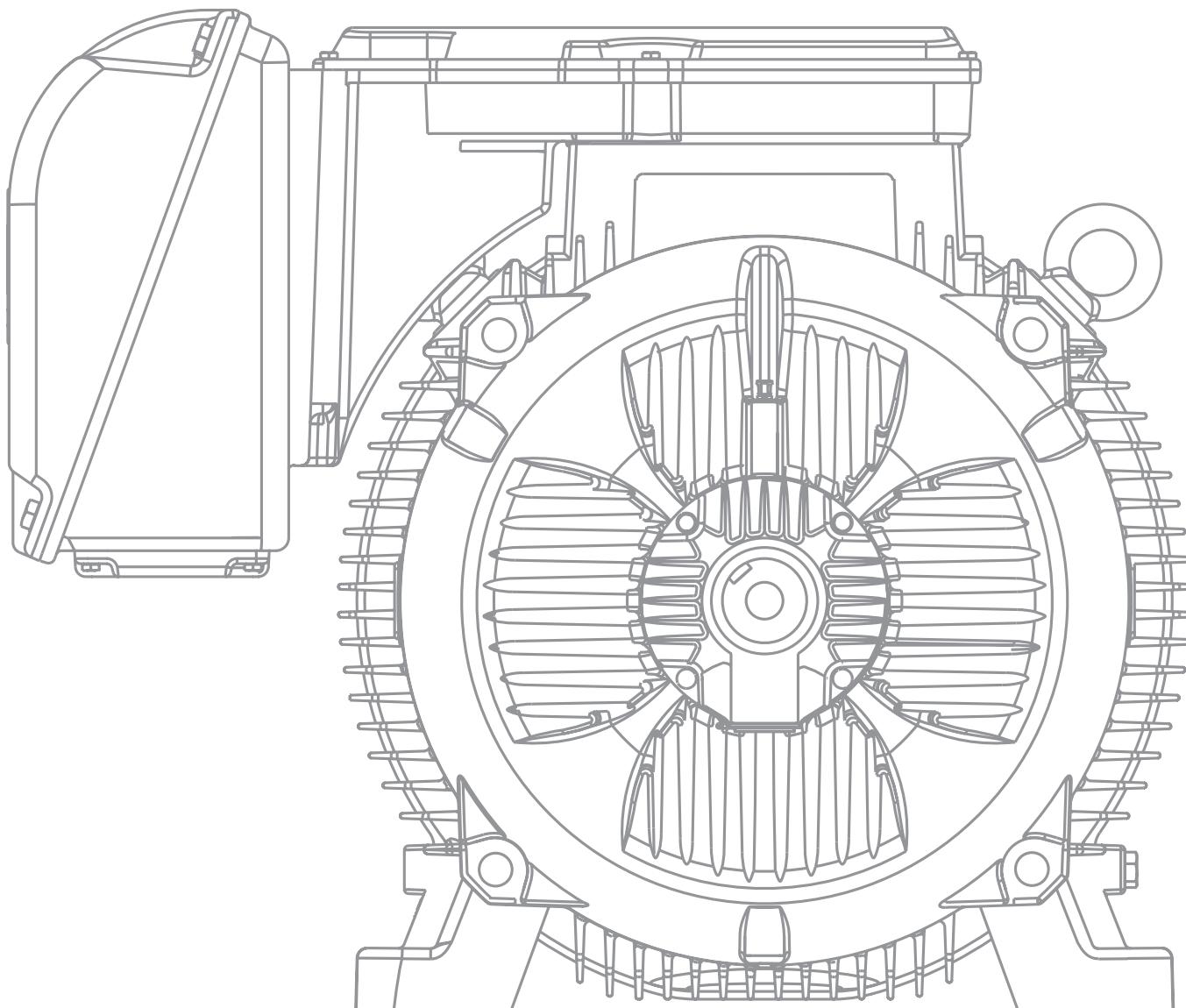


Driving efficiency and sustainability



GUÍA DE ESPECIFICACIÓN MOTORES ELÉCTRICOS



Especificación de Motores Eléctricos

Donde quiera que haya progreso, la presencia del motor eléctrico es imprescindible. Desempeñando un importante papel en la sociedad, los motores son el corazón de las máquinas modernas, por esa razón es necesario conocer sus principios fundamentales de funcionamiento, desde la construcción hasta las aplicaciones.

La guía de Especificación de Motores Eléctricos WEG auxilia de manera simple y objetiva a aquellos que compran, venden y trabajan con esos equipamientos, trayendo instrucciones de manipulación, uso y funcionamiento de los más diversos tipos de motores.

En la era de las máquinas modernas, los motores eléctricos son el combustible de la innovación.

Este material tiene como objetivo presentar a todos los apasionados por la electricidad, el crecimiento continuo de las nuevas tecnologías, sin perder la simplicidad de lo fundamental en el universo de la energía.



Índice

1. Nociones Fundamentales	6	5. Regulación de la Velocidad de Motores Asíncronos de Inducción	30
1.1 Motores Eléctricos.....	6	5.1 Variación del Número de Polos.....	30
1.2 Conceptos Básicos	7	5.1.1 Motores de Dos Velocidades con Devanados Independientes.....	30
1.2.1 Conjulado.....	7	5.1.2 Dahlander	30
1.2.2 Energía y Potencia Mecánica.....	7	5.1.3 Motores con Más de Dos Velocidades	31
1.2.3 Energía y Potencia Eléctrica	7	5.2 Variación del Deslizamiento	31
1.2.4 Potencias Aparente, Activa y Reactiva.....	8	5.2.1 Variación de la Resistencia Rotórica	31
1.2.5 Factor de Potencia.....	9	5.2.2 Variación de la Tensión del Estator	31
1.2.6 Rendimiento	11	5.3 Convertidores de Frecuencia.....	31
1.2.7 Relación entre Conjulado y Potencia.....	11		
1.3 Sistemas de Corriente Alterna Monofásica	11		
1.3.1 Conexiones en Serie y en Paralelo	11		
1.4.2 Conexión Estrella.....	12		
1.4 Sistemas de Corriente Alterna Trifásica	12		
1.4.1 Conexión Triángulo.....	12		
1.5 Motor de Inducción Trifásico	13		
1.5.1 Principio de Funcionamiento - Campo Girante	13		
1.5.2 Velocidad Síncrona (ns)	14		
1.5.3 Deslizamiento (s).....	15		
1.5.4 Velocidad Nominal.....	15		
1.6 Materiales y Sistemas de Aislamiento.....	15		
1.6.1 Material Aislante	15		
1.6.2 Sistema Aislante	15		
1.6.3 Clases Térmicas	15		
1.6.4 Materiales Aislantes en Sistemas de Aislamiento	16		
1.6.5 Sistemas de Aislamiento WEG	16		
2. Características de la Red de Alimentación.	18	6. Motofreno Trifásico.....	31
2.1 El Sistema.....	18	6.1 Funcionamiento del Freno	32
2.1.1 Trifásico	18	6.2 Esquemas de Conexión.....	32
2.1.2 Monofásico.....	18	6.3 Alimentación de la Bobina de Freno	33
3. Características de Alimentación del Motor Eléctrico	18	6.4 Conjulado de Frenado	33
3.1 Tensión Nominal	18	6.5 Ajuste del Entrehierro	33
3.1.1 Tensión Nominal Múltiple.....	18		
3.2 Frecuencia Nominal (Hz)	19		
3.2.1 Conexión en Frecuencias Diferentes	19		
3.3 Tolerancia de Variación de Tensión y Frecuencia..	20		
3.4 Limitación de la Corriente de Arranque en Motores Trifásicos	20		
3.4.1 Arranque Directo	20		
3.4.2 Arranque con Llave Estrella-Triángulo (Y - Δ)	21		
3.4.3 Arranque con Llave Compensadora (Autotransformador)	23		
3.4.4 Comparación entre Llaves Estrella-Triángulo y Compensadoras "Automáticas"	24		
3.4.5 Arranque con Llave Serie-Paralelo	24		
3.4.6 Arranque Electrónico (Soft-Starter)	25		
3.5 Sentido de Rotación de Motores de Inducción Trifásicos	25		
4. Características de Aceleración.....	25	7. Características en Régimen	34
4.1 Conjugados	25	7.1.1 Calentamiento del Devanado	34
4.1.1 Curva Conjulado X Velocidad	25	7.1.2 Vida Útil del Motor	35
4.1.2 Categorías - Valores Mínimos Normalizados de Conjulado.....	26	7.1.3 Clases de Aislamiento	35
4.1.3 Características de los motores WEG	28	7.1.4 Medida de Elevación de Temperatura del Devanado	35
4.2 Inercia de la Carga.....	28	7.1.5 Aplicación a Motores Eléctricos	36
4.3 Tiempo de Aceleración.....	28	7.2 Protección Térmica de Motores Eléctricos	36
4.4 Régimen de Arranque.....	29	7.2.1 Termorresistores (Pt-100)	36
4.5 Corriente de Rotor Bloqueado.....	29	7.2.2 Termistores (PTC y NTC)	36
4.5.1 Valores Máximos Normalizados	29	7.2.3 Protectores Térmicos Bimetálicos - Termostatos	37
		7.2.4 Protectores Térmicos Fenólicos	38
		7.3 Régimen de Servicio	39
		7.3.1 Regímenes Estandarizados	39
		7.3.2 Designación del Régimen Tipo	42
		7.3.3 Potencia Nominal	43
		7.3.4 Potencias Equivalentes para Cargas de Pequeña Inercia	43
		7.4 Factor de Servicio (FS)	44
		8. Características de Ambiente	44
		8.1 Altitud	44
		8.2 Temperatura Ambiente	44
		8.3 Determinación de la Potencia Útil del Motor en las Diversas Condiciones de temperatura y Altitud	44
		8.4 Atmósfera Ambiente	45
		8.4.1 Ambientes Agresivos	45
		8.4.2 Ambientes Conteniendo Polvo o Fibras	45
		8.4.3 Ambientes Explosivos	45
		8.5 Grado de Protección	45
		8.5.1 Código de Identificación	45
		8.5.2 Tipos Usuales de Grados de Protección	46
		8.5.3 Motores a Prueba de Intemperies	46
		8.6 Resistencia de Calentamiento	46
		8.7 Límites de Ruidos	47

9. Atmósferas Explosivas48

9.1	Áreas de Riesgo	48
9.2	Atmósfera Explosiva.....	48
9.3	Clasificación de las Áreas de Riesgo	48
9.3.1	Clases y Grupos de Áreas de Riesgo	48
9.3.2	Tipo de Protección del Envoltorio	49
9.4	Clases de Temperatura.....	50
9.5	Equipos para Áreas de Riesgo	50
9.6	Equipos de Seguridad Aumentada.....	50
9.7	Equipos a Prueba de Explosión.....	51

10. Características Constructivas51

10.1	Dimensiones.....	51
10.2	Formas Constructivas Normalizadas	52
10.3	Dimensiones de las Bridas	54
10.4	Pintura	55
10.4.1	Pintura Tropicalizada o Tropicalización	55

11. Selección y Aplicación de los Motores Trifásicos55

11.1	Selección del Tipo de Motor para Diferentes Cargas	57
11.2	W22 Magnet Drive System®	58
11.3	Aplicación de Motores de Inducción Alimentados por Convertidores de Frecuencia	58
11.3.1	Aspectos Normativos	58
11.3.2	Variación de la Velocidad del Motor por Medio de Convertidores de Frecuencia.....	58
11.3.3	Características de los Convertidores de Frecuencia	59
11.3.3.1	Modos de Control.....	59
11.3.3.2	Armónicas	60
11.3.4	Influencia del Convertidor en el Desempeño del Motor	60

12. Informaciones Ambientales.....63

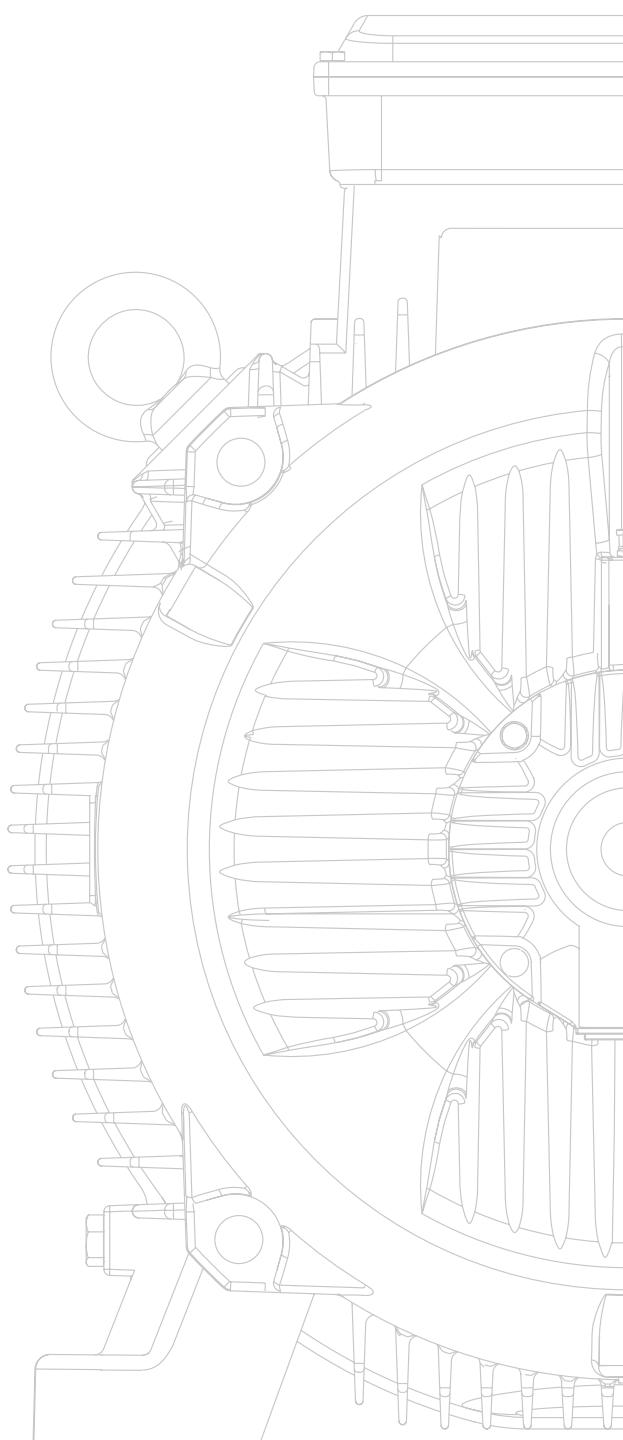
12.1	Embalaje.....	63
12.2	Producto.....	63

13. Ensayos63

13.1	Motores Alimentados por Convertidores de Frecuencia.....	63
------	--	----

14. Anexos64

14.1	Sistema Internacional de Unidades - SI	64
14.2	Conversión de Unidades	65
14.3	Norma	66



1. Nociones Fundamentales

1.1 Motores Eléctricos

El motor eléctrico es la máquina destinada a transformar energía eléctrica en energía mecánica. El motor de inducción es el más usado de todos los tipos de motores, ya que combina las ventajas de la utilización de energía eléctrica - bajo costo, facilidad de transporte, limpieza, simplicidad de comando - con su construcción simple y su gran versatilidad de adaptación a las cargas de los más diversos tipos y mejores rendimientos. Los tipos más comunes de motores eléctricos son:

a) Motores de corriente continua

Son motores de costo más elevado y, además de eso, precisan una fuente de corriente continua, o un dispositivo que convierta la corriente alterna común en continua. Pueden funcionar con velocidad ajustable, entre amplios límites y se prestan a controles de gran flexibilidad y precisión. Por eso, su uso es restricto a casos especiales en que estas exigencias compensan el costo mucho más alto de la instalación y del mantenimiento.

El Universo Tecnológico de los Motores Eléctricos

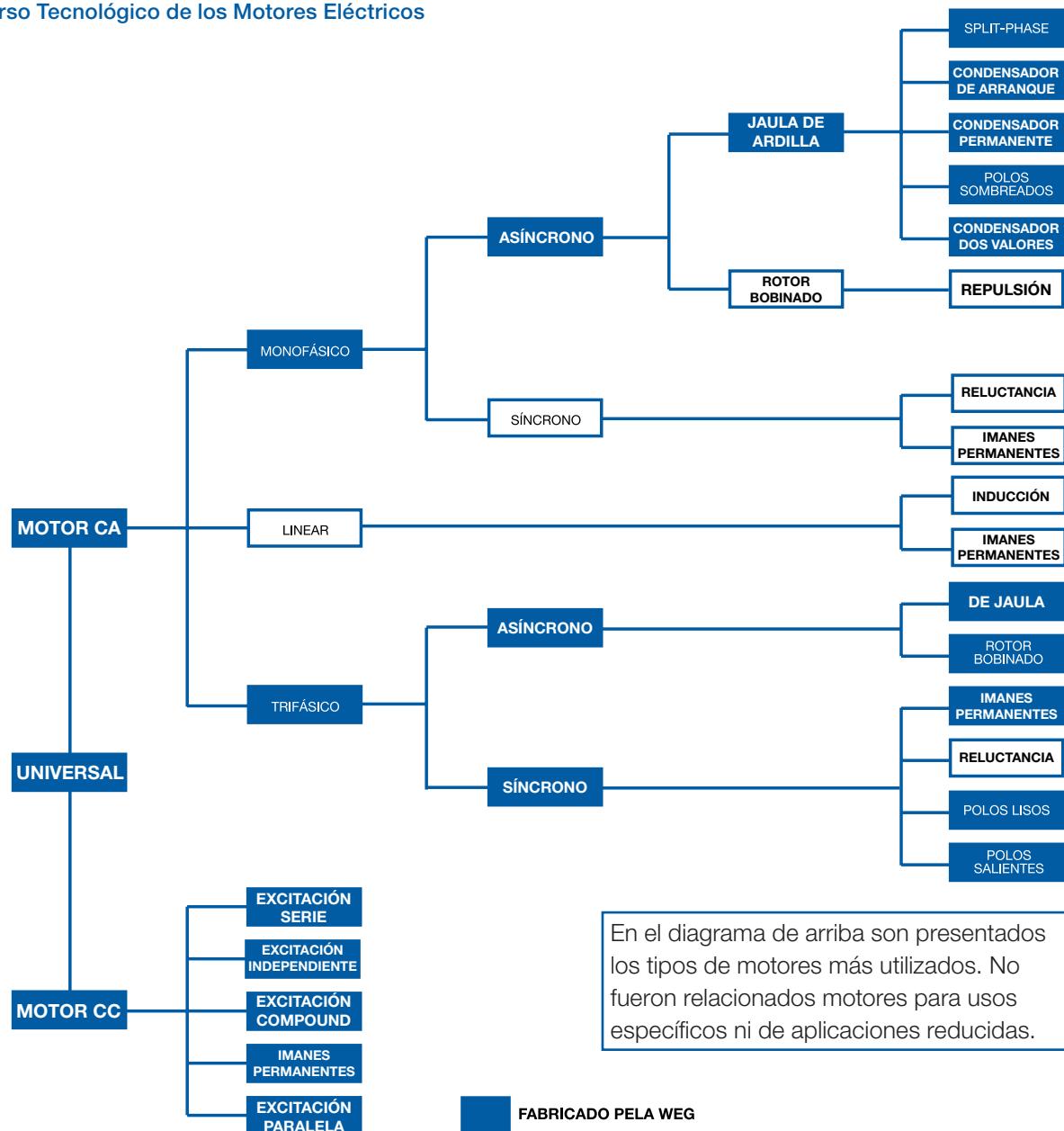


Tabla 1.1

1.2 Conceptos Básicos

A seguir son presentados los conceptos de algunas grandes báscicas, cuya comprensión es necesaria para seguir correctamente las explicaciones de las otras partes de esta guía.

1.2.1 Conjugado

El conjugado (también llamado par o momento) es la medida del esfuerzo necesario para girar un eje. Por la experiencia práctica se observa que para levantar un peso por un proceso semejante al usado en pozos (figura 1.1) la fuerza F que es precisa aplicar a la manivela, depende de la longitud E de la misma. Cuanto mayor sea la manivela, menor será la fuerza necesaria. Si doblamos el tamaño E de la manivela, la fuerza F necesaria será disminuida a la mitad. En el ejemplo de la figura 1.1, si el balde pesa 20 N y el diámetro del tambor es de 0,20 m, la cuerda transmitirá una fuerza de 20 N en la superficie del tambor, es decir, a 0,10 m del centro del eje. Para contrabalancear esta fuerza, se precisa de 10 N en la manivela, si la longitud E es de 0,20 m. Si E es el doble, es decir, 0,40 m, la fuerza F será la mitad, o sea 5 N. Como vemos, para medir el "esfuerzo" necesario para girar el eje, no basta definir la fuerza empleada: es preciso también decir a qué distancia del centro eje la fuerza es aplicada. El "esfuerzo" es medido por el conjugado, que es el producto de la fuerza por la distancia, $F \times E$. En el ejemplo citado, el conjugado vale:

$$C = 20 \text{ N} \times 0,10 \text{ m} = 10 \text{ N} \times 0,20 \text{ m} = 5 \text{ N} \times 0,40 \text{ m} = 2,0 \text{ Nm}$$

$$C = F \cdot E \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

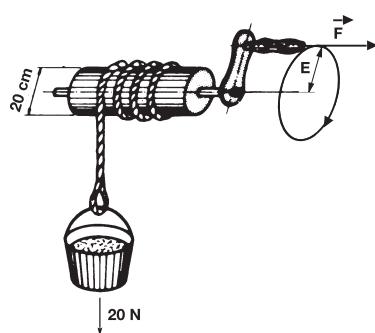


Figura 1.1

1.2.2 Energía y Potencia Mecánica

La potencia mide la "velocidad" con que la energía es aplicada o consumida. En el ejemplo anterior, si el pozo tiene 24,5 metros de profundidad, la energía gastada, o trabajo (W) realizado para traer el balde desde el fondo hasta la boca del pozo, es siempre la misma, valiendo:

$$20 \text{ N} \times 24,5 \text{ m} = 490 \text{ Nm}$$

Nota: la unidad de medida de energía mecánica, Nm, es la misma que usamos para el conjugado - se trata, no obstante, de grandes de naturalezas diferentes, que no deben ser confundidas.

$$W = F \cdot d \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

OBS.: 1 Nm = 1 J = potencia x tiempo = Watts x segundo

La potencia expresa la rapidez con que esta energía es aplicada y se calcula dividiendo la energía o trabajo total por el tiempo gastado en realizarlo.

Entonces, si usamos un motor eléctrico capaz de levantar el balde de agua en 2,0 segundos, la potencia necesaria será:

$$P_{\text{mec}} = \frac{F \cdot d}{t} \quad (\text{W})$$

$$P_1 = \frac{490}{2,0} = 245 \text{ W}$$

Si usamos un motor más potente, con capacidad de realizar el trabajo en 1,3 segundos, la potencia necesaria será:

$$P_2 = \frac{490}{1,3} = 377 \text{ W}$$

La unidad usada en Brasil para medida de potencia mecánica y el cv (caballo-vapor), equivalente a 0,736 kW (unidad de medida utilizada internacionalmente para el mismo fin).

Relación entre unidades de potencia:

$$P (\text{kW}) = 0,736 \cdot P (\text{cv})$$

$$P (\text{cv}) = 1,359 \cdot P (\text{kW})$$

Entonces las potencias de los dos motores de arriba serán:

$$P_1 = \frac{245}{736} = \frac{1}{3} \text{ cv} \quad P_2 = \frac{377}{736} = \frac{1}{2} \text{ cv}$$

Para movimientos circulares:

$$C = F \cdot r \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (\text{m/s})$$

$$P_{\text{mec}} = \frac{F \cdot d}{736 \cdot t} \quad (\text{cv})$$

Donde: C = conjugado en Nm

F = fuerza en N

r = radio de la polea en m

v = velocidad angular en m/s

d = diámetro de la patasza en m

n = velocidad en rpm

1.2.3 Energía y Potencia Eléctrica

Aunque la energía sea una sola cosa, la misma puede presentarse de formas diferentes. Se conectamos una resistencia a una red eléctrica con tensión, pasará una corriente eléctrica que calentará la resistencia. La resistencia absorbe energía eléctrica y la transforma en calor, que también es una forma de energía. Un motor eléctrico absorbe energía eléctrica de la red y la transforma en energía mecánica disponible en la punta del eje.

Circuitos de corriente continua

La “potencia eléctrica”, en circuitos de corriente continua, puede ser obtenida a través de la relación de la tensión (U), corriente (I) y resistencia (R) implicadas en el circuito, o sea:

$$P = U \cdot I \quad (\text{W})$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (\text{W})$$

$$P = R \cdot I^2 \quad (\text{W})$$

Donde:
U = tensión en Volt
I = corriente Amper
R = resistencia en Ohm
P = potencia media en Watt

Circuitos de corriente alterna

a) Resistencia

En el caso de las “resistencias”, cuanto mayor sea la tensión de la red, mayor será la corriente y más deprisa la resistencia se calentará. Esto quiere decir que la potencia eléctrica será mayor. La potencia eléctrica absorbida de la red, en el caso de la resistencia, es calculada multiplicándose la tensión de la red por la corriente, si la resistencia (carga), es monofásica.

$$P = U_f \cdot I_f \quad (\text{W})$$

En el sistema trifásico, la potencia en cada fase de la carga será $P_f = U_f \times I_f$, como si fuese un sistema monofásico independiente. La potencia total será la suma de las potencias de las tres fases, o sea:

$$P = 3P_f = 3 \cdot U_f \cdot I_f$$

Recordando que el sistema trifásico está conectado en estrella o triángulo, tenemos las siguientes relaciones:

$$\text{Conexión estrella: } U = \sqrt{3} \cdot U_f \text{ e } I = I_f$$

$$\text{Conexión triángulo: } U = U_f \text{ e } I = \sqrt{3} \cdot I_f$$

De esta forma, la potencia total, para ambas conexiones, será:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (\text{W})$$

Nota: esta expresión vale para la carga formada por resistencias, donde no hay desfasaje de la corriente.

b) Cargas reactivas

Para las “cargas reactivas”, o sea, donde existe desfasaje entre el ángulo de la tensión y de la corriente, como es el caso de los motores de inducción, este desfasaje tiene que ser considerado y la expresión queda:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{W})$$

Donde:
U = Tensión de línea
I = Corriente de línea
 $\cos \varphi$ = Ángulo de desfasaje entre la tensión y la corriente de fase.

La unidad de medida usual para potencia eléctrica y el Watt (W), correspondiente a 1 Volt x 1 Amper, o su múltiplo, el kilowatt = 1.000 Watts. Esta unidad también es usada para medida de potencia mecánica. La unidad de medida usual para energía eléctrica es el kilo-watt-hora (kWh) correspondiente a la energía suministrada por una potencia de 1 kW funcionando durante una hora - es la unidad que aparece para cobranza en las cuentas de luz.

1.2.4 Potencias Aparente, Activa y Reactiva

Potencia aparente (S)

Es el resultado de la multiplicación de la tensión por la corriente ($S = U \cdot I$ para sistemas monofásicos y $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$, para sistemas trifásicos). Corresponde a la potencia que existiría si. No hubiese desfasaje de la corriente, o sea, si la carga fuese formada por resistencias. Entonces:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (\text{VA})$$

Evidentemente, para las cargas resistivas, $\cos \varphi = 1$ y la potencia activa se confunde con la potencia aparente. La unidad de medida para potencia aparente es el Volt-Amper (VA) o su múltiplo, el kilo-Volt-Amper (kVA).

Potencia activa (P)

Es la cantidad de potencia aparente que realiza trabajo, o sea, que es transformada en energía.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{W}) \text{ ou } P = S \cdot \cos \varphi \quad (\text{W})$$

Potencia reactiva (Q)

Es la cantidad de potencia aparente que “no” realiza trabajo. Solamente es transferida y almacenada en los elementos pasivos (condensadores e inductores) del circuito.

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (\text{Var}) \text{ ou } Q = S \cdot \sin \varphi \quad (\text{Var})$$

Triángulo de potencias

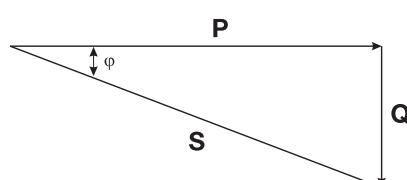


Figura 1.2 - Triángulo de potencias (carga inductiva).

1.2.5 Factor de Potencia

El factor de potencia, indicado por $\cos \varphi$, donde φ y el ángulo de desfasaje de la tensión en relación a la corriente, es la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S)

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P (\text{kW}) \cdot 1.000}{3 \cdot U \cdot I}$$

Así,

- Carga Resistiva: $\cos \varphi = 1$
- Carga Inductiva: $\cos \varphi$ atrasado
- Carga Capacitiva: $\cos \varphi$ adelantado

Nota: los términos, atrasado y adelantado, se refieren al ángulo de la corriente en relación a la tensión.

Un motor no consume solamente potencia activa, que luego es convertida en trabajo mecánico y calor (pérdidas), sino que también consume potencia reactiva, necesaria para la magnetización que no produce trabajo. En el diagrama de la figura 1.3, el vector P representa la potencia activa y el Q la potencia reactiva, que sumadas resultan en la potencia aparente S .

Importancia del factor de potencia

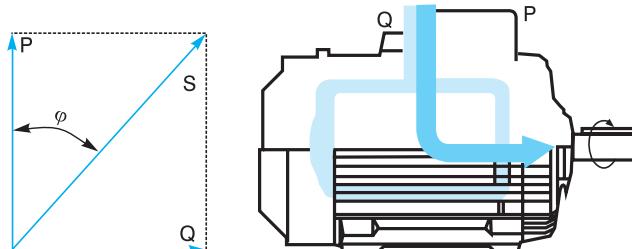
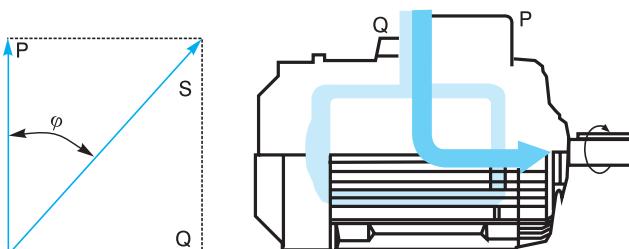


Figura 1.3 - El factor de potencia es determinado midiéndose la potencia de entrada, la tensión y la corriente de carga nominal.



Con el objetivo de optimizar el aprovechamiento del sistema eléctrico brasileño, reduciendo el tránsito de energía reactiva en las líneas de transmisión, subtransmisión y distribución, el decreto del DNAEE número 85, de 25 de marzo de 1992, determina que el factor de potencia de referencia de las cargas pasa de 0,85 a 0,92. El cambio del factor de potencia, otorga mayor disponibilidad de potencia activa al sistema, ya que la energía reactiva limita la capacidad de transporte de energía útil (activa).

El motor eléctrico es una pieza fundamental, ya que dentro de las industrias, representa más de 60% del consumo de energía. Con esto, es imprescindible la utilización de motores con potencia y características correctamente adecuadas a su función, ya que el factor de potencia varía con la carga del motor.

Corrección del factor de potencia

El aumento del factor de potencia es realizado con la conexión de una carga capacitativa, en general, un condensador o motor síncrono superexcitado, en paralelo con la carga.

Por ejemplo:

Un motor eléctrico, trifásico de 100 cv (75 kW), IV polos, operando a 100% de la potencia nominal, con factor de potencia original de 0,87 y rendimiento de 93,5%.

Se desea calcular la potencia reactiva necesaria para elevar el factor de potencia a 0,95.

Solución:

Valiéndose de la tabla 1.2, en la intersección de la línea 0,87 con la columna de 0,95, se obtiene el valor de 0,238, que multiplicado por la potencia absorbida de la red por el motor en kW, resulta en el valor de la potencia reactiva necesaria para elevarse el factor de potencia de 0,87 a 0,95.

$$\begin{aligned} \text{kVar} &= \frac{P (\text{HP}) \times 0,736 \times F \times 100\%}{\text{Eff. \%}} \\ &= \frac{100 \times 0,736 \times 0,238 \times 100\%}{93,5\%} \\ \text{kVar} &= 18,735 \text{ kVar} \end{aligned}$$

Donde: kVar = Potencia trifásica del banco de condensadores a ser instalado

$P (\text{cv})$ = Potencia nominal del motor

F = Factor obtenido en la tabla 1.2

Rend. % = Rendimiento del motor



Factor de potencia original	Factor de potencia deseado																						
	0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1		
0,5	0,982	1,008	1,034	1,06	1,086	1,112	1,139	1,165	1,192	1,220	1,248	1,276	1,306	1,337	1,369	1,403	1,442	1,481	1,529	1,590	1,732		
0,51	0,937	0,962	0,989	1,015	1,041	1,067	1,094	1,120	1,147	1,175	1,203	1,231	1,261	1,292	1,324	1,358	1,395	1,436	1,484	1,544	1,687		
0,52	0,893	0,919	0,945	0,971	0,997	1,023	1,060	1,076	1,103	1,131	1,159	1,187	1,217	1,248	1,280	1,314	1,351	1,392	1,440	1,500	1,643		
0,53	0,850	0,876	0,902	0,928	0,954	0,980	1,007	1,033	1,060	1,088	1,116	1,144	1,174	1,205	1,237	1,271	1,308	1,349	1,397	1,457	1,600		
0,54	0,809	0,835	0,861	0,887	0,913	0,939	0,966	0,992	1,019	1,047	1,075	1,103	1,133	1,164	1,196	1,230	1,267	1,308	1,356	1,416	1,359		
0,55	0,769	0,795	0,821	0,847	0,873	0,899	0,926	0,952	0,979	1,007	1,035	1,063	1,090	1,124	1,156	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519		
0,56	0,730	0,756	0,782	0,808	0,834	0,860	0,887	0,913	0,940	0,968	0,996	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480		
0,57	0,692	0,718	0,744	0,770	0,796	0,882	0,849	0,875	0,902	0,930	0,958	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442		
0,58	0,655	0,681	0,707	0,733	0,759	0,785	0,812	0,838	0,865	0,893	0,921	0,949	0,976	1,010	1,042	1,076	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405		
0,59	0,618	0,644	0,670	0,696	0,722	0,748	0,775	0,801	0,828	0,856	0,884	0,912	0,943	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368		
0,6	0,584	0,610	0,636	0,662	0,688	0,714	0,741	0,767	0,794	0,822	0,850	0,878	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334		
0,61	0,549	0,575	0,601	0,627	0,653	0,679	0,706	0,732	0,759	0,787	0,815	0,843	0,870	0,904	0,936	0,970	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299		
0,62	0,515	0,541	0,567	0,593	0,619	0,645	0,672	0,698	0,725	0,753	0,781	0,809	0,836	0,870	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265		
0,63	0,483	0,509	0,535	0,561	0,587	0,613	0,640	0,666	0,693	0,721	0,749	0,777	0,804	0,838	0,870	0,904	0,942	0,982	1,000	1,091	1,233		
0,64	0,450	0,476	0,502	0,528	0,554	0,580	0,607	0,633	0,660	0,688	0,716	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,066	1,200		
0,65	0,419	0,445	0,471	0,497	0,523	0,549	0,576	0,602	0,629	0,657	0,685	0,713	0,740	0,774	0,806	0,840	0,878	0,918	0,966	1,027	1,169		
0,66	0,388	0,414	0,440	0,466	0,492	0,518	0,545	0,571	0,598	0,626	0,654	0,692	0,709	0,742	0,755	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138		
0,67	0,358	0,384	0,410	0,436	0,462	0,488	0,515	0,541	0,568	0,596	0,624	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,906	0,966	1,108		
0,68	0,329	0,355	0,381	0,407	0,433	0,459	0,486	0,512	0,539	0,567	0,595	0,623	0,650	0,684	0,716	0,750	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079		
0,69	0,299	0,325	0,351	0,377	0,403	0,429	0,456	0,482	0,509	0,537	0,565	0,593	0,620	0,654	0,686	0,720	0,758	0,798	0,840	0,907	1,049		
0,7	0,270	0,296	0,322	0,348	0,374	0,400	0,427	0,453	0,480	0,508	0,536	0,564	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,020		
0,71	0,242	0,268	0,294	0,320	0,346	0,372	0,399	0,425	0,452	0,480	0,508	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,850	0,992		
0,72	0,213	0,239	0,265	0,291	0,317	0,343	0,370	0,396	0,423	0,451	0,479	0,507	0,534	0,568	0,600	0,624	0,672	0,712	0,754	0,821	0,963		
0,73	0,186	0,212	0,238	0,264	0,290	0,316	0,343	0,369	0,396	0,424	0,452	0,480	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936		
0,74	0,159	0,185	0,211	0,237	0,263	0,289	0,316	0,342	0,369	0,397	0,425	0,453	0,480	0,514	0,546	0,580	0,618	0,658	0,700	0,767	0,909		
0,75	0,132	0,158	0,184	0,210	0,236	0,262	0,289	0,315	0,342	0,370	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,740	0,882		
0,76	0,106	0,131	0,157	0,183	0,209	0,235	0,262	0,288	0,315	0,343	0,371	0,399	0,426	0,460	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855		
0,77	0,079	0,106	0,131	0,157	0,183	0,209	0,236	0,262	0,289	0,317	0,345	0,373	0,400	0,434	0,466	0,500	0,538	0,578	0,620	0,686	0,829		
0,78	0,053	0,079	0,105	0,131	0,157	0,183	0,210	0,236	0,263	0,291	0,319	0,347	0,374	0,408	0,440	0,474	0,512	0,562	0,594	0,661	0,803		
0,79	0,026	0,062	0,078	0,104	0,130	0,153	0,183	0,209	0,236	0,264	0,292	0,320	0,347	0,381	0,403	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776		
0,8	0,000	0,026	0,062	0,078	0,104	0,130	0,157	0,183	0,210	0,238	0,266	0,294	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,750		
0,81	0,000	0,026	0,062	0,078	0,104	0,131	0,157	0,184	0,212	0,240	0,268	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724			
0,82		0,000	0,026	0,062	0,078	0,105	0,131	0,158	0,186	0,214	0,242	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,496	0,556	0,696			
0,83			0,000	0,026	0,062	0,079	0,105	0,132	0,160	0,188	0,216	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,536	0,672			
0,84				0,000	0,026	0,053	0,079	0,106	0,140	0,162	0,190	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,645			
0,85					0,000	0,027	0,053	0,080	0,108	0,136	0,164	0,194	0,225	0,257	0,291	0,329	0,369	0,417	0,476	0,620			
0,86					0,000	0,026	0,053	0,081	0,109	0,137	0,167	0,198	0,230	0,265	0,301	0,343	0,390	0,451	0,593				
0,87						0,027	0,055	0,082	0,111	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,425	0,567					
0,88							0,028	0,056	0,084	0,114	0,145	0,177	0,211	0,248	0,290	0,337	0,398	0,540					
0,89								0,028	0,056	0,086	0,117	0,149	0,183	0,220	0,262	0,309	0,370	0,512					
0,9									0,028	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,342	0,484					
0,91															0,030	0,061	0,093	0,127	0,164	0,206	0,253	0,314	0,456
0,92															0,031	0,063	0,097	0,134	0,176	0,223	0,284	0,426	
0,93															0,032	0,068	0,103	0,145	0,192	0,253	0,395		
0,94															0,034	0,071	0,113	0,160	0,221	0,363			
0,95															0,037	0,079	0,126	0,187	0,328				
0,96															0,042	0,089	0,149	0,292					

1.2.6 Rendimiento

El rendimiento define la eficiencia con que es hecha la conversión de la energía eléctrica absorbida de la red por el motor, en energía mecánica disponible en el eje. Llamando "Potencia útil" P_u a la potencia mecánica disponible en el eje y "Potencia absorbida" P_a a la potencia eléctrica que el motor retira de la red, el rendimiento será la relación entre las dos, o sea:

$$\eta = \frac{P_u (\text{W})}{P_a (\text{W})} = \frac{736 \cdot P (\text{cv})}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} = \frac{1.000 \cdot P (\text{kW})}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}$$

ou

$$\eta \% = \frac{736 \cdot P (\text{cv})}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \cdot 100$$

1.2.7 Relación entre Conjugado y Potencia

Cuando la energía mecánica es aplicada bajo la forma de movimiento rotativo, la potencia desarrollada depende del conjugado C y de la velocidad de rotación n . Las relaciones son:

$$P (\text{cv}) = \frac{C (\text{kgfm}) \cdot n (\text{rpm})}{716} = \frac{C (\text{Nm}) \cdot n (\text{rpm})}{7.024}$$

$$P (\text{kW}) = \frac{C (\text{kgfm}) \cdot n (\text{rpm})}{974} = \frac{C (\text{Nm}) \cdot n (\text{rpm})}{9.555}$$

Inversamente

$$C (\text{kgfm}) = \frac{716 \cdot P (\text{cv})}{n (\text{rpm})} = \frac{974 \cdot P (\text{kW})}{n (\text{rpm})}$$

$$C (\text{Nm}) = \frac{7.024 \cdot P (\text{cv})}{n (\text{rpm})} = \frac{9.555 \cdot P (\text{kW})}{n (\text{rpm})}$$

1.3 Sistemas de Corriente Alterna Monofásica

La corriente alterna se caracteriza por el hecho de que la tensión, en vez de permanecer fija, como entre los polos de una batería, varía con el tiempo, cambiando de sentido alternadamente, de ahí su nombre.

