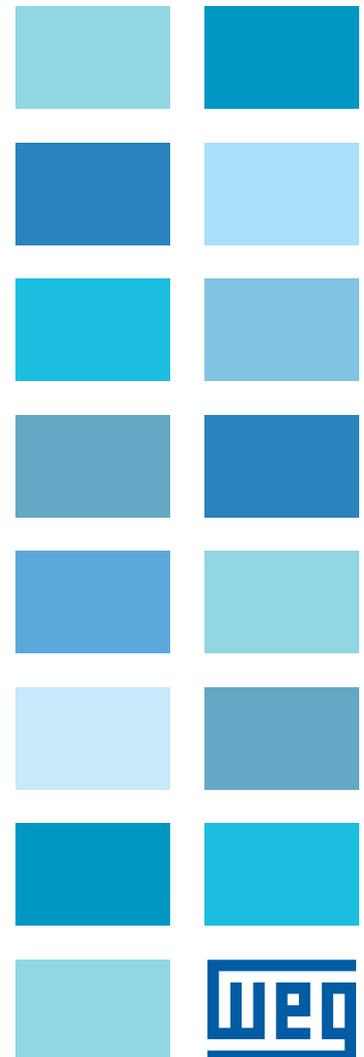
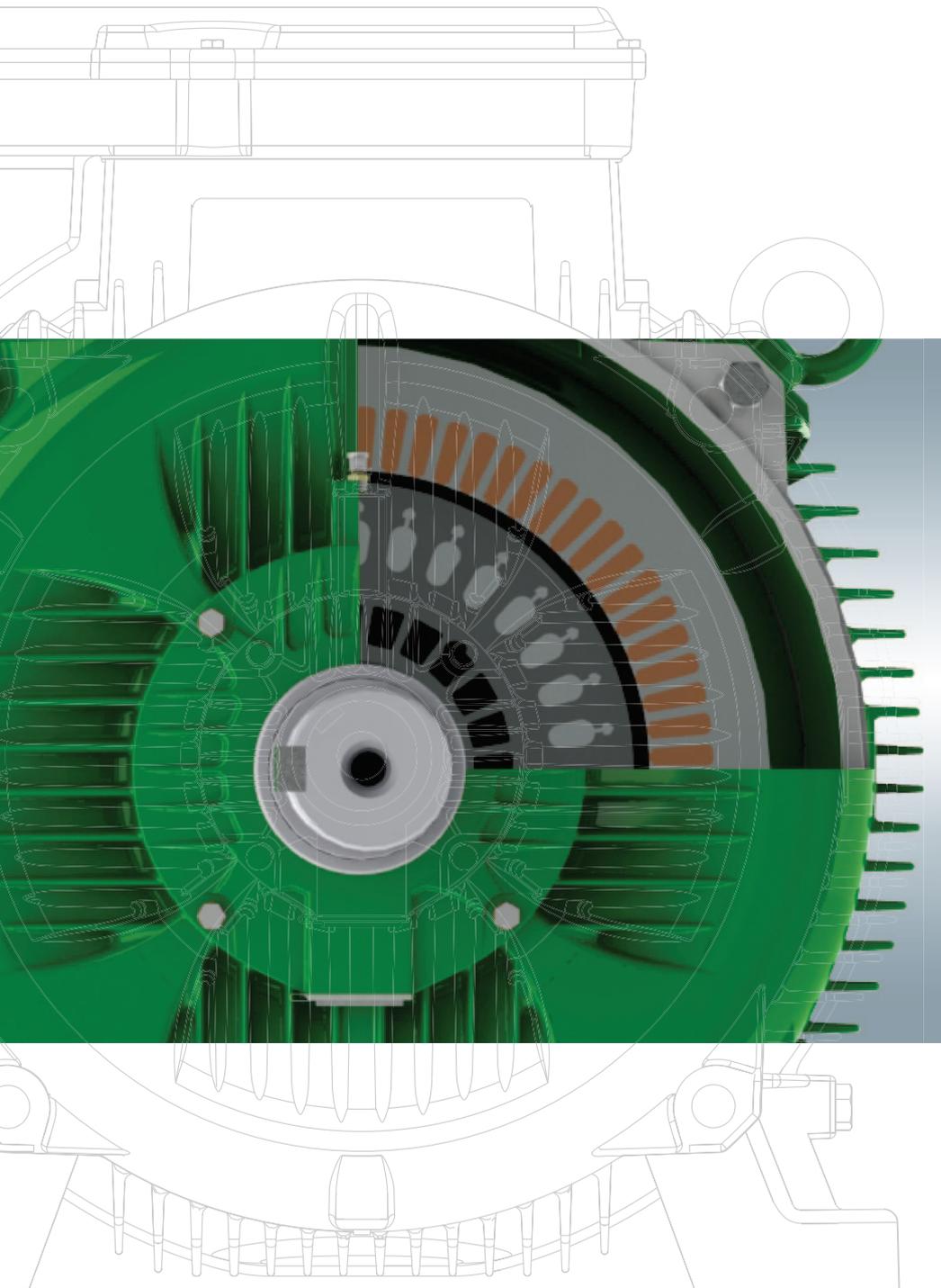
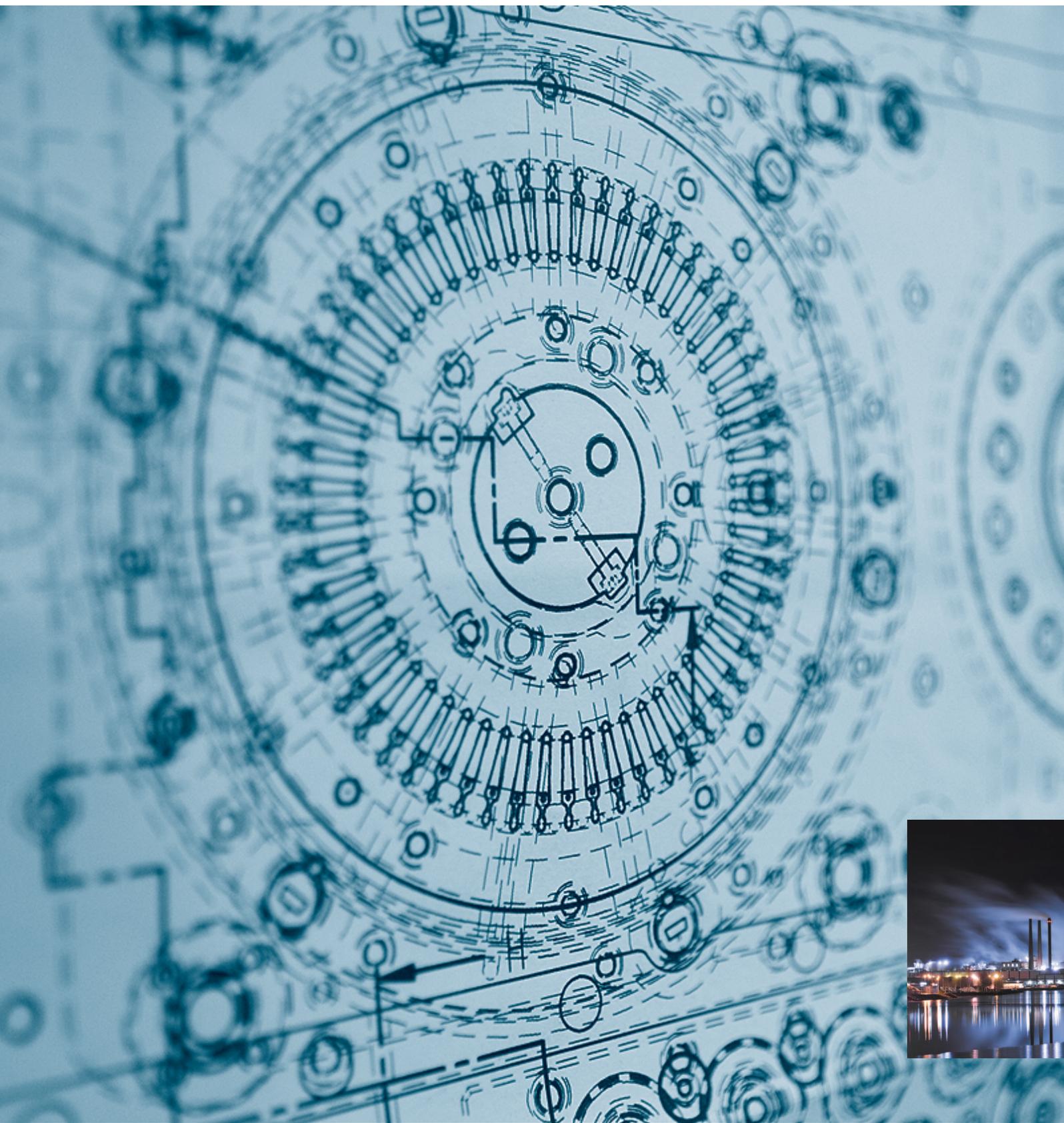


Motores Elétricos

Guia de Especificação



Especificação de Motores Elétricos

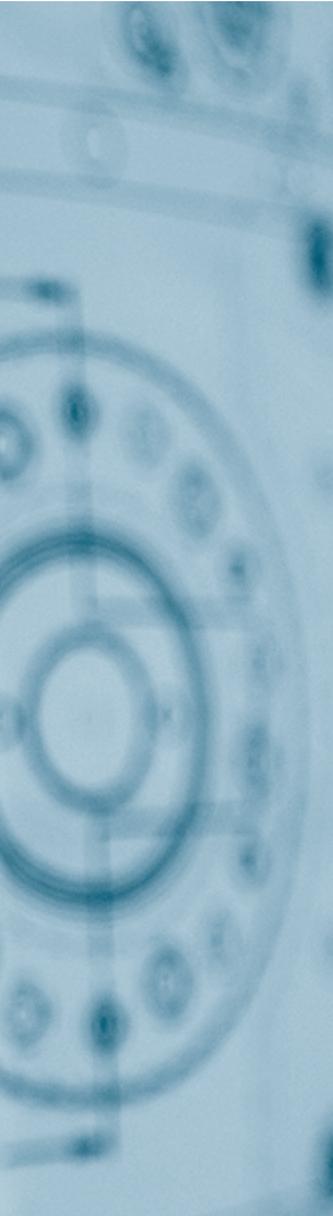




Onde quer que haja progresso, a presença do motor elétrico é imprescindível. Desempenhando um importante papel para a sociedade, os motores são o coração das máquinas modernas, por essa razão é necessário conhecer seus princípios fundamentais de funcionamento, desde a construção até as aplicações.

