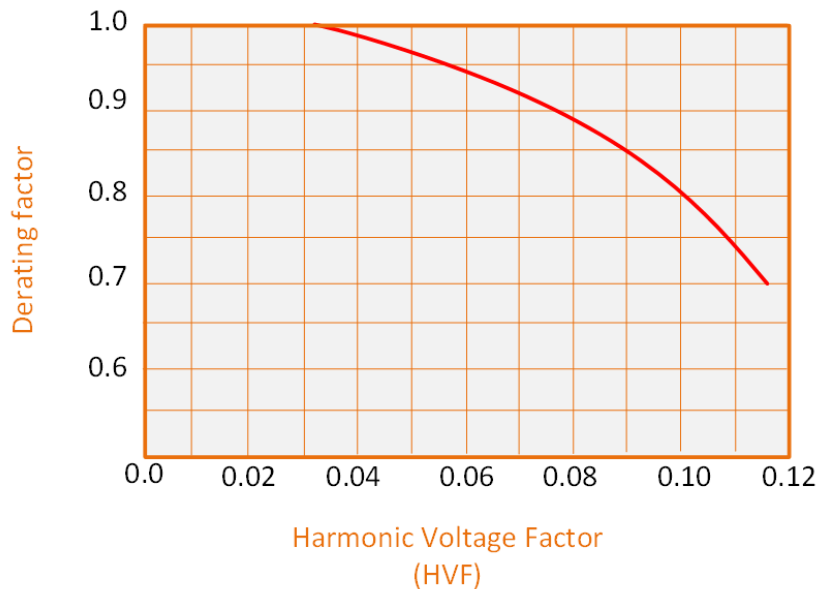
De acuerdo a las normas NEMA MG1.1993 y a la norma IEC60034-2 de la Comisión Electrotécnica Internacional, el desequilibrio de tensiones no debe exceder del 2%.

7.5 Disminuir la distorsión armónica de la red

En instalaciones con presencia de armónicos que alteran la onda de alimentación de los motores, se incrementan las pérdidas en el motor. Es recomendable disminuir la potencia del motor para evitar el calentamiento por armónicos según normas NEMA MG1 .1993, en donde indica que el factor de voltaje armónico no debe ser mayor a 0.05.

En la siguiente gráfica se observan los efectos de la distorsión armónica de la red sobre la potencia nominal de un motor.

Figura 95 Gráfica de distorsión armónica sobre la potencia motor



7.6 Reducir la carga mecánica sobre el motor

Hay que evaluar la posibilidad de reducir la carga a la que el motor opera o inclusive ver si ésta es necesaria dentro del proceso productivo, pues no sirve de mucho optimizar el motor y sus controles, si la carga a accionar o el proceso son ineficientes. A continuación se incluye una sección de recomendaciones para reducir la carga en los distintos sistemas donde se utilizan los motores eléctricos:

7.6.1 En Bombas y ventiladores.

Los motores de inducción son los más usados en este tipo de sistemas, por lo tanto es viable que operen con mayor eficiencia. Se recomienda seguir las siguientes acciones:

- Dimensionar y seleccionar la bomba para que opere cerca de su presión y flujo de diseño nominal.
- Si ya se cuenta con la bomba y esta opera muy por debajo de la carga nominal, se tendrá que instalar un impulsor más pequeño o redimensionar el que existe.
- Minimizar de ser posible todos los codos agudos de las tuberías.
- Use tuberías de baja fricción y considere el cambio de sus tuberías viejas.

- Implemente o continúe con un plan de mantenimiento periódico ya que de no contar con uno, la eficiencia del sistema puede caer en un 10% con respecto a la eficiencia nominal.
- Instale controles para optimizar el uso de los ventiladores.