En el sistema monofásico, es generada y aplicada una tensión alterna U (Volt) entre dos alambres, a los cuales se conecta la carga, que absorbe una corriente I (Amper) - ver figura 1.4a.

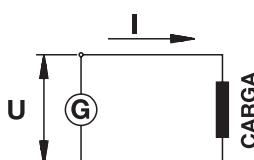


Figura 1.4a

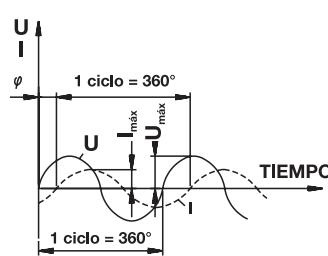


Figura 1.4b

Si representamos en un gráfico los valores de U e I , a cada instante, vamos a obtener la figura 1.4b. En la figura 1.4b están también indicadas algunas grandezas que serán definidas a continuación. Note que las ondas de tensión y de corriente no están "en fase", es decir, no pasan por el valor cero al mismo tiempo, aunque tengan la misma frecuencia; esto ocurre para muchos tipos de carga, por ejemplo, devanados de motores (cargas reactivas).

Frecuencia

Es el número de veces por segundo que la tensión cambia de sentido y vuelve a la condición inicial. Es expresada en "ciclos por segundo" o "Hertz" y simbolizada por Hz.

Tensión máxima ($U_{\text{máx}}$)

Es el valor de "pico" de la tensión, o sea, el mayor valor instantáneo alcanzado por la tensión durante un ciclo (este valor es alcanzado dos veces por ciclo, una vez positivo y una vez negativo).

Corriente máxima ($I_{\text{máx}}$)

Es el valor de "pico" de la corriente.

Valor eficaz de tensión y corriente (U e I)

Es el valor de tensión y corriente continuas que desarrollan potencia correspondiente a aquella desarrollada por la corriente alterna. Se puede demostrar que el valor eficaz vale:

$$U = \frac{U_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \quad \text{e} \quad I = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$$

Ejemplo:

Si conectamos una "resistencia" a un circuito de corriente alterna:

($\cos \varphi = 1$) with $U_{\text{máx}} = 311 \text{ V}$ and

$I_{\text{máx}} = 14.14 \text{ A}$.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = \frac{U_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \cdot 311 \cdot 14.14 \cdot 1$$

La potencia desarrollada será:

$$P = 2.200 \text{ Watts} = 2.2 \text{ kW}$$

Nota: normalmente, cuando se habla en tensión y corriente, por ejemplo, 220 V o 10 A, sin especificar nada más, estamos refiriéndonos a valores eficaces de la tensión o de la corriente que son empleados en la práctica.

Desfasaje (φ)

Es el "atraso" de la onda de corriente en relación a la onda de la tensión (ver figura 1.4b). En vez de ser medido en tiempo (segundos), este atraso es generalmente medido en ángulo (grados) correspondiente a la fracción de un ciclo completo, considerando 1 ciclo = 360°. Más comúnmente, el desfasaje es expresado por el coseno del ángulo (ver ítem "1.2.5 - Factor de potencia").

1.3.1 Conexiones en Serie y en Paralelo

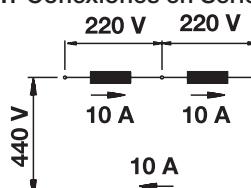


Figura 1.5a

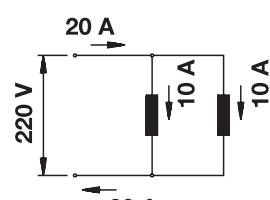


Figura 1.5b

Si conectamos dos cargas iguales a un sistema monofásico, esta conexión puede ser hecha de dos modos:

- Conexión en serie (figura 1.5a), en que la corriente total del circuito recorre las dos cargas. En este caso, la tensión en cada carga será la mitad de la tensión del circuito
- Conexión en paralelo (figura 1.5b), en que es aplicada a las dos cargas la tensión del circuito. En este caso, la corriente en cada carga será la mitad de la corriente total del circuito

1.4 Sistemas de Corriente Alterna Trifásica

El sistema trifásico está formado por la asociación de tres sistemas monofásicos de tensiones U_1 , U_2 y U_3 tales que el desfasaje entre las mismas sea de 120° , o sea, los "atrasos" de U_2 en relación a U_1 , de U_3 en relación a U_2 y de U_1 en relación a U_3 sean iguales a 120° (considerando un ciclo completo = 360°). El sistema es equilibrado si las tres tensiones tienen el mismo valor eficaz $U_1 = U_2 = U_3$ conforme la figura 1.6.

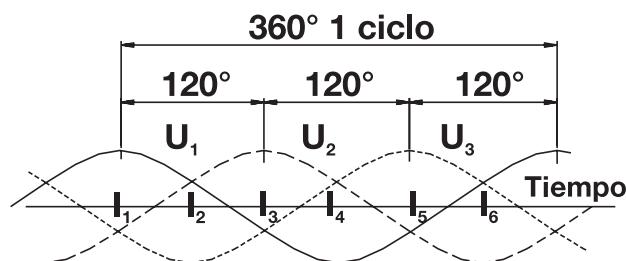
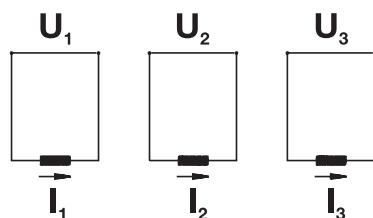


Figura 1.6

Conectando entre sí los tres sistemas monofásicos y eliminando los alambres innecesarios, tendremos un sistema trifásico equilibrado: tres tensiones U_1 , U_2 y U_3 equilibradas, desfasadas entre sí de 120° y aplicadas entre los tres alambres del sistema. La conexión puede ser hecha de dos maneras, representadas en los esquemas a seguir. En estos esquemas, se suele representar las tensiones con flechas inclinadas o vectores giratorios, manteniendo entre sí el ángulo correspondiente al desfasaje (120°), conforme las figuras 1.7a, b y c, y las figuras 1.8a, b y c.

1.4.1 Conexión Triángulo

Si conectamos los tres sistemas monofásicos entre sí, como indican las figuras 1.7a, b y c, podemos eliminar tres alambres, dejando apenas uno en cada punto de conexión, el sistema trifásico quedará reducido a tres alambres L_1 , L_2 y L_3 .

Tensión de línea (U)

Es la tensión nominal del sistema trifásico aplicada entre dos de los tres alambres L_1 , L_2 y L_3 .

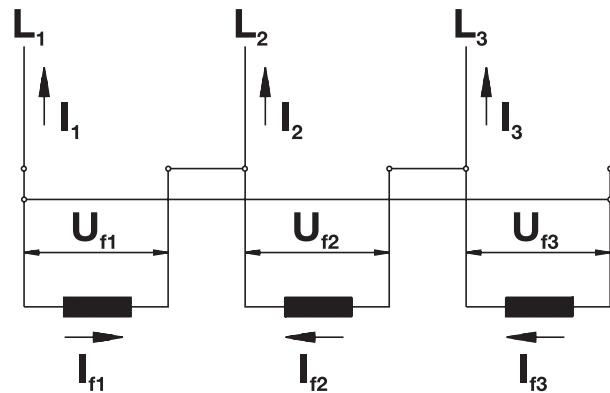


Figura 1.7a - Conexiones

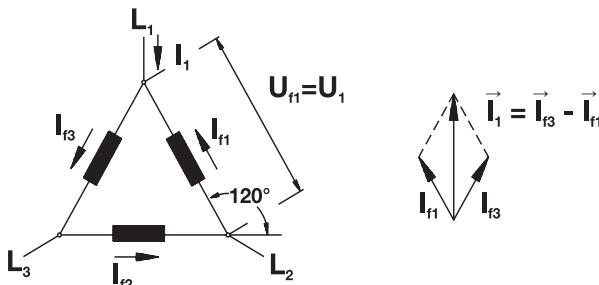


Figura 1.7b - Diagrama eléctrico

Figura 1.7c - Diagrama fasorial

Corriente de línea (I)

Es la corriente en cualquiera de los tres alambres L_1 , L_2 y L_3 .

Tensión y corriente de fase (U_f and I_f)

Es la tensión y corriente de cada uno de los tres sistemas monofásicos considerados.

Examinando el esquema de la figura 1.7b, se observa que:

$$\begin{aligned} U &= U_f \\ I &= \sqrt{3} \cdot I_f = 1,732 I_f \\ \vec{I} &= \vec{I}_{f3} - \vec{I}_{f1} \quad (\text{Figura 1.7c}) \end{aligned}$$

Ejemplo:

Tenemos un sistema equilibrado de tensión nominal 220 V. La corriente de línea medida es 10 A. Conectando a este sistema una carga trifásica compuesta por tres cargas iguales, conectadas en triángulo, ¿cuál será la tensión y la corriente en cada una de las cargas?

Tenemos $U_f = U_1 = 220$ V en cada una de las cargas.

Si $I = 1,732 \cdot I_f$, tenemos que $I_f = 0,577 \cdot I = 0,577 \cdot 10 = 5,77$ A en cada una de las cargas.

1.4.2 Conexión Estrella

Conectando uno de los alambres de cada sistema monofásico a un punto común a los tres, los tres alambres restantes forman un sistema trifásico en estrella (figura 1.8a). A veces, el sistema trifásico en estrella es "a cuatro alambres" o "con neutro".

El cuarto alambre es conectado al punto común de las tres fases.

La tensión de línea o tensión nominal del sistema trifásico y la corriente de línea, son definidas del mismo modo que en la conexión triángulo.

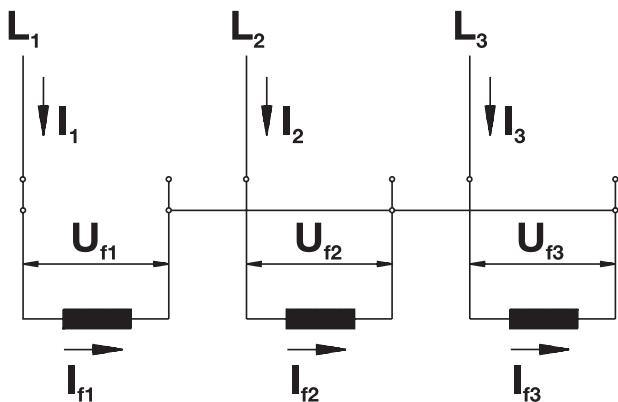


Figura 1.8a - Conexiones

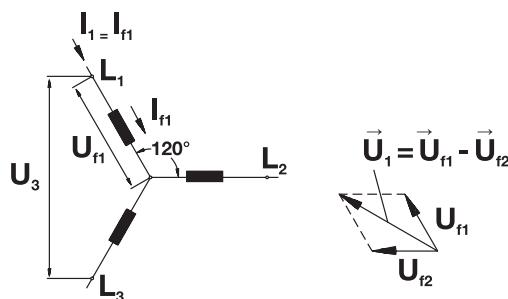


Figura 1.8b - Diagrama eléctrico

Figura 1.8c - Diagrama fasorial

Examinando el esquema de la figura 1.8b, se observa que:

$$\begin{aligned} I &= I_f \\ U &= \sqrt{3} \cdot U_f \\ \vec{U} &= \vec{U}_{f1} - \vec{U}_{f2} \end{aligned}$$

(Figura 1.8c)

Ejemplo:

Tenemos una carga trifásica compuesta por tres cargas iguales; cada carga es hecha para ser conectada a una tensión de 220 V, absorbiendo 5,77 A. ¿Cuál será la tensión nominal del sistema trifásico que alimenta a estas cargas conectadas en estrella, en sus condiciones nominales (220 V y 5,77 A)? ¿Cuál será la corriente de línea?

$$\begin{aligned} \text{Tenemos } U_f &= 220 \text{ V (tensión nominal de cada carga)} \\ U &= 1,732 \cdot 220 = 380 \text{ V} \\ I &= I_f = 5,77 \text{ A} \end{aligned}$$

1.5 Motor de Inducción Trifásico

El motor de inducción trifásico (figura 1.9) está compuesto fundamentalmente por dos partes: estator y rotor.

Estator

- Carcasa (1) - es la estructura soporte del conjunto de construcción robusta en hierro fundido, acero o aluminioinyectado, resistente a corrosión y normalmente con aletas
- Núcleo de chapas (2) - las chapas son de acero magnético
- Devanado trifásico (8) - tres conjuntos iguales de bobinas, una para cada fase, formando un sistema trifásico equilibrado ligado a red trifásica de alimentación

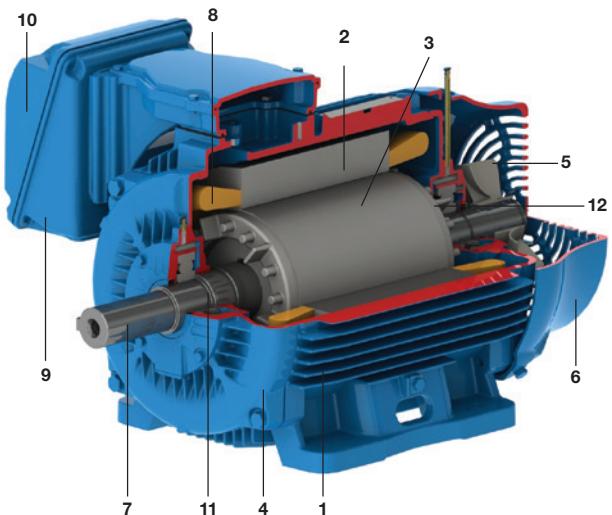


Figura 1.9

Rotor

- Eje (7) - transmite la potencia mecánica desarrollada por el motor
- Núcleo de chapas (3) - las chapas poseen las mismas características de las chapas del estator
- Barras y anillos de cortocircuito (12) - son de aluminio inyectado sobre presión en una única patasza

Otras partes del motor de inducción trifásico:

- Tapa (4)
- Ventilador (5)
- Tapa deflectora (6)
- Caja de conexión (9)
- Terminales (10)
- Rodamientos (11)

En esta guía daremos énfasis al "motor de jaula", cuyo rotor está constituido por un conjunto de barras no aisladas e interconectadas por anillos de cortocircuito. Lo que caracteriza al motor de inducción es que sólo el estator es conectado a la red de alimentación. El rotor no es alimentado externamente y las corrientes que circulan en el mismo son inducidas electromagnéticamente por el estator, de ahí su nombre de motor de inducción.

1.5.1 Principio de Funcionamiento - Campo Girante

Cuando una bobina es recorrida por una corriente eléctrica, es creado un campo magnético, orientado conforme el eje de la bobina, siendo de valor proporcional a la corriente.

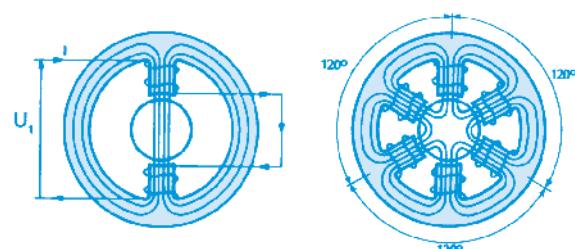


Figura 1.10a

Figura 1.10b

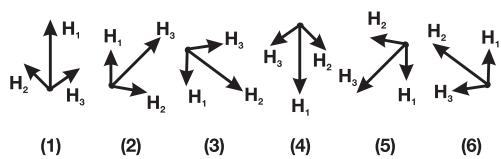
a) En la figura 1.10a es indicado un “devanado monofásico” atravesado por una corriente I y el campo H creado por la misma. El devanado está constituido por un par de polos (un polo “norte” y un polo “sur”), cuyos efectos se suman para establecer el campo H . El flujo magnético atraviesa el rotor entre los dos polos y se cierra a través del núcleo del estator. Si la corriente I es alterna, el campo H también lo es, y su valor a cada instante será representado por el mismo gráfico de la figura 1.4b, inclusive invirtiendo el sentido en cada medio ciclo. El campo H es “pulsante”, ya que su intensidad “varía” proporcionalmente a la corriente, siempre en la “misma” dirección norte-sur

b) En la figura 1.10b es indicado un “devanado trifásico”, que está compuesto por tres monofásicos espaciados entre sí a 120° . Si este devanado es alimentado por un sistema trifásico, las corrientes I_1 , I_2 e I_3 crearán, del mismo modo, sus propios campos magnéticos H_1 , H_2 y H_3 . Estos campos son desplazados 120° entre sí. Además de eso, como son proporcionales a las respectivas corrientes, serán desfasados en el tiempo, también a 120° entre sí, pudiendo ser representados por un gráfico igual al de la figura 1.6

El campo total H resultante, a cada instante, será igual a la suma gráfica de los tres campos H_1 , H_2 y H_3 en aquel instante.

En la figura 1.11, representamos esta suma gráfica para seis instantes sucesivos.

Diagrama Fasorial



Fasor / Vector

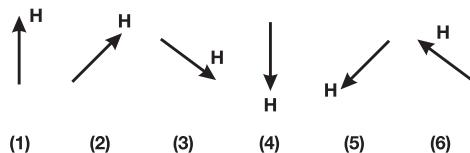


Figura 1.11

En el instante (1), la figura 1.11, muestra que el campo H_1 es máximo y los campos H_2 y H_3 son negativos y de mismo valor, iguales a 0,5.

El campo resultante (suma gráfica) es mostrado en la parte inferior de la figura 1.11 (1), teniendo la misma dirección del devanado de la fase 1.

Repetiendo la construcción para los puntos 2, 3, 4, 5 y 6 de la figura 1.6, se observa que el campo resultante H tiene intensidad “constante”. No obstante, su dirección irá “girando”, completando una vuelta al fin de un ciclo.

De esta forma, cuando un devanado trifásico es alimentado por corrientes trifásicas, se crea un “campo girante”, como si hubiese un único par de polos girantes, de intensidad constante. Este campo girante, creado por el devanado trifásico del estator induce tensiones en las barras del rotor (líneas de flujo magnético cortan las barras del rotor), que por estar cortocircuitadas generan corrientes, y, consecuentemente, un campo en el rotor, de polaridad opuesta a la del campo giratorio del estator. Como campos opuestos se atraen

y como el campo del estator es rotativo, el rotor tiende a acompañar la rotación de este campo. Se desarrolla entonces, en el rotor, un conjugado motor que hace que el mismo gire, accionando la carga.

1.5.2 Velocidad Síncrona (ns)

La velocidad síncrona del motor es definida por la velocidad de rotación del campo giratorio, la cual depende del número de polos ($2p$) del motor y de la frecuencia (f) de la red, en Hertz. Los devanados pueden ser construidos con uno o más pares de polos, los que se distribuyen alternadamente (uno “norte” y uno “sur”) a lo largo de la periferia del núcleo magnético. El campo giratorio recorre un par de polos (p) a cada ciclo. De esta forma, como el devanado tiene polos o “ p ” pares de polos, la velocidad del campo es:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot f}{2p} \quad (\text{rpm})$$

Ejemplos:

a) ¿Cuál es la rotación síncrona de un motor de VI polos, 50 Hz?

$$n_s = \frac{120 \cdot 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

b) ¿Motor de XII polos, 60 Hz?

$$n_s = \frac{120 \cdot 60}{12} = 600 \text{ rpm}$$

Note que el número de polos del motor tendrá que ser siempre par, para formar los pares de polos. Para las frecuencias y “polaridades” usuales, las velocidades síncronas son:

Nº de polos	Rotación síncrona por minuto	
	60 Hertz	50 Hertz
2	3.600	3.000
4	1.800	1.500
6	1.200	1.000
8	900	750
10	720	600

Tabla 1.3 - Velocidades síncronas.

Para motores de “dos polos”, como en el ítem 1.5.1, el campo recorre una vuelta a cada ciclo. De esta forma, los grados eléctricos equivalen a los grados mecánicos. Para motores con más de dos polos, de acuerdo con el número de polos, un giro “geométrico” menor es recorrido por el campo.

Ejemplo:

Para un motor de VI polos tendremos, en un ciclo completo, un giro del campo de $360^\circ \times 2/6 = 120^\circ$ mecánicos. Esto equivale, lógicamente, a $1/3$ de la velocidad en II polos. Se concluye que:

$$\text{Grados eléctricos} = \text{Grados mecánicos} \times p$$

1.5.3 Deslizamiento (s)

Si el motor gira a una velocidad diferente de la velocidad síncrona, o sea, diferente de la velocidad del campo girante, el devanado del rotor "corta" las líneas de fuerza magnética del campo y, por las leyes del electromagnetismo, circularán por el mismo corrientes inducidas. Cuanto mayor sea la carga, mayor tendrá que ser el conjugado necesario para accionarla.

Para obtener un mayor conjugado, tendrá que ser mayor la diferencia de velocidad, para que las corrientes inducidas y los campos producidos sean mayores. Por lo tanto, a medida que la carga aumenta, la rotación del motor disminuye. Cuando la carga es cero, motor en vacío, el rotor girará prácticamente con la rotación síncrona.

La diferencia entre la velocidad del motor (n) y la velocidad síncrona (ns) se llama deslizamiento (s), que puede ser expresado en rotaciones por minuto (rpm), como fracción de la velocidad síncrona, o incluso como porcentaje de ésta:

$$s \text{ (rpm)} = n_s - n; \quad s = \frac{n_s - n}{n_s}; \quad s \text{ (\%)} = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

Por lo tanto, para un deslizamiento dado s (%), la velocidad del motor será:

$$n = n_s \cdot \left(1 - \frac{s}{100} \right)$$

Ejemplo:

¿Cuál es el deslizamiento de un motor de VI polos, 50 Hz, si su velocidad es de 960 rpm?

$$s \text{ (\%)} = \frac{1000 - 960}{1000} \cdot 100 \\ s \text{ (\%)} = 4\%$$

1.5.4 Velocidad Nominal

Es la velocidad (rpm) del motor funcionando a potencia nominal, sobre tensión y frecuencia nominales. Conforme fue visto en el ítem 1.5.3, depende del deslizamiento y de la velocidad síncrona.

$$n = n_s \cdot \left(1 - \frac{s}{100} \right) \text{ rpm}$$

1.6 Materiales y Sistemas de Aislamiento

Siendo el motor de inducción, una máquina robusta y de construcción simple, su vida útil depende casi exclusivamente de la vida útil del aislamiento del devanado.

La misma es afectada por muchos factores, como humedad, vibraciones, ambientes corrosivos y otros. Entre todos los factores, el más importante es, sin duda, la temperatura soportada por los materiales aislantes empleados. Un aumento de 8 a 10 grados por encima del límite de la clase térmica de la temperatura del aislamiento puede reducir la vida útil del devanado por la mitad. Para un mayor tiempo de vida del motor eléctrico recomendamos la utilización de sensores térmicos para protección del devanado. Cuando hablamos de disminución de la vida útil del motor, no nos

referimos a temperaturas elevadas, cuando el aislante se quema y el devanado es destruido repentinamente. La vida útil del aislamiento (en términos de temperatura de trabajo, sensiblemente por debajo de aquella en que el material se quema), se refiere al envejecimiento gradual del aislante, que se va tornando reseco, perdiendo el poder aislante, hasta que no soporta más la tensión aplicada y produzca el cortocircuito.

La experiencia muestra que el aislamiento tiene una duración prácticamente ilimitada, si su temperatura es mantenida por debajo del límite de su clase térmica. Por encima de este valor, la vida útil del aislamiento se torna cada vez más corta, a medida que la temperatura de trabajo es más alta. Este límite de temperatura es mucho más bajo que la temperatura de "quema" del aislante y depende del tipo de material empleado. Esta limitación de temperatura se refiere al punto más caliente del aislamiento y no necesariamente a todo el devanado. Evidentemente, basta un "punto débil" en el interior de la bobina para que el devanado quede inutilizado. Con el uso cada vez más intenso de convertidores de frecuencia, para variación de velocidad de los motores de inducción, también deben ser observados otros criterios de la aplicación para la preservación de la vida del sistema de aislamiento del motor. Más detalles pueden ser vistos en el ítem "Influencia del convertidor en el aislamiento del motor".

1.6.1 Material Aislante

El material aislante impide, limita y dirige el flujo de las corrientes eléctricas. A pesar de que la principal función del material aislante sea la de impedir el flujo de corriente de un conductor para tierra o para un potencial más bajo, el mismo sirve también para dar soporte mecánico, proteger el conductor de degradación provocada por el medio ambiente y transferir calor para el ambiente externo.

Gases, líquidos y sólidos son usados para aislar equipos eléctricos, conforme las necesidades del sistema.

Los sistemas de aislamiento influencian en la buena calidad del equipamiento, el tipo y la calidad del aislamiento, afectan el costo, el peso, el desempeño y la vida útil del mismo.

1.6.2 Sistema Aislante

Una combinación de dos o más materiales aislantes, usados en un equipo eléctrico, se denomina sistema aislante. Esa combinación en un motor eléctrico consiste en el esmalte de aislamiento del alambre, aislamiento de fondo de ranura, aislamiento de cierre de ranura, aislamiento entre fases, barniz y/o resina de impregnación, aislamiento del cable de conexión, aislamiento de soldadura. Cualquier material o componente que no esté en contacto con la bobina, no hace parte del sistema de aislamiento.

1.6.3 Clases Térmicas

Como la temperatura en productos electromecánicos es frecuentemente el factor predominante para el envejecimiento del material aislante y del sistema de aislamiento, ciertas clasificaciones térmicas básicas son útiles y reconocidas mundialmente.

Los materiales y sistemas aislantes son clasificados conforme la resistencia a la temperatura por largo período de tiempo. Las normas citadas a seguir se refieren a la clasificación de materiales y sistemas aislantes:

Materiales	Sistemas	Materiales y Sistemas
UL 746B	UL 1446	IEC 60085
IEC 60216	UL 1561 / 1562	
	IEC 60505	
	IEEE 117	

Tabla 1.4 - Normas de materiales y sistemas aislantes.

Las clases térmicas definidas para los materiales y sistemas aislantes son las siguientes:

Temperatura (°C)	Clases de temperatura	
	IEC 60085	UL 1446
90	Y (90 °C)	-
105	A (105 °C)	-
120	E (120 °C)	120 (E)
130	B (130 °C)	130 (B)
155	F (155 °C)	155 (F)
180	H (180 °C)	180 (H)
200	N (200 °C)	200 (N)
220	R (220 °C)	220 (R)
240	-	240 (S)
Por encima de 240°C	-	Por encima de 240 (C)
250	250	

Tabla 1.5 - Clases térmicas.

IEC - International Electrotechnical Commission - organización internacional no gubernamental de normas del área eléctrica, electrónica y de tecnologías relacionadas.

UL - Underwriters Laboratories - Entidad norteamericana de certificación de productos.

Se especifica que en un equipamiento electromecánico, la clase térmica representa la temperatura máxima que el equipamiento puede alcanzar en su punto más caliente, al estar operando en carga nominal, sin disminución de la vida útil. La clasificación térmica de un material, o sistema, está basada en la comparación con sistemas o material de referencia conocidos. Sin embargo, en los casos en que no se conoce ningún material de referencia, la clase térmica puede ser obtenida extrapolando la curva de durabilidad térmica (Gráfico de Arrhenius) para un dado tiempo (IEC 216 especifica 20.000 horas).

1.6.4 Materiales Aislantes en Sistemas de Aislamiento

La especificación de un producto en una determinada clase térmica no significa, ni implica, que cada material aislante usado en su construcción tenga la misma capacidad térmica (clase térmica). El límite de temperatura para un sistema de aislamiento no puede ser directamente relacionado a la capacidad térmica de los materiales individuales utilizados en ese sistema. En un sistema, la performance térmica de un material puede ser mejorada a través de características protectoras de ciertos materiales usados con ese material. Por ejemplo, un material de clase 155 °C puede tener su desempeño mejorado cuando el conjunto es impregnado con barniz de clase 180 °C.

1.6.5 Sistemas de Aislamiento WEG

Para atender las variadas exigencias del mercado y aplicaciones específicas, aliadas a un excelente desempeño técnico, son utilizados nueve sistemas de aislamiento en los diversos motores WEG.

El alambre circular esmaltado es uno de los componentes más importantes del motor, ya que es la corriente eléctrica circulando por el mismo la que crea el campo magnético necesario para el funcionamiento del motor. Durante la fabricación del motor, los alambres son sometidos a esfuerzos mecánicos de tracción, flexión y abrasión. En funcionamiento, los efectos térmicos y eléctricos actúan también sobre el material aislante del alambre.

Por esa razón, el mismo debe tener un buen aislamiento mecánico, térmico y eléctrico.

El esmalte utilizado actualmente en los alambres garantiza esas propiedades, siendo la propiedades mecánica asegurada por la capa externa del esmalte que resiste a fuerzas de abrasión durante la inserción del mismo en las ranuras del estator. La capa de esmalte interna garantiza alta rigidez dieléctrica y el conjunto, atribuye clase 200 °C al alambre (UL File E234451). Ese alambre es utilizado en todos los motores clase B, F y H. En los motores para extracción de humo (Smoke Extraction Motor) el alambre es especial para altísimas temperaturas.

Los films y laminados aislantes tienen la función de aislar térmica y eléctricamente partes de la bobina del motor. La clase térmica es identificada en la placa de identificación. Estos son a base de aramida y poliéster y poseen films y laminados, siendo usados en los siguientes puntos:

- entre la bobina y la ranura (film de fondo de ranura): para aislar el paquete de chapas de acero (tierra) de la bobina de alambres esmaltados
- entre las fases: para aislar eléctricamente las fases, una de la otra
- cierre de la ranura del estator para aislar eléctricamente la bobina localizada en la parte superior de la ranura del estator y para actuar mecánicamente de modo de mantener los alambres dentro de la ranura

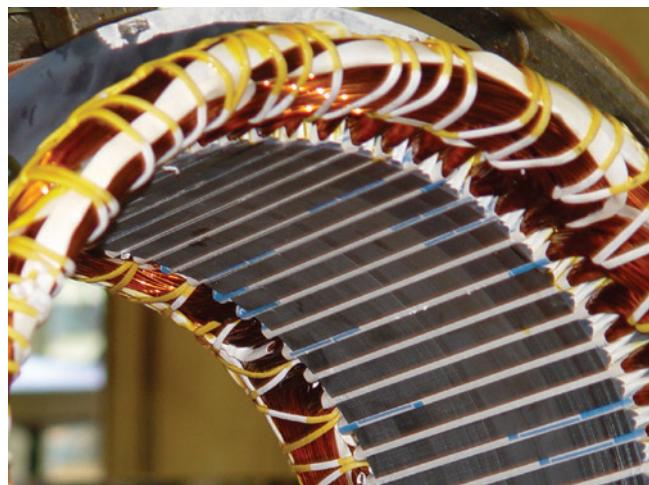


Figura 1.12a - Alambres y Films aplicados en el estator.

Los barnices y resinas de impregnación tienen como principales funciones mantener unidos entre sí todos los alambres esmaltados de la bobina con todos los componentes del estator y el relleno de los espacios vacíos dentro de la ranura. La unión de los alambres impide que los mismos vibren y se rocen entre sí. El roce podría provocar fallas en el esmalte del alambre, llevándolo a un cortocircuito. La eliminación de los espacios vacíos ayuda en la disipación térmica del calor generado por el conductor y, especialmente en aplicaciones de motores alimentados por convertidores de frecuencia, evita/disminuye la formación de descargas parciales (efecto corona) en el interior del motor. Actualmente se utilizan dos tipos de barnices y dos tipos de resinas de impregnación, todos a base de poliéster, para atender las necesidades constructivas y de aplicación de los motores.

La resina de silicona es utilizada apenas para motores especiales proyectados para altísimas temperaturas. Los barnices y resinas mejoran las características térmicas y eléctricas de los materiales impregnados pudiéndosele atribuir una clase térmica mayor a los materiales impregnados, cuando son comparados a los mismos materiales sin impregnación. Los barnices son aplicados por el proceso de inmersión y posterior cura en estufa. Las resinas (exentas de solventes) son aplicadas por el proceso de Flujo Continuo.

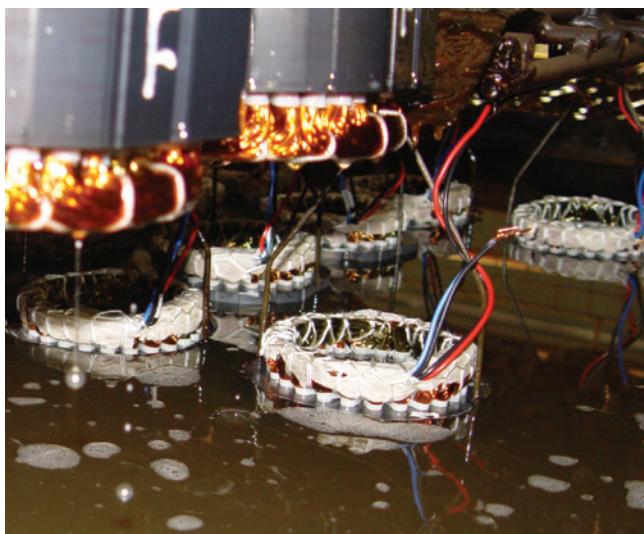


Figura 1.12.b - Impregnación por Inmersión.

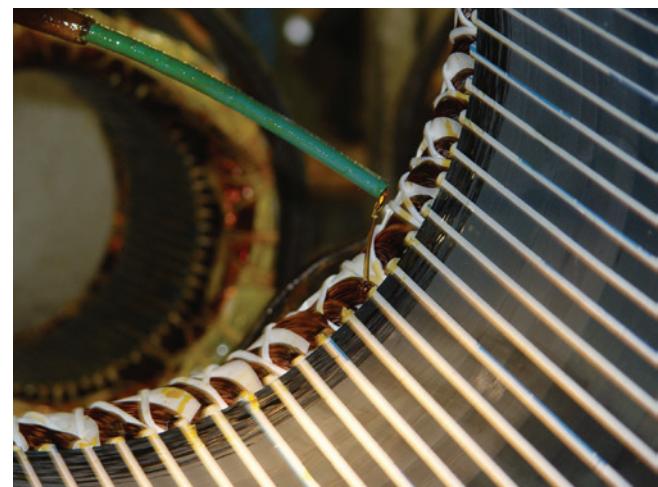


Figura 1.12.c - Flujo continuo de resina.

Los cables de conexión son construidos con materiales aislantes elastoméricos y de la misma clase térmica del motor. Esos materiales tienen, única y exclusivamente, la función de aislar eléctricamente el conductor del medio externo. Los mismos tienen alta resistencia eléctrica, aliada a una adecuada flexibilidad, para permitir la fácil manipulación durante el proceso de fabricación, instalación y mantenimiento del motor. Para ciertas aplicaciones como bombas sumergidas, el cable también debe ser químicamente resistente al aceite de la bomba. Los tubos flexibles tienen la función de cubrir y aislar eléctricamente las soldaduras de las conexiones entre los alambres de la bobina y el cable de conexión, así como entre alambres. Son flexibles para permitir que se amolden a los puntos de soldadura y al amarrado de la cabeza de la bobina. Se utilizan tres tipos de tubos:

- Tubo de poliéster termoencogible - Clase 130 °C
- Tubo con trama de poliéster recubierto con resina acrílica - Clase 155 °C
- Tubo con trama de fibra de vidrio recubierto con goma de silicona - Clase 180 °C



2. Características de la Red de Alimentación

2.1 El Sistema

Generalmente, el sistema de alimentación puede ser monofásico o trifásico. El sistema monofásico es utilizado en servicios domésticos, comerciales y rurales, mientras que el sistema trifásico se utiliza en aplicaciones industriales, ambos con frecuencia de red en 50 o 60 Hz.

2.1.1 Trifásico

Las tensiones trifásicas más usadas en las redes industriales son:

- Baja tensión: 220 V, 380 V y 440 V
- Alta tensión: 2.300 V, 4.160 V y 6.600 V

El sistema trifásico estrella de baja tensión, consiste en tres conductores de fase (L_1, L_2, L_3) y el conductor neutro (N), siendo éste, conectado al punto estrella del generador o al devanado secundario de los transformadores (conforme muestra la figura 2.1).

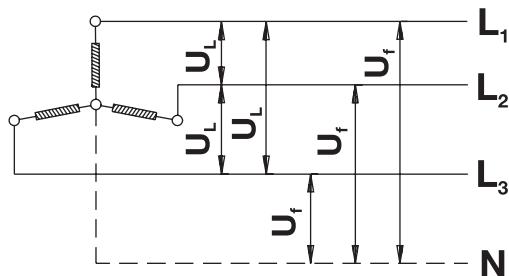


Figura 2.1 - Sistema trifásico.

2.1.2 Monofásico

Las tensiones monofásicas estandarizadas más comunes son las de 127 V y 220 V.

Los motores monofásicos son conectados a dos fases (tensión de línea U_L) o a una fase y neutro (tensión de fase U_f). De esta forma, la tensión nominal del motor monofásico deberá ser igual a la tensión U_L o U_f del sistema. Cuando varios motores monofásicos son conectados al sistema trifásico (formado por tres sistemas monofásicos), se debe tener cuidado para distribuirlos de manera uniforme, evitando así, desequilibrio de carga entre las fases.

Monofásico con retorno por tierra - MRT

El sistema monofásico con retorno por tierra - MRT - es un sistema eléctrico en el que la tierra funciona como conductor de retorno de la corriente de carga. El MTR se presenta como solución para el empleo en el sistema monofásico, a partir de alimentadores que no tienen el conductor neutro. Dependiendo de la naturaleza del sistema eléctrico existente y de las características del suelo donde será implantado (generalmente en la electrificación rural), se tiene:

a) Sistema unifilar

Es la versión más práctica y económica del MRT, no obstante, su utilización sólo es posible donde la salida de la subestación de origen es estrella puesta a tierra.

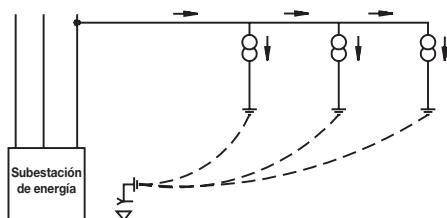


Figura 2.2 - Sistema unifilar.

b) Sistema unifilar con transformador de aislamiento

Este sistema posee algunas desventajas, además del costo del transformador, tales como:

- Limitación de la potencia del ramal a la potencia nominal del transformador de aislamiento
- Necesidad de reforzar la puesta a tierra del transformador de aislamiento, ya que en su falta, cesa el suministro de energía para todo el ramal

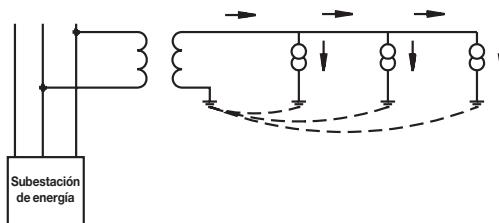


Figura 2.3 - Sistema unifilar con transformador de aislamiento.

c) Sistema MRT en la versión neutro parcial

Es empleado como solución para la utilización del MRT en regiones de suelos de alta resistividad, cuando se torna difícil obtener valores de resistencia de tierra de los transformadores dentro de los límites máximos establecidos en el proyecto.