O guia de Especificação de Motores Elétricos WEG auxilia de maneira simples e objetiva aqueles que compram, vendem e trabalham com esses equipamentos, trazendo instruções de manuseio, uso e funcionamento dos mais diversos tipos de motores.

Na era das máquinas modernas os motores elétricos são o combustível da inovação. Esse material tem como objetivo apresentar a todos os apaixonados pela eletricidade, o crescimento contínuo das novas tecnologias, sem perder a simplicidade do fundamental no universo da energia.



Índice

1. Noções Fundamentais6

1.1	Motores Elétricos	6
1.2	Conceitos Básicos	7
1.2.1	Conjugado	7
1.2.2	Energia e Potência Mecânica	7
1.2.3	Energia e Potência Elétrica	7
1.2.4	Potências Aparente, Ativa e Reativa	8
1.2.5	Fator de Potência	9
1.2.6	Rendimento	11
1.2.7	Relação entre Conjugado e Potência	11
1.3	Sistemas de Corrente Alternada Monofásica	11
1.3.1	Ligações em Série e Paralelo	11
1.4.2	Ligação Estrela	12
1.4	Sistemas de Corrente Alternada Trifásica	12
1.4.1	Ligação Triângulo	12
1.5	Motor de Indução Trifásico	13
1.5.1	Princípio de Funcionamento - Campo Girante	13
1.5.2	Velocidade Síncrona (n_s)	14
1.5.3	Escorregamento (s)	15
1.5.4	Velocidade Nominal	15
1.6	Materiais e Sistemas de Isolação	15
1.6.1	Material Isolante	15
1.6.2	Sistema Isolante	15
1.6.3	Classes Térmicas	15
1.6.4	Materiais Isolantes em Sistemas de Isolação	16
1.6.5	Sistemas de Isolação WEG	16

2. Características da Rede de Alimentação18

2.1	O Sistema	18
2.1.1	Trifásico	18
2.1.2	Monofásico	18

3. Características de Alimentação do Motor Elétrico18

3.1	Tensão Nominal	18
3.1.1	Tensão Nominal Múltipla	18
3.2	Frequência Nominal (Hz)	19
3.2.1	Ligação em Frequências Diferentes	19
3.3	Tolerância de Variação de Tensão e Frequência	20
3.4	Limitação da Corrente de Partida em Motores Trifásicos	20
3.4.1	Partida Direta	20
3.4.2	Partida com Chave Estrela-Triângulo (Y - Δ)	21
3.4.3	Partida com Chave Compensadora (Autotransformador)	23
3.4.4	Comparação entre Chaves Estrela-Triângulo e Compensadoras "Automáticas"	24
3.4.5	Partida com Chave Série-Paralelo	24
3.4.6	Partida Eletrônica (Soft-Starter)	25
3.5	Sentido de Rotação de Motores de Indução Trifásicos	25

4. Características de Aceleração25

4.1	Conjugados	25
4.1.1	Curva Conjugado X Velocidade	25
4.1.2	Categorias - Valores Mínimos Normalizados de Conjugado	26
4.1.3	Características dos Motores WEG	28
4.2	Inércia da Carga	28
4.3	Tempo de Aceleração	28
4.4	Regime de Partida	29
4.5	Corrente de Rotor Bloqueado	29
4.5.1	Valores Máximos Normalizados	29

5. Regulagem da Velocidade de Motores Assíncronos de Indução30

5.1	Variação do Número de Polos	30
5.1.1	Motores de duas Velocidades com Enrolamentos Independentes	30
5.1.2	Dahlander	30
5.1.3	Motores com Mais de Duas Velocidades	31
5.2	Variação do Escorregamento	31
5.2.1	Variação da Resistência Rotórica	31
5.2.2	Variação da Tensão do Estator	31
5.3	Inversores de Frequência	31

6. Motofreio Trifásico31

6.1	Funcionamento do Freio	32
6.2	Esquemas de Ligação	32
6.3	Alimentação da Bobina do Freio	33
6.4	Conjugado de Frenagem	33
6.5	Ajuste do Entreferro	33

7. Características em Regime34

7.1.1	Aquecimento do Enrolamento	34
7.1.2	Vida Útil do Motor	35
7.1.3	Classes de Isolamento	35
7.1.4	Medida de Elevação de Temperatura do Enrolamento	35
7.2	Proteção Térmica de Motores Elétricos	36
7.2.1	Termorresistores (Pt-100)	36
7.2.2	Termistores (PTC e NTC)	36
7.1.5	Aplicação a Motores Elétricos	36
7.2.3	Protetores Térmicos Bimetálicos - Termostatos	37
7.2.4	Protetores Térmicos Fenólicos	38
7.3	Regime de Serviço	39
7.3.1	Regimes Padronizados	39
7.3.2	Designação do Regime Tipo	42
7.3.3	Potência Nominal	43
7.3.4	Potências Equivalentes para Cargas de Pequena Inércia	43
7.4	Fator de Serviço (FS)	44

8. Características de Ambiente44

8.1	Altitude	44
8.2	Temperatura Ambiente	44
8.3	Determinação da Potência Útil do Motor nas Diversas Condições de Temperatura e Altitude	44
8.4	Atmosfera Ambiente	45
8.4.1	Ambientes Agressivos	45
8.4.2	Ambientes Contendo Poeiras ou Fibras	45
8.4.3	Ambientes Explosivos	45
8.5	Grau de Proteção	45
8.5.1	Código de Identificação	45
8.5.2	Tipos Usuais de Graus de Proteção	46
8.5.3	Motores a Prova de Intempéries	46
8.6	Resistência de Aquecimento	46
8.7	Limites de Ruídos	47

9. Atmosferas Explosivas48

9.1 Áreas de Risco 48
 9.2 Atmosfera Explosiva 48
 9.3 Classificação das Áreas de Risco 48
 9.3.1 Classes e Grupos das Áreas de Risco 48
 9.3.2 Tipo de Proteção do Invólucro..... 49
 9.4 Classes de Temperatura..... 50
 9.5 Equipamentos para Áreas de Risco 50
 9.6 Equipamentos de Segurança Aumentada..... 50
 9.7 Equipamentos à Prova de Explosão 51

10. Características Construtivas51

10.1 Dimensões 51
 10.2 Formas Construtivas Normalizadas..... 52
 10.3 Dimensões dos Flanges 54
 10.4 Pintura 55
 10.4.1 Pintura Tropicalizada ou Tropicalização..... 55

11. Seleção e Aplicação dos Motores Trifásicos55

11.1 Seleção do Tipo de Motor para Diferentes Cargas..... 57
 11.2 Níveis de Rendimentos Exigidos no Brasil..... 58
 11.2.1 O Programa de Eficiência Energética no País..... 58
 11.2.2 Motores Premium e Super Premium WEG 58
 11.2.3 WMagnet Drive System® 59
 11.3 Aplicação de Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência 59
 11.3.1 Aspectos Normativos 59
 11.3.2 Variação da Velocidade do Motor por Meio de Inversores de Frequência 59
 11.3.3 Características dos Inversores de Frequência .. 60
 11.3.3.1 Modos de Controle 60
 11.3.3.2 Harmônicas 61
 11.3.4 Influência do Inversor no Desempenho do Motor..... 61