7.6.2 En sistemas de transmisión mecánica.

Los sistemas de transmisión transfieren el torque del motor o las cargas o a los equipos. Esto se puede hacer cambiando la velocidad que entrega el motor o no, y se logra mediante engranes o poleas. Al seleccionar el sistema de transmisión, es de suma importancia conocer las características de cada sistema. A continuación se enlistan una serie de recomendaciones:

- Acople directo: asegurar el correcto acoplamiento entre motor y carga, utilizando tecnología láser de preferencia.
- Correas o Bandas: La banda más recomendada es del tipo “V”, dentada y si es sincrónica mejor. El alineamiento se debe hacer con tecnología láser.
- Reductores: hay que seleccionar el tipo de reductor adecuado de acuerdo a la potencia y a la relación de velocidades (helicoidal, cónico, cilíndrico y tornillo sin fin). Se tiene que tomar en cuenta que la eficiencia de un reductor cae abruptamente cuando se trabaja con una carga menor a 50% de la nominal.
- Cadenas: se recomiendan para transmitir cargas elevadas, la utilización de esta transmisión puede alcanzar eficiencias de 98%, pero el desgaste puede disminuir este porcentaje un par de puntos.

7.7 Uso de motores de alta eficiencia

Se trata de intentar sustituir los motores estándares por equipos de construcción especial que disponen de menor pérdida y por lo tanto una mejor eficiencia.

Los costos a 10 años de esta tecnología demuestran que:

- La inversión inicial con respecto a los motores estándares supone un incremento del 1%,
- La energía consumida es de 95% de la de los motores estándares
- El costo de mantenimiento resulta inferior al de un motor convencional

Por ello, el costo de comprar un motor de alta eficiencia es poco significativo respecto al costo total de operación, siempre y cuando se consideren estos puntos además del costo inicial en la compra del motor.

Como toda máquina, los motores de alta eficiencia presentan ventajas y limitaciones, las cuales se incluyen a continuación.

7.7.1 Ventajas

- Están mejor contruidos que los motores estándares o convencionales debido a la tecnología que se ocupa en su fabricación. Su construcción es robusta lo cual alarga la vida del motor y los costos del mantenimiento suelen ser menores.
- Como tienen mayor eficiencia, los costos de operación disminuyen recuperando así la inversión en un tiempo razonable siempre y cuando se encuentre bien seleccionado el motor.

7.7.2 Limitaciones

- Debido a que operan a velocidades mayores que los motores estándar o convencionales, pueden ocasionar un incremento en la carga.
- Su momento de arranque puede ser menor que en un motor estándar o convencional.
- La corriente al arranque es mayor, lo que puede provocar que la caída de tensión sobrepase los límites máximos en la red.
- La corriente transitoria en el arranque incrementa, afectando el disparo de la protección del motor, por lo que se tiene que realizar una buena coordinación de protecciones.
- En motores entre los 15 y los 40 HP, el factor de potencia suele ser menor que el de los motores estándar o convencionales.

7.7.3 Recomendaciones.

Si se está considerando adquirir un motor nuevo, se tiene que evaluar económicamente su rentabilidad, es decir, si se va a pagar un costo adicional por adquirir un motor de alta eficiencia, se debe de considerar el ahorro obtenido por un menor consumo energético.

Tomando en cuenta estos factores, un tiempo de retorno de inversión de 2 a 3 años se considerará como aceptable.

Por lo general, el análisis de rentabilidad resulta positivo en los siguientes casos:

- Cuando se tienen motores con potencias entre los 10 y 75 HP y operan por lo menos 2500 horas anuales.
- Cuando se tienen potencias inferiores a 10 HP o mayores a 75 HP y que operan 4500 horas anuales o más.
- Cuando se usan para reemplazar motores sobredimensionados.
- Para accionar bombas o ventiladores que cuenten con variadores electrónicos de frecuencia.

7.7.4 Evaluación económica.

Para determinar los ahorros anuales generados por usar un motor de mayor eficiencia, se tiene que tomar en cuenta el ahorro obtenido por un menor consumo energético y compensar el costo adicional del motor de alta eficiencia. Como se mencionó anteriormente, el tiempo de retorno de la inversión debe de estar entre los 2 y 3 años.