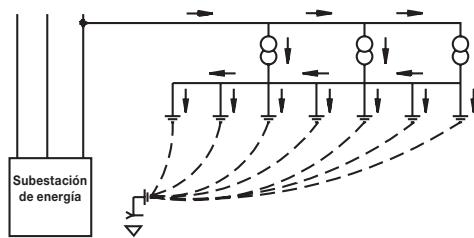


Figura 2.4 - Sistema MRT en la versión neutro parcial.

3. Características de Alimentación del Motor Eléctrico

3.1 Tensión Nominal

Es la tensión para la cual el motor fue proyectado.

3.1.1 Tensión Nominal Múltiple

La gran mayoría de los motores es suministrada con diferentes tipos de conexión, de modo de que puedan funcionar en redes de por lo menos dos tensiones diferentes. Los principales tipos de conexión de motores para funcionamiento en más de una tensión son:

a) Conexión serie-paralela

El devanado de cada fase está dividido en dos partes (vale recordar que el número de polos es siempre par, de modo que este tipo de conexión es siempre posible):

- Conectando las dos mitades en serie, cada mitad que dará con la mitad de la tensión de fase nominal del motor
- Conectando las dos mitades en paralelo, el motor podrá ser alimentado con una tensión igual a la mitad de la tensión de la condición anterior, sin que se altere la tensión aplicada a cada bobina. Vea los ejemplos de las figuras 3.1a y b.

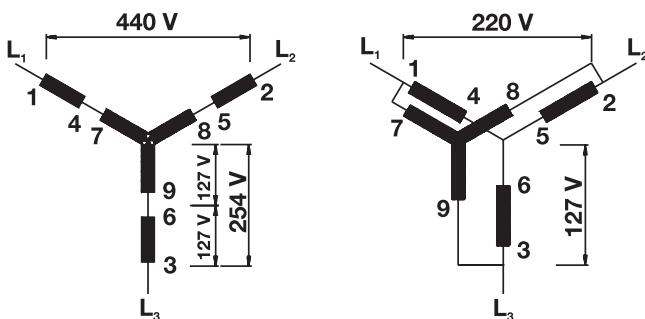


Figura 3.1a - Conexión serie-paralelo Y.

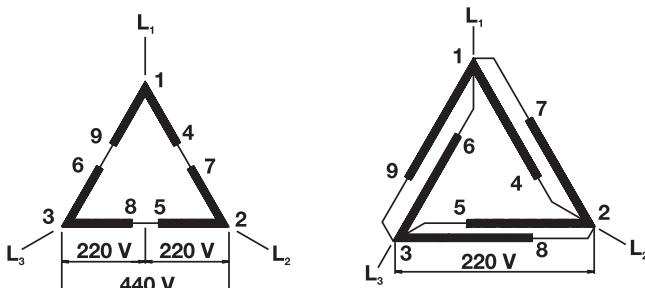


Figura 3.1b - Conexión serie-paralelo Δ

Este tipo de conexión exige nueve terminales en el motor y la tensión nominal (doble) más común, es 220/440 V, o sea, el motor es reconectado a la conexión paralela cuando es alimentado con 220 V y en la conexión en serie cuando es alimentado en 440 V. Las figuras 3.1a y 3.1b muestran la numeración normal de los terminales y los esquemas de conexión para estos tipos de motores, tanto para motores conectados en estrella como en triángulo. Los mismos esquemas sirven para otras dos tensiones cualesquiera, desde que una sea el doble de la otra, por ejemplo, 230/460 V.

b) Conexión estrella-tríangulo

El devanado de cada fase tiene las dos puntas conducidas hacia fuera del motor. Si conectamos las tres fases en triángulo, cada fase recibirá la tensión de la línea, por ejemplo, 220 V (figura 3.2). Si conectamos las tres fases en estrella, el motor puede ser conectado a una tensión igual a $220 \times \sqrt{3} = 380$ V.

Con eso, no hay alteración en la tensión del devanado, que continua igual a 220 Volts por fase:

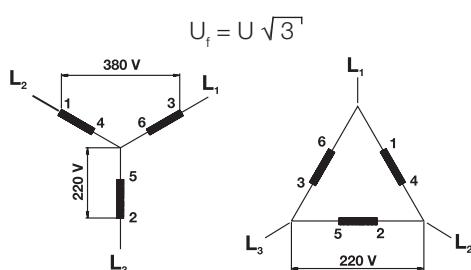


Figura 3.2 - Conexión estrella-tríangulo Y - Δ.

Este tipo de conexión exige seis terminales en el motor y sirve para cualquier tensión nominal doble, desde que la segunda sea igual a la primera multiplicada por la $\sqrt{3}$.

Ejemplos: 220/380 V - 380/660 V - 440/760 V

En el ejemplo 440/760 V, la tensión mayor declarada sirve para indicar que el motor puede ser accionado por llave estrella-tríangulo.

c) Triple tensión nominal

Podemos combinar los dos casos anteriores: el devanado de cada fase es dividido en dos mitades para conexión serie-paralelo. Además de eso, todos los terminales son accesibles para poder conectar las tres fases en estrella o triángulo. De este modo, tenemos cuatro combinaciones posibles de tensión nominal:

- 1) Conexión triángulo paralelo
- 2) Conexión estrella paralela, siendo igual a la tensión nominal igual a $\sqrt{3}$ veces la primera
- 3) Conexión triángulo serie, o sea, la tensión nominal igual al doble de la primera opción
- 4) Conexión estrella serie, tensión nominal igual a $\sqrt{3}$ veces la tercera opción. No obstante, como esta tensión sería mayor que 690 V, es indicada apenas como referencia de conexión estrella-tríangulo

Ejemplo: 220/380/440 (760) V

Obs: 760 V (Solamente para arranque)

Este tipo de conexión exige 12 terminales. La figura 2.7 muestra la numeración normal de los terminales y el esquema de conexión para las tres tensiones nominales.

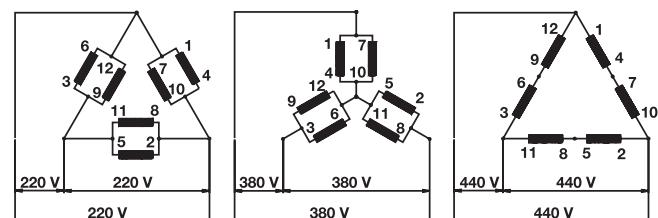


Figura 3.3

3.2 Frecuencia Nominal (Hz)

Es la frecuencia de la red para la cual el motor fue proyectado.

3.2.1 Conexión en Frecuencias Diferentes

Motores trifásicos devanados para 50 Hz podrán ser conectados también en red de 60 Hz.

a) Conectando el motor de 50 Hz, con la misma tensión, en 60 Hz:

- la potencia del motor será la misma
- la corriente nominal es la misma
- la corriente de arranque disminuye en 17%
- Cp/Cn disminuye en 17%
- Cm/Cn disminuye en 17%
- la velocidad nominal aumenta en 20%

Nota: deberán ser observados los valores de potencia requeridos, para motores que accionan equipos que poseen conjugados variables con la rotación.

b) Si se altera la tensión en proporción a la frecuencia:

- aumenta a potencia del motor 20%
- la corriente nominal es la misma
- la corriente de arranque será aproximadamente la misma
- el conjugado de arranque será aproximadamente el mismo
- el conjugado máximo será aproximadamente el mismo
- la rotación nominal aumenta 20%

3.3 Tolerancia de Variación de Tensión y Frecuencia

Conforme la norma IEC 60034-1, para los motores de inducción, las combinaciones de las variaciones de tensión y de frecuencia son clasificadas como Zona A o Zona B (figura 3.4).

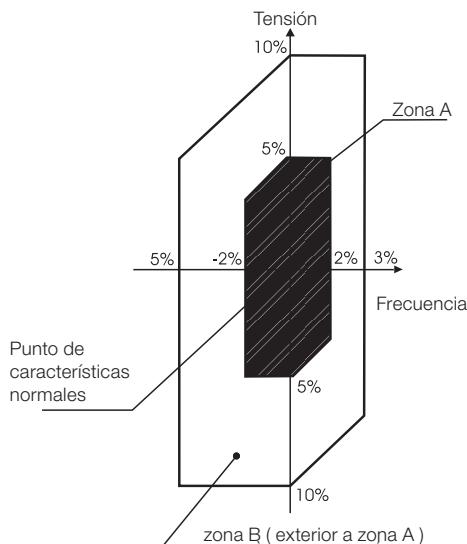


Figura 3.4 -Límites de las variaciones de tensión y de frecuencia en funcionamiento.

Un motor debe ser capaz de desempeñar su función principal continuamente en la Zona A, pero puede no atender completamente sus características de desempeño a tensión y frecuencia nominales (ver punto de características nominales en la figura 3.4), presentando algunos desvíos.

Las elevaciones de temperatura pueden ser superiores a aquellas a tensión y frecuencia nominales. Un motor debe ser capaz de desempeñar su función principal en la Zona B, pero puede presentar desvíos superiores a aquellos de la Zona A, en lo que se refiere a las características de desempeño a tensión y frecuencia nominales. Las elevaciones de temperatura pueden ser superiores a las verificadas con tensión y frecuencia nominales y muy probablemente superiores a aquellas de la Zona A. El funcionamiento prolongado en la periferia de la Zona B no es recomendado.

3.4 Limitación de la Corriente de Arranque en Motores Trifásicos

El arranque de un motor trifásico de jaula deberá ser directo, por medio de contactores. Se debe tener en cuenta que para un determinado motor, las curvas de conjugado y corriente son fijas, independientemente de la carga, para una tensión constante. En caso de que la corriente de arranque del motor sea elevada podrán ocurrir las siguientes consecuencias perjudiciales:

a) Elevada caída de tensión en el sistema de alimentación de la red. En función de esto, provoca la interferencia en equipos instalados en el sistema

b) El sistema de protección (cables, contactores) deberá ser superdimensionado, ocasionando un costo elevado

c) La imposición de las concesionarias de energía eléctrica que limitan la caída de tensión de la red

En caso de que el arranque directo no sea posible, debido a los problemas citados arriba, se puede usar el sistema de arranque indirecto, para reducir la corriente de arranque:

- llave estrella-triángulo

- llave compensadora

- llave serie-paralelo

- arranque electrónica (Soft-starter)

3.4.1 Arranque Directo

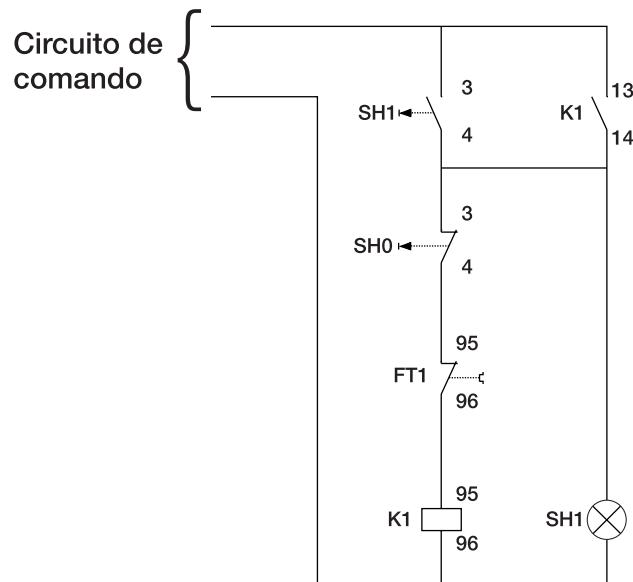


Figura 3.5 - Circuito de comando - arranque directo.

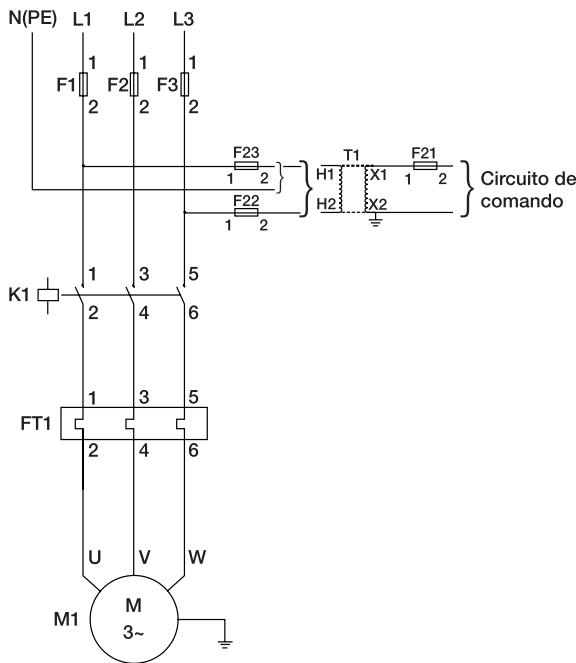


Figura 3.6 - Circuito de fuerza - arranque directo.

F1, F2, F3 - Fusibles de fuerza
F21, F22, F23 - Fusibles de comando
T1 - Transformador de comando
K1 - Contactores
FT1 - Relé de sobrecarga
SH1 - Botón de comando
KT1 - Relé de tiempo
M1 - Motor

Accesorios opcionales
 ■ Relé falta de fase
 ■ Relé mínima y máxima tensión
 ■ Amperímetro
 ■ Voltímetro
 ■ Ohmímetro

3.4.2 Arranque con Llave Estrella-Triángulo (Y - Δ)

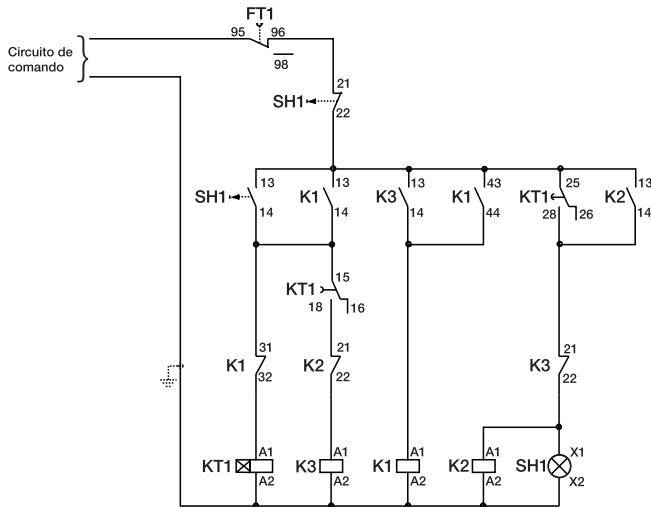


Figura 3.7 - Circuito de comando - arranque con llave estrella-triángulo.

Diagrama Eléctrico

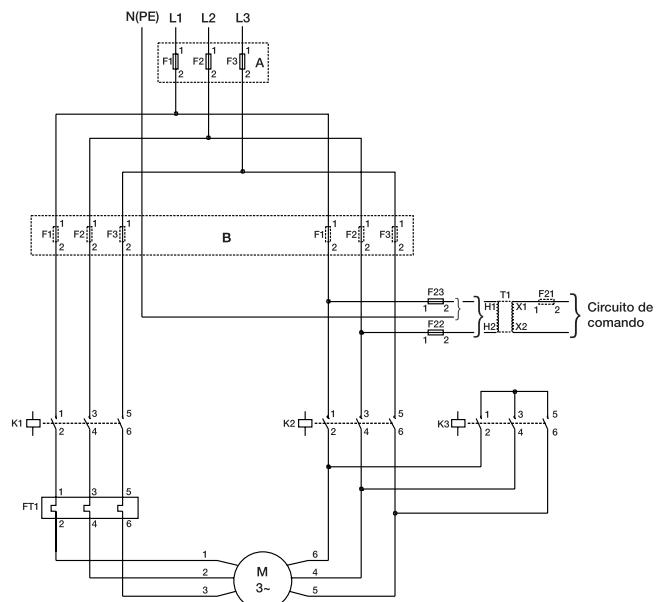


Figura 3.8 - Circuito de fuerza - arranque con llave estrella-triángulo.

Obs.: se debe utilizar la conexión "A" (protección por 3 fusibles) para potencias de hasta 75 cv (220 V), 125 cv (380 V) y 175 cv (440 V). Por encima de esas potencias debe ser utilizada la conexión "B" (protección por 6 fusibles), donde el conjunto de fusibles F1, F2, F3 es igual al conjunto F4, F5, F6.

F1, F2, F3 - Fusibles de fuerza
(F1, F2, F3 and F4, F5, F6) - Fusibles de fuerza
F21, F22, F23 - Fusibles de comando
T1 - Transformador de comando
K1, K2, K3 - Contactores
FT1 - Relé de sobrecarga
SH1 - Botón de comando
KT1 - Relé de tiempo
M1 - Motor

Accesorios opcionales
 ■ Relé falta de fase
 ■ Relé mínima y máxima tensión
 ■ Amperímetro
 ■ Voltímetro
 ■ Ohmímetro

Es fundamental, para el arranque, que el motor tenga la posibilidad de conexión en doble tensión, o sea, en 220/380 V, en 380/660 V o 440/760 V. Los motores deberán tener como mínimo seis bornes de conexión. El arranque estrella-triángulo podrá ser usado cuando la curva de conjugado del motor sea suficientemente elevada para poder garantizar la aceleración de la máquina con la corriente reducida. En la conexión estrella, la corriente queda reducida en 25% a 33% de la corriente de arranque en la conexión triángulo.

El conjugado resistente de la carga no podrá sobrepasar el conjugado de arranque del motor (figura 3.9), ni la corriente en el instante del cambio a triángulo podrá ser de valor inaceptable. Existen casos donde este sistema de arranque no puede ser usado, conforme lo demuestra la figura 3.10.

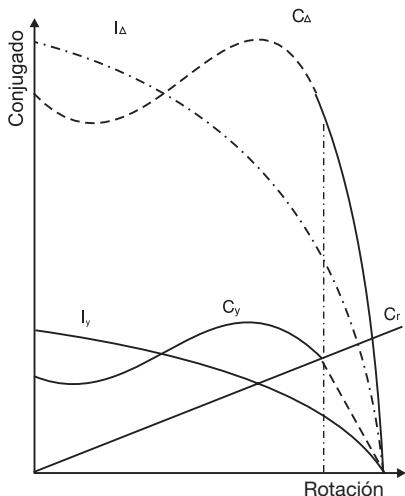


Figura 3.9 - Corriente y conjugado para arranque estrella-triángulo de un motor de jaula accionando una carga con conjugado resistente C_r .

I_Δ - corriente en triángulo

I_y - corriente en estrella

C_y - conjugado en estrella

C_Δ - conjugado en triángulo

C_r - conjugado resistente

En la figura 3.10 tenemos un alto conjugado resistente C_r . Si el arranque es en estrella, el motor acelera la carga aproximadamente hasta 85% de la rotación nominal. En este punto, la llave deberá ser conectada en triángulo. En este caso, la corriente, que era aproximadamente la nominal, o sea, 100%, salta repentinamente para 320%, lo que no es ninguna ventaja, una vez que en el arranque era de solamente 190%.

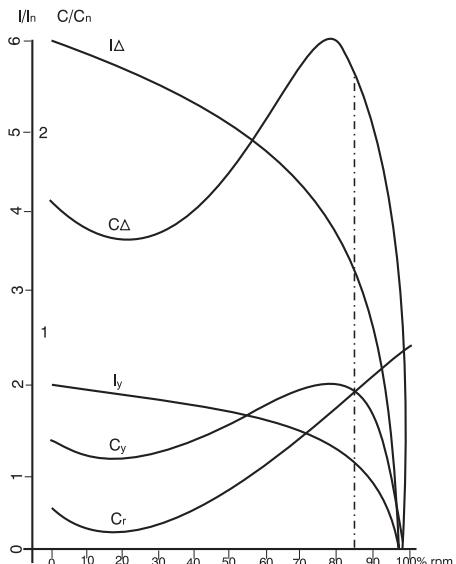


Figura 3.10

En la figura 3.11 tenemos el motor con las mismas características, no obstante, el conjugado resistente C_r es bastante menor. En la conexión Y, el motor acelera la carga en hasta 95% de la rotación nominal. Cuando la llave es conectada en Δ , la corriente, que era de aproximadamente

50%, sube a 170%, o sea, prácticamente igual a la del arranque en Y. En este caso, la conexión estrella-triángulo presenta ventaja, porque se fuese conectado directo, absorbería de la red 600% de la corriente nominal. La llave estrella-triángulo en general solo puede ser empleada en arranques de la máquina en vacío, esto es, sin carga. Solamente luego de haber alcanzado por lo menos 90% de la rotación nominal, la carga podrá ser aplicada. El instante de la comutación de estrella a triángulo debe ser cuidadosamente determinado, para que este método de arranque pueda efectivamente ser ventajoso en los casos en que el arranque directo no es posible. En el caso de motores de triple tensión nominal (220/380/440/760 V), se debe optar por la conexión 220/380 V o 440/(760) V, dependiendo de la red de alimentación.

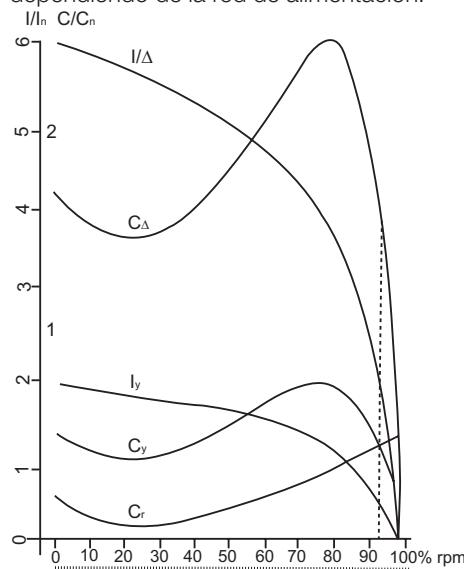


Figura 3.11

I_Δ - corriente en triángulo

I_y - corriente en estrella

C_Δ - conjugado en triángulo

C_y - conjugado en estrella

C/C_n - relación entre el conjugado del motor y el conjugado nominal

I/I_n - relación entre la corriente del motor y la corriente nominal

C_r - conjugado resistente

Esquemáticamente, la conexión estrella-triángulo en un motor para una red de 220 V es hecha de la manera indicada en la figura 3.12, notándose que la tensión por fase durante el arranque es reducida a 127 V.

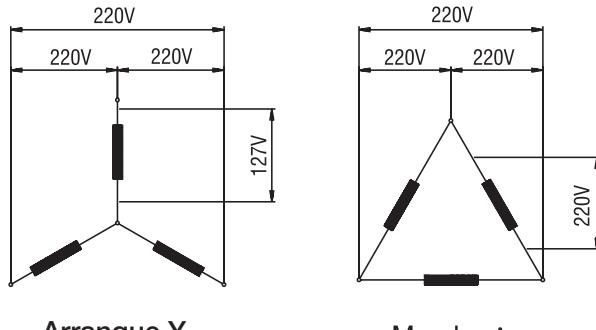


Figura 3.12

3.4.3 Arranque con Llave Compensadora (Autotransformador)

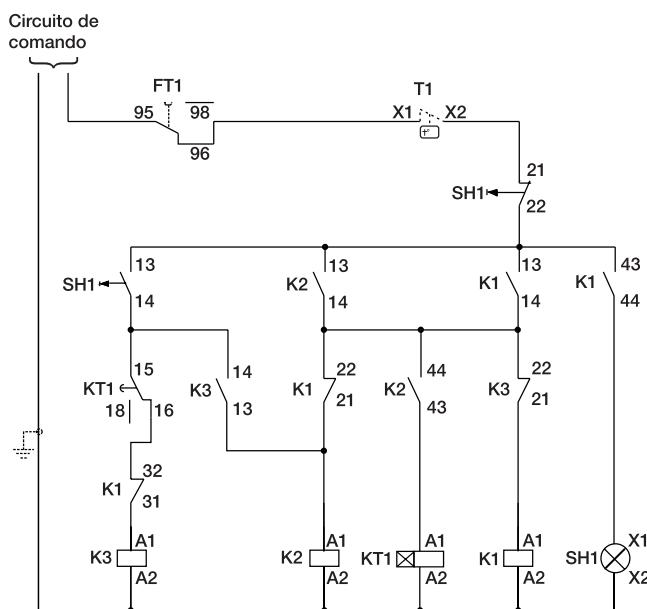


Figura 3.13 - Circuito de comando - arranque con llave compensadora.

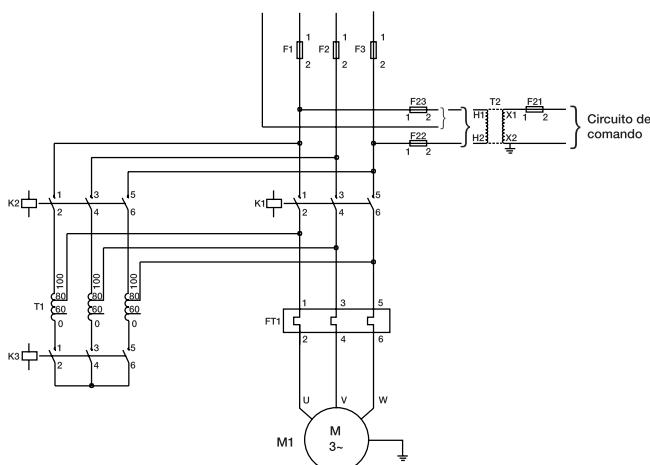


Figura 3.14 - Circuito de fuerza - arranque con llave compensadora.

- F1, F2, F3 - Fusibles de fuerza
- (F1, F2, F3 e F4, F5, F6) - Fusibles de fuerza
- F21, F22, F23 - Fusibles de comando
- T1 - Transformador de comando
- K1, K2, K3 e K4 - Contactores
- 1FT1 e 2FT1 - Relé de sobrecarga
- SH1 - Botón de comando
- KT1 - Relé de tiempo
- M1 - Motor

Accesorios opcionales

- Relé falta de fase
- Relé mínima y máxima tensión
- Amperímetro
- Voltímetro
- Ohmímetro

La llave compensadora puede ser usada para el arranque de motores bajo carga. La misma reduce la corriente de arranque, evitando una sobrecarga en el circuito, dejando, sin embargo, el motor con un conjugado suficiente para el arranque y la aceleración. La tensión en la llave compensadora es reducida a través de un autotransformador que posee normalmente taps de 50, 65 y 80% de la tensión nominal. Para los motores que arrancan con una tensión menor que la tensión nominal, la corriente y el conjugado de arranque deben ser multiplicados por los factores K_1 (factor de multiplicación de la corriente) y K_2 (factor de multiplicación del conjugado) obtenidos en el gráfico de la figura 3.15.

Ejemplo: para 85% de la tensión nominal

$$\left(\frac{I_p}{I_n} \right) 85\% = K_1 \cdot \left(\frac{I_p}{I_n} \right) 100\% = 0.8 \left(\frac{I_p}{I_n} \right) 100\%$$

$$\left(\frac{C_p}{C_n} \right) 85\% = K_2 \cdot \left(\frac{C_p}{C_n} \right) 100\% = 0.66 \left(\frac{C_p}{C_n} \right) 100\%$$

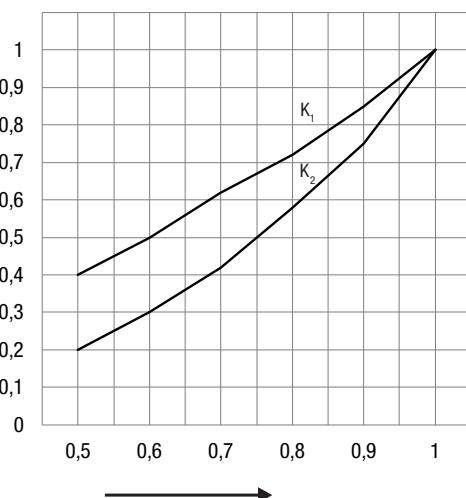


Figura 3.15 - Factores de reducción K_1 y K_2 en función de las relaciones de tensión del motor y de la red U_n/U_n .

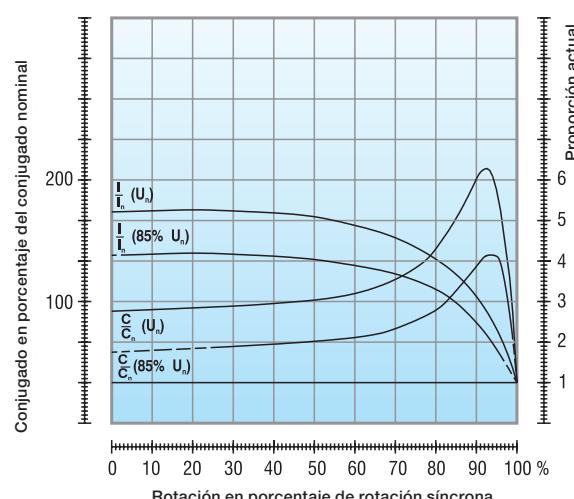


Figura 3.16 - Ejemplo de las características de desempeño de un motor de 425 cv, VI polos, cuando arranca con 85% de la tensión.

3.4.4 Comparación entre Llaves Estrella-Triángulo y Compensadoras “Automáticas”

1) Estrella-triángulo (automática)

Ventajas

- a) La llave estrella-triángulo es muy utilizada por su costo reducido.
- b) No tiene límite en cuanto a su número de maniobras.
- c) Los componentes ocupan poco espacio.
- d) La corriente de arranque queda reducida para aproximadamente 1/3.

Desventajas

- a) La llave sólo puede ser aplicada a motores cuyos seis bornes o terminales sean accesibles
- b) La tensión de la red debe coincidir con la tensión en triángulo del motor
- c) Con la corriente de arranque reducida a aproximadamente 1/3 de la corriente nominal, se reduce también el momento de arranque a 1/3
- d) En caso de que el motor no alcance por lo menos 90% de su velocidad nominal, el pico de corriente, en la conmutación de estrella a triángulo, será casi como si fuese un arranque directo, lo que se torna prejudicial para los contactos de los contactores y no aporta ninguna ventaja a la red eléctrica

2) Llave compensadora (automática)

Ventajas

- a) En el tap de 65% la corriente de línea es aproximadamente igual a la de la llave estrella-triángulo, no obstante, en el pasaje de la tensión reducida hacia la tensión de la red, el motor no es apagado y el segundo pico es drásticamente reducido, visto que el Autotransformador, por corto tiempo, se torna una reactancia
- b) Es posible la variación del tap de 65% a 80% o incluso a 90% de la tensión de la red, a fin de que el motor pueda arrancar satisfactoriamente

Desventajas

- a) La gran desventaja es la limitación de su frecuencia de maniobras. En la llave compensadora automática es siempre necesario saber su frecuencia de maniobra para, de esa forma, determinar el autotransformador conveniente
- b) La llave compensadora es sensiblemente más cara que la llave estrella-triángulo, debido al autotransformador
- c) Debido al tamaño del auto-transformador, la construcción se torna voluminosa, necesitando cuadros mayores, lo que torna su precio elevado

3.4.5 Arranque con Llave Serie-Paralelo

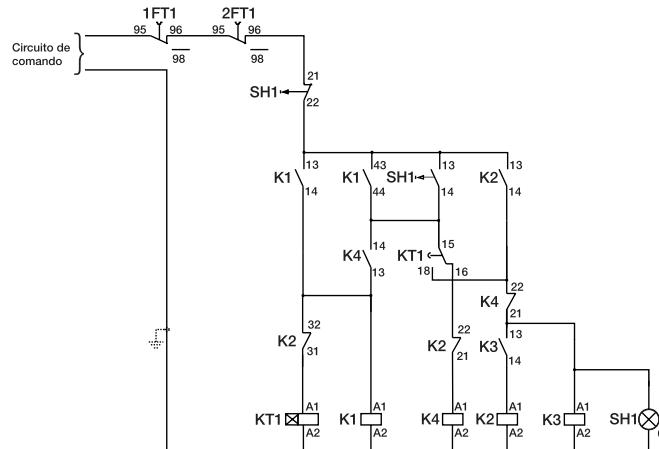


Figura 3.17 - Circuito de comando - arranque llave serie-paralelo.

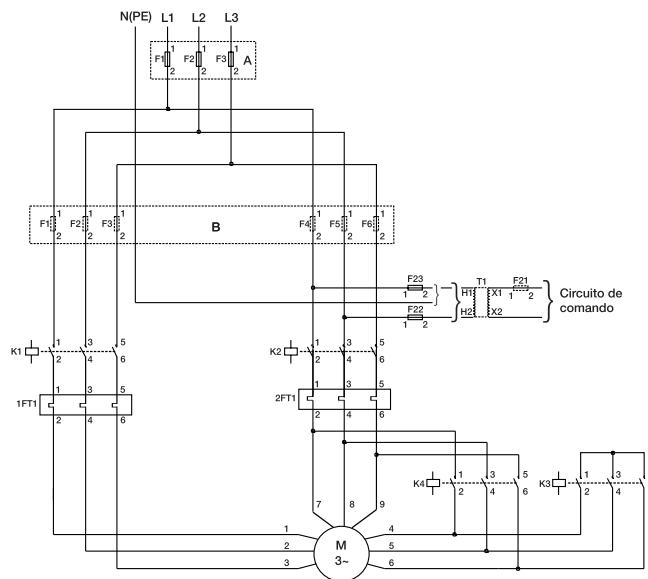


Figura 3.18 - Circuito de fuerza - arranque llave serie-paralelo.

F1, F2, F3 - Fusibles de fuerza

F21, F22, F23 - Fusibles de comando

T2 - Transformador de comando

K1, K2, K3 - Contactores

FT1 - Relé de sobrecarga

T1 - Autotransformer

SH1 - Botón de comando

KT1 - Relé de tiempo

M1 - Motor

Accesorios opcionales

- Relé falta de fase
- Relé mínima y máxima tensión
- Amperímetro
- Voltímetro
- Ohmímetro

Para arranque en serie-paralelo es necesario que el motor tenga dos tensiones nominales, siendo la menor igual a la de la red eterna y la otra dos veces mayor.

En este tipo de conexión, la tensión nominal más común es 220/440 V, o sea, durante el arranque el motor es conectado en la configuración en serie hasta alcanzar su rotación nominal y, entonces, se hace la conmutación para la configuración paralelo.

3.4.6 Arranque Electrónico (Soft-Starter)

El avance de la electrónica permitió la creación de la llave de arranque a estado sólido, la cual consiste en un conjunto de pares de tiristores (SCR) (o combinaciones de tiristores/diodos), uno en cada borne de potencia del motor.

El ángulo de disparo de cada par de tiristores es controlado electrónicamente para aplicar una tensión variable a los terminales del motor durante la aceleración. Al final del período de arranque, ajustable típicamente entre 2 y 30 segundos, la tensión alcanza su valor pleno tras una aceleración suave o una rampa ascendente, envés de ser sometido a incrementos o saltos repentinos. Con eso, se logra mantener la corriente de arranque (en la línea) próxima de la nominal y con una suave variación. Además de la ventaja del control de la tensión (corriente) durante el arranque, la llave electrónica presenta, también, la ventaja de no poseer partes móviles o que generen arco, como en las llaves mecánicas. Este es uno de los puntos fuertes de las llaves electrónicas, ya que su vida útil se torna más larga.

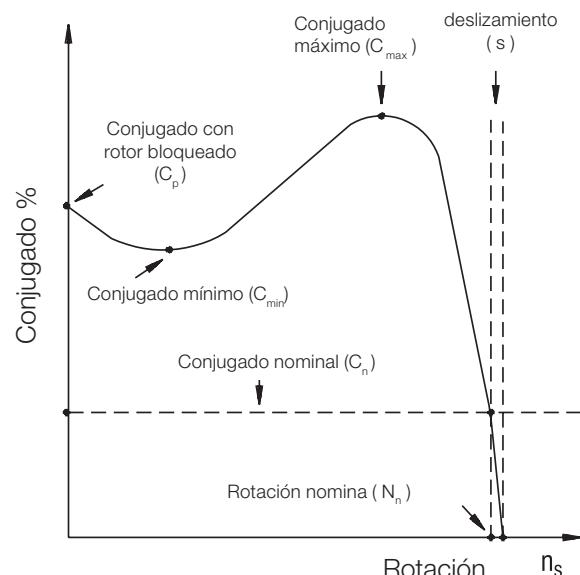


Figura 4.1 - Curva conjugado x rotación.

En la figura 4.1 destacamos y definimos algunos puntos importantes. Los valores de los conjugados relativos a estos puntos son especificados por la norma IEC 60034-1, conforme son presentados a seguir:

C_o: Conjugado básico - es el conjugado calculado en función de la potencia y de la velocidad síncrona.

$$C_o \text{ (Kgf m)} = \frac{716 \cdot P \text{ (cv)}}{n_s \text{ (rpm)}} = \frac{974 \cdot P \text{ (kW)}}{n_s \text{ (rpm)}}$$

$$C_o \text{ (Nm)} = \frac{7.024 \cdot P \text{ (cv)}}{n_s \text{ (rpm)}} = \frac{9.555 \cdot P \text{ (kW)}}{n_s \text{ (rpm)}}$$

C_n: Conjugado nominal o de plena carga - es el conjugado desarrollado por el motor a potencia nominal, bajo tensión y frecuencia nominales.

C_p: Conjugado con rotor bloqueado o conjugado de arranque o conjugado de arranque - es el conjugado mínimo desarrollado por el motor bloqueado, para todas las posiciones angulares del rotor, bajo tensión y frecuencia nominales.

Este conjugado puede ser expresado en Nm o, más comúnmente, en porcentaje del conjugado nominal.

$$C_p \text{ (%)} = \frac{C_p \text{ (Nm)}}{C_n \text{ (Nm)}} \cdot 100$$

En la práctica, el conjugado de rotor bloqueado debe ser el más alto posible, para que el rotor pueda vencer la inercia inicial de la carga y pueda acelerarla rápidamente, principalmente cuando el arranque es con tensión reducida.

Tensiones del motor	Tensión del servicio	Arranque con llave estrella-tríangulo	Arranque con llave compensadora	Arranque con llave serie-paralela	Arranque con Soft-Starter
220/380 V	220 V 380 V	SÍ NO	SÍ SÍ	NO NO	SÍ SÍ
220/440 V	220 V 440 V	NO NO	SÍ SÍ	SÍ NO	SÍ SÍ
380/660 V	380 V	SÍ	SÍ	NO	SÍ
220/380/ 440 V	220 V 380 V 440 V	SÍ NO SÍ	SÍ SÍ SÍ	SÍ SÍ NO	SÍ SÍ SÍ

Tabla 3.1 - Métodos de Arranque x Motores.

3.5 Sentido de Rotación de Motores de Inducción

Trifásicos

Un motor de inducción trifásico trabaja en cualquier sentido, dependiendo de la conexión con la fuente eléctrica. Para invertir el sentido de rotación, se invierte cualquier par de conexiones entre motor y la fuente eléctrica. Los motores WEG poseen ventilador bidireccional, excepto si el sentido de giro es informado en la hoja de datos o en placas adicionales, proporcionando su operación en cualquier sentido de rotación, sin perjudicar la refrigeración del motor. Motores sin ventilador, pero ventilados por la propia carga (ventilador como carga), deben cumplir la ventilación necesaria para el motor, independientemente del sentido de rotación. En caso de dudas, consulte a WEG.