12. Informações Ambientais64

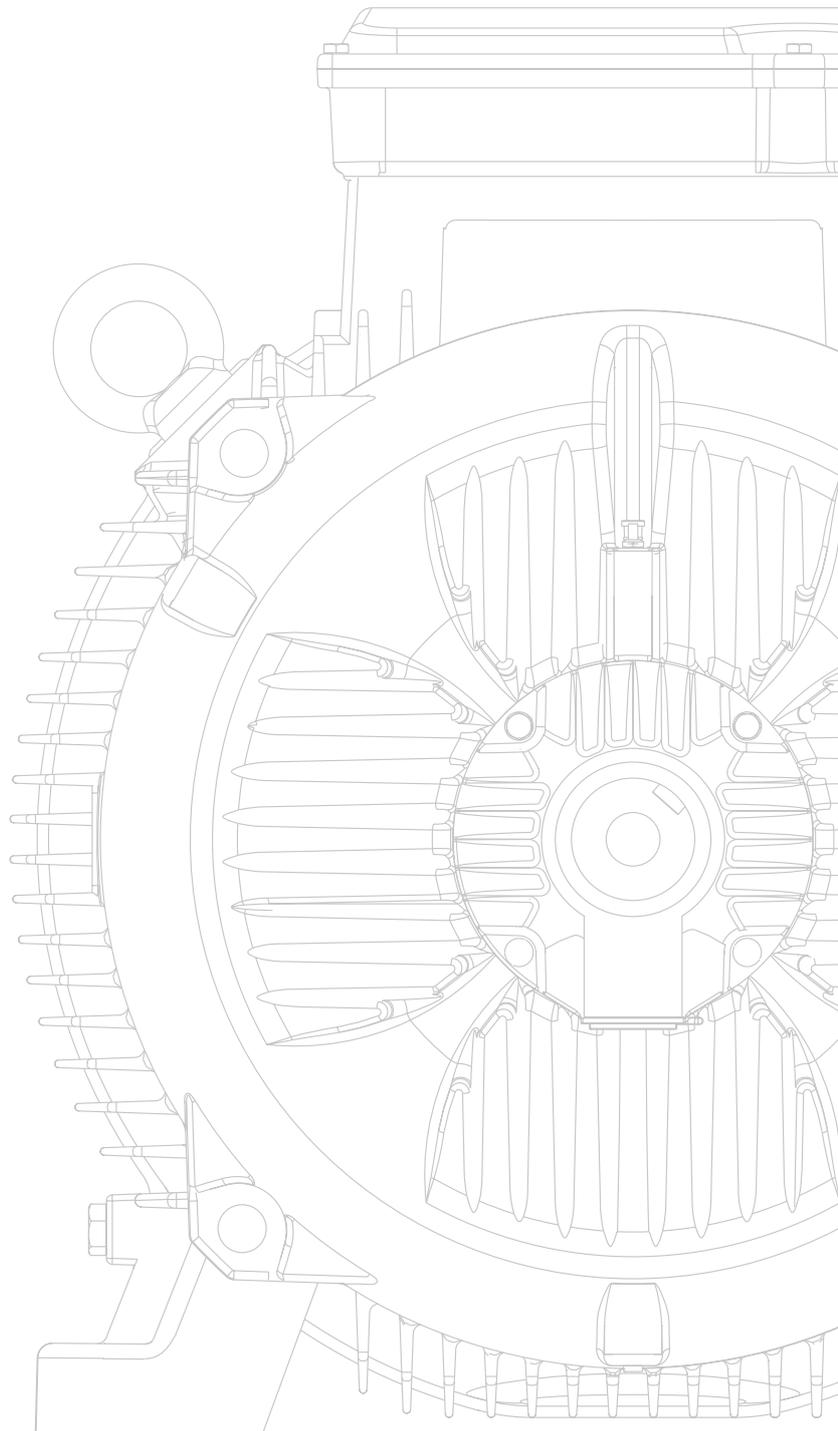
12.1 Embalagem 64
 12.2 Produto 64

13. Ensaios.....64

13.1 Motores Alimentados por Inversores de Frequência..... 64

14. Anexos.....65

14.1 Sistema Internacional de Unidades - SI..... 65
 14.2 Conversão de Unidades..... 66
 14.3 Normas - ABNT e IEC 67



1.2 Conceitos Básicos

São apresentados a seguir os conceitos de algumas grandezas básicas, cuja compreensão é necessária para melhor acompanhar as explicações das outras partes deste guia.

1.2.1 Conjugado

O conjugado (também chamado torque ou momento) é a medida do esforço necessário para girar um eixo. Pela experiência prática observa-se que para levantar um peso por um processo semelhante ao usado em poços (figura 1.1) a força F que é preciso aplicar à manivela depende do comprimento E da mesma. Quanto maior for a manivela, menor será a força necessária. Se dobrarmos o tamanho E da manivela, a força F necessária será diminuída à metade.

No exemplo da figura 1.1, se o balde pesa 20 N e o diâmetro do tambor é 0,20 m, a corda transmitirá uma força de 20 N na superfície do tambor, isto é, a 0,10 m do centro do eixo. Para contrabalançar esta força, precisa-se de 10 N na manivela, se o comprimento E for de 0,20 m. Se E for o dobro, isto é, 0,40 m, a força F será a metade, ou seja 5 N. Como vemos, para medir o “esforço” necessário para girar o eixo não basta definir a força empregada: é preciso também dizer a que distância do centro eixo a força é aplicada. O “esforço” é medido pelo conjugado, que é o produto da força pela distância, F x E. No exemplo citado, o conjugado vale:

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

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

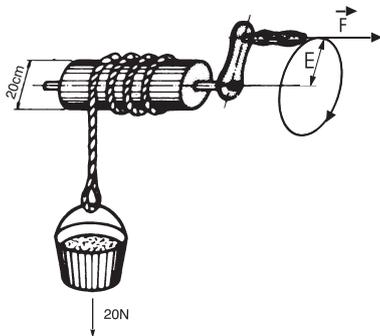


Figura 1.1

1.2.2 Energia e potência mecânica

A potência mede a “velocidade” com que a energia é aplicada ou consumida. No exemplo anterior, se o poço tem 24,5 metros de profundidade, a energia gasta, ou trabalho (W) realizado para trazer o balde do fundo até a boca do poço é sempre a mesma, valendo 20 N x 24,5 m = 490 Nm

Nota: a unidade de medida de energia mecânica, Nm, é a mesma que usamos para o conjugado - trata-se, no entanto, de grandezas de naturezas diferentes, que não devem ser confundidas.

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

OBS.: 1 Nm = 1 J = Potência x tempo = Watts x segundo

A potência exprime a rapidez com que esta energia é aplicada e se calcula dividindo a energia ou trabalho total pelo tempo gasto em realizá-lo. Assim, se usarmos um motor

elétrico capaz de erguer o balde de água em 2,0 segundos, a potência necessária será:

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

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

Se usarmos um motor mais potente, com capacidade de realizar o trabalho em 1,3 segundos, a potência necessária será:

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

A unidade usada no Brasil para medida de potência mecânica é o cv (cavalo-vapor), equivalente a 0,736 kW (unidade de medida utilizada internacionalmente para o mesmo fim).

Relação entre unidades de potência

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

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

Então as potências dos dois motores acima serão:

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

Para movimentos circulares

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

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

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

onde: C = conjugado em Nm

F = força em N

r = raio da polia em m

v = velocidade angular em m/s

d = diâmetro da peça em m

n = velocidade em rpm

1.2.3 Energia e potência elétrica

Embora a energia seja uma coisa só, ela pode se apresentar de formas diferentes. Se ligarmos uma resistência a uma rede elétrica com tensão, passará uma corrente elétrica que irá aquecer a resistência. A resistência absorve energia elétrica e a transforma em calor, que também é uma forma de energia. Um motor elétrico absorve energia elétrica da rede e a transforma em energia mecânica disponível na ponta do eixo.

Circuitos de corrente contínua

A “potência elétrica”, em circuitos de corrente contínua, pode ser obtida através da relação da tensão (U), corrente (I) e resistência (R) envolvidas no circuito, ou seja:

$$P = U \cdot I \quad (W)$$

ou,

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

ou,

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

Onde: U = tensão em Volt
I = corrente Ampère
R = resistência em Ohm
P = potência média em Watt

Circuitos de corrente alternada

a) Resistência

No caso de “resistências”, quanto maior a tensão da rede, maior será a corrente e mais depressa a resistência irá se aquecer. Isto quer dizer que a potência elétrica será maior. A potência elétrica absorvida da rede, no caso da resistência, é calculada multiplicando-se a tensão da rede pela corrente, se a resistência (carga), for monofásica.

$$P = U_f \cdot I_f \quad (W)$$

No sistema trifásico a potência em cada fase da carga será $P_f = U_f \times I_f$, como se fosse um sistema monofásico independente. A potência total será a soma das potências das três fases, ou seja:

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

Lembrando que o sistema trifásico é ligado em estrela ou triângulo, temos as seguintes relações:

Ligação estrela: $U = \sqrt{3} \cdot U_f$ e $I = I_f$

Ligação triângulo: $U = U_f$ e $I = \sqrt{3} \cdot I_f$

Assim, a potência total, para ambas as ligações, será:

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

Nota: esta expressão vale para a carga formada por resistências, onde não há defasagem da corrente.

b) Cargas reativas

Para as “cargas reativas”, ou seja, onde existe defasagem entre o ângulo da tensão e da corrente, como é o caso dos motores de indução, esta defasagem tem que ser levada em conta e a expressão fica:

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

Onde: U = Tensão de linha
I = Corrente de linha
 $\cos \varphi$ = Ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente de fase.

A unidade de medida usual para potência elétrica é o Watt (W), correspondente a 1 Volt x 1 Ampère, ou seu múltiplo, o quilowatt = 1.000 Watts. Esta unidade também é usada para medida de potência mecânica. A unidade de medida usual para energia elétrica é o quilo-watt-hora (kWh) correspondente à energia fornecida por uma potência de 1 kW funcionando durante uma hora - é a unidade que aparece, para cobrança, nas contas de luz.