Para calcular el ahorro anual económico cuando se instala un motor de alta eficiencia, se emplea la siguiente fórmula:

Ecuación 54 Ahorro económico anual con motor de alta eficiencia

$$S = 0.746 \text{ HP } L C T \left(\frac{100}{EF_A} - \frac{100}{EF_B} \right)$$

Donde:

- S = Ahorro (pesos)
HP = Potencia nominal del motor (HP)
L = Porcentaje de carga del motor respecto a la potencia nominal
C = Costo de la energía en pesos por kWh
T = Tiempo de funcionamiento del motor en horas por año
EA = Eficiencia del motor estándar
EB = Eficiencia del motor de alta eficiencia

Como es un cálculo de una inversión a largo plazo, se debe de considerar la tasa de interés bancaria. Por lo general se utiliza el método de valor presente para calcular el tiempo en el que se recupera la inversión adicional y la comparación económica se lleva a cabo al comienzo del periodo de inversión. De esta forma, se tiene que el ahorro económico al final de cada año es:

Ecuación 55 Valor presente

$$\text{Valor presente} = \text{Ahorro anual} \times \text{Factor de descuento}$$

Ecuación 56 Factor de descuento

$$\text{Factor de descuento} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\text{tasa de interes en \%}}{100}\right)^{\text{año que transcurre}}}$$

Con la Ecuación 56 se puede calcular el ahorro para un periodo de varios años. Generalmente se calcula para 10 años y el valor presente neto en cada año se obtiene multiplicando el valor del ahorro anual por el factor de descuento y restando el valor de la inversión realizada. Por lo tanto el costo de la inversión será el costo adicional pagado por el motor de alta eficiencia, es decir:

$$\text{Valor presente neto} = \text{Ahorro anual} \times \text{Factor de descuento} - \text{Costo de la inversión}$$

Resulta importante también considerar la elevación del costo de la energía año con año, los impuestos gravados a las utilidades generadas por el ahorro energético y la depreciación del motor. Todos estos aspectos deberán usarse para calcular el presente neto año con año, y la inversión se recupera cuando el valor presente sea igual a cero.

7.8 Controladores electrónicos de velocidad

Los motores deben operar con la carga y velocidad necesarias para un propósito específico, con la mayor eficiencia posible. Para ello pueden utilizarse troceadores de tensión o variadores de frecuencia, aportando ahorros superiores al 30%.

Los troceadores de tensión son equipos electrónicos que al trocear la onda de tensión disminuyen el voltaje eficaz aplicado al motor cuando este disminuye su carga, es decir la tensión que es aplicada al motor depende de la carga de tal forma que el motor opera con un factor de potencia constante, su uso se recomienda cuando se tienen cargas desde 0 a 100%.

Los variadores de frecuencia permiten regular el torque que entrega un motor sin necesidad de recurrir a opciones que demandan más energía que la requerida como lo es: la recirculación de un fluido, la estrangulación del caudal mediante válvulas o la detención del equipo; permitiendo lograr considerables ahorros de energía y algunos beneficios más tales como la disminución del ruido, aumento en la vida útil del motor, mejor control, menor desgaste, etc.

Se han realizado algunos estudios que muestran que las bombas requieren solamente de un 31% de la energía usada, los ventiladores, secadores y compresores un 18% y las bandas transportadoras cerca del 14%. Los ventiladores y las bombas centrífugas son las candidatas ideales para adicionar un variador de frecuencia ya que las cargas que manejan tienen momentos variables permitiendo tener ahorros del 50% o más.

7.9 Usar métodos de mantenimiento centrados en la eficiencia

Es recomendable que operativamente se verifique la eficiencia de los motores y con ello poder decidir sobre las medidas a tomar. Estas mediciones deben realizarse en operación de los equipos sin perturbar la producción. Si el motor opera por debajo de un 80% de su carga nominal debe replantearse su potencia ya que la potencia nominal tendrá un factor de potencia bajo.