4. Características de Aceleración

4.1 Conjugados

4.1.1 Curva Conjugado X Velocidad

Definición

El motor de inducción tiene conjugado igual a cero en la velocidad síncrona. A medida que la carga aumenta, la rotación del motor va cayendo gradualmente, hasta un punto en que el conjugado alcanza el valor máximo que el motor es capaz de desarrollar en rotación normal. Si el conjugado de la carga aumenta más, la rotación del motor cae bruscamente, pudiendo llegar a trabar el rotor. Representando en un gráfico la variación del conjugado con la velocidad para un motor normal, vamos a obtener una curva con aspecto representado en la figura 4.1.

C_{\min} : Conjugado mínimo - es el menor conjugado desarrollado por el motor al acelerar desde la velocidad cero hasta la velocidad correspondiente al conjugado máximo. En la práctica, este valor no debe ser muy bajo, es decir, la curva no debe presentar una depresión acentuada en la aceleración, para que el arranque no sea muy demorado, sobrecalentando el motor, especialmente en los casos de alta inercia o de arranque con tensión reducida.

C_{\max} : Conjugado máximo - es el mayor conjugado desarrollado por el motor, bajo tensión y frecuencia nominal, sin caída brusca de velocidad. En la práctica, el conjugado máximo debe ser el más alto posible, por dos razones principales:

- 1) El motor debe ser capaz de vencer, sin grandes dificultades, los eventuales picos de carga, como puede ocurrir en ciertas aplicaciones, como en trituradoras de patasdra, mezcladoras y otras.
- 2) El motor no debe perder bruscamente la velocidad cuando ocurran caídas de tensión momentáneamente excesivas.

4.1.2 Categorías - Valores Mínimos Normalizados de Conjugado

Conforme sus características de conjugado en relación a velocidad y corriente de arranque, los motores de inducción trifásicos con rotor de jaula son clasificados en categorías, cada una adecuada a un tipo de carga.

Estas categorías son definidas en norma (IEC 60034-1), y son las siguientes:

Categoría N

Conjugado de arranque normal, corriente de arranque normal; bajo deslizamiento. Constituyen la mayoría de los motores encontrados en el mercado y se prestan al accionamiento de cargas normales, como bombas, máquinas operadoras, ventiladores.

Categoría H

Conjugado de arranque alto, corriente de arranque normal; bajo deslizamiento. Usados para cargas que exigen mayor conjugado en el arranque, como coladoras, transportadores cargadores, cargas de alta inercia, trituradores, etc.

Categoría D

Conjugado de arranque alto, corriente de arranque normal; alto deslizamiento (+ de 5%). Usados en prensas excéntricas y máquinas semejantes, donde la carga presenta picos periódicos. Usados también en elevadores y cargas que necesitan de conjugados de arranque muy altos y corriente de arranque limitada. Las curvas conjugado X velocidad de las diferentes categorías pueden ser vistas en la figura 4.2.

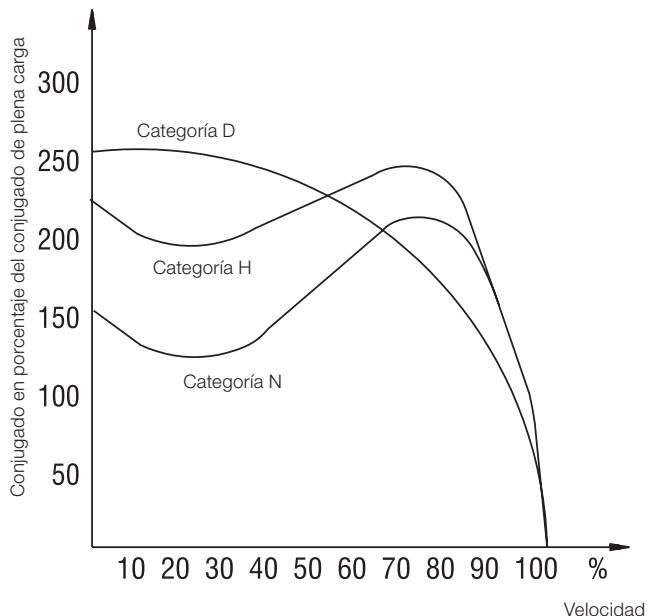


Figura 4.2 - Curvas Conjugado X Velocidad, de las diferentes categorías.

Categoría NY

Esta categoría incluye motores semejantes a los de la categoría N, no obstante, previstos para arranque estrella-triángulo. Para estos motores en conexión estrella, los valores mínimos del conjugado con rotor bloqueado y del conjugado mínimo de arranque son iguales al 25% de los valores indicados para los motores categoría N.

Categoría HY

Esta categoría incluye los motores semejantes a los de la categoría H, sin embargo, previstos para arranque estrella-triángulo. Para estos motores en conexión estrella, los valores mínimos del conjugado con rotor bloqueado y de conjugado mínimo de arranque son iguales al 25% de los valores indicados para los motores de categoría H.

Los valores mínimos de conjugado exigidos para motores de las categorías N y H, especificados en la norma IEC 60034-1, son mostrados en las tablas 4.1 y 4.2.

Para motores de la categoría D, de IV, VI y VIII polos y potencia nominal igual o inferior a 150 cv, se tiene, según la IEC 60034-1, que: la razón del conjugado con rotor bloqueado (C_p) para conjugado nominal (C_n) no debe ser inferior a 2,75. La norma no especifica los valores de C_{\min} y C_{\max} .

Número de polos		2			4			6			8		
Rango de potencias nominales		C_p/C_n	C_{\min}/C_n	C_{\max}/C_n									
kW	cv							pu					
> 0,36 ≤ 0,63	> 0,5 ≤ 0,86	1,9	1,3	2,0	2,0	1,4	2,0	1,7	1,2	1,7	1,5	1,1	1,6
> 0,63 ≤ 1,0	> 0,86 ≤ 1,4	1,8	1,2	2,0	1,9	1,3	2,0	1,7	1,2	1,8	1,5	1,1	1,7
> 1,0 ≤ 1,6	> 1,4 ≤ 2,2	1,8	1,2	2,0	1,9	1,3	2,0	1,6	1,1	1,9	1,4	1,0	1,8
> 1,6 ≤ 2,5	> 2,2 ≤ 3,4	1,7	1,1	2,0	1,8	1,2	2,0	1,6	1,1	1,9	1,4	1,0	1,8
> 2,5 ≤ 4,0	> 3,4 ≤ 5,4	1,6	1,1	2,0	1,7	1,2	2,0	1,5	1,1	1,9	1,3	1,0	1,8
> 4,0 ≤ 6,3	> 5,4 ≤ 8,6	1,5	1,0	2,0	1,6	1,1	2,0	1,5	1,1	1,9	1,3	1,0	1,8
> 6,3 ≤ 10	> 8,6 ≤ 14	1,5	1,0	2,0	1,6	1,1	2,0	1,5	1,1	1,8	1,3	1,0	1,7
> 10 ≤ 16	> 14 ≤ 22	1,4	1,0	2,0	1,5	1,1	2,0	1,4	1,0	1,8	1,2	0,9	1,7
> 16 ≤ 25	> 22 ≤ 34	1,3	0,9	1,9	1,4	1,0	1,9	1,4	1,0	1,8	1,2	0,9	1,7
> 25 ≤ 40	> 34 ≤ 54	1,2	0,9	1,9	1,3	1,0	1,9	1,3	1,0	1,8	1,2	0,9	1,7
> 40 ≤ 63	> 54 ≤ 86	1,1	0,8	1,8	1,2	0,9	1,8	1,2	0,9	1,7	1,1	0,8	1,7
> 63 ≤ 100	> 86 ≤ 136	1,0	0,7	1,8	1,1	0,8	1,8	1,1	0,8	1,7	1,0	0,7	1,6
> 100 ≤ 160	> 136 ≤ 217	0,9	0,7	1,7	1,0	0,8	1,7	1,0	0,8	1,7	0,9	0,7	1,6
> 160 ≤ 250	> 217 ≤ 340	0,8	0,6	1,7	0,9	0,7	1,7	0,9	0,7	1,6	0,9	0,7	1,6
> 250 ≤ 400	> 340 ≤ 543	0,75	0,6	1,6	0,75	0,6	1,6	0,75	0,6	1,6	0,75	0,6	1,6
> 400 ≤ 630	> 543 ≤ 856	0,65	0,5	1,6	0,65	0,5	1,6	0,65	0,5	1,6	0,65	0,5	1,6

Tabla 4.1 - Motores Trifásicos - Conjulado con rotor bloqueado (C_p), conjugado mínimo de arranque (C_{\min}) y máximo (C_{\max}), para motores de categoría N, relativos al conjugado nominal (C_n).

Número de polos		4			6			8		
Rango de potencias nominales		C_p/C_n	C_{\min}/C_n	C_{\max}/C_n	C_p/C_n	C_{\min}/C_n	C_{\max}/C_n	C_p/C_n	C_{\min}/C_n	C_{\max}/C_n
kW	cv							pu		
> 0,4 ≤ 0,63	> 0,54 ≤ 0,86	3,0	2,1	2,1	2,55	1,8	1,9	2,25	1,65	1,9
> 0,63 ≤ 1,0	> 0,86 ≤ 1,4	2,85	1,95	2,0	2,55	1,8	1,9	2,25	1,65	1,9
> 1,0 ≤ 1,6	> 1,4 ≤ 2,2	2,85	1,95	2,0	2,4	1,65	1,9	2,1	1,5	1,9
> 1,6 ≤ 2,5	> 2,2 ≤ 3,4	2,7	1,8	2,0	2,4	1,65	1,9	2,1	1,5	1,9
> 2,5 ≤ 4,0	> 3,4 ≤ 5,4	2,55	1,8	2,0	2,25	1,65	1,9	2,0	1,5	1,9
> 4,0 ≤ 6,3	> 5,4 ≤ 8,6	2,4	1,65	2,0	2,25	1,65	1,9	2,0	1,5	1,9
> 6,3 ≤ 10	> 8,6 ≤ 14	2,4	1,65	2,0	2,25	1,65	1,9	2,0	1,5	1,9
> 10 ≤ 16	> 14 ≤ 22	2,25	1,65	2,0	2,1	1,5	1,9	2,0	1,4	1,9
> 16 ≤ 25	> 22 ≤ 34	2,1	1,5	1,9	2,1	1,5	1,9	2,0	1,4	1,9
> 25 ≤ 40	> 34 ≤ 54	2,0	1,5	1,9	2,0	1,5	1,9	2,0	1,4	1,9
> 40 ≤ 63	> 54 ≤ 86	2,0	1,4	1,9	2,0	1,4	1,9	2,0	1,4	1,9
> 63 ≤ 100	> 86 ≤ 140	2,0	1,4	1,9	2,0	1,4	1,9	2,0	1,4	1,9
> 100 ≤ 160	> 140 ≤ 220	2,0	1,4	1,9	2,0	1,4	1,9	2,0	1,4	1,9

Tabla 4.2 - Motores Trifásicos - Conjulado con rotor bloqueado (C_p), conjugado mínimo de arranque (C_{\min}) y máximo (C_{\max}), para motores de categoría H, relativos al conjugado nominal (C_n).

Notas: a) los valores de C_p/C_n son iguales a 1,5 veces los valores correspondientes de la categoría N, no siendo, sin embargo, inferiores a 2,0;

b) los valores de C_{\min}/C_n son iguales a 1,5 veces los valores correspondientes de la categoría N, no siendo, sin embargo, inferiores a 1,4;

c) los valores de C_{\max}/C_n son iguales a los valores correspondientes de la categoría N, no siendo, sin embargo, inferiores a 1,9 o al valor correspondiente de C_{\min}/C_n .



4.1.3 Características de los motores WEG

Aunque los motores WEG sean, en su mayoría, declarados como pertenecientes a la categoría N, a ejemplo de la mayoría de los motores encontrados en el mercado, los valores reales típicos de los conjugados exceden los exigidos en la norma. La mayoría de los casos exceden, incluso, los mínimos exigidos para la categoría H. Esto significa una curva conjugado x velocidad bastante alta, trayendo las siguientes ventajas:

- 1) Rápida aceleración en caso de arranque pesado, como bombas de pistón, cintas cargadas, cargas de alta inercia, compresores con válvulas abiertas, etc.
- 2) Atendimientos de casos especiales, como los mencionados arriba, con motores estándar de stock, con ventajas de precio, plazo y entrega.
- 3) Permiten el uso de sistemas de arranque con tensión reducida, como llaves estrella-triángulo, en casos normales, sin perjuicio de la perfecta aceleración de la carga.
- 4) Debido al elevado valor del conjugado máximo, enfrentan, sin pérdida brusca de rotación, los picos momentáneos de carga y las caídas de tensión pasajeras. Esto es fundamental para el accionamiento de máquinas sujetas a grandes picos de carga, como trituradores de patasdra, calandrias, etc.

4.2 Inercia de la Carga

El momento de inercia de la carga accionada es una de las características fundamentales para verificar, a través del tiempo de aceleración, si el motor logra accionar la carga dentro de las condiciones exigidas por el ambiente o por la estabilidad térmica del material aislante.

El momento de inercia es una medida de la resistencia que un cuerpo ofrece a un cambio en su movimiento de rotación, en torno de un eje dado. Depende del eje en torno de cual está girando y de la forma del cuerpo, así como de la manera como su masa está distribuida. La unidad del momento de inercia es kgm^2 .

El momento de inercia total del sistema es la suma de los momentos de inercia de la carga y del motor ($J_t = J_m + J_c$). En el caso de una máquina que tiene "rotación diferente del motor" (por ejemplo, en casos de accionamiento por poleas o engranajes), deberá ser referida la rotación nominal del motor conforme sigue:

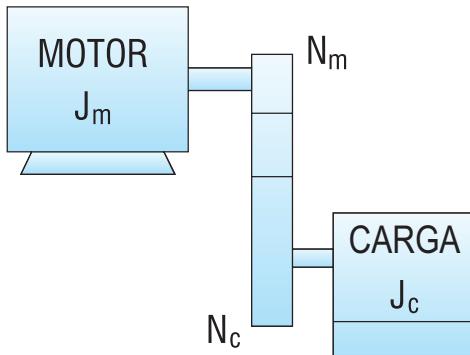


Figura 4.3 - Momento de inercia en rotaciones diferentes.

$$J_{ce} = J_c \left(\frac{N_c}{N_m} \right)^2 \quad (\text{kgm}^2)$$

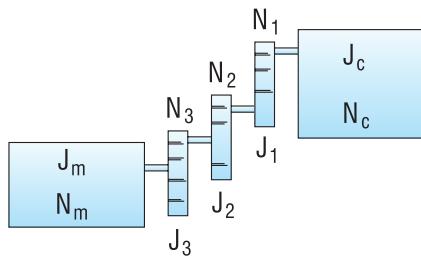


Figura 4.4 - Momento de inercia en velocidades diferentes

$$J_{ce} = J_c \left(\frac{N_c}{N_m} \right)^2 + J_1 \left(\frac{N_1}{N_m} \right)^2 + J_2 \left(\frac{N_2}{N_m} \right)^2 + J_3 \left(\frac{N_3}{N_m} \right)^2$$

Donde: J_{ce} - Momento de inercia de la carga referido al eje del motor

J_c - Momento de inercia de la carga

N_c - Rotación de la carga

N_m - Rotación nominal del motor

$$J_t = J_m + J_{ce}$$

La inercia total de una carga es un importante factor para la determinación del tiempo de aceleración.

4.3 Tiempo de Aceleración

Para verificar si el motor logra accionar la carga, o para dimensionar una instalación, equipo de arranque o sistema de protección, es necesario saber el tiempo de aceleración (desde el instante en que el equipo es accionado hasta ser alcanzada la rotación nominal). El tiempo de aceleración puede ser determinado de manera aproximada por el conjugado medio de aceleración.

$$t_a = \frac{2 \pi \cdot \text{rps} \cdot J_t}{C_a} = \frac{2 \pi \cdot \text{rps} \cdot (J_m + J_{ce})}{(C_{mmmed} - C_{rmed})}$$

t_a - tiempo de aceleración en segundos

J_t - momento de inercia total en kgm^2

rps - rotación nominal en rotaciones por segundo

C_{mmmed} - conjugado medio de aceleración del motor en N.m

C_{rmed} - conjugado medio resistente de carga referido al eje en N.m

J_m - momento de inercia del motor

J_{ce} - momento de inercia de la carga referido al eje

C_a - conjugado medio de aceleración

El conjugado medio de aceleración se obtiene a partir de la diferencia entre el conjugado del motor y el conjugado de la carga. Su valor debería ser calculado para cada intervalo de rotación (la sumatoria de los intervalos suministraría el tiempo total de aceleración). No obstante, en la práctica, es suficiente que se calcule gráficamente el conjugado medio, es decir, la diferencia entre la media del conjugado del motor y la media del conjugado de la carga. Dicha media puede ser obtenida gráficamente, bastando que se observe que la suma de las áreas A_1 y A_2 sea igual al área A_3 y que el área B_1 sea igual al área B_2 (vea la figura 4.5).

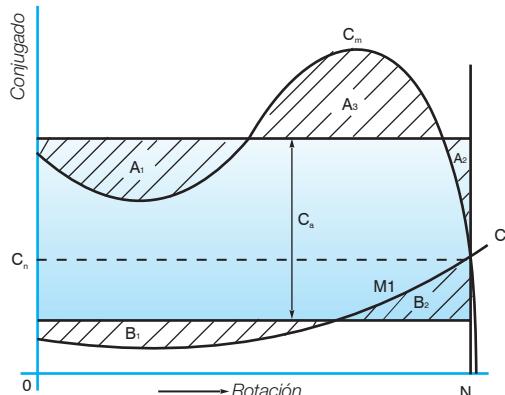


Figura 4.5 - Determinación grafica del conjugado medio de aceleración.

 C_n = Conjugado nominal C_m = Conjugado del motor C_r = Conjugado de la carga C_a = Conjugado medio de aceleración N_n = Rotación nominal

4.4 Régimen de Arranque

Debido al valor elevado de la corriente de arranque de los motores de inducción, el tiempo gastado en la aceleración de cargas de inercia elevada resulta en la elevación rápida de la temperatura del motor. Si el intervalo entre arranques sucesivos es muy reducido, llevará a un aumento de temperatura excesivo en el devanado, dañándolo o reduciendo su vida útil. Las normas y IEC 60034-1 establecen un régimen de arranque mínimo (S_1) que los motores debenser capaces de realizar:

- a) Dos arranques sucesivos, siendo el primero hecho con el motor frío, es decir, con sus devanados a temperatura ambiente, y la segunda a seguir, no obstante, después de que el motor se haya desacelerado hasta el reposo
- b) Un arranque con el motor caliente, o sea, con los devanados a temperatura de régimen

La primera condición simula el caso en que el primer arranque del motor es malogrado, por ejemplo, por el apagado de la protección, permitiéndose un segundo intento a continuación. La segunda condición simula el caso de un apagado accidental del motor en funcionamiento normal, por ejemplo, por falta de energía en la red, permitiéndose retomar el funcionamiento tras el restablecimiento de la energía. Como el calentamiento durante el arranque depende de la inercia de las partes girantes de la carga accionada, la norma establece los valores máximos de inercia de la carga para los cuales el motor debe ser capaz de cumplir las condiciones de arriba. Los valores fijados para motores de II, IV, VI y VIII polos están indicados en la tabla 4.3.

Potencia nominal		Número de polos			
		2	4	6	8
kW	cv	kgm ²			
0,4	0,54	0,018	0,099	0,273	0,561
0,63	0,86	0,026	0,149	0,411	0,845
1,0	1,4	0,040	0,226	0,624	1,28
1,6	2,2	0,061	0,345	0,952	1,95
2,5	3,4	0,091	0,516	1,42	2,92
4,0	5,4	0,139	0,788	2,17	4,46
6,3	8,6	0,210	1,19	3,27	6,71
10	14	0,318	1,80	4,95	10,2
18	22	0,485	2,74	7,56	15,5
25	34	0,725	4,10	11,3	23,2
40	54	1,11	6,26	17,2	35,4
63	86	1,67	9,42	26,0	53,3
100	140	2,52	14,3	39,3	80,8
160	220	3,85	21,8	60,1	123
250	340	5,76	32,6	89,7	184
400	540	8,79	49,7	137	281
630	860	13,2	74,8	206	423

Tabla 4.3 - Momento de inercia (J).

a) Los valores son dados en función de masa-radio al cuadrado. Los mismos fueron calculados a partir de la fórmula:

$$J = 0.04 \cdot P^{0.9} \cdot p^{2.5}$$

donde: P - potencia nominal en kW

p - número de pares de polos

b) Para valores intermedios de potencia nominal, el momento de inercia externo debe ser calculado por la formula de arriba. Para cargas con inercia mayor que el valor de referencia de la tabla 4.3, lo que puede ocurrir, principalmente en las potencias mayores o para determinación del número de arranques permitidos por hora, deberá ser consultada nuestra ingeniería de aplicación, indicando los siguientes datos de la aplicación:

- Potencia requerida por la carga. Si el régimen esintermitente, vea el último ítem: "régimen de funcionamiento"
- Rotación de la máquina accionada
- Transmisión: directa, correa plana, correas "V", corriente, etc
- Relación de transmisión con croquis de las dimensiones y distancias de las poleas, si es transmisión por correa
- Cargas radiales anormales aplicadas a la punta del eje: tracción de la correa en transmisiones especiales, pataszas pesadas, sujetas al eje, etc
- Cargas axiales aplicadas a la punta del eje: transmisiones por engranaje helicoidal, empujes hidráulicos de bombas, pataszas rotativas pesadas en montaje vertical, etc
- Si la forma constructiva no es B3D, indicar el código de la forma constructiva utilizada
- Conjugados de arranque y máximos necesarios.
- Descripción del equipamiento accionado y condiciones de utilización
- Momento de inercia o GD2 de las partes móviles del equipo y la rotación a la que está referida
- Régimen de funcionamiento, no tratándose de régimen continuo, describa detalladamente el período típico del régimen, no olvidando de especificar:
 - a) Potencia requerida y duración de cada período con carga;
 - b) Duración de los períodos sin carga (motor en vacío o motor apagado);
 - c) Reversiones del sentido de rotación;
 - d) Frenado en contra-corriente.

Los motores deben tener su número de arranques por hora conforme el régimen de servicio indicado en la placa de identificación y/o conforme el régimen acordado en el proyecto.

El exceso de arranques puede causar sobrecalentamiento y la consecuente quema del motor eléctrico. En caso de dudas consulte a WEG.

4.5 Corriente de Rotor Bloqueado

4.5.1 Valores Máximos Normalizados

Los límites máximos de la corriente con rotor bloqueado, en función de la potencia nominal del motor, son válidos para cualquier polaridad. Los mismos están indicados en la tabla 4.4, expresados en términos de la potencia aparente absorbida con rotor bloqueado en relación a la potencia nominal, kVA/cv o kVA/kW.

$$\text{kVA/cv} = \frac{\text{Potencia aparente con rotor bloqueado}}{\text{Potencia nominal}}$$

$$\text{kVA/cv} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot U}{P(\text{cv}) \cdot 1.000}$$

$$\text{kVA/kW} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot U}{P(\text{kW}) \cdot 1.000}$$

Siendo: I_p - Corriente de rotor bloqueado, o corriente de arranque
 U - Tensión nominal (V)
 P - Potencia nominal (cv o kW)

Rango de potencias		S_p / P_n	
kW	cv	kVA/kW	kVA/cv
> 0,37 ≤ 6,3	> 0,5 ≤ 8,6	13	9,6
> 6,3 ≤ 25	> 8,6 ≤ 34	12	8,8
> 25 ≤ 63	> 34 ≤ 86	11	8,1
> 63 ≤ 630	> 86 ≤ 856	10	7,4

Tabla 4.4 - Valores máximos de potencia aparente con rotor bloqueado (S_p/P_n), expresados por la razón para la potencia de salida nominal (P_n)

Nota: para obtener la relación I_p / I_n , se debe multiplicar el valor de kVA/kW por el producto del rendimiento y por el factor de potencia a plena carga.

I_p = Corriente con rotor bloqueado
 I_n = Corriente nominal

5. Regulación de la Velocidad de Motores Asíncronos de Inducción

La relación entre velocidad, frecuencia, número de polos y deslizamiento es expresada por:

$$n = \frac{f}{(2p)} \cdot 60 \cdot (1 - s)$$

Donde: n = rpm
 f = frecuencia (Hz)
 $2p$ = número de polos
 s = deslizamiento

- Analizando la fórmula, podemos ver que para regular la velocidad de un motor asincrónico, podemos actuar en los siguientes parámetros:
- 2p = número de polos
 - s = deslizamiento
 - f = frecuencia de la tensión (Hz)

5.1 Variación del Número de Polos

Existen tres modos de variar el número de polos de un motor asincrónico, son ellos:

- devanados separados en el estator
- un devanado con conmutación de polos
- combinación de los dos anteriores

En todos esos casos, la regulación de velocidad será discreta, sin pérdidas, sin embargo, la carcasa será más grande que la de un motor de velocidad única.

5.1.1 Motores de Dos Velocidades con Devanados Independientes

Esta versión presenta la ventaja de combinar devanados con cualquier número de polos, no obstante, es limitada por el dimensionamiento electromagnético del núcleo (estator/rotor) y carcasa, generalmente, mucho mayor que el motor de velocidad única.

5.1.2 Dahlander

Motores de dos velocidades con devanado por conmutación de polos es el sistema más común, también denominado "Dahlander". Esta conexión implica una relación de polos de 1:2 con consecuente relación de rotación de 2:1.

Pueden ser conectadas de la siguiente forma (figura 5.1):

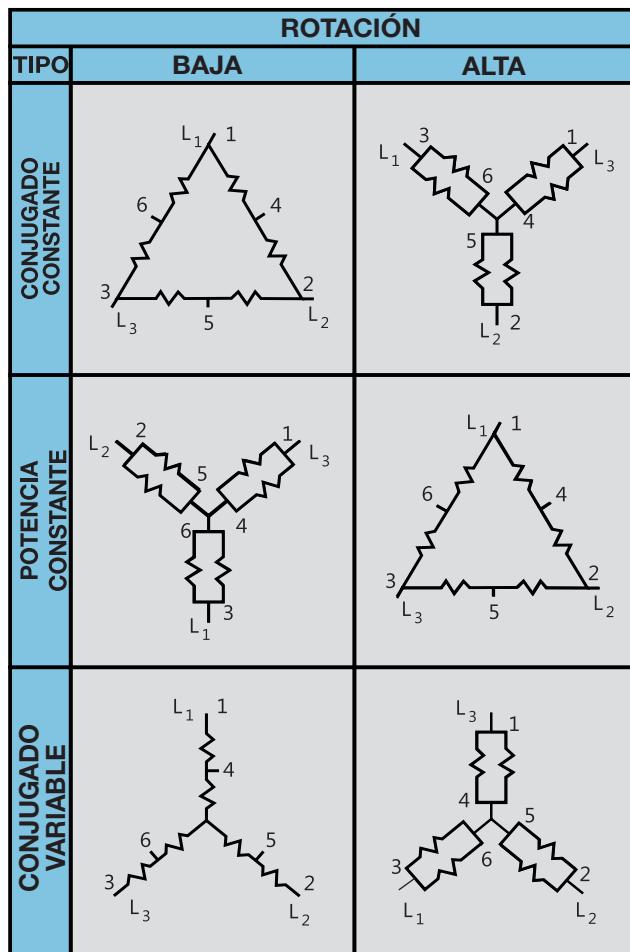


Figura 5.1 - Resumen de las conexiones Dahlander.

Conjugado constante

El conjugado en las dos rotaciones es constante y la relación de potencia es del orden de 0,63:1. En este caso el motor tiene una conexión de Δ/YY.

Ejemplo:

Motor 0,63/1 cv - IV/II polos - Δ/YY.

Este caso se presta para las aplicaciones cuya curva de par de la carga permanece constante con la rotación.

Potencia constante

En este caso, la relación de conjugado es 2:1 y la potencia permanece constante. El motor posee una conexión YY/Δ.

Ejemplo: 10/10 cv - IV/II polos - YY/Δ.

■ Conjugado variable

En este caso, la relación de potencia será de aproximadamente 1:4. Es muy aplicado a cargas como bombas, ventiladores. Su conexión es Y/YY. Ejemplo: 1/4 cv - IV/II polos - Y/YY.

5.1.3 Motores con Más de Dos Velocidades

Es posible combinar un devanado Dahlander con un devanado simple o más. Sin embargo, no es común, es solamente utilizado en aplicaciones especiales.

5.2 Variación del Deslizamiento

En este caso, la velocidad del campo girante es mantenida constante, y la velocidad del rotor es alterada de acuerdo con las condiciones exigidas por la carga, que pueden ser:

- variedad de la resistencia rotórica
- variedad de la tensión del estator
- variedad de ambas, simultáneamente.

Estas variaciones son conseguidas a través del aumento de las pérdidas rotóricas, lo que limita la utilización de ese sistema.

5.2.1 Variación de la Resistencia Rotórica

Utilizado en motores de anillos. Se basa en la siguiente ecuación:

$$s = \frac{p_{j2}}{\omega_o \cdot T} = \frac{3 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{\omega_o \cdot T}$$

donde:
 p_{j2} = Pérdidas rotóricas (W)
 ω_o = Rotación síncrona en rd/s
 T = Par o conjugado del rotor
 R_2 = Resistencia rotórica (Ohms)
 I_2 = Corriente rotórica (A)
 s = Deslizamiento

La inserción de una resistencia externa en el rotor hace que el motor aumente el deslizamiento (s), provocando la variación de velocidad.

En la figura a seguir, vemos el efecto del aumento del R_2 .

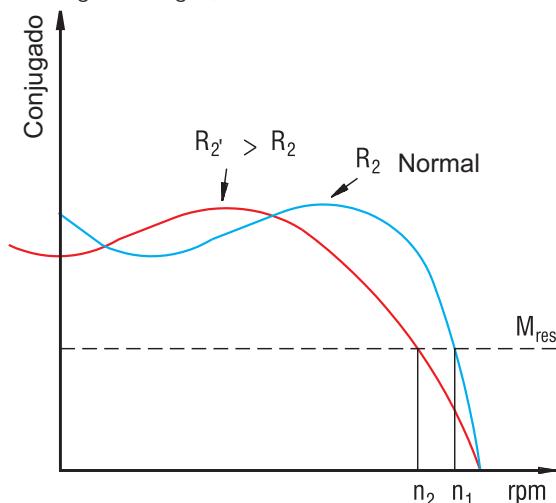


Figura 5.2 - Curva de conjugado con variación de la resistencia rotórica.

5.2.2 Variación de la Tensión del Estator

Es un sistema poco utilizado, una vez que también genera pérdidas rotóricas y el rango de variación de velocidad es pequeño.

5.3 Convertidores de Frecuencia

Por mayores informaciones sobre el uso de convertidores de frecuencia para control de velocidad, vea el capítulo "Aplicación de motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia".

6. Motofreno Trifásico

El motofreno consiste en un motor de inducción acoplado a un freno monodisco, formando una unidad integral compacta y robusta. El motor de inducción es totalmente cerrado con ventilación externa, con las mismas características de robustez y desempeño de la línea de motores. El freno es construido con pocas partes móviles, lo que asegura una larga duración con el mínimo de mantenimiento. La doble cara de las pastillas forma un grande superficie de roce, lo que proporciona pequeña presión sobre las mismas, bajo calentamiento y mínimo desgaste. Además de eso, el freno es enfriado por la propia ventilación del motor. La bobina de accionamiento del electroimán, protegida con resina epoxi, funciona continuamente con tensiones de 10% por encima o por debajo de la nominal.

La bobina de accionamiento del electroimán es alimentada por corriente continua, suministrada por un puente rectificador compuesto de diodos de silicio y varistores, que suprimen picos indeseados de tensión y permiten un rápido apagado de la corriente. La alimentación en corriente continua proporciona mayor rapidez y uniformidad de operación del freno.

El motofreno es generalmente aplicado en:

- máquinas-herramienta
- telares
- máquinas de embalaje
- transportadores
- máquinas de lavar y embotellar
- máquinas de bobinar
- dobladoras
- gupules
- puentes rodantes
- elevadores
- ajustes de rodillos de laminadoras
- máquinas gráficas

En fin, en equipamientos donde son exigidos paradas rápidas por cuestiones de seguridad, posicionamiento y reducción de tiempo de operación.



6.1 Funcionamiento del Freno

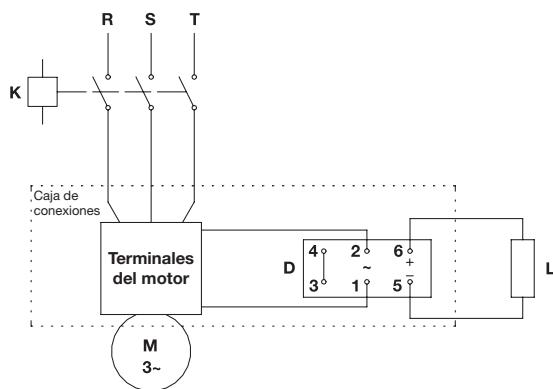
Cuando el motor es desconectado de la red, el control también interrumpe la corriente de la bobina y el electroimán para de actuar. Los resortes de presión empujan la armadura en dirección a la tapa trasera del motor. Las pastillas, que están alojadas en el disco de frenado, son comprimidas entre las dos superficies de roce, la armadura y la tapa, frenando el motor hasta que el mismo pare. Cuando el motor es conectado en la red, la bobina es alimentada y la armadura es atraída contra la carcasa del electroimán, venciendo la resistencia de los resortes. Las pastillas, al quedar libres, se desplazan axialmente en sus alojamientos quedando apartadas de las superficies de roce. De esta forma finaliza la acción de frenado, permitiendo que el motor arranque libremente. Opcionalmente puede ser suministrado un disco de frenado de lona.

6.2 Esquemas de Conexión

El motofreno WEG admite tres sistemas de conexiones, proporcionando frenados lentos, medios y rápidos.

a) Frenado lento

La alimentación del puente rectificador de la bobina del freno es hecha directamente de los terminales del motor, sin interrupción, conforme la figura a seguir:

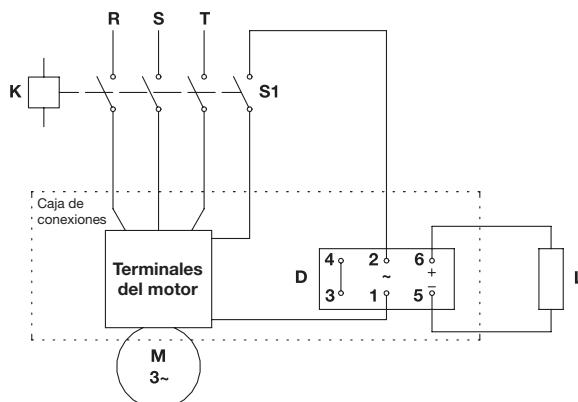


D - Puente Rectificadora
L - Bobina del electroimán
K - Contactor

Figura 6.1 - Esquema de conexión para frenado lento.

b) Frenado medio

En este caso, se intercala un contacto para interrupción de la corriente de alimentación del puente rectificador en el circuito de CA. Es esencial que éste sea un contacto auxiliar NA del propio contactor o llave magnética del motor, para garantizar que se encienda o apague el freno simultáneamente con el motor.

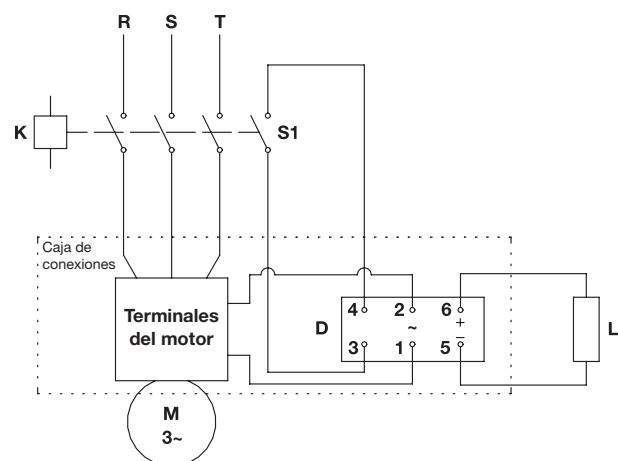


D - Puente Rectificadora
L - Bobina del electroimán
K - Contactor
S1- Contacto auxiliar NA

Figura 6.2 - Esquema de conexión para frenado medio

c) Frenado rápido

Se intercala el contacto para interrupción directamente en uno de los alambres de alimentación de la bobina. En el circuito CC. Es necesario que éste sea un contacto auxiliar NA del propio contactor o de la llave magnética del motor.



D - Puente rectificador
L - Bobina del electroimán
K - Contactor
S1 - Contacto auxiliar NA

Figura 6.3 - Esquema de conexión para frenado rápido

6.3 Alimentación de la Bobina de Freno

La alimentación del puente rectificador, por corriente alterna, puede ser obtenida de fuente independiente o de los terminales del motor. Esta alimentación podrá ser en 110/220 V, 440 V o 575 V, de acuerdo con las características del conjunto puente rectificador/bobina de freno.

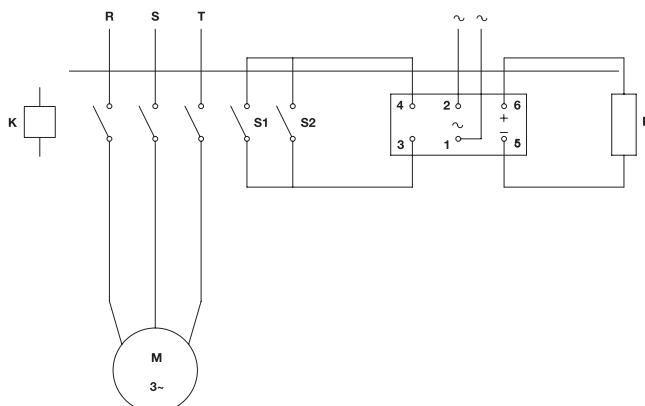
La bobina del freno también podrá ser suministrada en 24 Vcc, pero en este caso la alimentación deberá ser a través de una fuente independiente (corriente continua), dispensando el uso de puente rectificador (PR).

Por los terminales del motor

- Motor 220/380 V: conectar los terminales 1 y 2 de la PR (220 Vca) entre los terminales 1 y 4 del motor
- Motor 380/660 V: conectar los terminales 1 y 2 de la PR (220 Vca) entre el terminal 2 y el neutro
- Motor 220/380/440/760 V: conectar los terminales 1 y 2 de la PR (220 Vca) entre los terminales 1 y 4 del motor
- Motor cob 3 cables (tensión única): conecte los terminales 1 y 2 de la PR entre los terminales 1 y 2 del motor (en caso de que la tensión del puente sea igual a la del motor)
- Motor doble polaridad 220 V (PR 220 Vca):
 - alta rotación: conectar entre los terminales 4 y 6 del motor
 - baja rotación: conectar entre los terminales 1 y 2 del motor
- Motor 440 V: conectar los terminales del puente rectificador (440 Vca) a los terminales del motor.

Alimentación independiente (CA):

Para motores de otras tensiones, conecte los terminales del puente rectificador a la fuente independiente de 220 V, pero con interrupción simultánea con la alimentación del motor. Con alimentación independiente, es posible hacer eléctricamente el destrabamiento del freno, conforme la figura de abajo.



D - Puente rectificador
 L - Bobina del electroimán
 K - Contactor
 S1 - Contacto auxiliar NA
 S2 - Llave de destrabamiento eléctrico

Figura 6.4 - Esquema de conexión para alimentación independiente

6.4 Conjunto de frenado

Se puede obtener una parada más suave del motor disminuyendo el valor del conjugado de frenado, por la retirada de parte de los resortes de presión del freno.

¡Importante!

Los resortes deben ser retirados de manera que los restantes permanezcan simétricamente dispuestos, evitando que continúe existiendo fricción, incluso luego de accionado el motor, y se ocasiona el desgaste desparejo de las pastillas.