1.2.4 Potências Aparente, Ativa e Reativa

Potência aparente (S)

É o resultado da multiplicação da tensão pela corrente ($S = U \cdot I$ para sistemas monofásicos e $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$, para sistemas trifásicos). Corresponde à potência que existiria se não houvesse defasagem da corrente, ou seja, se a carga fosse formada por resistências. Então,

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

Evidentemente, para as cargas resistivas, $\cos \varphi = 1$ e a potência ativa se confunde com a potência aparente. A unidade de medida para potência aparente é o Volt-Ampère (VA) ou seu múltiplo, o quilo-Volt-Ampère (kVA).

Potência ativa (P)

É a parcela da potência aparente que realiza trabalho, ou seja, que é transformada em energia.

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

Potência reativa (Q)

É a parcela da potência aparente que “não” realiza trabalho. Apenas é transferida e armazenada nos elementos passivos (capacitores e indutores) do circuito.

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

Triângulo de potências

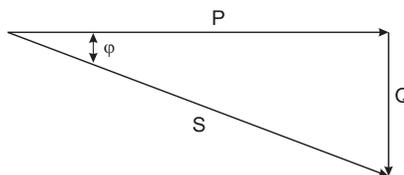


Figura 1.2 - Triângulo de potências (carga indutiva)

1.2.5 Fator de Potência

O fator de potência, indicado por $\cos \varphi$, onde φ é o ângulo de defasagem da tensão em relação à corrente, é a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) (figura 1.2).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P \text{ (kW)} \cdot 1000}{3 \cdot U \cdot I}$$

Assim,

- Carga Resistiva: $\cos \varphi = 1$
- Carga Indutiva: $\cos \varphi$ atrasado
- Carga Capacitiva: $\cos \varphi$ adiantado

Nota: os termos, atrasado e adiantado, referem-se ao ângulo da corrente em relação à tensão.

Um motor não consome apenas potência ativa que é depois convertida em trabalho mecânico e calor (perdas), mas também potência reativa, necessária para magnetização, mas que não produz trabalho. No diagrama da figura 1.3, o vetor P representa a potência ativa e o Q a potência reativa, que somadas resultam na potência aparente S.

Importância do fator de potência

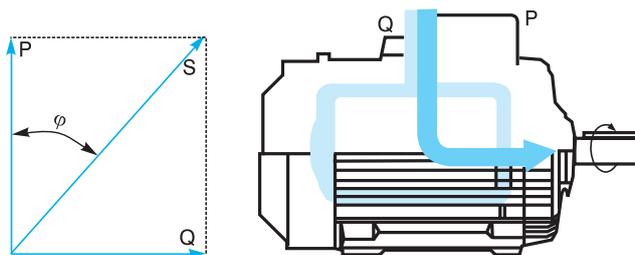


Figura 1.3 - O fator de potência é determinado medindo-se a potência de entrada, a tensão e a corrente de carga nominal

Visando otimizar o aproveitamento do sistema elétrico brasileiro, reduzindo o trânsito de energia reativa nas linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição, a portaria do DNAEE número 85, de 25 de março de 1992, determina que o fator de potência de referência das cargas passe de 0,85 para 0,92. A mudança do fator de potência, dá maior disponibilidade de potência ativa no sistema, já que a energia reativa limita a capacidade de transporte de energia útil (ativa).

O motor elétrico é uma peça fundamental, pois dentro das indústrias, representa mais de 60% do consumo de energia. Logo, é imprescindível a utilização de motores com potência e características bem adequadas a sua função, pois o fator de potência varia com a carga do motor.

Correção do fator de potência

O aumento do fator de potência é realizado com a ligação de uma carga capacitiva, em geral, um capacitor ou motor síncrono super excitado, em paralelo com a carga.

Por exemplo:

Um motor elétrico, trifásico de 100 cv (75 kW), IV polos, operando com 100% da potência nominal, com fator de potência original de 0,87 e rendimento de 93,5%. Deseja-se calcular a potência reativa necessária para elevar o fator de potência para 0,95.

Solução:

Utilizando-se da tabela 1.2, na intersecção da linha 0,87 com a coluna de 0,95, obtém-se o valor de 0,238, que multiplicado pela potência absorvida da rede pelo motor em kW, resulta no valor da potência reativa necessária para elevar-se o fator de potência de 0,87 para 0,95.

$$Q = \frac{P \text{ (cv)} \times 0,736 \times F \times 100\%}{\text{Rend. \%}}$$

$$= \frac{100 \times 0,736 \times 0,238 \times 100\%}{93,5\%}$$

$$Q = 18,735 \text{ kVAr}$$

Onde: Q = Potência trifásica do banco de capacitores a ser instalado
P(cv) = Potência nominal do motor
F = Fator obtido na tabela 1.2
Rend. % = Rendimento do motor



Fator de potência original	Fator de potência desejado																				
	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
0,50	0,982	1,008	1,034	1,060	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	1,559
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	0,822	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
0,60	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
0,70	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
0,80	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	0,14	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	
0,90											0,028	0,056	0,086	0,117	0,149	0,183	0,220	0,262	0,309	0,370	0,512
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
0,97																			0,047	0,108	0,251
0,98																				0,061	0,203
0,99																					0,142

Tabela 1.2 - Correção do fator de potência

1.2.6 Rendimento

O rendimento define a eficiência com que é feita a conversão da energia elétrica absorvida da rede pelo motor, em energia mecânica disponível no eixo. Chamando “Potência útil” P_u a potência mecânica disponível no eixo e “Potência absorvida” P_a a potência elétrica que o motor retira da rede, o rendimento será a relação entre as duas, ou seja:

$$\eta = \frac{P_u \text{ (W)}}{P_a \text{ (W)}} = \frac{736 \cdot P \text{ (cv)}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} = \frac{1000 \cdot P \text{ (kW)}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}$$

ou

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

1.2.7 Relação entre Conjugado e Potência

Quando a energia mecânica é aplicada sob a forma de movimento rotativo, a potência desenvolvida depende do conjugado C e da velocidade de rotação n . As relações são:

$$P \text{ (cv)} = \frac{C \text{ (kgfm)} \cdot n \text{ (rpm)}}{716} = \frac{C \text{ (Nm)} \cdot n \text{ (rpm)}}{7024}$$

$$P \text{ (kW)} = \frac{C \text{ (kgfm)} \cdot n \text{ (rpm)}}{974} = \frac{C \text{ (Nm)} \cdot n \text{ (rpm)}}{9555}$$

Inversamente

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

$$C \text{ (Nm)} = \frac{7024 \cdot P \text{ (cv)}}{n \text{ (rpm)}} = \frac{9555 \cdot P \text{ (kW)}}{n \text{ (rpm)}}$$

1.3 Sistemas de Corrente Alternada Monofásica

A corrente alternada se caracteriza pelo fato de que a tensão, em vez de permanecer fixa, como entre os polos de uma bateria, varia com o tempo, mudando de sentido alternadamente.

No sistema monofásico uma tensão alternada U (Volt) é gerada e aplicada entre dois fios, aos quais se liga a carga, que absorve uma corrente I (Ampère) - ver figura 1.4a.

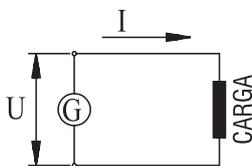


Figura 1.4a

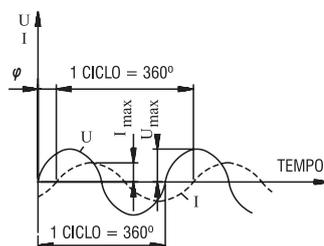


Figura 1.4b

Se representarmos num gráfico os valores de U e I , a cada instante, vamos obter a figura 1.4b. Na figura 1.4b estão também indicadas algumas grandezas que serão definidas em seguida. Note que as ondas de tensão e de corrente não estão “em fase”, isto é, não passam pelo valor zero ao mesmo tempo, embora tenham a mesma frequência; isto acontece para muitos tipos de carga, por exemplo, enrolamentos de motores (cargas reativas).

Frequência

É o número de vezes por segundo que a tensão muda de sentido e volta à condição inicial. É expressa em “ciclos por segundo” ou “Hertz”, simbolizada por Hz.

Tensão máxima ($U_{m\acute{a}x}$)

É o valor de “pico” da tensão, ou seja, o maior valor instantâneo atingido pela tensão durante um ciclo (este valor é atingido duas vezes por ciclo, uma vez positivo e uma vez negativo).

Corrente máxima ($I_{m\acute{a}x}$)

É o valor de “pico” da corrente.

Valor eficaz de tensão e corrente (U e I)

É o valor da tensão e corrente contínuas que desenvolvem potência correspondente àquela desenvolvida pela corrente alternada. Pode-se demonstrar que o valor eficaz vale:

$$U = U_{m\acute{a}x} / \sqrt{2} \quad e \quad I = I_{m\acute{a}x} / \sqrt{2}$$

Exemplo:

Se ligarmos uma “resistência” a um circuito de corrente alternada ($\cos \varphi = 1$) com $U_{m\acute{a}x} = 311$ V e $I_{m\acute{a}x} = 14,14$ A,

A potência desenvolvida será:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = \frac{U_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \cdot 1 = 311 \cdot 14,14 \cdot 1$$

$$P = 2.200 \text{ Watts} = 2,2 \text{ kW}$$

OBS.: normalmente, quando se fala em tensão e corrente, por exemplo, 220 V ou 10 A, sem especificar mais nada, estamos nos referindo à valores eficazes da tensão ou da corrente, que são empregados na prática.