7.9.1 Reparación eficiente de motores eléctricos

El rebobinado de un motor puede reducir su eficiencia entre un 2% y un 4% si se realiza bajo técnicas inadecuadas, por eso es necesario que cuando se decida rebobinar un motor se realice con expertos profesionales que aseguren la eficiencia. A continuación se enlistan algunas de las técnicas utilizadas para conservar la eficiencia de un motor:

- Horno de Pirolisis. En donde se somete el bobinado a una temperatura controlada de 350°C con el objetivo de retirarlo del núcleo magnético sin dañar sus láminas.
- Conservar el calibre de conductor, el número de vueltas y la longitud de las bobinas. Con esto se asegura que la resistencia del bobinado no varíe y no aumenten las pérdidas que se generan en los conductores del estator.
- Hay ocasiones en las que se recomienda de ser posible aumentar el calibre y disminuir la longitud de las bobinas para ayudar a disminuir las pérdidas en los conductores del estator.

7.9.2 Reemplazar en lugar de rebobinar.

Si un motor está fallando y debe ser reparado, hay que pensar en si es conveniente repararlo o sustituirlo por un motor de alta eficiencia. Se debe tomar en cuenta que por cada reparación la eficiencia del motor puede verse alterada.

A continuación se enlistan ciertos criterios que hay que tomar en cuenta para decidir entre reparar y reemplazar el motor:

- Condición y la edad del motor.
- Historial del reparaciones del motor
- El potencial ahorro que puede lograrse al cambiarlo por un motor de alta eficiencia.

7.10 Resumen

Para reducir el consumo de energía en motores eléctricos el primer paso a tomar en cuenta es el cálculo adecuado de la potencia del motor, puesto que cuando un motor es operado cerca de sus condiciones nominales su eficiencia y su factor de potencia contribuirán al buen uso de la energía eléctrica.

Es importante desechar las prácticas tradicionales en las compras de motores que solo consideran el costo inicial, se debe considerar que el costo del motor solo representa un pequeño porcentaje respecto al costo del consumo de energía eléctrica durante su ciclo de vida.

Se tiene que evaluar constantemente la calidad de la potencia eléctrica entregada por el suministrador ya que es un elemento de suma importancia para la operación eficiente de los motores eléctricos. Los parámetros más importantes a tomar en cuenta son: La distorsión armónica de la red, la cual no debe ser mayor a 0.05, la tensión no debe tener variaciones mayores del $\pm 5\%$ y el desequilibrio de tensiones no debe ser mayor de 2%.

Para optimizar un motor y sus controles es poco lo que uno puede realizar si el equipo y el proceso son eficientes. Sin embargo, existen técnicas económicas para reducir las cargas sobre el motor, las cuales son un excelente punto de partida para mejorar la eficiencia del sistema y con ello contribuir a la reducción del consumo de energía.

Los variadores de frecuencia son utilizados cuando las cargas tienen torques variables, siendo las bombas y los ventiladores los mejores candidatos para usar esta tecnología en el ahorro de energía. Al disminuir la velocidad de operación, disminuirá la potencia requerida por el motor, lo cual nos permitirá tener ahorros del 50% o más.

El mantenimiento en los motores eléctricos también juega un rol importante. Al asegurar una adecuada operación del motor, se logra eliminar tiempos de paro y operar más eficientemente.

Al decidir reparar un motor, se debe de asegurar un proceso de reparación de calidad que asegure mantener o incluso mejorar la eficiencia del mismo y garantizar que no fallará al ponerlo de vuelta en funcionamiento.

8 EJEMPLOS

8.1 Ejemplo 1

¿Cuál es el factor de carga, el deslizamiento y la eficiencia de un motor de 30 HP, con una velocidad de placa de 3,570 RPM, el cual registro una potencia trifásica de 25.5 kW? Se tomaron las RPM del rotor con un tacómetro y fue de 3580 RPM. Se tiene una velocidad síncrona de 3,600 RPM. El motor opera 6,240 horas al año.