6.5 Ajuste del Entrehielro

Los motofrenos son suministrados con el entrehielro inicial, o sea, la distancia entre la armadura y la carcasa con el freno aplicado. Este valor mínimo preajustado en fábrica está indicado en la tabla 6.1.

Por ser de construcción simple, los motofrenos prácticamente dispensan mantenimiento, a no ser el ajuste periódico del entrehielro. Se recomienda proceder a una limpieza interna, cuando haya penetración de agua, polvo, etc., o en el mantenimiento periódico del motor.

Carcasa	Entrehielro inicial (mm)	Entrehielro máximo (mm)
71	0,2 - 0,3	0,6
80	0,2 - 0,3	0,6
90S - 60L	0,2 - 0,3	0,6
100L	0,2 - 0,3	0,6
112M	0,2 - 0,3	0,6
132S - 132M	0,3 - 0,4	0,8
160M - 160L	0,3 - 0,4	0,8

Tabla 6.1

Con el desgaste natural de las pastillas, el entrehielro aumenta gradualmente, no afectando el buen funcionamiento del freno hasta que alcance el valor máximo indicado en la tabla 6.1.

Para reajustar el entrehielro a sus valores iniciales, se procede como sigue:

- Retirar los tornillos de fijación y remueva la tapa deflectora
- Remover el anillo de protección
- Medir el entrehielro en tres puntos, próximos a los tornillos de regulación, la medición es hecha con un juego de láminas estándar (espía)
- Si la medida encontrada es mayor o igual al valor máximo indicado, o si las tres lecturas son diferentes entre sí, continuar la regulación de la siguiente manera:
 - soltar las contratuercas y los tornillos de regulación
 - ajustar el entrehielro a su valor inicial indicado en la tabla 6.1, apretando por igual los tres tornillos de regulación. El valor del entrehielro debe ser uniforme en los tres puntos de medición y debe ser de tal forma, que la lámina estándar correspondiente al límite inferior, penetre libremente en toda la vuelta, y la lámina correspondiente al límite superior no pueda ser introducida en ningún punto
 - apretar los tornillos de trabamiento hasta que su punta quede apoyada en la tapa del motor, no apretar en demasía

4. apretar firmemente las contratuercas
5. realizar una verificación final del entrehierro, procediendo a las mediciones conforme el ítem 2
6. recolocar la cinta de protección
7. recolocar la tapa deflectora, fijándola con los tornillos

Intervalos para inspección y ajuste del entrehierro

El intervalo de tiempo entre los reajustes periódicos del entrehierro, o sea, el número de operaciones de frenado hasta que el desgaste de las pastillas lleve el entrehierro a su valor máximo, depende de la carga, de las condiciones de servicio, de las impurezas del ambiente de trabajo, etc. El intervalo ideal podrá ser determinado por el mantenimiento, observándose el comportamiento del motofreno en los primeros meses de funcionamiento, en las condiciones reales de trabajo. El desgaste de las pastillas depende del momento de inercia de la carga accionada.

WEG dispone de otras opciones de freno para aplicaciones más rigurosas (ej.: puentes rodantes, traccionadores, reductores, etc.). En caso de dudas, consulte a WEG.

7. Características en Régimen

7.1.1 Calentamiento del Devanado

Pérdidas

La potencia útil suministrada por el motor, en la punta del eje, es menor que la potencia que el motor absorbe de la línea de alimentación, o sea, el rendimiento del motor es siempre inferior a 100%. La diferencia entre las dos potencias representa las pérdidas, que son transformadas en calor, lo cual calienta el devanado y debe ser disipado hacia fuera del motor, para evitar que la elevación de temperatura sea excesiva. Lo mismo ocurre en todos los tipos de motores. En el motor de automóvil, por ejemplo, el calor generado por las pérdidas internas tiene que ser retirado del block por el sistema de circulación de agua con radiador o por el ventilador, en motores enfriados a aire.

Dispersión del calor

El calor generado por las pérdidas en el interior de un motor cerrado es dispersado hacia el ambiente a través de la superficie externa de la carcasa. En motores cerrados esa dispersión es normalmente auxiliada por el ventilador montado en el propio eje del motor. Una buena dispersión depende:

- de la eficiencia del sistema de ventilación
- del área total de dispersión de la carcasa
- de la diferencia de temperatura entre la superficie externa de la carcasa y del aire ambiente ($t_{ext} - t_a$)

- a) El sistema de ventilación bien proyectado, además de tener un ventilador eficiente, capaz de mover un gran volumen de aire, debe dirigir ese aire de modo de cubrir toda la superficie de la carcasa, donde se da el intercambio de calor. De nada sirve contar con un gran volumen de aire si el mismo se esparce sin retirar el calor del motor
- b) El área total de dispersión debe ser la mayor posible. Entretanto, un motor con una carcasa muy grande, para obtener mayor área, sería muy caro y pesado, además de ocupar mucho espacio. Por eso, el área de dispersión disponible es limitada por la necesidad de fabricar motores pequeños y leves. Eso es compensado, en parte, aumentándose el área disponible, por medio de aletas de enfriamiento, fundidas con la carcasa

c) Un sistema de enfriamiento eficiente es aquel que logra disipar la mayor cantidad de calor disponible, a través de la menor área de dispersión. Para eso, es necesario que la caída interna de temperatura, mostrada en la figura 7.1, sea minimizada. Esto quiere decir que debe haber una buena transferencia de calor del interior del motor hacia la superficie externa de temperatura

Lo que realmente queremos limitar es la elevación de la temperatura en el devanado sobre la temperatura del aire ambiente. Esta diferencia total (Δt) es comúnmente llamada "elevación de temperatura" del motor y, como es indicado en la figura 7.1, vale la suma de la caída interna con la caída externa.

Como vimos, interesa reducir la caída interna (mejorar la transferencia de calor) para poder tener la mayor caída externa posible, ya que ésta es la que realmente ayuda a disipar el calor. La caída interna de temperatura depende de diversos factores como indica la figura 7.1, donde las temperaturas de ciertos puntos importantes del motor están representadas y explicadas a seguir:

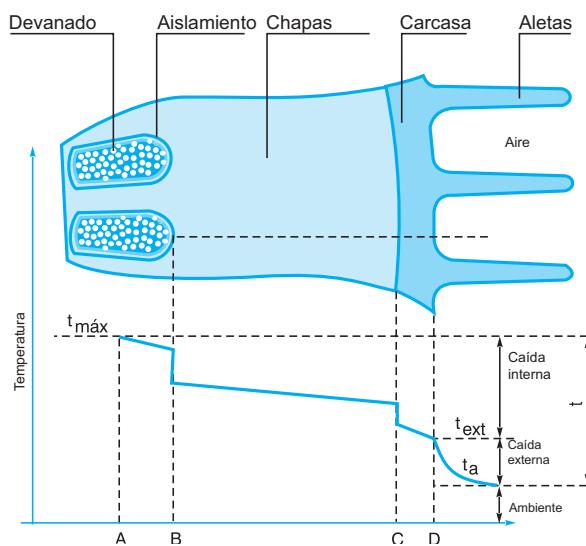


Figura 7.1

A - Punto más caliente del devanado, en el interior de la ranura, donde es generado el calor proveniente de las pérdidas en los conductores.

AB - Caída de temperatura en la transferencia de calor del punto más caliente hasta los alambres externos. Como el aire es un pésimo conductor de calor, es importante que no haya "vacíos" en el interior de la ranura, es decir, las bobinas deben ser compactas y la impregnación con barniz debe completar al máximo posible los vacíos.

B - Caída a través del aislamiento de la ranura y en el contacto de éste con los conductores de un lado, y con las chapas del núcleo, del otro. El empleo de materiales modernos mejora la transmisión de calor a través del aislante; la impregnación perfecta, mejora el contacto del lado interno, eliminando espacios vacíos; el buen alineamiento de las chapas estampadas mejora el contacto del lado externo, eliminando camadas de aire que perjudican la transferencia de calor.

BC - Caída de temperatura por transmisión a través del material de las chapas del núcleo.

C - Caída en el contacto entre el núcleo y la carcasa. La conducción de calor será mejor cuando más perfecto sea el contacto entre las partes, dependiendo del buen alineamiento de las chapas, y de la precisión del mecanizado de la carcasa. Superficies irregulares dejan espacios vacíos entre las mismas, resultando en mal contacto y, por tanto, mala conducción del calor.

CD - Caída de temperatura por transmisión a través de la espesura de la carcasa. Gracias a un proyecto moderno, uso de materiales avanzados, procesos de fabricación perfeccionados, bajo un permanente Control de Calidad, los motores WEG presentan una excelente transferencia de calor desde el interior hacia la superficie, eliminando "puntos calientes" en el devanado.

Temperatura externa del motor

Siguen, abajo, los locales donde recomendamos verificar la temperatura externa de un motor eléctrico, utilizando un medidor de temperatura calibrado, conforme la figura de abajo:



Figura 7.2

¡Importante!

Medir también la temperatura ambiente (máx. a 1 m de distancia del motor)

7.1.2 Vida Útil del Motor

Conforme es comentado en el ítem "materiales y sistemas de aislamiento", su vida útil depende casi exclusivamente de la vida útil del sistema de aislamiento de los devanados. Éste es afectado por muchos factores, como humedad, vibraciones, ambientes corrosivos y otros. Entre todos los factores, el más importante es, sin duda la temperatura de trabajo de los materiales aislantes empleados. Un aumento de 8 a 10 grados por encima del límite de la clase térmica, en la temperatura del sistema de aislamiento, puede reducir la vida útil del devanado a la mitad. Cuando hablamos en disminución de la vida útil del motor, no nos referimos a las temperaturas elevadas, cuando el aislante se quema, el devanado es destruido. La vida útil del sistema de aislamiento (en términos de temperatura de trabajo, sensiblemente por debajo de aquella en que el material se quema), se refiere al envejecimiento gradual del aislante, que va tornándose reseco, perdiendo el poder aislante, hasta que no soporta más la tensión aplicada y produce el cortocircuito. La experiencia muestra que la capacidad de aislamiento de los materiales tiene una duración prácticamente ilimitada, si su

temperatura es mantenida por debajo de un cierto límite. Por encima de este valor, la vida útil de los materiales aislantes se va tornando cada vez más corta, a medida que la temperatura de trabajo es más alta. Este límite de temperatura es mucho más bajo que la temperatura de "quema" del aislante y depende del tipo de material empleado. Esta limitación de temperatura se refiere al punto más caliente del aislamiento y no necesariamente a todo el devanado. Evidentemente, basta un "punto débil" en el interior de la bobina para que el devanado que de inutilizado. Recomendamos utilizar sensores de temperatura como protección adicional del motor eléctrico. Estos sensores podrán garantizar una mayor vida al motor y confiabilidad al proceso.

La especificación de alarma y/o apagado debe ser realizada de acuerdo con la clase térmica del motor. En caso de dudas, consulte a WEG.

7.1.3 Clases de Aislamiento

Definición de las clases

Como fue visto anteriormente, el límite de temperatura depende del tipo de material empleado. Para fines de normalización, los materiales aislantes y los sistemas de aislamiento (cada uno formado por la combinación de varios materiales) son agrupados en CLASES DE AISLAMIENTO, cada cual definida por el respectivo límite de temperatura, o sea, por la mayor temperatura que el material o el sistema de aislamiento puede soportar continuamente sin que sea afectada su vida útil.

Las clases de aislamiento utilizadas en máquinas eléctricas y los respectivos límites de temperatura conforme IEC 60034-1, son las siguientes:

- Clase A (105 °C)
- Clase E (120 °C)
- Clase B (130 °C)
- Clase F (155 °C)
- Clase H (180 °C)

7.1.4 Medida de Elevación de Temperatura del Devanado

Es muy difícil medir la temperatura del devanado con termómetros o termopares, ya que la temperatura varía de un punto a otro y nunca se sabe si el punto de la medición está próximo del punto más caliente. El método más confiable para medir la temperatura de un devanado es a través de la variación de su resistencia óhmica con la temperatura.

La elevación de la temperatura por el método de la resistencia, es calculada por medio de la siguiente fórmula, para conductores de cobre:

$$\Delta t = t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + t_1) + t_1 - t_a$$

Donde: Δt = es la elevación de temperatura

- t_1 = la temperatura del devanado antes del ensayo, prácticamente igual a la del medio refrigerante, medida por termómetro
- t_2 = la temperatura del medio refrigerante en el fin del ensayo
- t_a = temperature of the cooling medium at the conclusion of the test
- R_1 = resistencia del devanado antes del ensayo
- R_2 = resistencia del devanado en el fin del ensayo

7.1.5 Aplicación a Motores Eléctricos

La temperatura del punto más caliente del devanado debe ser mantenida por debajo del límite de la clase. La temperatura total vale la suma de la temperatura ambiente con la elevación de temperatura Δt más la diferencia que existe entre la temperatura media del devanado y la del punto más caliente. Las normas de motores fijan la máxima elevación de temperatura Δt , de modo que la temperatura del punto más caliente queda limitada, basada en las siguientes consideraciones:

- a) La temperatura ambiente es de un máximo de 40 °C, por norma. Por encima de tal, las condiciones de trabajo son consideradas especiales
- b) La diferencia entre la temperatura media y la del punto más caliente no varía mucho de motor para motor y su valor establecido por norma, basado en la práctica, es de 5 °C, para las clases A y E, 10 °C para las clases B y F, y 15 °C para la clase H

Las normas de motores, por tanto, establecen un máximo para la temperatura ambiente y especifican una elevación de temperatura máxima para cada clase de aislamiento. De este modo, queda indirectamente limitada la temperatura del punto más caliente del motor. Los valores numéricos y la composición de la temperatura admisible del punto más caliente, son indicados en la tabla 7.1.

Clase de aislamiento		A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	°C	40	40	40	40	40
Δt = elevación de temperatura (método de la resistencia)	°C	60	75	80	105	125
Diferencia entre el punto más caliente y la temperatura media	°C	5	5	10	10	15
Total: temperatura del punto más caliente	°C	105	120	130	155	180

Tabla 7.1 - Composición de la temperatura en función de la clase de aislamiento.

Para motores de construcción naval, deberán ser obedecidos todos los detalles particulares de cada entidad clasificadora, conforme la tabla 7.2.

Entidades clasificadoras para uso naval	Máxima sobreelevación de temperatura permitida por clase de aislamiento, Δt en °C (método de variación de resistencia)				
	A	E	B	F	H
Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd	-	-	75	100	120
American Bureau of Shipping	55	70	75	100	120
Bureau Veritas	55	70	75	100	120
Lloyds Register of Shipping	50	65	70	95	110
Registro Italiano Navale (RINA)	55	70	75	100	120

Tabla 7.2 - Corrección de las temperaturas para rotores navales.

7.2 Protección Térmica de Motores Eléctricos

Los motores utilizados en régimen continuo deben ser protegidos contra sobrecargas por un dispositivo integrante del motor, o por un dispositivo de protección independiente, generalmente con relé térmico con corriente nominal o de ajuste, igual o inferior al valor obtenido multiplicándose la corriente nominal de alimentación (I_n) por el factor de servicio (FS), conforme la tabla:

Factor de servicio del motor (FS)	Ajuste de la corriente del relé
1,0 hasta 1,15	$I_n \cdot FS$
$\geq 1,15$	$(I_n \cdot FS) - 5\%$

Tabla 7.3 - Corriente de alimentación x Factor de servicio.

La protección térmica es efectuada por medio de termoresistencias (resistencia calibrada), termistores, termostatos o protectores térmicos. Los tipos de sensores a ser utilizados son determinados en función de la clase de temperatura del aislamiento empleado, de cada tipo de máquina y de la exigencia del cliente.

7.2.1 Termorresistores (Pt-100)

Son sensores de temperatura con principio de funcionamiento basado en la proporcionalidad que algunos materiales que varían la resistencia eléctrica con la variación de la temperatura (generalmente platina, níquel o cobre). Poseen resistencia calibrada que varía linealmente con la temperatura, posibilitando un seguimiento continuo del proceso de calentamiento del motor por el display del controlador, con alto grado de precisión y sensibilidad de respuesta.

Un mismo sensor puede servir para alarma (operación por encima de la temperatura normal de trabajo) y apagado (generalmente ajustada para la máxima temperatura de la clase de aislamiento). Las resistencias de los cables, de los contactos, etc., pueden interferir en la medición. De esa forma, existen diferentes tipos de configuraciones que pueden ser realizadas buscando minimizar dichos efectos.

- La configuración de dos alambres normalmente es satisfactoria en locales donde la longitud del cable del sensor hasta el instrumento no sobrepasa los 3,0 m para calibre 20 AWG
- En la configuración de tres alambres (más utilizada por la industria) habrá una compensación de la resistencia eléctrica por el tercer alambre
- En la configuración de cuatro alambres (montaje más preciso), existen dos conexiones para cada terminal del bulbo (dos cables para tensión y dos para corriente), obteniéndose un balanceo total de resistencias (es utilizada en casos donde es necesaria una gran precisión)

Desventaja

Los elementos sensores y los circuitos de control poseen un alto costo.



Figura 7.3 - Visualización del aspecto interno y externo de los termorresistores.

Para el Pt-100, la temperatura puede ser obtenida con la fórmula a seguir, o a través de tablas suministradas por los fabricantes.

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{r - 100}{0,385}$$

r - resistencia medida en Ohms.

7.2.2 Termistores (PTC y NTC)

Los termistores son dispositivos hechos de materiales semiconductores, cuya resistencia varía acentuadamente con la temperatura.

PTC - coeficiente de temperatura positivo

NTC - coeficiente de temperatura negativo

El termistor "PTC" presenta aumento de la resistencia con el aumento de la temperatura y algunos son caracterizados porque tal aumento es abrupto, lo que los torna útiles en dispositivos de protección de sobrecalentamiento. El termistor "NTC" presenta reducción de la resistencia con el aumento de la temperatura, normalmente no son utilizados en motores eléctricos.

La brusca variación en la resistencia interrumpe la corriente en el PTC, accionando un relé de salida, lo cual apaga el circuito principal.

Los termistores pueden ser usados para alarma y apagado. En ese caso, son necesarios dos termistores, conectados en serie, por fase. Los termistores poseen tamaño reducido, no sufren desgastes mecánicos y tienen una respuesta más rápida en relación a los otros detectores, aunque no permitan un seguimiento continuo del proceso de calentamiento del motor. Los termistores, con sus respectivos circuitos electrónicos de control, ofrecen protección completa contra sobrecalentamiento producido por falta de fase, sobrecarga, sub o sobretensiones y operaciones frecuentes de reversión o enciende-apaga. Poseen bajo costo, cuando son comparados al del tipo Pt-100, sin embargo, necesitan de relé para comando de la actuación de la alarma o de la operación.



Figura 7.4 - Visualización del aspecto externo de los termistores.

Sigue abajo la tabla de los principales PTC utilizados en los motores eléctricos. Esta tabla relaciona los colores de los cables del sensor PTC con su temperatura de actuación.

Colores de los cables	Temperatura °C
Rojo	110
Gris	120
Amarillo	140
Cian	160
Rojo + Cian	180

Tabla 7.4 - Colores de los cables.

WEG posee el relé electrónico RPW que tiene a función específica de adquirir la señal del PTC y actuar su relé de salida. Para mayores informaciones consulte a WEG.

7.2.3 Protectores Térmicos Bimetálicos - Termostatos

Son sensores térmicos del tipo bimetálico con contactos de plata normalmente cerrados, que se abren al alcanzar determinada elevación de temperatura. Cuando la temperatura de actuación del bimetálico baja, el mismo vuelve a su forma, original instantáneamente, permitiendo el cierre de los contactos nuevamente. Los termostatos pueden ser destinados para sistemas de alarma, apagado o ambos (alarma y apagado) de motores eléctricos trifásicos. En los motores, los termostatos son instalados en las cabezas de

bobinas de fases diferentes y conectados en serie con la bobina del contactor donde, dependiendo del grado de seguridad y de la especificación del cliente, pueden ser utilizados tres termostatos (uno por fase) o seis termostatos (grupos de dos por fase).

Para operar en alarma y apagado (dos termostatos por fase), los termostatos de alarma deben ser apropiados para actuación en la elevación de temperatura prevista del motor, mientras que los termostatos de apagado deberán actuar a la temperatura máxima del material aislante.

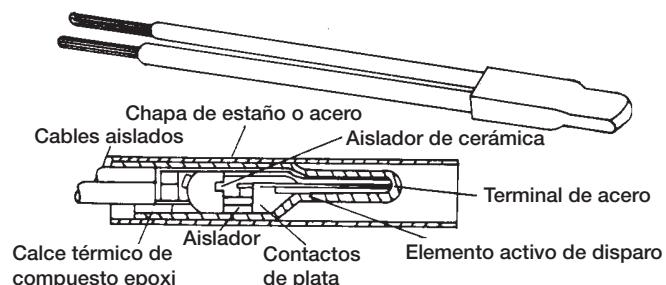


Figura 7.5 - Visualización del aspecto interno y externo del termostato.

Los termostatos también son utilizados en aplicaciones especiales de motores monofásicos. En estas aplicaciones, el termostato puede ser conectado en serie con la alimentación del motor, desde que la corriente del motor no sobrepase la máxima corriente admisible del termostato. En caso de que esto ocurra, el termostato debe ser conectado en serie con la bobina del contactor. Los termostatos son instalados en las cabezas de bobinas de fases diferentes.



Figura 7.6 - Instalación del protector térmico bimetálico.

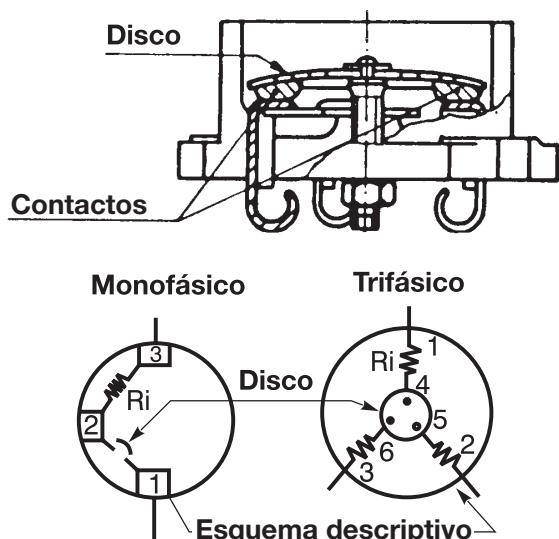
Nota: WEG recomienda utilizar sensores de temperatura en la protección del devanado y de rodamientos, con el objetivo de aumentar la vida útil y la confiabilidad del motor eléctrico.

7.2.4 Protectores Térmicos Fenólicos

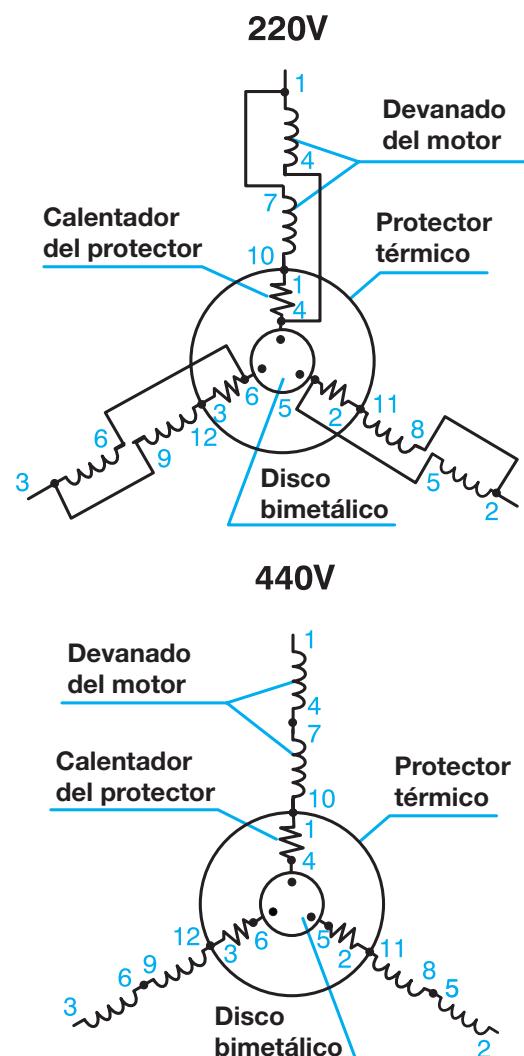
Son dispositivos del tipo bimetálico con contactos normalmente cerrados utilizados principalmente en motores de inducción monofásicos para protección contra sobrecalentamiento provocado por sobrecargas, trabamiento del rotor, caídas de tensión, etc. El protector térmico consiste básicamente en un disco bimetálico que posee dos contactos móviles, una resistencia y un par de contactos fijos. El protector es conectado en serie con la alimentación y debido a la disipación térmica causada por el pasaje de la corriente a través de la resistencia interna, ocurre una deformación del disco, haciendo que los contactos se abran y que la alimentación del motor sea interrumpida.

Luego de ser alcanzada una temperatura inferior a la especificada, el protector debe reencender el sistema. En función del reencendido, puede haber dos tipos de protectores:

- Protector con reencendido automático
- Protector con reencendido manual



El protector térmico también tiene aplicación en motores trifásicos, no obstante, solamente en motores con conexión Y. El siguiente esquema de conexión podrá ser utilizado:



Ventajas

- Combinación de protector sensible a corriente y a temperatura
- Posibilidad de reencendido automático

Desventajas

- Limitación de la corriente, por estar el protector conectado directamente a la bobina del motor monofásico.
- Aplicación direccionalizada a motores trifásicos solamente en el centro de la conexión Y.

Nota: WEG recomienda utilizar sensores de temperatura en la protección del devanado y de los rodamientos, con el objetivo de aumentar la vida útil y la confiabilidad del motor eléctrico.



	Termostistor (Pt-100)	Termistor (PTC e NTC)	Protector térmico bimetálico	Protector térmico fenólico
Mecanismo de protección	Resistencia calibrada	Resistor de avalancha	<ul style="list-style-type: none"> ■ Contactos móviles ■ Bimetálicos 	Contactos móviles
Disposición	Cabeza de bobina	Cabeza de bobina	<ul style="list-style-type: none"> ■ Insertado en el circuito ■ Cabeza de bobina 	Insertado en el circuito
Forma de actuación	Comando externo de actuación en la protección	Comando externo de actuación en la protección	<ul style="list-style-type: none"> ■ Actuación directa ■ Comando externo de actuación de la protección. 	Actuación directa
Limitación de corriente	Corriente de comando	Corriente de comando	<ul style="list-style-type: none"> ■ Corriente del motor ■ Corriente del comando 	Corriente del motor
Tipo de sensibilidad	Temperatura	Temperatura	Corriente y temperatura	Corriente y temperatura
Número de unidades por motor	3 ó 6	3 ó 6	3 ó 6 1 ó 3	1
Tipos decomando	Alarma y/o apagado	Alarma y/o apagado	<ul style="list-style-type: none"> ■ Apagado ■ Alarma y/o apagado 	Apagado

Tabla 7.5 - Protectores térmicos

Causes of overheating	Protección en función de la corriente		Protección con sondas térmicas y relé térmico
	Sólo fusible o disyuntor	Fusible y relé térmico	
Sobrecarga con corriente 1.2 veces la corriente nominal	○	●	●
Regímenes de carga S1 a S10	○	○	●
Frenados, reversiones y funcionamiento con arranques frecuentes	○	○	●
Funcionamiento con más de 15 arranques por hora	○	○	●
Rotor bloqueado	●	○	●
Falta de fase	○	○	●
Variación de tensión excesiva	○	●	●
Variación de frecuencia en la red	○	●	●
Temperatura ambiente excesiva	○	○	●
Calentamiento externo provocado por rodamientos, correas, poleas, etc.	○	○	●
Obstrucción de la ventilación	○	○	●

Tabla 7.6 - Comparación entre sistemas de protección de motores.

Detalle: no protegido ○
 semiprotegido ○
 totalmente protegido ●

Orientamos a no utilizar disyuntores en caja moldeada para distribución y minidisyuntores para protección de arranques de motores eléctricos, debido a que estos no cumplen la norma de protección de motores eléctricos, por los siguientes motivos:

- Generalmente estos disyuntores no poseen regulación/ajuste de su corriente térmica/sobrecarga nominal, teniendo apenas valores fijos de esta corriente nominal, y en la mayoría de los casos, no se igualan a la corriente nominal del motor eléctrico
- En casos de sistemas trifásicos, el dispositivo térmico de los disyuntores no posee la protección por "falta de fase", ya que su dispositivo térmico no cuenta con la "curva característica sobrecarga bipolar" - 2 fases que los relés de sobrecarga normales y electrónicos poseen

7.3 Régimen de Servicio

Según la IEC 60034-1, es el grado de regularidad de la carga a la que el motor es sometido. Los motores normales son proyectados para régimen continuo, (la carga es constante), por tiempo indefinido, e igual a la potencia nominal del motor. La indicación del régimen del motor debe ser realizada por el comprador de la forma más exacta posible. En los casos en que la carga no varía o en los cuales varía de forma previsible, el régimen podrá ser indicado numéricamente o por medio de gráficos que representan la variación en función del tiempo de las grandes variables. Cuando la secuencia real de los valores en el tiempo sea indeterminada, deberá ser indicada una secuencia ficticia no menos severa que la real. La utilización de otro régimen de arranque en relación al informado en la placa de identificación podrá llevar al sobrecalentamiento del motor y consecuentes daños al mismo. En caso de dudas consulte a WEG.

7.3.1 Regímenes Estandarizados

Los regímenes de tipo y los símbolos alfanuméricos a ellos atribuidos, son indicados a seguir:

a) Régimen continuo (S1)

Funcionamiento a carga constante de duración suficiente para que se alcance el equilibrio térmico (figura 7.9).

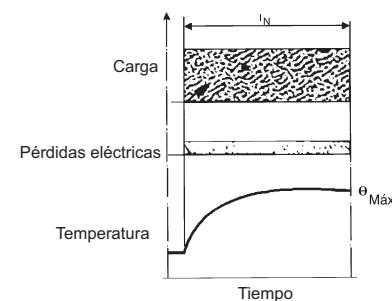


Figura 7.9

t_N = funcionamiento en carga constante

$\theta_{\text{máx}}$ = temperatura máxima alcanzada

b) Régimen de Tiempo Limitado (S2)

Funcionamiento a carga constante, durante un cierto tiempo, inferior al necesario para alcanzar el equilibrio térmico, seguido de un período de reposo de duración suficiente para restablecer la temperatura del motor dentro de + 2K en relación a la temperatura del fluido refrigerante (figura 7.10).

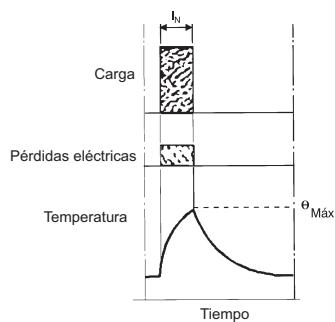


Figura 7.10

t_N = funcionamiento en carga constante
 $\theta_{\text{máx.}}$ = temperatura máxima alcanzada durante el ciclo

c) Régimen intermitente periódico (S3)

Secuencia de ciclos idénticos, cada cual incluyendo un período de funcionamiento con carga constante y un período desenergizado y en reposo. En este régimen, el ciclo es tal que la corriente de arranque no afecta de modo significativo la elevación de temperatura (figura 7.11)

$$\text{Factor de duración del ciclo} = \frac{t_N}{t_N + t_R} \cdot 100\%$$

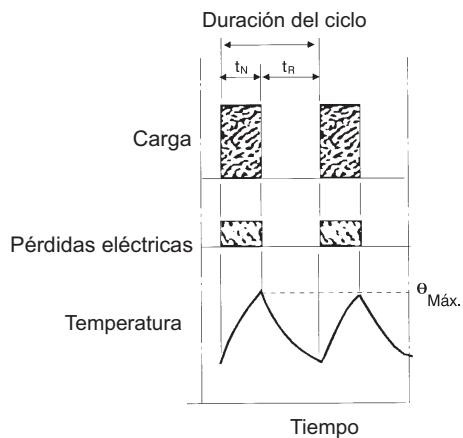


Figura 7.11

t_N = funcionamiento en carga constante
 t_R = reposo
 $\theta_{\text{máx.}}$ = temperatura máxima alcanzada durante el ciclo

d) Régimen intermitente periódico con arranques (S4)

Secuencia de ciclos de régimen idénticos, cada cual consistiendo en un período de arranque, un período de funcionamiento a carga constante y un período de reposo, siendo tales períodos muy cortos, para que se alcance el equilibrio térmico (figura 7.12).

$$\text{Factor de duración del ciclo} = \frac{t_D + t_N}{t_D + t_N + t_R} \cdot 100\%$$

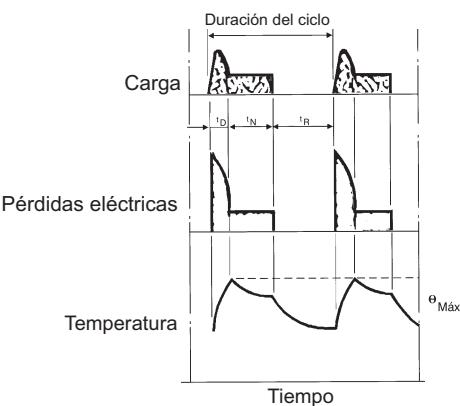


Figura 7.12

t_D = arranque
 t_N = funcionamiento en carga constante
 t_R = reposo
 $\theta_{\text{máx.}}$ = temperatura máxima alcanzada durante el ciclo

e) Régimen intermitente periódico con frenado eléctrico (S5)

Secuencia de ciclos de régimen idénticos, cada cual consistiendo en un período de arranque, un período de funcionamiento a carga constante, un período de frenado eléctrico y un período desenergizado y en reposo, siendo tales períodos muy cortos para que se alcance el equilibrio térmico (figura 7.13).

$$\text{Factor de duración del ciclo} = \frac{t_D + t_N + t_F}{t_D + t_N + t_F + t_R} \cdot 100\%$$

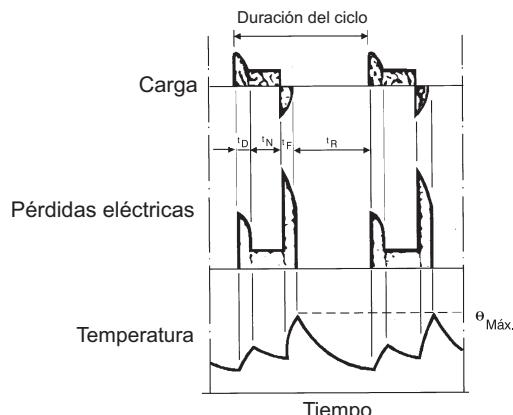


Figura 7.13

t_D = arranque
 t_N = funcionamiento en carga constante
 t_F = frenado eléctrico
 t_R = reposo
 $\theta_{\text{máx.}}$ = temperatura máxima alcanzada durante el ciclo

f) Régimen de funcionamiento continuo periódico con carga intermitente (S6)

Secuencia de ciclos de régimen idénticos, cada cual consistiendo en un período de funcionamiento a carga constante y un período de funcionamiento en vacío, no existiendo período de reposo (figura 7.14).

$$\text{Factor de duración del ciclo} = \frac{t_N}{t_N + t_V} \cdot 100\%$$

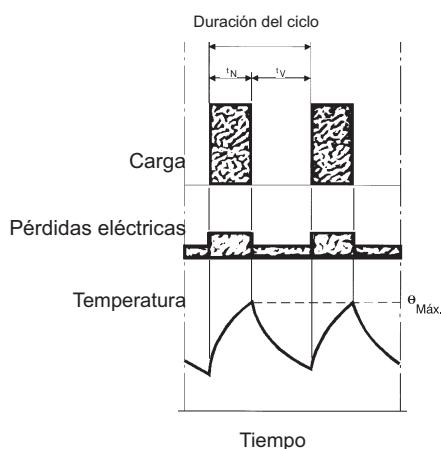


Figura 7.14

t_N = funcionamiento en carga constante

t_V = funcionamiento en vacío

θ_{\max} = temperatura máxima atingida durante el ciclo

g) Régimen de funcionamiento continuo periódico con frenado eléctrica (S7)

Secuencia de ciclos de regímenes idénticos, cada cual consistiendo de un período de arranque, en un período de funcionamiento a carga constante y un período de frenado eléctrica, no existiendo el período de reposo (figura 7.15).

Factor de duración del ciclo = 1

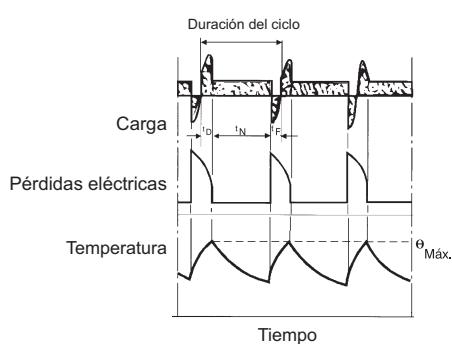


Figura 7.15

t_D = arranque

t_N = funcionamiento en carga constante

t_F = frenado eléctrico

θ_{\max} = temperatura máxima alcanzada durante el ciclo

h) Régimen de funcionamiento continuo con cambio periódico en la relación carga/velocidad de rotación (S8)

Secuencia de ciclos de regímenes idénticos, cada ciclo consiste en un período de arranque y un período de funcionamiento a carga constante, correspondiendo a una determinada velocidad de rotación, seguidos de uno o más períodos de funcionamiento a otras cargas constantes, correspondientes a diferentes velocidades de rotación. No existe período de reposo (figura 7.16).

Factor de duración de ciclo:

$$\begin{aligned} \text{■ Para } N_1 &= \frac{t_D + t_{N_1}}{t_D + t_{N_1} + t_{F_1} + t_{N_2} + t_{F_2} + t_{N_3}} \cdot 100\% \\ \text{■ Para } N_2 &= \frac{t_{F_1} + t_{N_2}}{t_D + t_{N_1} + t_{F_1} + t_{N_2} + t_{F_2} + t_{N_3}} \cdot 100\% \\ \text{■ Para } N_3 &= \frac{t_{F_2} + t_{N_3}}{t_D + t_{N_1} + t_{F_1} + t_{N_2} + t_{F_2} + t_{N_3}} \cdot 100\% \end{aligned}$$

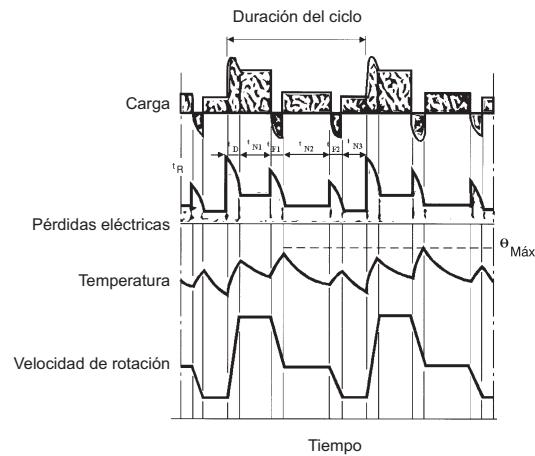


Figura 7.16

$t_{F_1} - t_{F_2}$ = frenado eléctrico

t_D = arranque

$t_{N_1} - t_{N_2} - t_{N_3}$ = funcionamiento en carga constante

θ_{\max} = temperatura máxima alcanzada durante el ciclo

i) Régimen con variaciones no periódicas de carga y de velocidad (S9)

Régimen en el cual generalmente la carga y la velocidad varían no periódicamente, dentro del rango de funcionamiento admisible, incluyendo frecuentemente sobrecargas aplicadas que pueden ser muy superiores a la carga de referencia (figura 7.17).