Defasagem (φ)

É o “atraso” da onda de corrente em relação à onda da tensão (ver figura 1.4b). Em vez de ser medido em tempo (segundos), este atraso é geralmente medido em ângulo (graus) correspondente à fração de um ciclo completo, considerando 1 ciclo = 360°. Mas comumente a defasagem é expressa pelo cosseno do ângulo (ver item “1.2.5 - Fator de potência”).

1.3.1 Ligações em Série e Paralelo

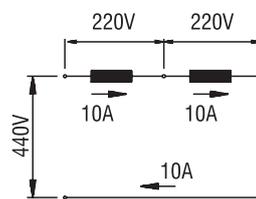


Figura 1.5a

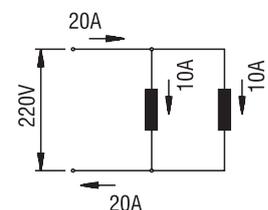


Figura 1.5b

Se ligarmos duas cargas iguais a um sistema monofásico, esta ligação pode ser feita em dois modos:

- ligação em série (figura 1.5a), em que a corrente total do circuito percorre as duas cargas. Neste caso, a tensão em cada carga será a metade da tensão do circuito.
- ligação em paralelo (figura 1.5b), em que é aplicada às duas cargas a tensão do circuito. Neste caso, a corrente em cada carga será a metade da corrente total do circuito.

1.4 Sistemas de Corrente Alternada Trifásica

O sistema trifásico é formado pela associação de três sistemas monofásicos de tensões U_1 , U_2 e U_3 tais que a defasagem entre elas seja de 120° , ou seja, os “atrasos” de U_2 em relação a U_1 , de U_3 em relação a U_2 e de U_1 em relação a U_3 sejam iguais a 120° (considerando um ciclo completo = 360°). O sistema é equilibrado se as três tensões têm o mesmo valor eficaz $U_1 = U_2 = U_3$ conforme figura 1.6.

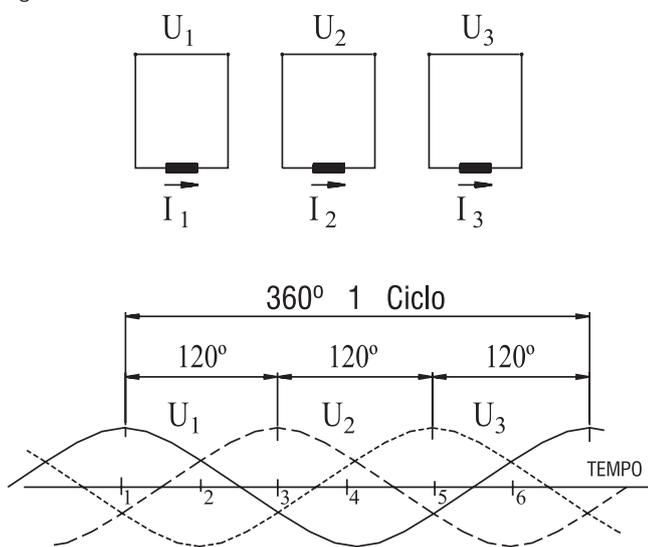


Figura 1.6

Ligando entre si os três sistemas monofásicos e eliminando os fios desnecessários, teremos um sistema trifásico equilibrado: três tensões U_1 , U_2 e U_3 equilibradas, defasadas entre si de 120° e aplicadas entre os três fios do sistema. A ligação pode ser feita de duas maneiras, representadas nos esquemas seguintes. Nestes esquemas, costuma-se representar as tensões com setas inclinadas ou vetores girantes, mantendo entre si o ângulo correspondente à defasagem (120°), conforme figuras 1.7a, b e c, e figuras 1.8a, b e c.

1.4.1 Ligação Triângulo

Se ligarmos os três sistemas monofásicos entre si, como indicam as figuras 1.7a, b e c, podemos eliminar três fios, deixando apenas um em cada ponto de ligação, e o sistema trifásico ficará reduzido a três fios L_1 , L_2 e L_3 .

Tensão de linha (U)

É a tensão nominal do sistema trifásico aplicada entre dois dos três fios L_1 , L_2 e L_3 .

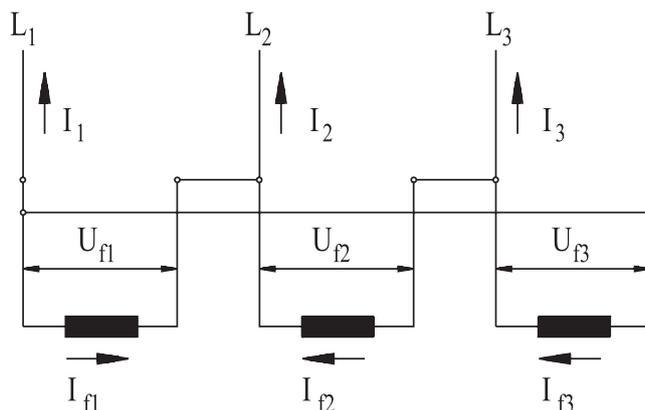


Figura 1.7a - Ligações

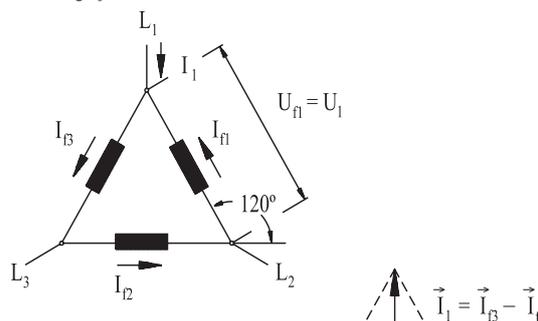


Figura 1.7b - Diagrama elétrico

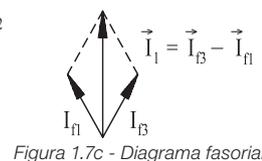


Figura 1.7c - Diagrama fasorial

Corrente de linha (I)

É a corrente em qualquer um dos três fios L_1 , L_2 e L_3 .

Tensão e corrente de fase (U_f e I_f)

É a tensão e corrente de cada um dos três sistemas monofásicos considerados.

Examinando o esquema da figura 1.7b, vê-se que:

$$U = U_f$$

$$I = \sqrt{3} \cdot I_f \quad I_f = 1,732 I_f$$

$$\vec{I} = \vec{I}_{f3} - \vec{I}_{f1} \quad (\text{figura 1.7c})$$

Exemplo:

Temos um sistema equilibrado de tensão nominal 220 V. A corrente de linha medida é 10 A. Ligando a este sistema uma carga trifásica composta de três cargas iguais ligadas em triângulo, qual a tensão e a corrente em cada uma das cargas?

Temos $U_f = U_1 = 220$ V em cada uma das cargas.

Se $I = 1,732 \cdot I_f$, temos que $I_f = 0,577 \cdot I = 0,577 \cdot 10 = 5,77$ A em cada uma das cargas.

1.4.2 Ligação Estrela

Ligando um dos fios de cada sistema monofásico a um ponto comum aos três, os três fios restantes formam um sistema trifásico em estrela (figura 1.8a). Às vezes, o sistema trifásico em estrela é “a quatro fios” ou “com neutro”. O quarto fio é ligado ao ponto comum às três fases.

A tensão de linha ou tensão nominal do sistema trifásico e a corrente de linha, são definidas do mesmo modo que na ligação triângulo.

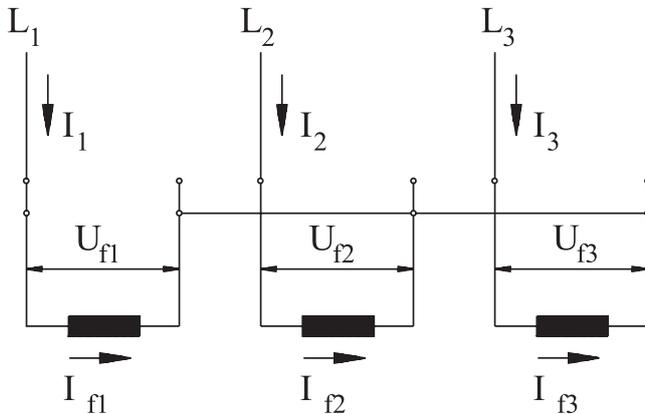


Figura 1.8a - Ligações

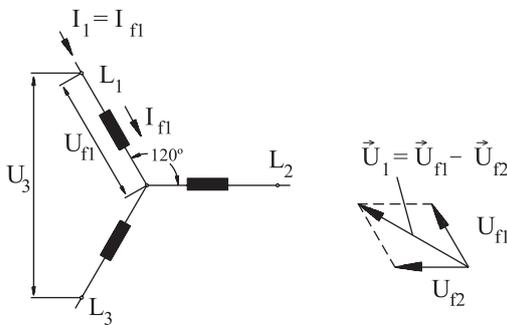


Figura 1.8b - Diagrama elétrico

Figura 1.8c - Diagrama fasorial

Examinando o esquema da figura 1.8b, vê-se que:

$$I = I_f$$

$$U = \sqrt{3} \cdot U_f = 1,732 \cdot U_f$$

$$\vec{U} = \vec{U}_{f1} - \vec{U}_{f2} \text{ (figura 1.8c)}$$

Exemplo:

Temos uma carga trifásica composta de três cargas iguais; cada carga é feita para ser ligada a uma tensão de 220 V, absorvendo 5,77 A. Qual a tensão nominal do sistema trifásico que alimenta estas cargas ligadas em estrela em suas condições nominais (220 V e 5,77 A)? Qual a corrente de linha?

$$\text{Temos } U_f = 220 \text{ V (tensão nominal de cada carga)}$$

$$U = 1,732 \cdot 220 = 380 \text{ V}$$

$$I = I_f = 5,77 \text{ A}$$

1.5 Motor de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico (figura 1.9) é composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor.