La energía consumida actualmente por el motor es de:

$$\text{Energía [kWh]} = 25.5 \text{ [kW]} \times 6,240 \text{ horas/año} = 159,120 \text{ [kWh]}$$

El deslizamiento está determinado por:

$$\text{Deslizamiento} = \text{velocidad sincronismo [RPM]} - \text{velocidad del rotor [RPM]}$$

$$\text{Deslizamiento} = 3600 \text{ [RPM]} - 3585 \text{ [RPM]} = 15 \text{ [RPM]}$$

El factor de carga está dado por:

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Deslizamiento}}{\text{RPM}_{\text{síncronas}} - \text{RPM}_{\text{de placa}}}$$

$$\text{Factor de carga} = \frac{15}{3600 \text{ [RPM]} - 3570 \text{ [RPM]}} \times 100 = 50 \%$$

La eficiencia del motor está dada por:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\text{Potencia eléctrica}} \times 100$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{\frac{30 \text{ [HP]}}{1 \text{ [HP]}} \times 0.746 \text{ [kW]}}{25.5 \text{ [kW]}} \times 100 = 87.76\%$$

La potencia real entregada según su factor de carga está dada por:

$$\text{HP salida} = \text{Factor de carga} \times \text{Potencia de placa}$$

$$\text{HP salida} = 0.5 \times 30 \text{ [HP]} = 15 \text{ [HP]}$$

Se piensa cambiar el motor en cuestión por un motor de alta eficiencia con exactamente los mismos datos pero de eficiencia de 94% a 50% de carga.

$$\text{Potencia eléctrica} = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\text{Eficiencia}}$$

$$\text{Potencia eléctrica} = \frac{\frac{30 \text{ [HP]}}{1 \text{ [HP]}} \times 0.746 \text{ [kW]}}{0.94} = 23.80 \text{ [kW]}$$

El ahorro por mejora en la eficiencia del motor a sustituir es de:

$$\text{Ahorro} = 25.5 \text{ [kW]} - 23.8 \text{ [kW]} = 1.7 \text{ [kW]}$$

8.2 Ejemplo 2

Manteniendo la operación del mismo motor del ejemplo anterior, a la misma razón de carga constante durante 6,240 horas al año. ¿Cuánto ahorro se obtuvo por la sustitución del motor y cuanto es el tiempo de retorno de la inversión?

$$\text{Ahorros anuales} = 1.7 \text{ [kW]} \times 6,240 \text{ [h]} = 10,608 \text{ kWh/año}$$

Suponiendo un costo por cada kWh de 1.55 pesos, el ahorro anual es:

$$\text{Ahorro anual} = \$ 16,442.4$$

La recuperación de la inversión para un motor Premium, suponiendo un costo del motor de 68,250 es de:

$$\text{TRS} = \$68,250 / \$16,442.4 = 4.15 \text{ años}$$

8.3 Ejemplo 3

Si el motor está trabajando a una carga del 50% y el motor utilizado es de 30 HP, ¿será factible el sustituir el motor por uno de menor potencia (25 HP) para que funcione a mayor carga pero con menor consumo eléctrico?

Se propone un motor de 25 HP con una eficiencia del 94 %.

$$\text{Potencia eléctrica} = \frac{\frac{20 [\text{HP}]}{1[\text{HP}]} \times 0.746 [\text{kW}]}{0.94} = 15.87 [\text{kW}]$$

El motor actual de 30 HP y con un FC de 50% lleva una carga en su eje de

$$\text{HP eje} = \frac{30 [\text{HP}]}{1[\text{HP}]} \times 0.746 [\text{kW}] \times 50\% = 11.19 [\text{kW}]$$

El nuevo motor con 20 HP puede operar bajo las mismas condiciones de operación con un factor de carga de:

$$\text{Factor de carga} = \frac{11.19 [\text{kW}]}{20 [\text{HP}] \times 0.746 [\text{kW}]} = 75\%$$

El motor de 20 HP puede operar sin problemas con esa carga y el ahorro de energía sería de:

$$\begin{aligned} \text{Ahorros anuales} &= 25.50 [\text{kW}] - 11.19 [\text{kW}] = 14.31 \text{ kW} \\ \text{Ahorros anuales} &= 14.31 [\text{kW}] \times 6240 [\text{h/año}] = 89,294.40 \text{ kWh} \\ \text{Tomando el kWh a 1.55 pesos, entonces:} \\ \text{Ahorro anual} &= \$1.55 \times 89,294.40 [\text{kWh}] = 138,406.32 \end{aligned}$$

8.4 Ejemplo 4

Una bomba centrífuga requiere 100 HP para el flujo de diseño. Se asume que el costo de energía es de 0.07 USD/kWh y el costo del VSD más su instalación es de 8,800 USD.