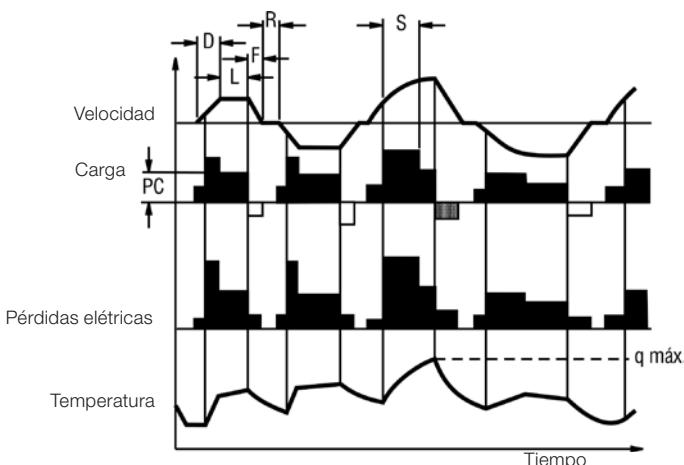


Figura 7.17

j) Régimen con cargas constantes distintas (S10)

Régimen consistiendo en un número específico de valores distintos de cargas (o cargas equivalentes) y, si es aplicable, velocidad, siendo cada combinación carga/velocidad mantenida por un tiempo suficiente para permitir que la máquina alcance el equilibrio térmico. La carga mínima durante un ciclo de régimen puede tener el valor cero (funcionamiento en vacío o reposo sin tensión).

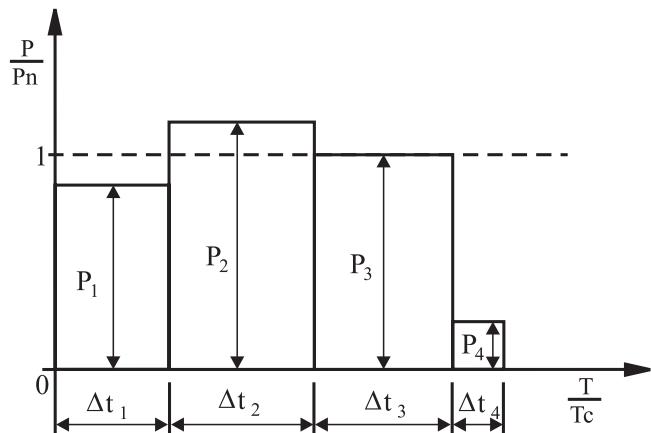


Figura 7.18a

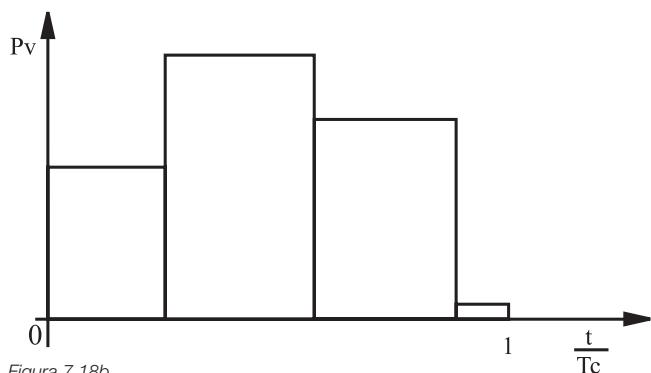
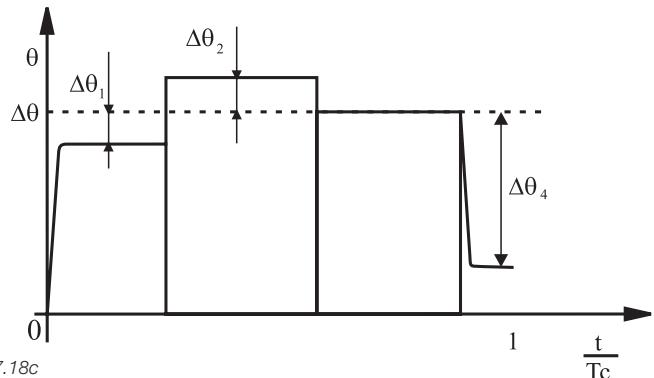


Figura 7.18b



Nota: en los regímenes S3 y S8, el período es generalmente demasiado corto para que sea alcanzado el equilibrio térmico, de modo que el motor se va calentando y enfriando parcialmente a cada ciclo. Luego de un gran número de ciclos, el motor alcanza un rango de elevación de temperatura y equilibrio.

k) Regímenes especiales

Donde la carga puede variar durante los períodos de funcionamiento, existe reversión o frenado por contracorriente, etc., la elección del motor adecuado debe ser hecha mediante consulta a la fabrica y depende de una descripción completa del ciclo:

- Potencia necesaria para accionar la carga. Si la carga varía cíclicamente, se debe proveer un gráfico de carga x tiempo, como es ejemplificado en la figura 7.15
- Conjunto resistente de la carga
- Momento de inercia total (GD2 o J) de la máquina accionada, referida a su rotación nominal
- Número de arranques, reversiones, frenados por contracorriente, etc
- Duración de los períodos en carga y en reposo o vacío

7.3.2 Designación del Régimen Tipo

El régimen tipo es designado por el símbolo descrito en el ítem 7.3. En el caso de régimen continuo, éste puede ser indicado, como alternativa, por la palabra "continuo". Ejemplos de las designaciones de los regímenes:

1) S2 60 segundos

La designación de los regímenes S2 a S8 es seguida de las siguientes indicaciones:

- S2, del tiempo de funcionamiento en carga constante
- S3 a S6, del factor de duración del ciclo
- S8, de cada una de las velocidades nominales que constituyen el ciclo, seguida de la respectiva potencia nominal y de su respectivo tiempo de duración

En el caso de los regímenes S4, S5, S7 y S8, otras indicaciones a ser agregadas a la designación, deberán ser estipuladas mediante acuerdo entre fabricante y comprador.

Notas: como ejemplo de las indicaciones a ser agregadas, mediante el referido acuerdo a las designaciones de regímenes tipo diferentes del continuo, se citan las siguientes, aplicables según el régimen tipo considerado:

- Número de arranques por hora;
- Número de frenados por hora;
- Tipo de frenados;
- Constante de energía cinética (H), en la velocidad nominal, del motor y de la carga, esta última puede ser sustituida por el factor de inercia (F_l).

Donde: la constante de energía cinética es la relación entre la energía cinética (almacenada en el rotor a velocidad de rotación nominal) y la potencia aparente nominal. El factor de inercia es la relación entre la suma del momento de inercia total de la carga (referido al eje del motor) y del momento de inercia del rotor.

2) S3 25%; S6 40%

3) S8 motor H.1 Fl. 10 33 cv 740 rpm 3 min

Donde: - H.1 significa una constante de energía cinética igual a 1s;
- Fl.10 significa un factor de inercia igual a 10.

4) S10 para $\Delta t = 1.1/0.4; 1.0/0.3; 0.9/0.2; r/0.1; TL = 0.6$.

Donde: Δt está en p.u. (por unidad) para las diferentes cargas y sus duraciones respectivas y del valor de TL en p.u. para la expectativa de vida térmica del sistema de aislamiento. Durante los períodos de reposo, la carga debe ser indicada por la letra "r".

7.3.3 Potencia Nominal

Es la potencia que el motor puede proveer, dentro de sus características nominales, en régimen continuo. El concepto de potencia nominal, o sea, la potencia que el motor puede proveer, está íntimamente relacionado a la elevación de temperatura del devanado. Sabemos que el motor puede accionar cargas de potencias muy por encima de su potencia nominal, hasta casi alcanzar el conjugado máximo. Lo que ocurre, no obstante, es que, si esta sobrecarga es excesiva, es decir, si se exige del motor una potencia muy por encima de aquella para la cual fue proyectado, el calentamiento normal será sobrepasado y la vida del motor será disminuida, pudiéndose, incluso, quemar rápidamente. Se debe siempre tener en mente que la potencia solicitada al motor es definida por las características de la carga, o sea, independientemente de la potencia del motor: una carga de 90 cv, independientemente si el motor es de 75 cv o 100 cv, serán solicitados del motor 90 cv.

7.3.4 Potencias Equivalentes para Cargas de Pequeña Inercia

Evidentemente, un motor eléctrico debe suprir la máquina accionada con la potencia necesaria, siendo recomendable que exista un margen de holgura, ya que podrán ocurrir pequeñas sobrecargas; o incluso, dependiendo del régimen de servicio, el motor podrá, eventualmente, suprir más o menos potencia. A pesar de las innúmeras formas normalizadas de descripción de las condiciones de funcionamiento de un motor, es frecuentemente necesario, en la práctica, evaluar la solicitud impuesta al motor por un régimen más complejo que aquellos descritos en las normas. Una forma usual de calcular la potencia equivalente es por la fórmula:

$$P_m^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^l P(t)^2 \Delta t$$

Donde: P_m = potencia equivalente solicitada al motor
 $P(t)$ = potencia, variable con el tiempo, solicitada al motor
 T = duración total del ciclo (período)

El método está basado en la hipótesis de que la carga efectivamente aplicada al motor acarrearía la misma solicitud térmica que una carga ficticia, equivalente, que solicita continuamente la potencia P_m . Se basa también en el hecho de ser asumida una variación de las pérdidas con el cuadrado de la carga, y en que la elevación de temperatura es directamente proporcional a las pérdidas.

Esto es verdadero para motores que giran continuamente, pero son solicitados intermitentemente.

De esta forma:

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4 + P_5^2 \cdot t_5 + P_6^2 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}}$$

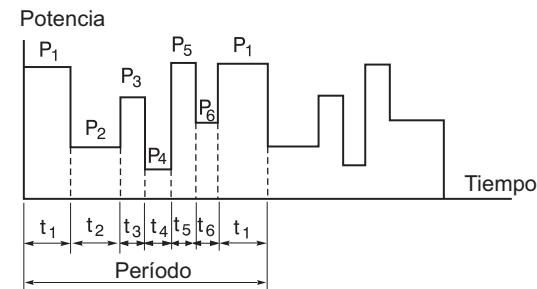


Figura 7.19 - Funcionamiento continuo con solicitudes intermitentes.

En caso de que el motor permanezca en reposo entre los tiempos de carga, la refrigeración del mismo será perjudicada. Por ende, para los motores donde la ventilación está vinculada al funcionamiento del motor (por ejemplo, motores totalmente cerrados con ventilador externo montado en el propio eje del motor) la potencia equivalente es calculada por la fórmula:

$$(P_m)^2 = \frac{\sum (P_i^2 \cdot t_i)}{\sum (t_i + \frac{1}{3} t_r)}$$

donde: t_i = tiempos en carga
 t_r = tiempos en reposo
 P_i = cargas correspondientes

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_3^2 \cdot t_3 + P_5^2 \cdot t_5 + P_6^2 \cdot t_6}{t_1 + t_3 + t_5 + t_6 + \frac{1}{3} (t_2 + t_4 + t_7)}}$$

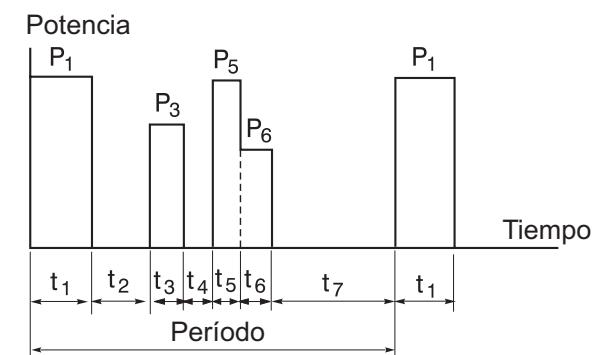


Figura 7.20 - Funcionamiento con carga variable y con reposo entre los tiempos de carga.

7.4 Factor de Servicio (FS)

Se llama factor de servicio (FS) al factor que, aplicada la potencia nominal, indica la carga permisible que puede ser aplicada continuamente al motor, bajo condiciones especificadas. Note que se trata de una capacidad de sobrecarga continua, o sea, una reserva de potencia que le da al motor una capacidad de soportar mejor el funcionamiento en condiciones desfavorables. El factor de servicio no debe ser confundido con la capacidad de sobrecarga momentánea, durante algunos minutos. El factor de servicio FS = 1,0 significa que el motor no fue proyectado para funcionar continuamente por encima de su potencia nominal. Esto, sin embargo, no cambia su capacidad para sobrecargas momentáneas. La IEC 60034-1 especifica los factores de servicio usuales por potencia.

8. Características de Ambiente

Para analizar la viabilidad del uso de un motor en una determinada aplicación, se deben tomar en consideración algunos parámetros:

- Altitud en que el motor será instalado
- Temperatura del medio refrigerante

Conforme IEC 60034-1, las condiciones usuales de servicio, son:

- a) Altitud no superior a 1.000 m por encima del nivel del mar
- b) Medio refrigerante (en la mayoría de los casos, el aire ambiente) con temperatura no superior a 40 °C y exenta de elementos perjudiciales

Hasta estos valores de altitud y temperatura ambiente, se consideran condiciones normales donde el motor debe proveer, sin sobrecalentamiento, su potencia nominal.

8.1 Altitud

Motores funcionando en altitudes por encima de 1.000 m. presentan problemas de calentamiento causado por la rarefacción del aire y, consecuentemente, disminución de su poder de refrigeración (enfriamiento).

El intercambio insuficiente de calor entre el motor y el aire circundante, lleva a la exigencia de reducción de pérdidas, lo que significa también la reducción de la potencia.

Los motores tienen calentamiento directamente proporcional a las pérdidas y éstas varían, aproximadamente, en una razón cuadrática con la potencia. Existen algunas alternativas de aplicaciones a ser evaluadas:

- a) La instalación de un motor en altitudes por encima de 1.000 metros puede ser realizada usándose material aislante de clase superior
- b) Según la norma IEC 60034-1, la reducción necesaria en la temperatura ambiente debe ser de 1% de los límites de elevación de temperatura para cada 100 m de altitud por encima de 1.000 m. Esta regla es válida para altitudes hasta 4.000 m. Para valores superiores, contacte a WEG

Ejemplo:

Motor de 100 cv, aislamiento F con ΔT 80 K , trabajando a una altitud de 1.500 m por encima del nivel del mar, la temperatura ambiente de 40 °C será reducida en 5%, resultando en una temperatura ambiente máxima estable de 36 °C. Evidentemente, la temperatura ambiente podrá ser mayor desde que la elevación de la temperatura sea menor que la temperatura de la clase térmica.

$$T_{\text{amb}} = 40 - 80 \cdot 0,05 = 36 \text{ °C}$$

8.2 Temperatura Ambiente

Motores que trabajan a temperaturas inferiores a -20 °C, presentan los siguientes problemas:

- a) Excesiva condensación, exigiendo drenaje adicional o instalación de resistencia de calentamiento, en caso de que el motor permanezca largos períodos parado
- b) Formación de hielo en los cojinetes, provocando endurecimiento de las grasas o lubricantes en los mismos, exigiendo el empleo de lubricantes especiales o grasa anticongelante (consulte nuestro sitio web). En motores que trabajan a temperaturas ambientales constantemente superiores a 40 °C, el devanado puede alcanzar temperaturas perjudiciales para el aislamiento Este hecho debe ser compensado por un proyecto especial del motor, usando materiales aislantes especiales o por sobredimensionamiento del motor.

8.3 Determinación de la Potencia Útil del Motor en las Diversas Condiciones de temperatura y Altitud

Asociando los efectos de la variación de la temperatura y de la altitud, la capacidad de disipación de la potencia del motor puede ser obtenida multiplicándose la potencia útil por el factor de multiplicación obtenido en la tabla 8.1.

T (°C)	Altitud (m)									
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	
10										0,97 0,92 0,88
15						0,98	0,94 0,90	0,86		
20					1,00	0,95	0,91	0,87	0,83	
25				1,00	0,95	0,93	0,89	0,85	0,81	
30		1,00	0,96	0,92	0,90	0,86	0,82	0,78		
35	1,00	0,95	0,93	0,90	0,88	0,84	0,80	0,75		
40	1,00	0,97	0,94	0,90	0,86	0,82	0,80	0,76	0,71	
45	0,95	0,92	0,90	0,88	0,85	0,81	0,78	0,74	0,69	
50	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77	0,72	0,67	
55	0,88	0,85	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73	0,70	0,65	
60	0,83	0,82	0,80	0,77	0,75	0,73	0,70	0,67	0,62	
65	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,62	0,58	
70	0,74	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,62	0,58	0,53	
75	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,53	0,49	
80	0,65	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,55	0,48	0,44	

Tabla 8.1 Factor de multiplicación de la potencia útil en función de la temperatura ambiente (T) en °C y de altitud (H) en m".

Ejemplo:

Un motor de 100 cv, aislamiento F, para trabajar en un local con altitud de 2.000 m y temperatura ambiente de 55 °C.

De la tabla 8.1 - $\alpha = 0,83$ logo P" = 0,83 , Pn

El motor podrá suministrar apenas 83% de su potencia nominal.

8.4 Atmósfera Ambiente

8.4.1 Ambientes Agresivos

Ambientes agresivos, tales como astilleros, instalaciones portuarias, industria de pescados y múltiples aplicaciones navales, industria química y petroquímica, exigen que los equipos que allí trabajan, sean perfectamente adecuados para soportar tales circunstancias, con elevada confiabilidad, sin presentar problemas de ninguna especie.

Para aplicación de motores en estos ambientes agresivos, WEG posee una línea específica para cada tipo de motores, proyectados para atender los requisitos especiales y estandarizados para las condiciones más severas que puedan ser encontradas. Tales motores pueden poseer las siguientes características especiales:

- Devanado doblemente impregnado
- Pintura anticorrosiva alquídica (interna y externa)
- Elementos de montaje zincados
- Sellado específico para la aplicación entre eje y tapa (puede ser Retentor, W3Seal, etc.)
- Protección adicional entre las juntas de pasaje

Para ambientes con temperaturas entre -16 °C y 40 °C y con humedad relativa ≤95%, se recomienda utilizar pintura interna anticorrosiva. Para ambientes entre 40 °C y 65 °C también se recomienda utilizar pintura interna anticorrosiva, no obstante, debe ser aplicado un valor de derating a 40 °C.

Nota: con humedades superiores a 95% se recomienda la pintura anticorrosiva junto con la resistencia de calentamiento.

En el caso de motores navales, las características de funcionamiento específicas son determinadas por el tipo de carga accionada a bordo. Todos los motores, sin embargo, presentan las siguientes características especiales:

- Elevación de temperatura reducida para funcionamiento en ambientes de hasta 50 °C.
- Capacidad de soportar, sin problemas, sobrecargas ocasionales de corta duración de hasta 60% por encima del conjugado nominal, conforme normas de las Sociedades Clasificadoras.

En lo que se refiere al control rígido, para asegurar la confiabilidad en servicio, los motores navales WEG se encuadran dentro de las exigencias de construcción, inspección y ensayos establecidos en las normas de las Sociedades Clasificadoras:

- Registro Italiano Navale (RINA)
- American Bureau of Shipping (ABS)
- Bureau Veritas (BV)
- China Certification Society (CCS)
- Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (DNV GL)
- Lloyd's Register (LR)
- Russian Maritime Register of Shipping (RS)
- Korean Register of Shipping (KRS)
- Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK)

8.4.2 Ambientes Conteniendo Polvo o Fibras

Para analizar si los motores pueden, o no, trabajar en estos ambientes, deben ser informados tamaño y cantidad aproximada de fibras contenidas en el ambiente. Esos datos son factores importantes, ya que una gran cantidad de polvo, depositada sobre las aletas del motor, puede funcionar como un aislante térmico, y fibras de mayor tamaño pueden provocar, con el transcurso del tiempo, la obstrucción de la ventilación perjudicando el sistema de refrigeración. Cuando el contenido en fibras es elevado, deben ser empleados filtros

de aire o se debe efectuar una limpieza en los motores.

Evitar que la ventilación del motor sea perjudicada

En estos casos, existen dos soluciones:

- 1) Utilizar motores sin ventilación
- 2) Para motores con ventilación por ductos, se calcula el volumen de aire desplazado por el ventilador del motor, determinando la circulación de aire necesaria para una perfecta refrigeración del motor

8.4.3 Ambientes Explosivos

Los motores a prueba de explosión, no inflamables, de seguridad aumentada, y a prueba de polvo, se destinan para trabajar en ambientes clasificados como explosivos por contener gases, vapores, polvo o fibras inflamables o explosivas. El capítulo 9 (atmósferas explosivas) trata específicamente tal asunto.

8.5 Grado de Protección

Los envoltorios de los equipos eléctricos, conforme las características del local en que serán instalados y su accesibilidad, deben ofrecer un determinado grado de protección. De esta forma, por ejemplo, un equipo a ser instalado en un local sujeto a chorros de agua, debe poseer un envoltorio capaz de soportar tales chorros, bajo determinados valores de presión y ángulo de incidencia, sin que haya penetración de agua.

8.5.1 Código de Identificación

La norma IEC 60034-5 define los grados de protección de los equipos eléctricos por medio de las letras

1º guarismo	
Guarismo	Indicación
0	Máquina no protegida
1	Máquina protegida contra objetos sólidos mayores a 50 mm
2	Máquina protegida contra objetos sólidos mayores a 12 mm
3	Máquina protegida contra objetos sólidos mayores a 2,5 mm
4	Máquina protegida contra objetos sólidos mayores a 1 mm
5	Máquina protegida contra polvo
6	Máquina totalmente protegida contra polvo

Tabla 8.2 - 1º guarismo: Indica el grado de protección contra penetración de cuerpos sólidos extraños y contacto accidental.

2º guarismo	
Guarismo	Indicación
0	Máquina no protegida
1	Máquina protegida contra goteo vertical
2	Máquina protegida contra goteo de agua, con inclinación de hasta 15°
3	Máquina protegida contra aspersión de agua
4	Máquina protegida contra proyecciones de agua
5	Máquina protegida contra chorros de agua
6	Máquina protegida contra chorros potentes
7	Máquina protegida contra los efectos de la inmersión temporaria
8	Máquina protegida contra los efectos de la inmersión continua

Tabla 8.3 - 2º guarismo: Indica el grado de protección contra penetración de agua en el interior del motor.

Las combinaciones entre los dos guarismos, es decir, entre los dos criterios de protección, están resumidos en la tabla 8.4. Note que, de acuerdo con la norma, la calificación del motor en cada grado, en lo que se refiere a cada uno de los guarismos, es definida a través de ensayos estandarizados, y no está sujeta a interpretaciones, como ocurría anteriormente.

Motor	Grado de protección	1º guarismo		2º guarismo
		Protección contra contacto	Protección contra cuerpos extraños	Protección contra agua
Motores abiertos	IP00	no tiene	no tiene	no tiene
	IP02	no tiene	no tiene	gotas de agua hasta una inclinación de 15° con la vertical
	IP11	toque accidental con la mano	cuerpos extraños sólidos de dimensiones por encima de 50 mm	gotas de agua en la vertical
	IP12	toque accidental con la mano	cuerpos extraños sólidos de dimensiones por encima de 50 mm	gotas de agua hasta una inclinación de 15° con la vertical
	IP13	toque accidental con la mano	cuerpos extraños sólidos de dimensiones por encima de 50 mm	agua de lluvia hasta una inclinación de 60° con la vertical
	IP21	toque con los dedos	cuerpos extraños sólidos de dimensiones por encima de 12 mm	gotas de agua hasta una inclinación de 15° con la vertical
	IP22	toque con los dedos	cuerpos extraños sólidos de dimensiones por encima de 12 mm	Protection against dripping water even when tilted 15°
	IP23	toque con los dedos	cuerpos extraños sólidos de dimensiones por encima de 12 mm	agua de lluvia hasta una inclinación de 60° con la vertical
Motores cerrados	IP44	toque con herramientas	cuerpos extraños sólidos de dimensiones por encima de 1 mm	salpicaduras de todas las direcciones
	IP54	protección completa contra pares	protección contra acumulación de polvo nocivo	salpicaduras de todas las direcciones
	IP55	protección completa contra pares	protección contra acumulación de polvo nocivo	chorros de agua en todas las direcciones

Tabla 8.4 - Grados de protección.

8.5.2 Tipos Usuales de Grados de Protección

Aunque algunos guarismos indicativos de grado de protección puedan ser combinados de muchas maneras, solamente algunos tipos de protección son empleados en los casos normales. Los mismos son: IP21, IP22, IP23, IP44 e IP55. Los tres primeros son motores abiertos y los dos últimos son motores cerrados. Para aplicaciones especiales más rigurosas, son comunes, también, los grados de protección IP55W (protección contra intemperies), IP56 (protección contra "agua de oleaje"), IP65 (totalmente protegido contra polvos) e IP66 (totalmente protegido contra polvos y agua de oleaje).

Sellado de los cojinetes

Para garantizar el grado de protección requerido para cada aplicación, los motores cuentan con sistemas de sellados que evitan la entrada de residuos a través de los cojinetes.

Los motores WEG se pueden suministrar con los siguientes sistemas de sellado de los cojinetes:

- V'Ring
- Retentor
- Labirinto
- WSeal® - Sistema de sellado exclusivo de WEG, compuesto por un anillo V'Ring con doble labio y cubierta metálica montados sobre el anillo.
- W3 Seal® - Sistema de sellado exclusivo de WEG, compuesto por tres sellos: V'Ring, O'Ring y Laberinto.

Los sistemas de sellado WSeal® e W3 Seal® fueron desarrollados por WEG, contra acumulación de impurezas sólidas y líquidas presentes en el ambiente.

NOTA: Para conocer el sello de su motor, debe consultar los sellos disponibles por línea de producto y tamaño de bastidor. Las opciones anteriores cumplen con la mayoría de las aplicaciones del mercado. Para obtener más información, comuníquese con WEG.

8.5.3 Motores a Prueba de Intemperies

Conforme la norma IEC 60034-5, el motor será a prueba de intemperies cuando como consecuencia de su proyecto (discusión técnica entre cliente y WEG), las protecciones definidas proporcionen un correcto funcionamiento de la máquina, en condición de exposición a agua (lluvia), vientos (polvos) y nieve.

WEG utiliza la letra W junto a la indicación del grado de protección del motor para indicar que el motor tiene un plan de pintura especial (a prueba de intemperies). Los planes de pintura podrán variar de acuerdo con la agresividad del ambiente, lo cual deberá ser informado por el cliente durante especificación/solicitud del producto.

Ambientes agresivos exigen que los equipamientos que en los mismos trabajan sean perfectamente adecuados para soportar tales circunstancias con elevada confiabilidad, sin presentar problemas de cualquier especie.

WEG produce una variada gama de motores eléctricos con características técnicas especiales, apropiadas para utilización en astilleros, instalaciones portuarias, industria del pescado y múltiples aplicaciones navales, además de las industrias químicas y petroquímicas y otros ambientes de condiciones agresivas. Siendo así, son adecuados a los más severos regímenes de trabajo.

8.6 Resistencia de Calentamiento

Las resistencias de calentamiento son instaladas cuando un motor eléctrico es instalado en ambientes muy húmedos, (humedad > 95%) y/o con posibilidad de quedar apagados por largos períodos (por encima de 24 h), impidiendo la acumulación de agua en el interior del motor por la condensación del aire húmedo.

Las resistencias de calentamiento, calientan el interior del motor algunos grados por encima del ambiente (5 a 10 °C), cuando el motor esta apagado. La tensión de alimentación de las resistencias de calentamiento, deberá ser especificada por el cliente, siendo disponibles en 110 V, 220 V y 440 V.

Dependiendo de la carcasa, serán empleados los resistores de calentamiento, conforme la tabla 8.5.

Carcasa	Cantidad	Potencia (W)
63 a 80	1	7,5
90 a 100	1	11
112	2	11
132 a 160	2	15
180 a 200	2	19
225 a 250	2	28
280 a 315	2	70
355 a 315B	2	87

Tabla 8.5 - Resistencia de calentamiento.

ATENCIÓN: las resistencias de calentamiento sólo deberán ser energizadas con el motor apagado, en caso contrario el motor podrá sufrir un sobrecalentamiento, resultando en daños potenciales. En los casos de mantenimiento en el motor, el mismo deberá ser completamente desenergizado, incluyendo las resistencias de calentamiento.

8.7 Límites de Ruidos

Los motores WEG cumplen las normas NEMA y IEC que especifican los límites máximos de nivel de potencia sonora, en decibeles. Los valores de la tabla 8.6, están conforme IEC 60034-9.

Carcasa	2 polos		4 polos		6 polos		8 polos	
	Potencia	Presión	Potencia	Presión	Potencia	Presión	Potencia	Presión
90	83	71	69	57	66	54	66	54
100	87	75	73	61	67	55	67	55
112	88	76	75	63	73	61	73	61
132	90	78	78	66	76	64	74	62
160	92	79	80	67	76	63	75	62
180	93	80	83	70	80	67	79	66
200	95	82	86	73	83	70	82	69
225	97	84	87	74	83	70	82	69
250	97	83	88	74	85	71	83	69
280	99	85	91	77	88	74	85	71
315	103	88	97	82	92	77	91	76
355	105	90	98	83	97	82	95	80

Tabla 8.6 - Niveles máximos de potencia y presión sonora para motores trifásicos (IC411, IC511, IC611), a vacío, en dB (A), 60 Hz.

Nota 1: motores IC01, IC11, IC21 pueden tener niveles de potencia sonora mayores: 2 y 4 polos +7dB (A), - 6 y 8 polos +4dB (A)

Nota 2: los niveles de presión y potencia sonora para motores 2 y 4 polos con carcasa 355 son para ventiladores unidireccionales. Los demás son para ventiladores bidireccionales.

Nota 3: los valores para motores 50 Hz deben ser disminuidos: 2 polos -5dB (A); 4, 6 y 8 polos -3dB (A)

En la tabla 8.7 están citados los incrementos a ser considerados en los valores de presión y potencia sonora, en dB (A), para motores operando en carga.

Carcasa	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
90 a 160	2	5	7	8
180 a 200	2	4	6	7
225 a 280	2	3	6	7
315	2	3	5	6
355	2	2	4	5

Tabla 8.7 - Incremento máximo estimado para presión y potencia sonora, en dB (A)

Nota 1: esta tabla provee el incremento máximo esperado para condición en carga nominal.

Nota 2: los valores son válidos para 50 Hz y 60 Hz.



9. Atmósferas Explosivas

9.1 Áreas de Riesgo

Una instalación donde son continuamente manipulados productos inflamables, procesados o almacenados, necesita, obviamente, de cuidados especiales que garanticen el mantenimiento del patrimonio y preserven la vida humana.

Los equipos eléctricos, por sus propias características, pueden representar fuentes de ignición, ya sea por el chispeo normal, debido a apertura y cierre de contactos, o por supercalentamiento de algún componente, sea intencional o causado por corrientes de defecto.

9.2 Atmósfera Explosiva

Una atmósfera es explosiva cuando la proporción de gas, vapor, polvo o fibras es tal, que una chispa proveniente de un circuito eléctrico o el calentamiento de un aparato provoca la explosión. Para que se inicie una explosión, son necesarios tres elementos:

$$\text{Combustible} + \text{oxygeno} + \text{chispa} = \text{explosión}$$

9.3 Clasificación de las Áreas de Riesgo

De acuerdo con la norma IEC, las áreas de riesgo son clasificadas en:

Zona 0:

Región donde la ocurrencia de mezcla inflamable y/o explosiva es continua, o existe por largos períodos. Por ejemplo, la región interna de un tanque de combustible. La atmósfera explosiva está siempre presente.

Zona 1:

Región donde la probabilidad de ocurrencia de mezcla inflamable y/o explosiva está asociada a la operación normal del equipo y del proceso. La atmósfera explosiva está frecuentemente presente.

Zona 2:

Locales donde la presencia de mezcla inflamable y/o explosiva no es probable de que ocurra, y si ocurre, es por pocos períodos. Está asociada a la operación anormal del equipo y del proceso, pérdidas o uso negligente. La atmósfera explosiva puede accidentalmente estar presente. De acuerdo con la norma NEC/API 500, las áreas de riesgo son clasificadas en divisiones.

- División 1 - Región donde se presenta una ALTA probabilidad de ocurrencia de una explosión
- División 2 - Región de menor probabilidad

Normas	Ocurrencia de mezcla inflamable		
	Continúa	En condición normal	En condición anormal
IEC	Zona 0	Zona 1	Zona 2
NEC/API	División 1		División 2

Tabla 9.1 - Comparación entre IEC y NEC/API.

El proceso o almacenamiento de polvo en los espacios confinados ofrece riesgo potencial de explosión. Eso ocurre cuando es mezclado con el aire en forma de nubes, o cuando permanece depositado sobre los equipos eléctricos. Con relación a la presencia de polvo combustible, conforme la norma IEC 61241-10, las áreas son clasificadas en:

Zona 20:

Área en la cual el polvo combustible, en la forma de nube misturada con el aire, está continuamente presente durante largos períodos.

Zona 21:

Área en la cual el polvo combustible en la forma de nube misturada con el aire podrá estar presente durante la operación normal, ocurriendo ocasionalmente.

Zona 22:

Área en la cual el polvo combustible en la forma de nube es improbable durante la operación normal, y si ocurre, será por cortos períodos.

Entre los productos que sus polvos, o polvos inflamables crean atmósferas explosivas en el interior de ambientes confinados, podemos citar el carbón, trigo, celulosa, fibras y plásticos en partículas finamente divididas, entre otros.

9.3.1 Clases y Grupos de Áreas de Riesgo

Clases - Se refieren a la naturaleza de la mistura. El concepto de clases sólo es adoptado por la norma NEC.

Grupos - El concepto de grupo está asociado a la composición química de la mistura.

Clases I

Gases o vapores explosivos. Conforme el tipo de gas o vapor, tenemos:

- GRUPO A - acetileno
- GRUPO B - hidrógeno, butadieno, óxido de etileno
- GRUPO C - éter etílico, etileno
- GRUPO D - gasolina, nafta, solventes en general

Clases II

Polvos combustibles o conductores. Conforme el tipo de polvo, tenemos:

- GROPO E
- GROPO F
- GROPO G

Clases III

Fibras y partículas leves e inflamables.

De acuerdo con la norma IEC 60079-0, los grupos de riesgo son divididos en:

- Grupo I - Para minas susceptibles a liberación de grisú (gas a base de metano)
- Grupo II - Para aplicación en otros locales con gases explosivos, siendo divididos en IIA, IIB y IIC
- Grupo III - Para aplicación en locales con atmósfera explosiva de polvos, siendo dividido en:
 - III A - Fibras combustibles
 - III B - Polvos no conductores
 - III C - Polvos conductores

Gases Normas	Grupo acetileno	Grupo hidrógeno	Grupo etano	Grupo propano
IEC	II C	II C	II B	II A
NEC/API	Clase I Gr A	Clase I Gr B	Clase I Gr C	Clase I Gr D

Tabla 9.2 - Correspondencia entre IEC y NEC/API para gases.

Atmósfera explosiva	IEC	NEC
Gases o vapores	Zona 0 y Zona 1	Clase I Division 1
	Zona 2	Clase I Division 2
Polvos combustibles	Zona 20 y Zona 21	Clase II Division 1
	Zona 22	Clase II Division 2

Tabla 9.4 - Clasificación de áreas conforme IEC e NEC.

Polvos y fibras Normas	Polvos de alta conductividad	Polvos de leve conductividad	Polvos no conductores	Fibras combustibles
IEC	III C	III C	III B	III A
NEC/API	Clase II Gr E	Clase II Gr F	Clase II Gr G	Clase III

Tabla 9.3 - Correspondencia entre normas IEC y NEC/API para polvos y fibras combustibles.

9.3.2 Tipo de Protección del Envoltorio

Símbolo del tipo	Definición	Representación simplificada	
"db"	A prueba de explosión	Tipo de protección en que las partes pueden causar la ignición de una atmósfera explosiva. Son confinadas en un envoltorio capaz de soportar la presión desarrollada durante una explosión interna de una mezcla explosiva impidiendo la transmisión de la explosión hacia el medio externo.	
"eb", "ec"	Seguridad aumentada	Medidas que son aplicadas, con el fin de evitar la posibilidad de temperatura excesiva y la aparición de arcos o chispas en el interior y sobre las partes externas del material eléctrico producidas bajo funcionamiento normal.	
"i"	Seguridad intrínseca "ia", "ib", "ic"	Tipo de protección, en la cual ninguna chispa ni efecto térmico, producido en las condiciones de prueba prescritas por la norma (funcionamiento normal y condiciones de falla), es capaz de provocar la inflamación de un ambiente explosivo.	
"m"	Encapsulado "ma", "mb", "mc"	Tipo de protección en el cual las patas que pueden inflamar un ambiente explosivo, por chispas o por calentamiento, son encapsuladas en una resina suficientemente resistente a las influencias ambientales, de tal manera que el ambiente explosivo no puede ser inflamado.	
"n"	No Inflamable "nC", "nR"	Tipo de protección aplicado a material eléctrico de modo que, en funcionamiento normal y en ciertas condiciones anormales específicas, no pueda inflamar el ambiente explosivo. Existen 2 categorías de materiales: producción de chispas (nC), encapsulados de respiración limitada (nR).	
"o"	Inmersión en aceite	Tipo de protección, donde el equipo eléctrico o las partes del equipo eléctrico, están sumergidos en un líquido protector, de tal manera que una atmósfera de gas explosivo que pueda estar por encima del mismo o fuera del envoltorio no cause explosión.	
"p"	Presurizado "px", "py", "pz",	Tipo de protección contra el ingreso de una atmósfera externa hacia dentro del envoltorio o hacia dentro del ambiente, manteniendo el gas protector a una presión por encima de la presión de la atmósfera externa.	
"q"	Rellenado con arena	Tipo de protección en la cual las partes capaces de incendiar una atmósfera de gas explosivo son fijas y completamente envueltas por el material de relleno, para de esa manera prevenir la ignición de la atmósfera explosiva externa.	
"t"	Protección por envoltorio "tb", "tc"	Tipo de protección en que las partes que pueden causar la ignición de una atmósfera explosiva son confinadas en un envoltorio total o parcialmente protegido contra el ingreso de polvos y donde la temperatura máxima de superficie es limitada.	

Tabla 9.5 - Tipo de protección del envoltorio.

9.4 Clases de Temperatura

La temperatura máxima en la superficie interna y/o externa del equipo eléctrico debe ser siempre menor que la temperatura de ignición del gas o vapor. Los gases pueden ser clasificados para las clases de temperatura de acuerdo con su temperatura de ignición, donde la máxima temperatura de superficie, de la respectiva clase, debe ser menor que la temperatura de los gases correspondientes.

IEC		NEC		Temperatura de ignición de los gases y/o vapores
Clases de temperatura	Temperatura máxima de superficie	Clases de temperatura	Temperatura máxima de superficie	
T1	450	T1	450	> 450
T2	300	T2	300	> 300
T3	200	T3	200	> 200
T4	135	T4	135	> 135
T5	100	T5	100	> 100
T6	85	T6	85	> 85

Tabla 9.6 - Clases de temperatura.

9.5 Equipos para Áreas de Riesgo

Los cuadros abajo muestran la selección de los equipos para las áreas clasificadas de acuerdo con la norma IEC 60079-14:

IEC 60079-14	
Zona	Protección posible
Zona 0	Ex "ia"
	Ex "ma"
	Equipos especialmente aprobados para Zona 0
Zona 1	Equipamientos certificados para Zona 0
	Ex "db"
	Ex "db eb"
	Ex "eb"
	Ex "pxb", Ex "pyb"
	Ex "ib"
	Ex "q"
	Ex "ob"
	Ex "mb"
	Equipamientos certificados para Zona 0 y Zona 1
Zona 2	Ex "pzc"
	Ex "ic"
	Ex "ec"
	Ex "oc"
	Ex "mc"

Tabla 9.7 - Tipos de protección para atmósferas explosivas con gases inflamables.