Estator

- Carcaça (1) - é a estrutura suporte do conjunto de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e normalmente com aletas.
- Núcleo de chapas (2) - as chapas são de aço magnético.
- Enrolamento trifásico (8) - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico equilibrado ligado à rede trifásica de alimentação.

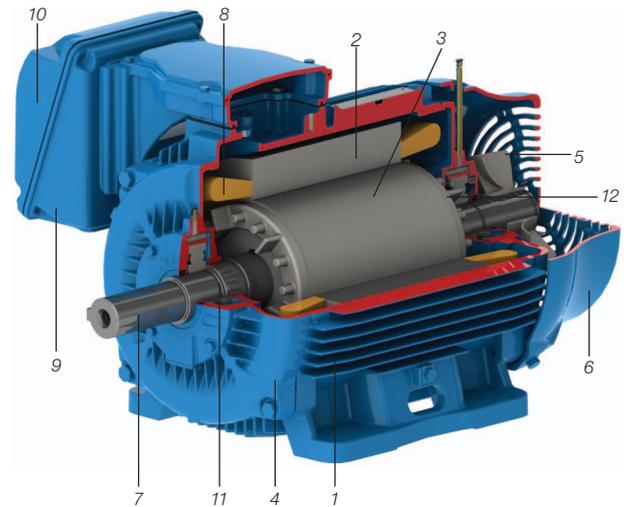


Figura 1.9

Rotor

- Eixo (7) - transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.
- Núcleo de chapas (3) - as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator.
- Barras e anéis de curto-circuito (12) - são de alumínio injetado sob pressão numa única peça.

Outras partes do motor de indução trifásico:

- Tampa (4)
- Ventilador (5)
- Tampa defletora (6)
- Caixa de ligação (9)
- Terminais (10)
- Rolamentos (11)

Daremos, neste guia, ênfase ao “motor de gaiola”, cujo rotor é constituído de um conjunto de barras não isoladas e interligadas por anéis de curto-circuito. O que caracteriza o motor de indução é que só o estator é ligado à rede de alimentação. O rotor não é alimentado externamente e as correntes que circulam nele, são induzidas eletromagneticamente pelo estator, de onde provém o seu nome: motor de indução.

1.5.1 Princípio de Funcionamento - Campo Girante

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético orientado conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente.

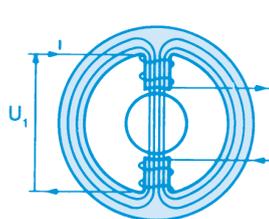


Figura 1.10a

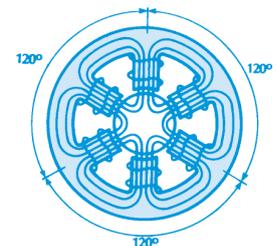


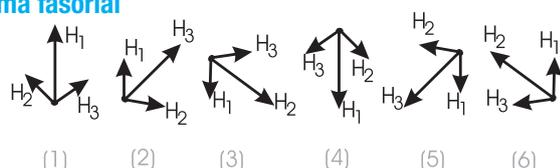
Figura 1.10b

a) Na figura 1.10a é indicado um “enrolamento monofásico” atravessado por uma corrente I e o campo H criado por ela. Enrolamento é constituído de um par de polos (um polo “norte” e um polo “sul”), cujos efeitos se somam para estabelecer o campo H. O fluxo magnético atravessa o rotor entre os dois polos e se fecha através do núcleo do estator. Se a corrente I é alternada, o campo H também é, e o seu valor a cada instante será representando pelo mesmo gráfico da figura 1.4b, inclusive invertendo o sentido em cada meio ciclo. O campo H é “pulsante”, pois sua intensidade “varia” proporcionalmente à corrente, sempre na “mesma” direção norte-sul.

b) Na figura 1.10b é indicado um “enrolamento trifásico”, que é composto por três monofásicos espaçados entre si de 120°. Se este enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes I₁, I₂ e I₃ criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos H₁, H₂ e H₃. Estes campos são deslocados 120° entre si. Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, serão defasados no tempo, também de 120° entre si e podem ser representados por um gráfico igual ao da figura 1.6. O campo total H resultante, a cada instante, será igual à soma gráfica dos três campos H₁, H₂ e H₃ naquele instante.

Na figura 1.11, representamos esta soma gráfica para seis instantes sucessivos.

Diagrama fasorial



Fasor/Vetor

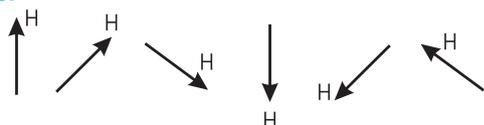


Figura 1.11

No instante (1), a figura 1.11, mostra que o campo H₁ é máximo e os campos H₂ e H₃ são negativos e de mesmo valor, iguais a 0,5. O campo resultante (soma gráfica) é mostrado na parte inferior da figura 1.11 (1), tendo a mesma direção do enrolamento da fase 1.

Repetindo a construção para os pontos 2, 3, 4, 5 e 6 da figura 1.6, observa-se que o campo resultante H tem intensidade “constante”, porém sua direção vai “girando”, completando uma volta no fim de um ciclo.

Assim, quando um enrolamento trifásico é alimentado por correntes trifásicas, cria-se um “campo girante”, como se houvesse um único par de polos girantes, de intensidade constante. Este campo girante, criado pelo enrolamento trifásico do estator, induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo magnético cortam as barras do rotor), que por estar curto-circuitadas geram correntes, e, conseqüentemente, um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo girante do estator. Como campos opostos se atraem e como

o campo do estator é rotativo, o rotor tende a acompanhar a rotação deste campo. Desenvolve-se então, no rotor, um conjugado motor que faz com que ele gire, acionando a carga.

1.5.2 Velocidade Síncrona (n_s)

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de polos (2p) do motor e da frequência (f) da rede, em Hertz. Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente (um “norte” e um “sul”) ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um par de polos (p) a cada ciclo. Assim, como o enrolamento tem polos ou “p” pares de polos, a velocidade do campo é:

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

Exemplos:

a) Qual a rotação síncrona de um 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 o número de polos do motor terá que ser sempre par, para formar os pares de polos. Para as frequências e “polaridades” usuais, as velocidades síncronas são:

Nº de polos	Rotação síncrona por minuto	
	60 Hertz	50 Hertz
II	3.600	3.000
IV	1.800	1.500
VI	1.200	1.000
VIII	900	750
X	720	600

Tabela 1.3 - Velocidades síncronas

Para motores de “dois polos”, como no item 1.5.1, o campo percorre uma volta a cada ciclo. Assim, os graus elétricos equivalem aos graus mecânicos. Para motores com mais de dois polos, de acordo com o número de polos, um giro “geométrico” menor é percorrido pelo campo.

Exemplo:

Para um motor de VI polos teremos, em um ciclo completo, um giro do campo de 360° x 2/6 = 120° mecânicos. Isto equivale, logicamente, a 1/3 da velocidade em II polos. Conclui-se, assim, que:

$$\text{Graus elétricos} = \text{Graus mecânicos} \times p$$

1.5.3 Escorregamento (s)

Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona, ou seja, diferente da velocidade do campo girante, o enrolamento do rotor “corta” as linhas de força magnética do campo e, pelas leis do eletromagnetismo, circularão nele correntes induzidas. Quanto maior a carga, maior terá que ser o conjugado necessário para acioná-la.

Para obter um maior conjugado, terá que ser maior a diferença de velocidade, para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Portanto, à medida que a carga aumenta, a rotação do motor diminui. Quando a carga é zero, motor em vazio, o rotor girará praticamente com a rotação síncrona.

A diferença entre a velocidade do motor (n) e a velocidade síncrona (n_s) chama-se escorregamento (s), que pode ser expresso em rotações por minuto (rpm), como fração da velocidade síncrona, ou como ainda, porcentagem desta:

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

Portanto, para um dado escorregamento s (%), a velocidade do motor será:

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

Exemplo:

Qual é o escorregamento de um motor de VI polos, 50 Hz, se sua velocidade é de 960 rpm?

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

$$s \text{ (%) } = 4\%$$

1.5.4 Velocidade Nominal

É a velocidade (rpm) do motor funcionando à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. Conforme foi visto no item 1.5.3, depende do escorregamento e da velocidade síncrona.

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

1.6 Materiais e Sistemas de Isolação

Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil da isolação do enrolamento. Esta é afetada por muitos fatores, como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é, sem dúvida, a temperatura suportada pelos materiais isolantes empregados.