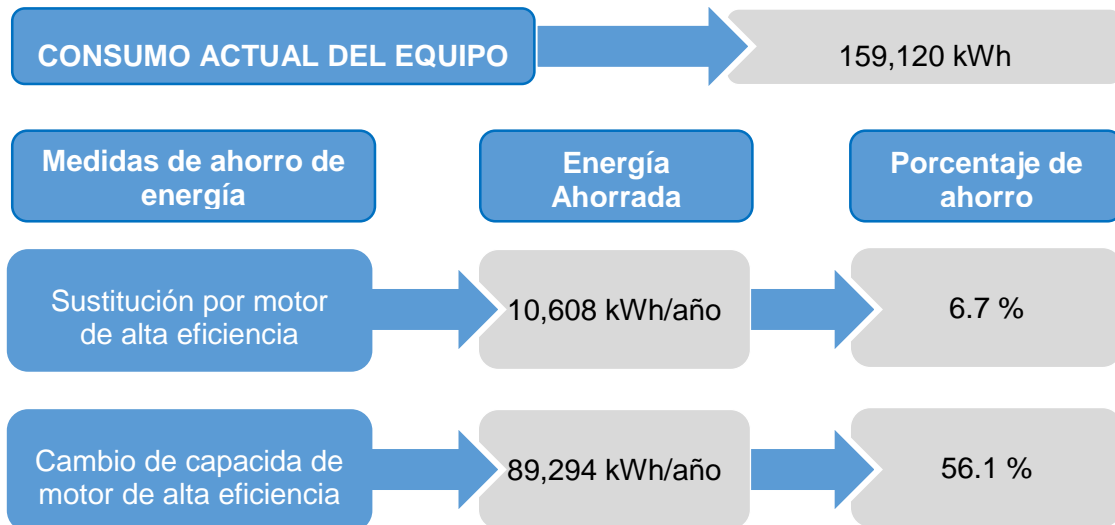
Se ha determinado que el flujo requerido varía de 40% a 90% con la capacidad de diseño.

¿En cuánto tiempo se recupera la inversión?

Si el motor opera a velocidad fija tiene un consumo anual de 544,923 kWh lo que da un costo anual de operación de 38,145 USD.

Si se utiliza el motor con el VSD el consumo anual del equipo será de 228,450 kWh, lo que da un costo de 15,991 USD, como el costo del VSD más su instalación fue de 8,800 USD, se tendrá un ahorro anual de 22,153 USD y la inversión se recuperará en 4.8 meses.

8.5 Resumen de ejemplos anteriores



Bibliografía

1. Energie+, Architecture et Climat, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4. Disponible sobre: <http://www.energieplus-lesite.be> ".
2. Memotech genie energetique, collection A. Capliez
3. Buenas prácticas energéticas para Motores eléctricos Industriales - GIZ
4. Motores Monofásicos-conceptos básicos - Universidad Nacional Experimental del Táchira- Departamento de Ingeniería Electrónica
5. La Machine synchrone monphasee et biphasée dans les automatismos – jean francois HILAIRE
6. Cahier technique n°207- Les moteurs electriques- Schneider electric
7. Guide de référence sur l'efficacité énergétique de MOTEURS – natural resources Canada
8. Revista Energia Hoy – Diversos artículos de la sección técnica”

Páginas electrónicas:

<http://www.energieplus-lesite.be/>

<http://e-ducative.catedu.es/>

<http://sitelec.org/>

<http://redsocialeducative.euroinnova.edu.es/>

<http://www.idae.es/>

ANEXO 1: Unidades y magnitudes

Tabla 10 Unidades y magnitudes Corriente continua

Corriente continua				
Cantidad eléctrica	Cantidad	Intensidad	Tiempo	
	$Q = I \times t$			
	C	A	s	
Energía	Energía	Tensión	Cantidad	
	$W = U \times Q$			
	J	V	C	
	Energía	Tensión	Intensidad	Tiempo
	$W = U \times I \times t$			
	J	V	A	s
	Energía	Potencia	Tiempo	
	$W = P \times t$			
Potencia	J	W	s	
	Potencia	Tensión	Intensidad	
	$P = U \times I$			
Ley de ohm	W	V	A	
	Tensión	Resistencia	Intensidad	
	$U = R \times I$			
Resistencia de un conductor	V	Ω	A	
	Resistencia	Resistividad	Longitud	
	$R = \rho \times l/s$			
	Ω	$\Omega \text{ m}$	m	
			m ²	
Ley de Joule	Energía	Resistencia	Intensidad	Tiempo
	$W = R \times I^2 \times t$			
	J	Ω	A	s

Capacitor	Carga	Capacitancia	Tensión	
	$Q = C \times U$			
	C	F	V	
Energía almacenada en un capacitor	Energía	Capacitancia	Tensión	
	$W = 1/2 C \times U^2$			
	J	F	V	

Tabla 11 Unidades y magnitudes Corriente alterna monofásica

Corriente alterna monofásica					
Tensión instantánea	Valor instantáneo	Valor máximo	Velocidad angular	Tiempo	
	$U = U_m \times \sin(\omega \times t)$				
	V	V	Rad/s	s	
Velocidad angular	Velocidad angular		Frecuencia		
	$\omega = 2\pi \times f$				
	Rad/s		Hz		
Frecuencia	Frecuencia		Periodo		
	$f = 1 / T$				
	Hz		s		
Potencia Activa	Potencia	Tensión	Intensidad	Factor de potencia	
	$P = U \times I \times \sin \phi$				
	W	V	A		
Potencia Aparente	Potencia	Tensión	Intensidad		<p>$\cos \phi$ es el factor de potencia</p>
	$S = U \times I$				
	VA	V	A		
Potencia Reactiva	Potencia	Tensión	Intensidad		<p>$\cos \phi - P/S$ $\tan \phi - Q/P$ $\sin \phi - Q/S$</p>
	$Q = U \times I \times \sin \phi$				
	VAR	V	A		

Relación entre potencias	Aparente	Activa	Reactiva	
	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$			
	VA	W	VA _r	
Impedancia	Tensión	Impedancia	Intensidad	
	$U = Z \times I$			
	V	Ω	A	
Inductancia	Tensión	Inductancia	Velocidad angular	Intensidad
	$U = L \times \omega \times I$			
	V	H	Rad/s	A
	Impedancia	Inductancia	Velocidad angular	
	$Z = L \times \omega$			
	Ω	H	Rad/s	
Capacitancia	Tensión	Capacitancia	Velocidad angular	Intensidad
	$U = [1/C \times \omega] \times I$			
	V	F	Rad/s	A
	Impedancia	Capacitancia	Velocidad angular	
	$Z = 1 / [C \times \omega]$			
	Ω	F	Rad/s	

Tabla 12 Unidades y magnitudes Corriente alterna trifásica

Corriente alterna trifásica				
Tensión	Tensión compuesta	Tensión simple		
	$U = V \times \sqrt{3}$			
	V	V		
Potencia Activa	Potencia	Tensión	Intensidad	Factor de potencia
	$P = U \times I \times \sqrt{3} \sin \phi$			
	W	V	A	
Potencia Aparente	Potencia	Tensión	Intensidad	
	$S = U \times I \times \sqrt{3}$			
	VA	V	A	
Potencia Reactiva	Potencia	Tensión	Intensidad	
	$Q = U \times I \times \sqrt{3} \cos \phi$			
	VAr	V	A	