De acuerdo con la norma NEC, la relación de los equipos está mostrada en el cuadro de abajo:

DIVISIÓN 1	Equipos con tipo de protección: ■ a prueba de explosión Ex"d" ■ presurización Ex"p" ■ inmersión en aceite Ex"o" ■ seguridad intrínseca Ex"i"
DIVISIÓN 2	■ cualquier equipo certificado para división 1 ■ equipos incapaces de generar chispas o superficies calientes en envoltorios de uso general

Tabla 9.8

9.6 Equipos de Seguridad Aumentada (nível de protección "eb")

Es el equipo eléctrico que, bajo condiciones de operación no produce arcos, chispas o calentamiento suficiente para causar ignición de la atmósfera explosiva para la cual fue proyectado.

Tiempo t_E - tiempo necesario para que un devanado de corriente alterna, cuando es recorrido por su corriente de arranque, alcance su temperatura límite, partiendo de la temperatura alcanzada en régimen nominal, considerando la temperatura ambiente a su máximo. Abajo mostramos los gráficos que ilustran cómo debemos proceder a la correcta determinación del tiempo " t_E " (figuras 9.1 y 9.2).

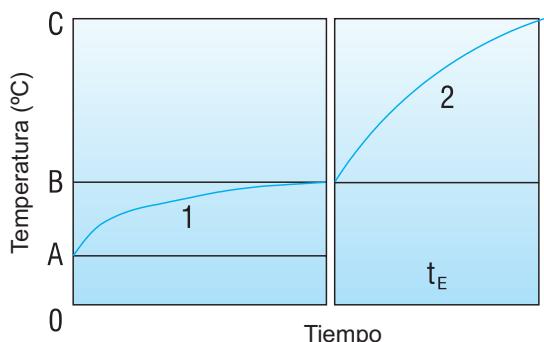


Figura 9.1 - Diagrama esquemático explicando el método de determinación del tiempo " t_E ".

- A - temperatura ambiente máxima
B - temperatura en servicio nominal
C - temperatura límite
1 - elevación de la temperatura en servicio
2 - elevación de la temperatura con rotor bloqueado

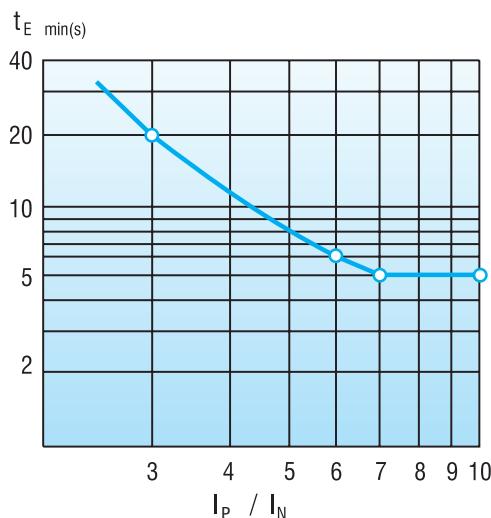


Figura 9.2 - Valor mínimo del tiempo " t_E " en función de la relación de la corriente de arranque I_p / I_N .

9.7 Equipos a Prueba de Explosión

Es un tipo de protección en que las partes que pueden inflamar una atmósfera explosiva son confinadas en envoltorios que pueden soportar la presión durante una explosión interna de una mezcla explosiva, previniendo la transmisión de la explosión para una atmósfera explosiva.

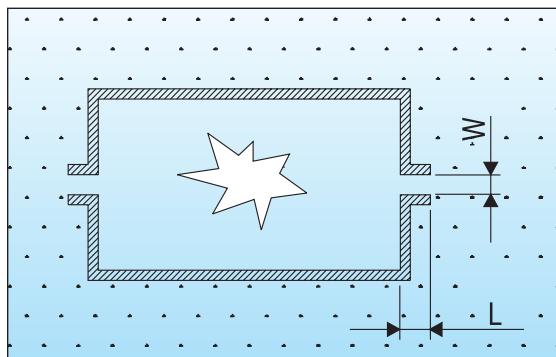


Figura 9.3 - Principio de la protección.

El motor eléctrico de inducción (de cualquier protección) intercambia aire con el medio externo. Cuando está en funcionamiento, se calienta y el aire en su interior queda con una presión mayor que la externa (el aire es expelido); cuando es apagada la alimentación, el motor se enfriá y la presión interna disminuye, permitiendo la entrada de aire (que en este caso está contaminado). La protección no permitirá que una eventual explosión interna se propague hacia el ambiente externo.

Para la seguridad del sistema, WEG controla los valores de los intersticios (tolerancias entre encastres) y las condiciones de acabamiento de las juntas, ya que son responsables por el volumen de gases intercambiados entre el interior y el exterior del motor.

10. Características Constructivas

10.1 Dimensiones

Las dimensiones de los motores eléctricos WEG son estandarizadas de acuerdo con la International Electrotechnical Commission - IEC-60072. En estas normas, la dimensión básica para la estandarización de las dimensiones de montaje de máquinas eléctricas girantes es la altura del plano de la base hasta el centro de la punta del eje, denominado por la letra H (Ver figura 10.1 abajo).

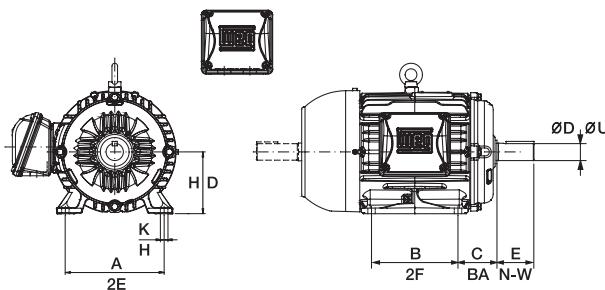


Figura 10.1 - Representación dimensional del motor eléctrico

A cada altura de la punta de eje H es asociada una dimensión C, distancia del centro del orificio de las patas del lado de la punta del eje hacia el plano del apoyo de la punta de eje. A cada dimensión H, no obstante, pueden ser asociadas varias dimensiones B (distancia entre centros de los orificios de las patas), de forma que sea posible tener motores más "largos" o más "cortos".

La dimensión A, distancia entre centros de los orificios de las patas, en sentido frontal, es única para valores de H hasta 315 mm, pero puede asumir múltiples valores a partir de la carcasa H igual a 355 mm. Para los clientes que exigen carcasa estandarizada por la norma NEMA, la tabla 10.1 realiza la comparación entre las dimensiones H - A - B - C - K - D - E de la norma IEC y D, 2E, 2F, BA, H, U, N-W de la norma NEMA.

IEC NEMA	H D	A 2E	B 2F	C BA	K H	\emptyset D \emptyset U	E N-W
63	63	100	80	40	7	11j6	23
71	71	112	90	45	7	14j6	30
80	80	125	100	50	10	19j6	40
90 S	90	140	100	56	10	24j6	50
143 T	88.9	139.7	101.6	57.15	8.7	22.2	57.15
90 L	90	140	125	56	10	24j6	50
145 T	88.9	139.7	127	57.15	8.7	22.2	57.15
100L	100	160	140	63	12	28j6	60
112 S	112	190	114	70	12	28j6	60
182 T	114.3	190.5	114.3	70	10.3	28.6	69.9
112 M	112	190	140	70	12	28j6	60
184 T	114.3	190.5	139.7	70	10.3	28.6	69.9
132 S	132	216	140	89	12	38k6	80
213 T	133.4	216	139.7	89	10.3	34.9	85.7
132 M	132	216	178	89	12	38k6	80
215 T	133.4	216	177.8	89	10.3	34.9	85.7
160 M	160	254	210	108	15	42k6	110
254 T	158.8	254	209.6	108	13.5	41.3	101.6
160 L	160	254	254	108	15	42k6	110
256 T	158.8	254	254	108	13.5	41.3	101.6
180 M	180	279	241	121	15	48k6	110
284 T	177.8	279.4	241.3	121	13.5	47.6	117.5
180 L	180	279	279	121	15	48k6	110
286 T	177.8	279.4	279.4	121	13.5	47.6	117.5
200 M	200	318	267	133	19	55m6	110
324 T	203.2	317.5	266.7	133	16.7	54	133.4
200 L	200	318	305	133	19	55m6	110
326 T	203.2	317.5	304.8	133	16.7	54	133.4
225 S	225	356	286	149	19	60m6	140
364 T	228.6	355.6	285.8	149	19.0	60.3	149.2
225 M	225	356	311	149	19.0	60m6	140
365 T	228.6	355.6	285.8	149	19.0	60.3	149.2
250 S	250	406	311	168	24	65m6	140
404 T	254	406.4	311.2	168	20.6	73	184.2
250 M	250	406	349	168	24	65m6	140
405 T	254	406.4	349.2	168	20.6	73	184.2
280 S	280	457	368	190	24	65m6	140
444 T	279.4	457.2	368.4	190	20.6	73	184.2
280 M	280	457	419	190	24	75m6	140
445 T	279.4	457.2	419.1	190	20.6	85.7	215.9
315 S	315	508	406	216	28	80m6	170
504 Z	317.5	508	406.4	215.9	31.8	92.1	269.9
315 M	315	508	457	216	28	80m6	170
505 Z	317.5	508	457.2	215.9	31.8	92.1	269.9
355 M	355	610	560	254	28	100m6	210
586	368.3	584.2	558.8	254	30	98.4	295.3
355 L	355	610	630	254	28	100m6	210
587	368.3	584.2	635	254	30	98.4	295.3

Tabla 10.1 - Comparación de dimensiones IEC y NEMA.



10.2 Formas Constructivas Normalizadas

Se denomina forma constructiva, a la confabulación de las partes constructivas de las máquinas con relación a su fijación, a la disposición de sus cojinetes y a la punta de eje, las que son estandarizadas por la IEC 60034-7, DIN-42950 y NEMA MG 1-4.03.

La IEC 60072 determinan que la caja de conexión de un motor debe de estar situada de modo que su línea de centro se encuentre en un sector comprendido entre el tope del motor y 10 grados por debajo de la línea de centro horizontal de éste, del lado derecho, cuando el motor es visto desde el lado del accionamiento. Las tablas a seguir indican las diversas formas normalizadas.

Figura	Símbolo para					Fijación o montaje	
	Designación WEG	DIN 42950	IEC 60034-7		Carcasa		
			Código I	Código II			
	B3D	B3	IM B3L	IM 1001L	con patas	montada sobre subestructura (*)	
	B3E		IM B3R	IM 1001R			
	B5D	B5	IM B5L	IM 3001L	sin patas	fijada por la brida "FF"	
	B5E		IM B5R	IM 3001R			
	B35D	B3/B5	IM B35L	IM 2001L	con patas	montada sobre subestructura por las patas, con fijación suplementaria por la brida "FF"	
	B35E		IM B35R	IM 2001R			
	B14D	B14	IM B14L	IM 3601L	sin patas	fijada por la brida "C"	
	B14E		IM B14R	IM 3601R			
	B34D	B3/B14	IM B34L	IM 2101L	con patas	montado sobre subestructura por las patas, con fijación suplementaria por la brida "C"	
	B34E		IM B34R	IM 2101R			
	B6D	B6	IM B6L	IM 1051L	con patas	montado en pared, patas a la izquierda mirando desde el lado del accionamiento	
	B6E		IM B6R	IM 1051R			

Tabla 10.2a - Formas constructivas normalizadas (montaje horizontal)

(*) Subestructura: bases, placa de base, cimientos, rieles, pedestales, etc.

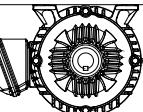
Figura	Designación WEG	DIN 42950	Símbolo para			Carcasa	Fijación o montaje
			IEC 60034-7		Código I		
	B7D	B7	IM B7L	IM 1061L		con patas	Montado en pared, con patas a la derecha, mirando desde el lado del accionamiento
	B7E		IM B7R	IM 1061R			
	B8D	B8	IM B8L	IM 1071L		con patas	fijada en el techo
	B8E		IM B8R	IM 1071R			

Tabla 10.2b - Standardized mounting arrangements (horizontal mounting)

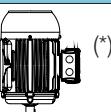
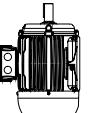
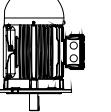
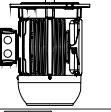
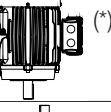
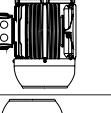
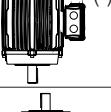
Figura	Designación WEG	DIN 42950	Símbolo para			Carcasa	Fijación o montaje
			IEC 60034-7		Código I		
	V5	V5	IM V5	IM 1011		con patas	montada en pared o sobre subestructura
	V6	V6	IM V6	IM 1031		con patas	montada en pared o sobre subestructura
	V1	V1	IM V1	IM 3011		sin patas	fijada por la brida "FF", para abajo
	V3	V3	IM V3	IM 3031		sin patas	fijada por la brida "FF", para arriba
	V15	V1/V5	IM V15	IM 2011		con patas	montada en pared con fijación suplementaria por la brida "FF", para abajo
	V36	V3/V6	IM V36	IM 2031		con patas	fijada en pared con fijación suplementaria por la brida "FF", para arriba
	V18	V18	IM V18	IM 3611		sin patas	fijada por la brida "C", para abajo
	V19	V19	IM V19	IM 3631		sin patas	fijada por la brida "C", para arriba

Tabla 10.3 - Formas constructivas normalizadas (montaje vertical)

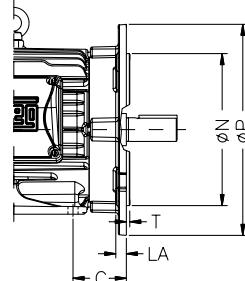
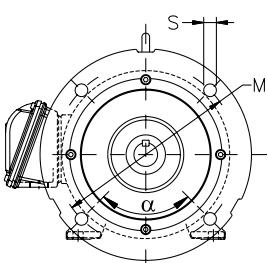
Nota: Recomendamos la utilización del sombrerete protector para motores que operen en vertical con punta de eje para abajo y que permanezcan expuestos a la intemperie.

Recomendamos la utilización del slinger de goma en la punta de eje (lado acoplado) en la utilización de motores verticales con eje para arriba.

10.3 Dimensiones de las Bridas

Brida "FF"

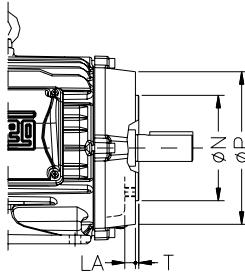
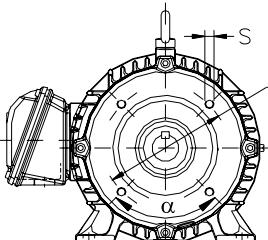
Brida "FF"										
Carcasa	Brida	LA	M	N	P	S	T	α	Nº de agujeros	
63	FF-115	5,5	115	95	140					
71	FF-130	7	130	110	160					
80	FF-165	9								
90		10	165	130	200	12	3,5			
100	FF-215	12,5								
112			215	180	250					
132	FF-265	12	265	230	300					
160	FF-300	18								
180			300	250	350					
200	FF-350		350	300	400					
225	FF-400		400	350	450					
250	FF-500									
280			500	450	550					
315	FF-600	22	600	550	660					
355	FF-740		740	680	800	24	6			



Nota: Dimensiones en mm.

Brida "C"

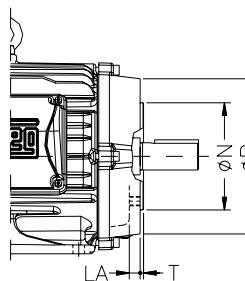
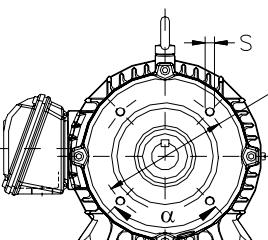
Brida "C"										
Carcasa	Brida	LA	M	N	P	S	T	α	Nº de agujeros	
63	FC-95	4,5								
71		10	95,2	76,2	143	UNC 1/4"x20				
80	FC-149	15								
90		12	149,2	114,3	165	UNC 3/8"x16				
100	FC-184	13,5								
112		15,5	184,2	215,9	225					
132	FC-228	19,5								
160		20	228,6	266,7	280					
180	FC-279	279,4	317,5	395						
200		355,6	406,4							
225	FC-355	25								
250										
280	FC-368									
315										
355M/L	FC-368	40	368,3	419,1						
355A/B		33,5								



Nota: Dimensiones en mm.

Brida "C-DIN"

Brida "C-DIN"										
Carcasa	Brida	LA	M	N	P	S	T	α	Nº de agujeros	
63	C-90	9,5	75	60	90	M5				
71	C-105	8	85	70	105					
80	C-120	10,5	100	80	120					
90	C-140		115	95	140					
100	C-160	12								
112	C-200	13,5	130	110	160					
132		15,5	165	130	200	M10				



Nota: Dimensiones en mm.

10.4 Pintura

El plan de pintura de abajo presenta las soluciones que son adoptadas para cada aplicación.

Equivalencias de los planos de pintura WEG x ISO 12944								
Planos de pintura (Nomenclatura WEG)	Clasificación de la corrosividad del ambiente ISO 12944-2	Ambiente Interno / Externo	Durabilidad estimada (años)				Espesor mínimo(µm) ISO 12944	Ejemplos considerando entornos con clima típicamente templado
			> 7	7 a 15	15 a 25	> 25		
203A	C3	Interno / Externo	L				80	Atmósferas poco contaminadas. Mayormente zonas rurales. Ambientes fríos donde puede producirse condensación, por ejemplo, almacenes, pabellones deportivos.
207A	C3	Interno / Externo	L				80	
207N	C2	Interno / Externo			H		120	
205E	C4	Interno	L				120	Atmósferas urbanas o industriales, contaminación moderada por dióxido de azufre.
205P	C4	Interno / Externo	L				120	Zona costera con baja salinidad. Salas de producción con alta humedad y contaminación atmosférica. Ej: comida, lavandería, cerveza.
202P	C4	Interno / Externo		M			180	
202E	C4	Interno		M			180	
214P	C4	Interno / Externo		M			160	
222E	C4	Interno / Externo		M			180	Para ambientes industriales y urbanos, protegidos, con contaminación moderada por agentes corrosivos como SO ₂ (dióxido de azufre) y Cl ⁻ (cloruro), y pueden contener humedad elevada.
222P	C4	Interno / Externo		M			180	
211P	C5 (I y M)	Interno / Externo		M			240	C5I: Zona industrial con alta humedad y atmósfera agresiva. Edificios o áreas donde puede ocurrir condensación y alta contaminación.
211E	C5 (I y M)	Interno		M			240	C5M: Zona costera y marina con alta salinidad. Edificios o áreas donde puede ocurrir condensación y alta contaminación.
212P	CX / C5 (I y M)	Interno / Externo				VH	320	CX: Área costa afuera con alta salinidad y áreas industriales con extrema humedad y atmósfera agresiva y atmósferas tropicales y subtropicales. Zonas industriales con extrema humedad y atmósferas agresivas.
212E	C5 (I y M)	Interno				VH	320	

Tabla 10.4 - Planes de pintura.

Nota: los planes de pintura WEG cumplen las normas Petrobras.



Al pintar por encima de la pintura original WEG, evalúe con su proveedor de pinturas se la nueva es compatible con la pintura base utilizada en los motores WEG y se la superficie esta preparada de manera adecuada, en contra podrá afectar el desempeño del plan de pintura además de anular la garantía del producto.

10.4.1 Pintura Tropicalizada o Tropicalización

Altos índices de humedad pueden llevar a un desgaste prematuro del sistema de aislamiento, que es el principal responsable por la vida útil del motor. Ambientes con hasta 95% de humedad relativa no requieren protecciones adicionales, además de la resistencia de calentamiento, para evitar la condensación de agua en el interior del motor. No obstante, para ambientes con niveles de humedad superiores a 95% se aplica, en las partes internas del motor, una pintura epoxi conocida como pintura tropicalizada.

11. Selección y Aplicación de los Motores Trifásicos

En la ingeniería de aplicación de motores es común, y en muchos casos prácticos, comparar las exigencias de la carga con las características del motor. Existen muchas aplicaciones que pueden ser correctamente accionadas por más de un tipo de motor, y la selección de un determinado tipo, no siempre excluye el uso de otros tipos.

Con el advenimiento de la computadora, el cálculo puede ser perfeccionado, obteniéndose resultados precisos que resultan en máquinas dimensionadas de manera más económica.

Los motores de inducción WEG, de jaula o de anillo, de baja y media tensión, encuentran un vasto campo de aplicación, notoriamente en los sectores de siderurgia, minería, papel y celulosa, saneamiento, químico y petroquímico, cemento, entre otros, tornándose cada vez más importante la selección del tipo adecuado para cada aplicación. La selección del tipo adecuado de motor, con respecto al conjugado, factor de potencia, rendimiento y elevación de temperatura, aislamiento, tensión y grado de protección mecánica, solamente puede ser realizada, tras un análisis cuidadoso, considerando parámetros como:

- Costo inicial
- Capacidad de la red
- Necesidad de corrección del factor de potencia
- Conjugados requeridos
- Efecto de inercia de la carga
- Necesidad, o no, de regulación de velocidad
- Exposición de la máquina en ambientes húmedos, contaminados y/o agresivos

El motor asíncrono de jaula es el más empleado en cualquier aplicación industrial, debido a su construcción robusta y simple, además de ser la solución más económica, tanto en términos de motores como de comando y protección.

El medio más adecuado en la actualidad para reducir los gastos de energía es usar motores WEG de la línea Premium. Esta comprobado por testes que estos motores especiales tienen hasta 30% menos de pérdidas, lo que significa un real ahorro. Dichos motores son proyectados y construidos con la más alta tecnología, con el objetivo de reducir pérdidas e incrementar el rendimiento. Esto proporciona un bajo consumo de energía y menor gasto. Son los más adecuados en las aplicaciones con variación de tensión. Son testeados de acuerdo con las normas IEC 60034-1 y sus valores de rendimiento son certificados y están estampados en la placa de identificación del motor. La técnica de ensayo es el método B de la IEEE STD 112.

Los valores de rendimiento son obtenidos a través del método de separación de pérdidas, de acuerdo con las normas IEC 60034-1.

Los motores Premium, son estandarizados conforme las normas IEC, manteniendo la relación potencia/carcasa, siendo por tanto, intercambiables con todos los motores normalizados existentes en el mercado.

Tipo	Motor de inducción de jaula	Motor de inducción de anillos
Corriente de arranque	Alto	Bajo
Conjugado de arranque	Bajo	Alto
Corriente de arranque / corriente nominal	Alto	Bajo
Conjugado máximo	> 160% del conjugado nominal	> 160% del conjugado nominal
Rendimiento	Alto	Alto
Equipo de arranque	Simple para arranque directo	Relativamente simple
Equipo de protección	Simple	Simple
Espacio requerido	Pequeño	Reóstato requiere un espacio grande
Mantenimiento	Pequeño	En los anillos y escobillas - frecuente
Costo	Bajo	Alto

Tabla 11.1 - Comparación entre diferentes tipos de máquinas.

En la selección correcta de los motores es importante considerar las características técnicas de aplicación y las características de carga, medio ambiente y alimentación, en que se refiere a aspectos mecánicos para calcular:

a) Conjugado de arranque

Conjugado requerido para vencer la inercia estática de la máquina y producir movimiento. Para que una carga, arrancando a velocidad cero, alcance su velocidad nominal, es necesario que el conjugado del motor sea siempre superior al conjugado de la carga.

b) Conjugado de aceleración

Conjugado necesario para acelerar la carga a la velocidad nominal. El conjugado del motor debe ser siempre mayor que el conjugado de carga, en todos los puntos entre cero y la rotación nominal. En el punto de intersección de las dos curvas, el conjugado de aceleración es nulo, o sea, es alcanzado el punto de equilibrio a partir del cual la velocidad permanece constante. Este punto de intersección entre las dos curvas debe corresponder a la velocidad nominal.

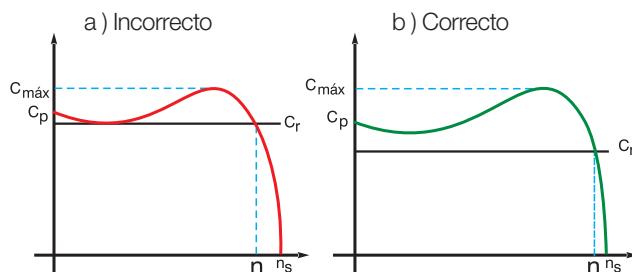


Figura 11.1 - Selección de motor considerando el conjugado resistente de la carga.

Donde:
 C_{\max} = conjugado máximo
 C_p = conjugado de arranque
 C_r = conjugado resistente
 n_s = rotación síncrona
 n = rotación nominal

El conjugado de aceleración asume valores sensiblemente diferentes en la fase de arranque. El conjugado medio de aceleración (C_a) se obtiene a partir de la diferencia entre el conjugado del motor y el conjugado resistente de la carga.

c) Conjugado nominal

Conjugado nominal necesario para mover la carga en condiciones de funcionamiento a la velocidad específica. El conjugado requerido para funcionamiento normal de una máquina puede ser constante o varía entre amplios límites. Para conjugados variables, el conjugado máximo debe ser suficiente para soportar picos momentáneos de carga. Las características de funcionamiento de una máquina, en cuanto al conjugado, pueden dividirse en tres clases:

■ Conjugado constante

En las máquinas de este tipo, el conjugado permanece constante durante la variación de la velocidad aumentando la potencia proporcionalmente con la velocidad.

Conjugado requerido por la máquina

Potencia requerida por la máquina

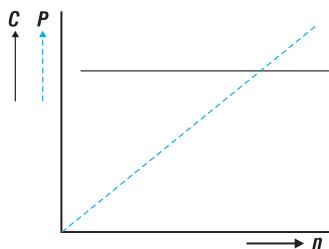


Figura 11.2

C = Conjugado resistente: constante

P = Potencia: proporcional a velocidad (n)

■ Conjunto variable

Se encuentran casos de conjugado variables en las bombas y en los ventiladores.

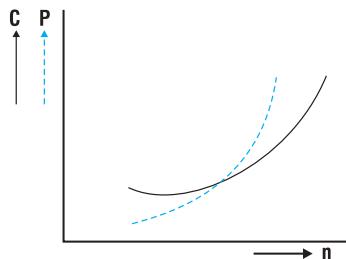


Figura 11.3

C = Conjunto resistente: proporcional a la velocidad al cuadrado (n^2)

P = Potencia: proporcional a la velocidad al cubo (n^3)

■ Potencia constante

Las aplicaciones de potencia constante requieren una potencia igual a la nominal, a cualquier velocidad.

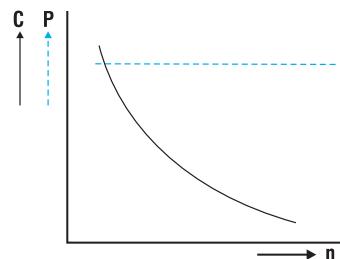


Figura 11.4

C = Conjunto resistente: inversamente proporcional a la velocidad

P = Potencia constante

11.1 Selección del Tipo de Motor para Diferentes Cargas

Tipos de carga	Conjugado requerido		Característica de la carga	Tipo de motor usado
	Arranque	Máximo		
Bombas centrífugas, ventiladores, taladradoras, compresores, rectificadoras, trituradoras.	Entre 1 y 1,5 veces el conjugado nominal	Valores máximos entre 220% y 250% del nominal	<ul style="list-style-type: none"> ■ Condiciones de arranques fáciles, tales como: engranajes intermedios, baja inercia o uso de acoplamientos especiales, simplifican el arranque ■ Máquinas centrífugas, tales como: bombas donde el conjugado aumenta al cuadrado de la velocidad hasta un máximo, conseguido en la velocidad nominal ■ En velocidad nominal puede estar sujeta a pequeñas sobrecargas 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Conjunto normal ■ Corriente de arranque normal ■ Categoría N
Bombas alternativas, compresores, cargadores, alimentadores, laminadoras de barras.	Entre 2 y 3 veces el conjugado nominal	no mayor a 2 veces el conjugado nominal	<ul style="list-style-type: none"> ■ Conjunto de arranque alto para vencer la elevada inercia, contra presión, fricción de parada, rigidez en los procesos de materiales o condiciones mecánicas similares ■ Durante la aceleración, el conjugado exigido cae para el valor del conjugado nominal ■ No es aconsejable sujetar el motor a sobrecargas, durante la velocidad nominal 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Conjunto de arranque alto ■ Corriente de arranque normal ■ Categoría N
Prensas punzón, grúas, puentes rodantes, elevadores de grúa, tijeras mecánicas, bombas de aceite para pozos.	3 veces el conjugado nominal	Requiere 2 a 3 veces el conjugado nominal. Son consideradas pérdidas durante los picos de carga.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cargas intermitentes, las cuales requieren conjugado de arranque, alto o bajo ■ Requieren arranques frecuentes, paradas y reversiones; ■ Máquinas accionadas, tales como: prensas punzón, que pueden usar volantes para soportar los picos de potencia ■ Es conveniente una pequeña regulación para amenizar los picos de potencias y reducir los esfuerzos mecánicos en el equipo accionado ■ La alimentación precisa ser protegida de los picos de potencias, resultantes de las fluctuaciones de carga 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Conjunto de arranque alto ■ Corriente de arranque normal ■ Alto deslizamiento ■ Categoría D
Ventiladores, máquinas-herramientas.	Algunas veces se precisa solamente parte del conjugado nominal; y otros, muchas veces el conjugado nominal.	1 o 2 veces el conjugado nominal en cada velocidad.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dos, tres o cuatro velocidades fijas son suficientes ■ no es necesario el ajuste de velocidad ■ El conjugado de arranque puede ser pequeño (ventiladores) o alto (transportadores) ■ Las características de funcionamiento en varias velocidades, pueden variar entre potencia constante, conjugado constante o de conjugado variable ■ Las máquinas de cortar metal tienen potencia constante ■ Las cargas de fricción son típicas de conjugado constante ■ Las cargas de fricción son típicas de conjugado constante 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Conjunto normal o alto (velocidades múltiples)

Tabla 11.2 - Características para diferentes cargas.

11.2 W22 Magnet Drive System®

El W22 Magnet Drive System® es un conjunto compuesto por un motor de corriente alterna, trifásico, síncrono con rotor de imanes permanentes y por un convertidor de frecuencia*. La utilización de imanes permanentes elimina las pérdidas Joule en el rotor, obteniendo así, niveles de rendimiento más elevados como IE4 y IE5. Con la eliminación de esas pérdidas, el motor trabaja con temperatura reducida proporcionando, de esta forma, la reducción del tamaño de la carcasa y el aumento de la vida útil del motor. La utilización del convertidor de frecuencia posibilita un control continuo de la velocidad del motor. Provee par constante en todo su rango de rotación, inclusive en 0 rpm, sin necesidad de ventilación forzada en bajas frecuencias. Debido a la forma constructiva del rotor, a la tecnología del proceso de balanceo utilizado y a la reducción de la carcasa, los motores W22 Magnet presentan bajos niveles de vibración y ruido cuando son comparados con motores de inducción de la misma potencia.



Figura 11.5

*Los motores W22 Magnet son accionados solamente a través de una línea de convertidores de frecuencia CFW-11, desarrollada con software específico para esta función.

11.3 Aplicación de Motores de Inducción Alimentados por Convertidores de Frecuencia

El accionamiento de motores eléctricos de inducción por medio de convertidores de frecuencia (denominados también convertidores estáticos de frecuencia) es una solución ampliamente utilizada en la industria, la que se constituye actualmente en el método más eficiente para el control de velocidad de los motores de inducción. Tales aplicaciones otorgan una serie de beneficios, comparadas a otros métodos de variación de velocidad. Éstas, no obstante, dependen de un dimensionamiento adecuado para que puedan ser efectivamente ventajosas en la comparación entre eficiencia energética y costos. Entre los muchos beneficios están la reducción de costos, el control a distancia, la versatilidad, el aumento de la calidad, de la productividad y mejor utilización de la energía.

11.3.1 Aspectos Normativos

Con el gran avance verificado en las aplicaciones de motores eléctricos con convertidores de frecuencia, se torna cada vez mayor la necesidad de la elaboración y la adopción de normas que estandaricen los procedimientos de evaluación de tales accionamientos. Aún no existe una norma nacional que establezca criterios para el uso de convertidores electrónicos en el accionamiento de máquinas CA. No obstante, las principales normas internacionales que abordan el asunto son:

■ IEC: 60034-17 - Rotating Electrical Machines - Part 17:

Cage induction motors when fed from converters - application guide

■ IEC 60034-25 - Rotating Electrical Machines - Part 25:

Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply

■ NEMA MG1 - Part 30: Application considerations for constant speed motors used on a sinusoidal bus with harmonic content and general purpose motors usrd with adjustable-voltage or adjustable-frequency controls or both

■ NEMS MG1 - Part 31: Definite purpose inverter-fed polyphase motor

11.3.2 Variación de la Velocidad del Motor por Medio de Convertidores de Frecuencia

La relación entre la rotación, la frecuencia de alimentación, el número de polos y el deslizamiento de un motor de inducción obedece a la siguiente ecuación:

$$n = \frac{120 \cdot f_1 \cdot (1 - s)}{p}$$

donde: n = rotación [rpm]

f = frecuencia de la red [Hz]

p = número de polos

s = deslizamiento

El análisis de la formula muestra que la mejor manera de variar la velocidad de un motor de inducción es por medio de la variación de la frecuencia de alimentación.

Los convertidores de frecuencia transforman la tensión de la red, de amplitud y frecuencia constantes, en una tensión de amplitud y frecuencia variables. Variando la frecuencia de la tensión de alimentación, varía también la velocidad del campo girante y consecuentemente la velocidad mecánica del motor. De esa forma, el convertidor actúa como una fuente de frecuencia variable para el motor. Por la teoría del motor de inducción, el par electromagnético desarrollado obedece la siguiente ecuación:

$$T = K_1 \cdot \Phi_m \cdot I_2$$

Y, despreciando la caída de tensión en la impedancia del devanado estático, su flujo magnetizante vale:

$$\Phi_m = K_2 \cdot \frac{V_1}{f_1}$$

Donde: T : par o conjugado disponible en la punta de eje (N.m)

Φ_m : flujo de magnetización (Wb)

I_2 : corriente rotórica (A) (depende de la carga)

V_1 : tensión estática (V)

K_1 e K_2 : constantes (dependen del material y del proyecto)

No obstante, para que el motor pueda trabajar en un rango de velocidades, no basta variar la frecuencia de alimentación. Se debe variar también la amplitud de la tensión de alimentación, de manera proporcional a la variación de frecuencia.

De esta forma, el flujo, y por consiguiente el par electromagnético del motor, permanecen constantes, mientras que el deslizamiento es mantenido. Por consiguiente, básicamente, la variación de la relación V/f es lineal hasta la frecuencia base (nominal) de operación del motor. Por encima de la misma, la tensión, que es igual a la nominal del motor, permanece constante y existe, solamente, variación de la frecuencia estática.

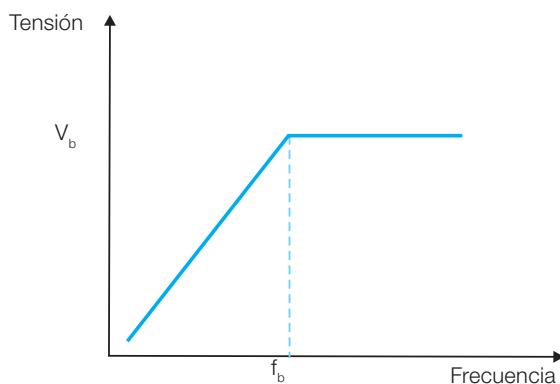


Figura 11.6

De esta forma, por encima de la frecuencia base de operación se caracteriza la región de debilitamiento de campo, en la cual el flujo disminuye, provocando reducción de par. El par es suministrado por el motor, por tanto, es constante hasta la frecuencia base de operación, disminuyendo gradualmente a frecuencias de operación por encima de ésta.

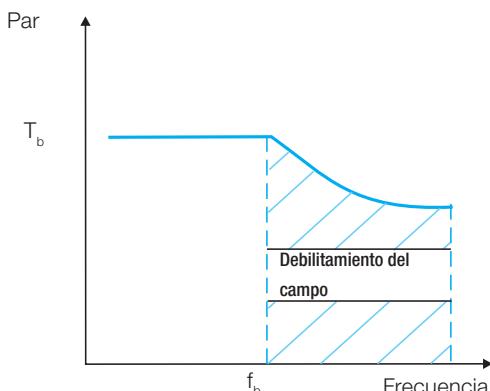


Figura 11.7

Como la potencia es el resultado del producto del par por la rotación, la potencia útil del motor crece linealmente hasta la frecuencia base y permanece constante por encima de ésta.

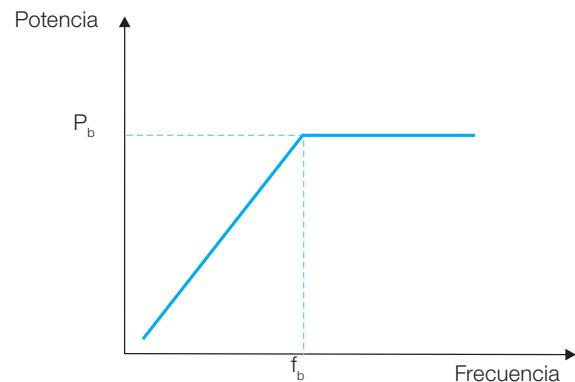


Figura 11.8

11.3.3 Características de los Convertidores de Frecuencia

La obtención de la tensión y frecuencia deseadas, por medio de los convertidores frecuencia, pasa básicamente por tres niveles:

- Puente de diodos - Rectificación (transformación CA - CC) de la tensión proveniente de la red de alimentación.
- Filtro o enlace CC - Alisamiento/regulación de la tensión rectificada con almacenamiento de energía por medio de un banco de condensadores.
- Transistores IGBT - Inversión (transformación CC - CA) de la tensión del enlace CC por medio de técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM). Este tipo de modulación permite la variación de la tensión/frecuencia de salida por la acción de transistores (llaves electrónicas), sin afectar la tensión del enlace CC.

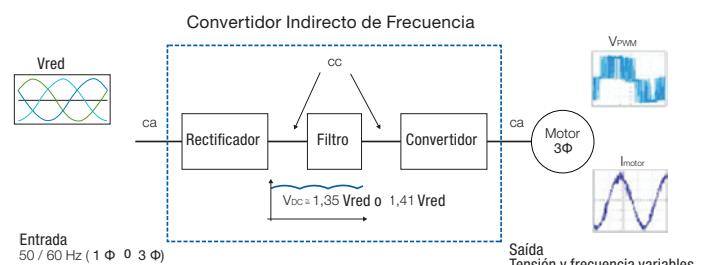


Figura 11.9

11.3.3.1 Modos de Control

Básicamente existen dos tipos de control de los convertidores electrónicos: el escalar y el vectorial. El control escalar se basa en el concepto original del convertidor de frecuencia: impone en el motor una determinada relación tensión/frecuencia, apuntando a mantener el flujo magnético del motor aproximadamente constante. Aplicable cuando no hay necesidad de respuestas rápidas a comandos de par y velocidad, este modo de control es particularmente interesante cuando existe una conexión de múltiples motores a un único convertidor. El control es realizado en malla abierta y la precisión de la velocidad es función del deslizamiento del motor, el cual varía con la carga. Para mejorar el desempeño del motor a bajas velocidades, algunos convertidores poseen funciones especiales como la compensación de deslizamiento (que atenúa la variación de la velocidad en función de la carga) y el boost de tensión (aumento de la relación V/f para compensar el efecto de la caída de tensión).

en la resistencia estática y mantener la capacidad de par del motor) en bajas rotaciones. Ese control es el más utilizado debido a su simplicidad y debido al hecho de que la gran mayoría de las aplicaciones no requiere alta precisión ni rapidez en el control de la velocidad.

El control vectorial posibilita alcanzar un elevado grado de precisión y rapidez en el control del par y de la velocidad del motor. El control descompone la corriente del motor en dos vectores: uno que produce el flujo magnetizante y otro que produce par, regulando separadamente el par y el flujo.