Um aumento de 8 a 10 graus acima do limite da classe térmica da temperatura da isolação, pode reduzir a vida útil do enrolamento pela metade. Para um maior tempo de vida do motor elétrico recomendamos a utilização de sensores térmicos para proteção do enrolamento.

Quando falamos em diminuição da vida útil do motor, não nos referimos às temperaturas elevadas, quando o isolante se queima e o enrolamento é destruído repentinamente. Vida útil da isolação (em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queima), refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão aplicada e produza o curto-circuito.

A experiência mostra que a isolação tem uma duração praticamente ilimitada, se a sua temperatura for mantida abaixo do limite de sua classe térmica. Acima deste valor, a vida útil da isolação torna-se cada vez mais curta, à medida que a temperatura de trabalho é mais alta.

Este limite de temperatura é muito mais baixo que a temperatura de “queima” do isolante e depende do tipo de material empregado. Esta limitação de temperatura refere-se ao ponto mais quente da isolação e não necessariamente ao enrolamento todo.

Com o uso cada vez mais intenso de inversores de frequência para variação de velocidade dos motores de indução, outros critérios da aplicação também devem ser observados para a preservação da vida do sistema de isolação do motor.

Mais detalhes podem ser vistos no item “Influência do inversor na isolação do motor”.

1.6.1 Material Isolante

O material isolante impede, limita e direciona o fluxo das correntes elétricas. Apesar da principal função do material isolante ser de impedir o fluxo de corrente de um condutor para terra ou para um potencial mais baixo, ele serve também para dar suporte mecânico, proteger o condutor de degradação provocada pelo meio ambiente e transferir calor para o ambiente externo.

Gases, líquidos e sólidos são usados para isolar equipamentos elétricos, conforme as necessidades do sistema. Os sistemas de isolação influenciam na boa qualidade do equipamento, o tipo e a qualidade da isolação, afetam o custo, o peso, o desempenho e a vida útil do mesmo.

1.6.2 Sistema Isolante

Uma combinação de dois ou mais materiais isolantes usados num equipamento elétrico denomina-se sistema isolante. Essa combinação num motor elétrico consiste do esmalte de isolação do fio, isolação de fundo de ranhura, isolação de fechamento de ranhura, isolação entre fases, verniz e/ou resina de impregnação, isolação do cabo de ligação e isolação de solda. Qualquer material ou componente que não esteja em contato com a bobina, não faz parte do sistema de isolação.

1.6.3 Classes Térmicas

Como a temperatura em produtos eletromecânicos é frequentemente o fator predominante para o envelhecimento do material isolante e do sistema de isolação, certas classificações térmicas básicas são úteis e reconhecidas mundialmente.

Os materiais e sistemas isolantes são classificados conforme a resistência à temperatura por longo período de tempo. As normas citadas a seguir referem-se à classificação de materiais e sistemas isolantes:

Materiais	Sistemas	Materiais e Sistemas
UL 746B	UL 1446	IEC 60085
IEC 60216	UL 1561 / 1562	
	IEC 60505	
	IEEE 117	

Tabela 1.4 - Normas de materiais e sistemas isolantes

As classes térmicas definidas para os materiais e sistemas isolantes são as seguintes:

Temperatura (°C)	Classes 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)
acima de 240°C	-	Acima de 240 (C)
250	250	

Tabela 1.5 - Classes térmicas

IEC - International Electrotechnical Commission - organização internacional não governamental de normas da área elétrica, eletrônica e de tecnologias relacionadas.

UL - Underwriters Laboratories - Entidade norte americana de certificação de produtos.

Especifica-se que em um equipamento eletromecânico, a classe térmica representa a temperatura máxima que o equipamento pode alcançar no seu ponto mais quente, ao estar operando em carga nominal, sem diminuição da vida útil. A classificação térmica de um material ou sistema é baseada na comparação com sistemas ou material de referência conhecidos. No entanto, nos casos em que não se conhece nenhum material de referência, a classe térmica pode ser obtida extrapolando a curva de durabilidade térmica (Gráfico de Arrhenius) para um dado tempo (IEC 216 especifica 20.000 horas).

1.6.4 Materiais Isolantes em Sistemas de Isolação

A especificação de um produto numa determinada classe térmica não significa e não implica que cada material isolante usado na sua construção tenha a mesma capacidade térmica (classe térmica). O limite de temperatura para um sistema de isolação não pode ser diretamente relacionado à capacidade térmica dos materiais individuais utilizados nesse sistema. Em um sistema, a performance térmica de um material pode ser melhorada através de características protetivas de certos materiais usados com esse material. Por exemplo, um material de classe 155 °C pode ter o seu desempenho melhorado quando o conjunto é impregnado com verniz de classe 180 °C.

1.6.5 Sistemas de Isolação WEG

Para atender as várias exigências do mercado e aplicações específicas, aliadas a um excelente desempenho técnico, nove sistemas de isolação são utilizados nos diversos motores WEG.

O fio circular esmaltado é um dos componentes mais importantes do motor, pois é a corrente elétrica circulando por ele que cria o campo magnético necessário para o funcionamento do motor. Durante a fabricação do motor, os fios são submetidos a esforços mecânicos de tração, flexão e abrasão. Em funcionamento, os efeitos térmicos e elétricos agem também sobre o material isolante do fio. Por essa razão, ele deve ter uma boa isolação mecânica, térmica e elétrica.

O esmalte utilizado atualmente nos fios garante essas propriedades, sendo a propriedade mecânica assegurada pela camada externa do esmalte que resiste a forças de abrasão durante a inserção do mesmo nas ranhuras do estator. A camada de esmalte interna garante alta rigidez dielétrica ao conjunto, atribuído classe 200 °C ao fio (UL File E234451). Esse fio é utilizado em todos os motores classe B, F e H. Nos motores para extração de fumaça (Smoke Extraction Motor) o fio é especial para altíssimas temperaturas.

Os filmes e laminados isolantes têm função de isolar térmica e eletricamente partes da bobina do motor. A classe térmica é identificada na placa de identificação. Esses são à base de aramida e poliéster e possuem filmes e laminados são usados nos seguintes pontos:

- entre a bobina e a ranhura (filme de fundo de ranhura): para isolar o pacote de chapas de aço (terra) da bobina de fios esmaltados;
- entre as fases: para isolar eletricamente a fase uma da outra;
- fechamento da ranhura do estator para isolar eletricamente a bobina localizada na parte superior da ranhura do estator e para atuar mecanicamente de modo a manter os fios dentro da ranhura.

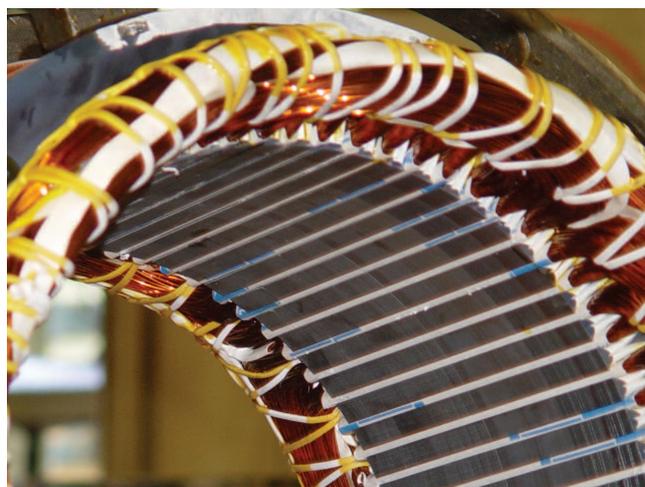


Figura 1.12a – Fios e Filmes aplicados no estator

Os vernizes e resinas de impregnação têm como principais funções manter unidos entre si todos os fios esmaltados da bobina com todos os componentes do estator e o preenchimento dos espaços vazios dentro da ranhura. A união dos fios impede que os mesmos vibrem e atritem entre si. Esse atrito poderia provocar falhas no esmalte do fio levando-o a um curto circuito. A eliminação dos espaços vazios ajuda na dissipação térmica do calor gerado pelo condutor e, especialmente em aplicações de motores alimentados por inversores de frequência, evita/diminui a formação de descargas parciais (efeito corona) no interior do motor.

Utiliza-se atualmente dois tipos de vernizes e dois tipos de resinas de impregnação, todos à base de poliéster, para atender às necessidades construtivas e de aplicação dos motores. A resina de silicone é utilizada apenas para motores especiais projetados para altíssimas temperaturas.

Os vernizes e resinas melhoram as características térmica e elétrica dos materiais impregnados podendo-se atribuir aos mesmos uma classe térmica maior aos materiais impregnados, quando comparados a esses mesmos materiais sem impregnação.

Os vernizes são aplicados pelo processo de imersão e posterior cura em estufa. Já as resinas (isentas de solventes) são aplicadas pelo processo de Fluxo Contínuo.