El control vectorial puede ser realizado en malla abierta ("sensorless") o en malla cerrada (con realimentación).

- Con sensor de velocidad - requiere la instalación de un sensor de velocidad (por ejemplo, un encoder incremental) en el motor. Ese tipo de control permite la mayor precisión posible en el control de la velocidad y del par, inclusive en rotación cero.

- Sensorless - tiene la ventaja de ser más simple que el control con sensor, no obstante, presenta limitaciones de par principalmente a bajísimas rotaciones. A velocidades mayores, es prácticamente tan bueno como el control vectorial con realimentación.

11.3.3.2 Armónicas

El sistema (motor + convertidor) es visto por la fuente de alimentación como una carga no lineal, cuya corriente posee armónicas. De forma general, se considera que el rectificador produce armónicas características de orden $h = np \pm 1$ en el lado CA, de esta forma, en el caso del puente rectificador con 6 diodos (6 pulsos), las principales armónicas generadas son la 5a y la 7a, cuyas amplitudes pueden variar de 10% a 40% de la fundamental, dependiendo de la impedancia de red. Para rectificadores de 12 pulsos (12 diodos) las armónicas más expresivas son la 11a y la 13a. Las armónicas superiores generalmente poseen menor amplitud y son más fáciles de filtrar. La mayoría de los convertidores de baja tensión comerciales, sin embargo, son de 6 pulsos.

El parámetro que cuantifica el disturbio causado por las armónicas en la red de alimentación es el THD (Distorsión armónica Total), el cual es generalmente suministrado por el fabricante del convertidor y definido como:

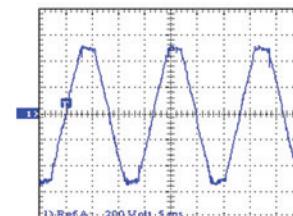
$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{A_h}{A_1} \right)^2}$$

donde: A_h : valores eficaces de las componentes armónicas

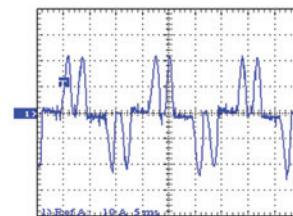
A_1 : valor eficaz de la componente fundamental

h : orden de la armónica

La norma IEEE Std.512 recomienda valores máximos para las armónicas de corriente generadas por un equipamiento eléctrico. La mayoría de los fabricantes de convertidores actuales toma precauciones en el proyecto de sus equipamientos para garantizar que los límites de THD establecidos por esa norma sean respetados.



Forma de onda típica de tensión en la entrada de un convertidor PWM de 6 pulsos (frecuencia de la red 50 Hz o 60 Hz).



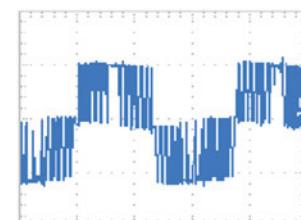
Forma de onda típica de corriente en la entrada de un convertidor PWM de 6 pulsos

Figura 11.10

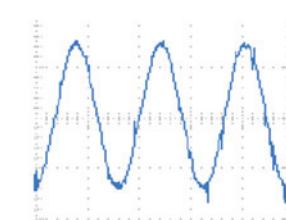
11.3.4 Influencia del Convertidor en el Desempeño del Motor

El motor de inducción accionado por convertidor PWM está sujeto a armónicas que pueden acarrear aumento de pérdidas y temperatura, de esta forma, como de los niveles de vibración y ruido, en comparación con la condición de alimentación senoidal.

La influencia del convertidor sobre el motor depende de una serie de factores relacionados con el control, tales como la frecuencia de conmutación, el ancho efectivo, y el número de pulsos, entre otros.



Forma de onda típica de corriente en los terminales del motor alimentado con tensión PWM



Típica forma de onda de tensión PWM en la salida del convertidor

Figura 11.11

Básicamente, para reducir las armónicas generadas por un convertidor de frecuencia PWM, existen las siguientes soluciones: instalación de filtros de salida (reactancias de carga, filtros dV/dt, filtros senoidales, etc.), utilización de convertidor con mayor número de niveles (topologías más sofisticadas), mejoría en la calidad de la modulación PWM (perfeccionamiento del estándar de pulsos) y aumento de la frecuencia de conmutación.

Además de eso, en cuanto a la alimentación del motor por convertidor, pueden aparecer otros efectos, que no se deben especificamente a las armónicas, pero que son también relevantes y no deben ser despreciados, tales como el stress del sistema de aislamiento y la circulación de corriente por los cojinetes.

Consideraciones en relación al rendimiento

La falta de una norma que especifique el procedimiento de ensayo para evaluación del rendimiento del sistema (convertidor + motor) permite que el ensayo sea realizado de diferentes maneras. Por tanto, los resultados obtenidos no deben influenciar en la aceptación, o no, del motor, excepto mediante acuerdo entre fabricante y comprador, conforme disponen las normas internacionales. La experiencia muestra, no obstante, que de manera general, las siguientes observaciones son válidas:

- El motor de inducción, cuando es alimentado por un convertidor de frecuencia PWM, tiene su rendimiento disminuido, en relación a un motor alimentado por tensión puramente senoidal, debido al aumento en las pérdidas ocasionado por las armónicas
- En aplicaciones de motores con convertidores debe ser evaluado el rendimiento del sistema (convertidor + motor) y no solamente del motor
- Deben ser consideradas las características del convertidor y del motor, tales como: frecuencia de operación, frecuencia de comutación, condición de carga y potencia del motor, tasa de distorsión armónica de la señal suministrada por el convertidor, etc
- Deben ser utilizados instrumentos especiales, capaces de medir el valor eficaz verdadero (true RMS) de las grandezas eléctricas
- El aumento de la frecuencia de comutación tiende a disminuir el rendimiento del convertidor y a aumentar el rendimiento del motor

Influencia del convertidor en la elevación de temperatura del motor

El motor de inducción puede presentar una elevación de temperatura mayor, cuando es alimentado por convertidor, que cuando es alimentado con tensión senoidal. Esa sobre-elevación de temperatura es derivada del aumento de las pérdidas del motor, en función de las componentes armónicas de la señal PWM, aliada a la reducción de la ventilación, en cuanto a la operación del motor autoventilado a bajas frecuencias. Básicamente existen las siguientes soluciones para evitar el sobrecalentamiento del motor:

- Reducción del par nominal (sobredimensionamiento del motor)
- Utilización de sistema de ventilación independiente
- Utilización del "flujo óptimo" (solución exclusiva WEG)

Criterios de reducción de par (derating)

Para mantener la temperatura de los motores de inducción WEG dentro de niveles aceptables, cuando son alimentados por convertidor de frecuencia, deben ser obedecidos los límites de carga presentados en las figuras 11.13 y 11.14.

Nota: motores para áreas clasificadas deben ser evaluados caso a caso, y WEG debe ser consultada.

Flujo Óptimo

La solución flujo óptimo fue desarrollada con el objetivo de tornar los motores WEG aptos para operar a bajas velocidades con par constante, manteniendo su temperatura dentro de los límites de la clase térmica, sin necesidad de ventilación forzada o sobredimensionamiento de la carcasa.

El estudio de la composición de las pérdidas en los motores eléctricos y de su relación con la frecuencia, el flujo, la corriente y la variación de velocidad, permitió la determinación de un valor óptimo de flujo para cada rotación.

La incorporación de la solución obtenida en los convertidores CFW09 y CFW11 permite que haya una continua minimización de las pérdidas del motor a lo largo de todo el rango de operación, la cual es realizada automáticamente por el convertidor.

¡Importante!

Dicha solución no debe ser utilizada con cargas de par variable o por encima de la frecuencia base y sólo es posible cuando:

- El motor de la línea Premium (cumple el nivel IE3 o superior)
- El motor es alimentado por convertidor de frecuencia WEG (CFW11 o CFW09 versión 2.40 o superior)
- Es utilizado control vectorial sensorless

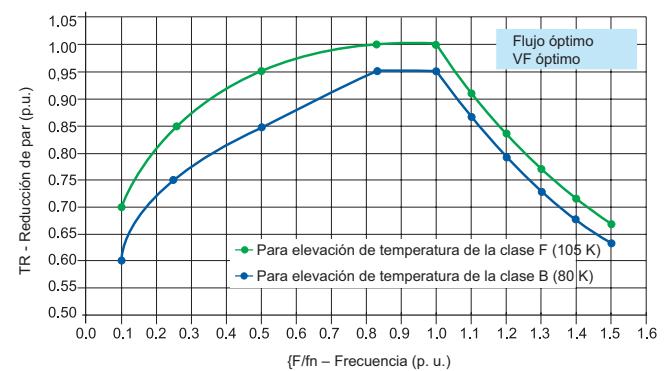


Figura 11.12 - Condición de flujo constante.

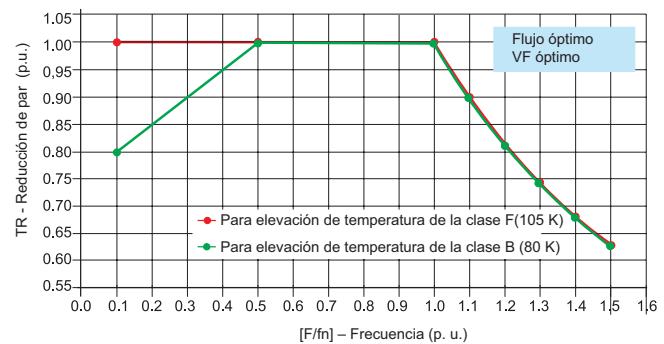


Figura 11.13 - Condición de flujo óptimo.

Los convertidores de frecuencia modernos utilizan transistores de potencia (normalmente IGBTs), cuyas comutaciones ocurren a velocidades muy elevadas, en frecuencias del orden de kHz. Para alcanzar tales comutaciones, los transistores poseen tiempos de inicio de conducción y bloqueo muy rápidos, que resultan en pulsos de tensión con elevado dV/dt (tasa de variación de la tensión en el tiempo). Cuando esos convertidores son utilizados en conjunto con un motor de inducción, los pulsos, en combinación con las impedancias del cable y del motor, pueden generar, en los terminales del motor, sobretensiones (overshoots) repetitivas, que reducen la vida útil del sistema aislante. Los overshoots afectan especialmente el aislamiento entre espiras de devanados aleatorios y su valor es determinado, básicamente, por los siguientes factores: tiempo de subida (rise time) del pulso de tensión, longitud del cable, mínimo tiempo entre pulsos, frecuencia de comutación y el uso de múltiples motores.

Criterios de aislamiento

En la utilización de motores de inducción trifásicos de baja tensión WEG con convertidores deben ser obedecidos los criterios definidos a seguir. Si alguna de las condiciones presentadas en la tabla no es cumplida, debe ser instalado un filtro entre el convertidor y el motor.

Nota: motores para áreas clasificadas deben ser evaluados caso a caso y WEG debe ser consultada.

Tensión nominal del motor	Tensión de pico en los terminales del motor(fase-fase)	dV/dt* en los terminales del motor(fase-fase)	Rise Time*	Tiempo mínimo entre pulsos
$V_{NOM} < 460 \text{ V}$	$\leq 1600 \text{ V}$	$\leq 5200 \text{ V}/\mu\text{s}$	$\geq 0,1 \mu\text{s}$	$\geq 6 \mu\text{s}$
$460 \text{ V} \leq V_{NOM} < 575 \text{ V}$	$\leq 2000 \text{ V}$	$\leq 6500 \text{ V}/\mu\text{s}$		
$575 \text{ V} \leq V_{NOM} \leq 1000 \text{ V}$	$\leq 2400 \text{ V}$	$\leq 7800 \text{ V}/\mu\text{s}$		

Tabla 11.4

* Definición conforme la norma NEMA MG1- Part 30

El fenómeno de la tensión/corriente inducida en el eje proviene fundamentalmente de desequilibrios existentes en el circuito magnético de los motores. Las causas usuales de ese problema, que acomete principalmente máquinas grandes, son excentricidades y otras imperfecciones derivadas del proceso de fabricación. Con el advenimiento de los convertidores PWM, sin embargo, el problema fue agravado, pasando a ocurrir también en máquinas de potencias menores, ya que los motores pasaron a ser alimentados por formas de ondas desequilibradas que poseen componentes de alta frecuencia. De esa forma, las causas de tensión inducida en el eje, debido a los convertidores de frecuencia, se suman a aquellas intrínsecas al motor, que también provocan la circulación de corriente por los cojinetes.

La mayor causa de corrientes por los cojinetes, cuando el motor es accionado por un convertidor PWM, es debido a las tensiones de modo común. La alta frecuencia de la tensión de modo común, producida por el convertidor, hace que las reactancias capacitivas de dentro del motor, queden bajas, permitiendo que la corriente atraviese el acoplamiento formado por el rotor, eje y cojinete en dirección a la tierra.

Tensión de modo común y circuito equivalente del motor para las altas frecuencias

Diferentemente a la tensión trifásica senoidal, la tensión trifásica PWM no es equilibrada, o sea, la suma vectorial instantánea de las tensiones en las tres fases, en la salida de un convertidor de frecuencia, no es igual a cero, sino igual a un potencial eléctrico de alta frecuencia. Corrientes de modo común pueden resultar de esa tensión de modo común de alta frecuencia y, existiendo capacitancias del motor hacia la tierra, la corriente tenderá a fluir para la tierra, atravesando rotor, eje y cojinete hacia la tapa puesta a tierra.

Los caminos recorridos por las corrientes de modo común pueden ser observados en el modelo del circuito equivalente del motor para altas frecuencias, en el cual los cojinetes son representados por capacitancias. A altas velocidades no hay contacto entre el rotor y la pista externa del rodamiento

(puesta a tierra), debido a la distribución plana de la película de grasa.

El potencial del rotor puede, de esta forma, aumentar con relación a tierra hasta alcanzar un nivel capaz de romper la película de grasa, cuando ocurre chispeo y la corriente de descarga fluye a través de los rodamientos. Esta corriente tiene naturaleza aleatoria y es denominada "componente de descarga capacitiva".

Esas descargas dan origen a pequeños orificios, que comienzan a sobreponerse y, en caso de que haya corrientes de descarga por largo tiempo, serán formados surcos (cráteres).

La erosión acarrea reducción de la vida útil de los rodamientos y puede provocar falla de la máquina. La otra componente de corriente, que circula permanentemente por la espira característica formada por eje, cojinetes y carcasa, es denominada "componente de conducción".

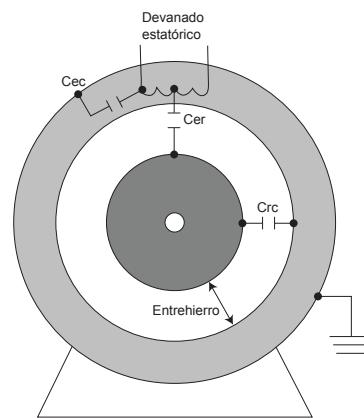


Figura 11.14 - Corriente de descarga capacitiva.

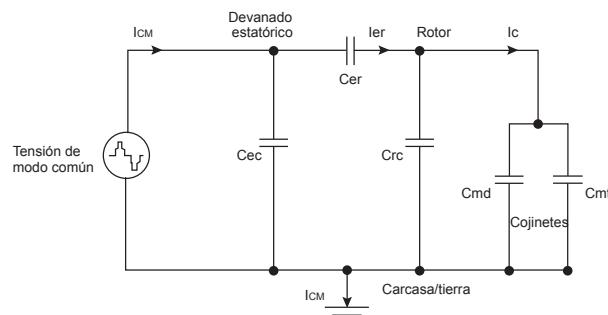


Figura 11.16 - Capacitancia del motor.

Circuito equivalente para alta frecuencia donde:

- C_{er} : capacitor formado entre el devanado estacionario y las chapas del rotor
- C_{rc} : capacitor formado entre las chapas del rotor y del estator
- C_{ec} : capacitor formado entre devanado estacionario y carcasa
- $C_{md/mi}$: capacitancia del cojinete delantero/trasero, formada entre la pista de rodaje del anillo interno/externo y las esferas metálicas
- I_{CM} : corriente total de modo común
- I_{er} : corriente de descarga capacitiva del estator hacia el rotor
- I_c : corriente de descarga capacitiva por los cojinetes.

Criterios de protección de los cojinetes

Cuando hay utilización de motores de inducción trifásicos de baja tensión WEG con convertidores de frecuencia, deben ser obedecidos los criterios para la protección de los cojinetes presentados a seguir:

Nota: motores para áreas clasificadas deben ser evaluados caso a caso - consultar a WEG.

Línea W22		
Tamaño de la Carcasa (IEC)	Estándar	Opcional
225 ≤ mod < 315	■ Sin protección	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cojinete trasero aislado ■ Cojinete delantero aislado ■ Sistema de puesta a tierra de escobillas entre la carcasa y el eje en el lado no accionado
315 y 355	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cojinete trasero aislado ■ Sistema de puesta a tierra de escobillas entre la carcasa y el eje en el lado accionado 	■ Ambos cojinetes aislados

Tabla 11.5 - Protección de los cojinetes.

Los motores de inducción poseen básicamente tres fuentes de ruido: el sistema de ventilación, los rodamientos y la interacción entre ondas electromagnéticas. Cuando los rodamientos están en buen estado, no obstante, el ruido generado por los mismos es prácticamente despreciable, comparado con el ruido generado por las otras fuentes. Motores alimentados con tensión senoidal, principalmente aquellos de polaridades más bajas (rotaciones más elevadas), tienen en el sistema de ventilación su principal fuente de ruido. En motores de polaridades mayores y rotaciones menores, frecuentemente predomina el ruido de origen electromagnético. Por otro lado, en accionamientos de velocidad variable - especialmente en las bajas frecuencias de operación, en las cuales el ruido, debido a la ventilación disminuye - el ruido electromagnético puede ser la mayor fuente de ruido para motores de cualquier polaridad, debido al contenido armónico de la tensión.

Criterios de ruido

Resultados de ensayos de laboratorio (mediciones de 4 puntos efectuadas en cámara acústica semianecoica con el convertidor colocado fuera de la cámara) realizados con varios motores y convertidores WEG, utilizando diversas frecuencias de conmutación, han mostrado que los motores de inducción trifásicos WEG, cuando son alimentados por convertidores de frecuencia PWM y operando a la frecuencia nominal (típicamente 50 ó 60 Hz), presentan como máximo 11 dB(A) de incremento en su nivel de presión sonora global.

Notas: ■ El aumento de la frecuencia de conmutación tiende a reducir el ruido de origen electromagnético producido por el motor.
■ Los criterios de ruido de arriba valen solamente para motores de carcasa ≤ 355

12. Informaciones Ambientales

12.1 Embalaje

Los motores eléctricos son suministrados en embalajes de cartón, plástico o madera. Estos materiales son reciclables o reutilizables. Toda la madera utilizada en los embalajes de los motores WEG provienen de reforestación.

12.2 Producto

Los motores eléctricos, bajo aspecto constructivo, son fabricados esencialmente con metales ferrosos (acero, hierro fundido), metales no ferrosos (cobre, aluminio) y plástico. En general, el motor eléctrico tiene larga vida útil, sin embargo, cuando su disposición, WEG recomienda que los materiales de empaque y el producto son adecuadamente separados y enviados para su reciclaje. Los materiales no reciclables deben, como lo requiere la legislación ambiental, ser eliminados adecuadamente en los vertederos, co-procesado o se incineran. Los proveedores de servicios de reciclaje, eliminación, co-procesamiento o incineración deben tener las licencias apropiadas de las autoridades ambientales locales para llevar a cabo estas actividades.

13. Ensayos

La finalidad de este capítulo es definir los ensayos que pueden ser realizados por solicitud de clientes, con o sin presencia de inspector.

Son agrupados en ENSAYOS DE RUTINA, TIPO y ESPECIAL, conforme son definidos por la norma IEC 60034-1. Para la realización de estos ensayos, debe ser seguida la norma IEEE 112 o IEC 60034-2-1, que define los procedimientos a ser seguidos para la ejecución de los ensayos. Otros ensayos, no mencionados pueden ser realizadas por los laboratorios WEG, siempre que exista acuerdo entre las partes interesadas.

Nº	Descripción	Lista de Tests			Conforme norma	
		Ensayo de Rutina	Ensayo de Tipo	Ensayo Especial	NEMA	IEC
1	Resistencia del devanado a frío	X	X		IEEE 112	IEC 60034-1
2	Ensayo de rotor bloqueado - Corriente	X	X		NEMA MG1	-
3	Ensayo de rotor bloqueado- Desempeño de arranque	N.A.	X		IEEE 112	IEC 60034-12
4	Ensayo de elevación de temperatura	N.A.	X		IEEE 112	IEC 60034-1
5	Ensayo en carga	N.A.	X		IEEE 112	IEC 60034-2-1
6	Ensayo de conjugado máximo	N.A.	X		IEEE 112	IEC 60034-12
7	Ensayo en vacío	X	X		IEEE 112	IEC 60034-2-1
8	Ensayo de vibración	N.A.	N.A.	X	NEMA MG1	IEC 60034-14
9	Nivel de ruido	N.A.	N.A.	X	NEMA MG1	IEC 60034-9
10	Ensayo de tensión aplicada (dieléctrico)	X	X		IEEE 112	IEC 60034-1
11	Ensayo de resistencia de aislamiento	X	X		IEEE 43	IEC 60034-27-4
12	Índice de polarización	N.A.	N.A.	X	IEEE 43	IEC 60034-27-4
13	Curva conjugado x rpm	N.A.	N.A.	X	IEEE 112	-
14	Sobrevelocidad	N.A.	N.A.	X	NEMA MG1	IEC 60034-1
15	Tensión en el eje	N.A.	N.A.	X	IEEE 112	-
16	Resistencia de aislamiento de los cojinetes	N.A.	N.A.	X	IEEE 112	-
17	Exceso de conjugado momentáneo	N.A.	N.A.	X	-	IEC 60034-1
18	Sobrecorriente ocasional	N.A.	N.A.	X	NEMA MG1	IEC 60034-1

Tabla 13.1 - Ensayos

* N.A.: No Aplicable

13.1 Motores Alimentados por Convertidores de Frecuencia

Cuando el motor es alimentado por convertidor, los testes son realizados con alimentación senoidal, con excepción del ensayo de elevación de temperatura, que puede ser realizado con alimentación PWM cuando sea solicitado.

14. Anexos

14.1 Sistema Internacional de Unidades - SI

Grandezas	Nombres	Unidades
Aceleración	metro por segundo al cuadrado	m/s ²
Aceleración angular	radián por segundo al cuadrado	rad/s ²
Ángulo plano	radián	rad
Ángulo sólido	esferoradián	sr
Área	metro cuadrado	m ²
Calor específico	Joule por kilogramo e por Kelvin	J/kgK
Capacitancia	Farad	F
Flujo	metro cúbico por segundo	m ³ /s
Conductancia	Siemens	S
Conductividad térmica	Watt por metro y por Kelvin	W/mK
Conductividad eléctrica	Siemens por metro	S/m
Densidad de flujo de energía	Watt por metro cuadrado	W/m ²
Dosis absorbida	Joule por kilogramo	J/kg
Energía	Joule	J
Entropía	Joule por kelvin	J/K
Flujo (de masa)	kilogramo por segundo	kg/s
Flujo magnético	Weber	Wb
Frecuencia	Hertz	Hz
Fuerza	Newton	N
Gradiente de temperatura	Kelvin por metro	K/m
Impulsión	Newton-segundo	Ns
Inducción magnética	Tesla	T
Inductancia	Henri	H
Intensidad de campo eléctrico	Volt por metro	V/m
Intensidad de campo magnético	Amper por metro	A/m
Intensidad luminosa	candela	cd
Intensidad de corriente	Amper	A
Intervalo de frecuencias	octava	
Longitud	Metro	m
Masa	kilogramo	kg
Masa específica	kilogramo por metro cúbico	kg/m ³
Momento de fuerza	Newton-metro	Nm
Momento cinético	kilogramo-metro cuadrado-segundo	kgm ² /s
Momento de inercia	kilogramo-metro cuadrado	kgm ²
Potencia	Watt	W
Presión	Newton por metro cuadrado	N/m ²
Reluctancia	Amper por Weber	A/Wb
Resistencia eléctrica	Ohm	Ω
Resistividad de masa	Ohm-kilogramo por metro cuadrado	Ωkg/m ²
Resistividad	Ohm-metro	Ωm
Temperatura termodinámica	Kelvin	K
Tensión eléctrica	Volt	V
Tensión superficial	Newton por metro	N/m
Tiempo	Segundo	s
Velocidad angular	radián por segundo	rad/s
Velocidad	metro por segundo	m/s
Viscosidad dinámica	Newton-segundo por metro cuadrado	Ns/m ²
Viscosidad cinemática	metro cuadrado por segundo	m ² /s
Volumen	metro cúbico	m ³

Tabla 14.1

14.2 Conversión de Unidades

De	Multiplicar por	Para obtener
Aceleración		
Metro por segundo al cuadrado (m/s ²)	1.000	Milímetro/segundo ² (mm/s ²)
	100	Centímetro/segundo ² (cm/s ²)
	3,280853	Pies/segundo ² (ft/s ²)
	2,23694	Milla/hora segundo (mi/(h.s))
Aceleración angular		
Radian por segundo al cuadrado (rad/s ²)	57,29577951	Grados por segundo al cuadrado (°/s ²)
	0,159154943	Revolución por segundo al cuadrado (s ⁻²)
Ángulo plano		
Radián (rad)	57,2958	Grado trigonométrico (°)
	3,437,748	Minuto (')
	206,264,900	Segundo (")
	0,1591551	rpm
Área		
Metro cuadrado (m ²)	0,001482626	Acre (ac)
	60.000	Centímetro cuadrado (cm ²)
	64,58346	Pies cuadrados (ft ²)
	0,0006	Hectárea (ha)
	9300,019	Pulgadas cuadradas (in ²)
	6x10 ⁻⁶	Kilómetro cuadrado (km ²)
	2,32x10 ⁻⁶	Milla cuadrada (mi ²)
	6.000.000	Milímetro cuadrado (mm ²)
Calor específico		
Joule por kilogramo e por Kelvin (J/kgK)	0,000238846	Caloría (IT)/Gramo/Grados Celsius (cal/g/°C)
	0,101971621	Kilogramo-fuerza metro/Kilogramo/Kelvin (kgfm/kg/K)
	0,185862535	Libra-fuerza pie/Libra/Rankine (lb.ft/lb.°R)
	0,000238846	Btu (IT)/Libra/Grados Fahrenheit (BTU/lb/°F)
	0,000429923	Btu (IT)/Libra/Grados Celsius (BTU/lb/°C)
Capacitancia		
Farad (F)	1	Culombio/Volt (C/V)
Flujo		
Metro cúbico por segundo (m ³ /s)	1.000	Litro por segundo (l/s)
	33.814,0227	Onza por segundo (oz/s)
	1,307950619	Yarda cónica por segundo (yd ³ /s)
	35,31466672	Pies cúbicos por segundo (ft ³ /s)
	61,023,74409	Pulgadas cúbicas por segundo (in ³ /s)
	1.629,941563	Libra por segundo (lb/s)
	739,3290564	Kilogramo por segundo (kg/s)
Conductancia		
Siemens (S)	1	Amper por Volt (A/V)
Conductividad térmica		
Watt por metro y por Kelvin (W/mK)	0,002388459	Caloría(IT)/Segundo/Centímetro/Grados Celsius (cal/s/cm/°C)
	0,001925964	Btu(IT)/Pulgadas/Segundo/Pies cuadrados/°F (BTU.in/s/ft ²)
Conductividad eléctrica		
Siemens por metro (S/m)	8,99x10 ⁻¹¹	Statmho/metro
Densidad de flujo de energía		
Watt por metro cuadrado (W/m ²)	0,00064516	Watt/Pulgadas cuadradas (W/in ²)
	1	Joule/Segundo/Metros cuadrados (J/s.m ²)
	0,000023901	Caloría (th)/Segundo/Centímetros cuadrados (cal/s/cm ²)
	3.600.000	Dina/hora/centímetro (dyn/h/cm)
	36.000	Erg/hora/Milímetros cuadrados (erg/h/mm ²)
	4,111305952	Libra Pie/Minuto/Pie cuadrado (lb.ft/min/ft ²)
	0,000126313	Horsepower(métrico)/Pie cuadrado (HP/ft ²)
	0,000088055	Btu (IT)/Segundo/Pie cuadrado (BTU/s/ft ²)
Dosis absorbida		
Joule por Kilogramo (J/kg)	100	rad
	1	Gray
Energía		
Joule (J)	0,000947817	BTU
	0,2388459	Caloría (cal)
	1x10 ⁻⁰⁷	Dina-centímetro (dyn.cm)
	6,24x10 ⁻¹⁸	Elétron volt (eV)
	1x10 ⁻⁰⁷	Erg (erg)
	2,78x10 ⁻⁰⁷	Kilovatio·hora (kWh)
	10,197,16	Gramo fuerza·centímetro (gf.cm)
	3,73x10 ⁻⁰⁷	Horsepower·hora (HP.h)
	1	Newton·metro (N.m)
	141,6119	Onza Fuerza·Pulgada (ozf.in)
	8,850746	Libra-Fuerza·Pulgada (lbf.in)
	0,7375621	Libra-Fuerza·pie (lbf.ft)
Entropía		
Joule por kelvin (J/K)	7,24x10 ⁻²²	Constante de Boltzmann (k(B))
	2,39x10 ⁻⁰¹	Calorías/Kelvin (cal/K)
	2,39x10 ⁻⁰¹	Clausius (Cl)
	1	Newton·metro/Kelvin (Nm/K)
	3,42x10 ⁻⁰³	Libra cuadrada pulgada por Kelvin segundo cuadrado (lb.in ² /K.s ²)

De	Multiplicar por	Para obtener
Flujo (de masa)		
Kilogramo por segundo (kg/s)	0,001	Tonelada (métrica)/segundo (t/s)
	2,204622622	Libra/segundo (lb/s)
Flujo magnético		
Weber (Wb)	1	Volt segundo (V.s)
	7,957,747,155	Polo unitario
	100	Megalina
	100.000.000	Maxwell (Mx)
	1	Tesla metro cuadrado (T.m ²)
	100.000.000	Gauss centímetro cuadrado (G.cm ²)
Frecuencia		
Hertz (Hz)	1	Ciclo/segundo
Fuerza		
Newton (N)	100.000	Dina (dyn)
	101,9716	Gramo fuerza (gf)
	0,1019716	Kilogramo fuerza (kgf)
	3,596943	Onza-fuerza (ozf)
	0,2248089	Libra-fuerza (lbf)
Gradiente de temperatura		
Kelvin por metro (K/m)	0,9144	Kelvin por Yarda (K/yd)
	0,3048	Kelvin por pie (K/ft)
	0,0254	Kelvin por pulgada (K/in)
Inducción magnética		
Tesla (T)	1	Weber/metro cuadrado (Wb/m ²)
	0,00064516	Weber/pulgadas cuadradas (Wb/in ²)
	1	Maxwell/metro cuadrado (Mx/m ²)
	64,516	Maxwell/pulgadas cuadradas (Mx/in ²)
	10.000	Gauss (G)
Inductancia		
Henry (H)	1	Weber/Ampere (Wb/A ²)
Intensidad de campo eléctrico		
Volt por metro (V/m)	0,0254	Volt/pulgadas (V/in)
	1	Newton/Culombio (N/C)
Intensidad de campo magnético		
Amper por metro (A/m)	0,012566371	Oersted (Oe)
Intensidad de corriente		
Amper (A)	0,1	Biot (Bi)
Longitud		
Metro (m)	3,28083	Pie (ft)
	0,00497097	Furlong (fur)
	39,36996	Pulgada (in)
	1,05702x10 ⁻¹⁶	Año luz (ly)
	0,000621371	Milla (mi)
	0,000539957	Milla náutica (M)
	3,24078x10 ⁻¹⁷	Parsec (pc)
	1,09361	Yarda (yd)
Masa		
Kilogramo (kg)	5.000	Quilate (ct)
	15,432,4	Grano (gr)
	35,27392	Onza (avdp) (oz)
	32,1505	Onza (troy) (ozt)
	2,20462	Libra (lb)
	0,1574728	Stone (st)
	0,0009842	Tonelada (largo)
	0,0011023	Tonelada (pequeño) (tn)
Masa específica		
Kilogramo por metro cúbico (kg/m ³)	0,000001	Gramo/Milímetro cúbico (g/mm ³)
	0,000001	Kilogramo/Centímetro cúbico (kg/cm ³)
	0,001	Kilogramo/Litro (kg/l)
	0,06243	Libra/Pie Cúbico (lb/ft ³)
Momento de fuerza		
Newton-metro (Nm)	1x10 ⁻⁰⁷	Dina centímetro (dyn.cm)
	10,197,2	Gramo·fuerza centímetro (gf.cm)
	0,1019716	Kilogramo·fuerza metro (kgf.m)
	11,80097	Onza·fuerza pie (ozf.ft)
	141,6116	Onza·fuerza pulgadas (ozf.in)
	0,737561	Libra·fuerza pie (lbf.ft)
Momento de inercia		
Kilogramo-metro cuadrado (kgm ²)	54,674,74983	Onza pulgada cuadrada (oz.in ²)
	23,7303604	Libra pie cuadrado (lb.ft ²)
	3,417,171898	Libra pulgada cuadrada (lb.in ²)
	0,737562142	Slug pie cuadrado (slug ft ²)

14.3 Normas

De	Multiplicar por	Para obtener
Potencia		
Watt (W)	3,415179	BTU/hora (BTU/h)
	0,05691965	BTU/minuto (BTU/min)
	0,000948661	BTU/segundo (BTU/s)
	0,2390585	Caloría/segundo (cal/s)
	0,001341022	Horsepower (HP)
	44,25373	Libra-pie/minuto (lb.ft/min)
	0,7375621	Libra-pie/segundo (lb.ft/s)
	0,00135962	Caballo de Vapor (cv)
	0,001	Kilovatio (kW)
	Presión	
Newton por metro cuadrado (N/m ²)	1	Pascal (Pa)
	0,00001	Bar
	10	Dina/Centímetro cuadrado (Dye/cm ²)
	0,101971621	Kilogramo-fuerza/ Metro cuadrado (kgf/m ²)
	1,04427x10 ⁻⁰⁵	Tonelada-fuerza(pequeño)/Pie cuadrado (ton.f/ft ²)
	9,32385x10 ⁻⁰⁶	Tonelada-fuerza(largo)/Pie cuadrado (ton.f/ft ²)
	1,45x10 ⁻⁰⁷	Fuerza-kip/Pulgadas cuadradas (kip/in ²) (ksi)
Reluctancia		
Amper por Weber (A/Wb)	1	Amper/volt-segundo (A/V.s)
	1x10 ⁻⁰⁸	Amper/maxell (A/Mx)
	1x10 ⁻⁰¹	Biot/Weber (Bi/Wb)
Resistencia eléctrica		
Ohm (Ω)	1	Volt por Amper (V/A)
	1	(1/S)
Resistividad		
Ohm-metro (Ωm)	1	Siemens por metro (S/m)
Temperatura termodinámica		
Kelvin (K)	(K)-273,15	Grados Celsius (°C)
	(K-273,15)x9/5+32	Grados Fahrenheit (°F)
	1,8	Rankine (Ra)
Grados Fahrenheit (°F)	(F-32)x 5/9	Grados Celsius (°C)
Grados Celsius (°C)	(9/5°C)+32	Grados Fahrenheit (°F)
	(°C) + 273,15	Kelvin (K)
Grados Trigonométricos	0,01745	Radiano (rad)
Tensión superficial		
Newton por metro (N/m)	1	Joule por metro cuadrado (J/m ²)
Dina/Centímetro (dyn/cm)	0,001	Newton por metro (N/m)
	1	Erg/Centímetro cuadrado (Erg/cm ²)
Tiempo		
Segundo (s)	3,17x10 ⁻¹⁰	Siglo
	1,16x10 ⁻⁰⁵	Día
	8,27x10 ⁻⁰⁷	Quincena
	0,000277778	Hora (h)
	0,01666667	Minuto (')
Velocidad angular		
Radián por segundo (rad/s)	0,1592	rpm
Velocidad		
Metro por segundo (m/s)	11.811,02	Pie/hora (ft/h)
	196,8504	Pie/minuto (ft/min)
	3,28084	Pie/segundo (ft/s)
	1,943844	Knot (kn)
	0,003016955	Mach (Ma)
	3.600	Metro/hora (m/h)
	60	Metro/minuto (m/min)
	2,236936	Milla/hora (Mi/h)
Viscosidad dinámica		
Pascal-segundo (Pa.s)	1	Newton-segundo por metro cuadrado (Ns/m ²)
	1	Kilogramo por metro segundo (kg/(m.s))
	0,67197	Libra por pie segundo (lbf/(ft.s))
	0,67197	Slug por pie segundo (slug/(ft.s))
	0,02089	Libra-fuerza segundo por pie cuadrado (lbf.s/ft ²)
Poise	1	Dina segundo por centímetro cuadrado (dyn.s/cm ²)
	1	Gramo por centímetro segundo (g/(cm.s))
	0,1	Pascal-segundo (Pa.s)
	0,1	Newton-segundo por metro cuadrado (Ns/m ²)
Viscosidad cinemática		
Stokes (St)	0,0001	Metro cuadrado por segundo (m ² /s)
	1	Centímetro cuadrado por segundo (cm ² /s)
Volumen		
Metro cúbico (m ³)	35,31467	Pie cúbico (ft ³)
	61.023,74	Pulgada cúbica (in ³)
	1,307951	Yarda cúbica (yd ³)
	264,1721	Galón (gal)
	1.000	Litro (l)
	1.000.000	Milímetro cúbico (mm ³)
	33.814,02	Onza (oz)

Principales normas para Máquinas Eléctricas Girantes			
IEC	Contenido	NEMA	Contenido
IEC 60034-7	Clasificación de las formas constructivas y montajes	NEMA MG 1 Part 4	Motor and Generators - Part 4: Dimensions, tolerances, and mounting
IEC 60034-6	Clasificación de los métodos de enfriamiento	NEMA MG 1 Part 6	Motor and Generators - Part 6: Rotating electrical machines - Method of cooling (IC code)
IEC 60034-1	Motores de inducción trifásicos - Ensayos	IEEE 112	Test procedures for polyphase induction motors and generators
IEC 60072-1/2	Dimensiones y series de potencias para máquinas eléctricas girantes - Estandarización - Designación de carcassas entre 56 a 400 y bridas entre 55 y 1 080	NEMA MG 1 Part 4	Motor and Generators - Part 4: Dimensions, tolerances, and mounting
IEC 60085	Materiales aislantes eléctricos - Clasificación térmica	IEEE 1	General Principles for Temperature Limits in the Rating of Electric Equipment and for the Evaluation Electrical Insulation
IEC 60034-9	Límites de ruido	NEMA MG 1 Part 9	Motor and Generators - Part 9: Sound power limits and measurement procedures
IEC 60034-1	Motores de inducción Parte 1: trifásicos Parte 2: monofásicos	NEMA MG 1	Motor and Generators
IEC 60079	Serie de normas de seguridad para atmósferas explosivas	UL 60079 UL 674 CSA C22.2 N°145	Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres Electric Motors and Generators for Use in Division 1 Hazardous (Classified) Locations Motors and Generators for Use in Hazardous Locations
IEC 60529	Grados de protección para envoltores de equipos eléctricos (código IP)	NEMA MG 1 Part 5	Motor and Generators - Part 5: Classification of degrees of protection provided by enclosures for rotating machines

Notas



+55 47 3276.4000



motores@weg.net



Jaraguá do Sul - SC - Brazil

Cod:50039910 | Rev: 09 | Date (m/a): 09/2024.

Los valores demostrados pueden ser cambiados sin aviso previo.
La información contenida son valores de referencia.