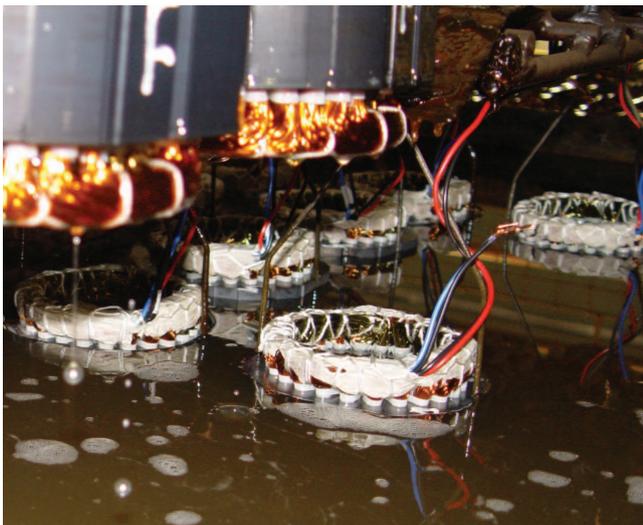


Figura 1.12.b – Imersão por Imersão



Figura 1.12.c – Fluxo contínuo de resina

Os cabos de ligação são construídos com materiais isolantes elastoméricos e de mesma classe térmica do motor. Esses materiais tem única e exclusivamente a função de isolar eletricamente o condutor do meio externo.

Eles tem alta resistência elétrica aliada à adequada flexibilidade para permitir o fácil manuseio durante o processo de fabricação, instalação e manutenção do motor.

Para certas aplicações como bombas submersas, o cabo também deve ser quimicamente resistente ao óleo da bomba. Os tubos flexíveis têm a função de cobrir e isolar eletricamente as soldas das conexões entre os fios da bobina e o cabo de ligação e também entre fios. Eles são flexíveis para permitir que se moldem aos pontos de solda e à amarração da cabeça da bobina. Utilizam-se três tipos de tubos:

- Tubo de poliéster termoencolhível - Classe 130 °C
- Tubo com trama de poliéster recoberto com resina acrílica - Classe 155 °C
- Tubo com trama de fibra de vidro recoberto com borracha de silicone - Classe 180 °C



2. Características da Rede de Alimentação

2.1 O Sistema

No Brasil, o sistema de alimentação pode ser monofásico ou trifásico. O sistema monofásico é utilizado em serviços domésticos, comerciais e rurais, enquanto o sistema trifásico, em aplicações industriais, ambos com frequência de rede em 60 Hz.

2.1.1 Trifásico

As tensões trifásicas mais usadas nas redes industriais são:

- Baixa tensão: 220 V, 380 V e 440 V
- Alta tensão: 2.300 V, 4.160 V e 6.600 V

O sistema trifásico estrela de baixa tensão, consiste de três condutores de fase (L_1 , L_2 , L_3) e o condutor neutro (N), sendo este, conectado ao ponto estrela do gerador ou ao enrolamento secundário dos transformadores (conforme mostra figura 2.1).

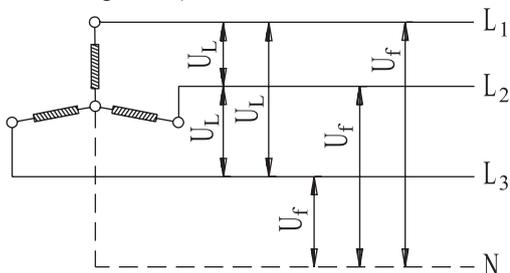


Figura 2.1 - Sistema trifásico

2.1.2 Monofásico

As tensões monofásicas padronizadas no Brasil são as de 127 V e 220 V.

Os motores monofásicos são ligados a duas fases (tensão de linha U_L ou à uma fase e o neutro (tensão de fase U_f). Assim, a tensão nominal do motor monofásico deverá ser igual à tensão U_L ou U_f do sistema. Quando vários motores monofásicos são conectados ao sistema trifásico (formado por três sistemas monofásicos), deve-se tomar o cuidado para distribuí-los de maneira uniforme, evitando-se assim, desequilíbrio de carga entre as fases.

Monofásico com retorno por terra - MRT

O sistema monofásico com retorno por terra - MRT -, é um sistema elétrico em que a terra funciona como condutor de retorno da corrente de carga. Afigura-se, como solução para o emprego no sistema monofásico, a partir de alimentadores que não têm o condutor neutro. Dependendo da natureza do sistema elétrico existente e das características do solo onde será implantado (geralmente na eletrificação rural), tem-se:

a) Sistema monofilar

É a versão mais prática e econômica do MRT, porém, sua utilização só é possível onde a saída da subestação de origem é estrela aterrada.

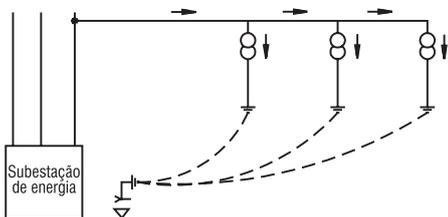


Figura 2.2 - Sistema monofilar

b) Sistema monofilar com transformador de isolamento

Este sistema possui algumas desvantagens, além do custo do transformador, tais como:

- Limitação da potência do ramal à potência nominal do transformador de isolamento;
- Necessidade de reforçar o aterramento do transformador de isolamento, pois na sua falta, cessa o fornecimento de energia para todo o ramal.

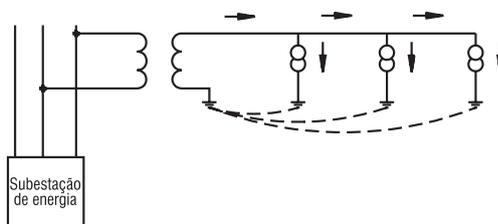


Figura 2.3 - Sistema monofilar com transformador de isolamento

c) Sistema MRT na versão neutro parcial

É empregado como solução para a utilização do MRT em regiões de solos de alta resistividade, quando se torna difícil obter valores de resistência de terra dos transformadores dentro dos limites máximos estabelecidos no projeto.

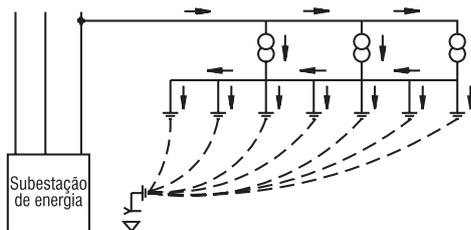


Figura 2.4 - Sistema MRT na versão neutro parcial

3. Características de Alimentação do Motor Elétrico

3.1 Tensão Nominal

É a tensão para a qual o motor foi projetado.

3.1.1 Tensão nominal múltipla

A grande maioria dos motores é fornecida com diferentes tipos de ligação, de modo a poderem funcionar em redes de pelo menos duas tensões diferentes. Os principais tipos de ligação de motores para funcionamento em mais de uma tensão são:

a) Ligação série-paralela

O enrolamento de cada fase é dividido em duas partes (lembrar que o número de polos é sempre par, de modo que este tipo de ligação é sempre possível):

- Ligando as duas metades em série, cada metade ficará com a metade da tensão de fase nominal do motor;
- Ligando as duas metades em paralelo, o motor poderá ser alimentado com uma tensão igual à metade da tensão da condição anterior, sem que se altere a tensão aplicada a cada bobina. Veja os exemplos das figuras 3.1a e b.

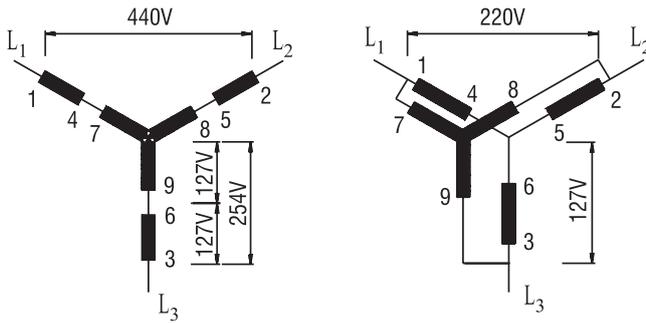


Figura 3.1a - Ligação série-paralelo Y

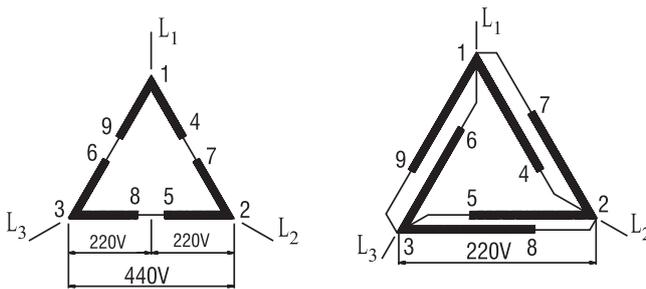


Figura 3.1b - Ligação série-paralelo Δ

Este tipo de ligação exige nove terminais no motor e a tensão nominal (dupla) mais comum, é 220/440 V, ou seja, o motor é religado na ligação paralela quando alimentado com 220 V e na ligação série quando alimentado em 440 V. As figuras 3.1a e 3.1b mostram a numeração normal dos terminais e os esquemas de ligação para estes tipos de motores, tanto para motores ligados em estrela como em triângulo. Os mesmos esquemas servem para outras duas tensões quaisquer, desde que uma seja o dobro da outra, por exemplo, 230/460 V

b) Ligação estrela-triângulo

O enrolamento de cada fase tem as duas pontas trazidas para fora do motor. Se ligarmos as três fases em triângulo, cada fase receberá a tensão da linha, por exemplo, 220 V (figura 3.2). Se ligarmos as três fases em estrela, o motor pode ser ligado a uma tensão igual a $220 \times \sqrt{3} = 380$ V. Com isso não há alteração na tensão do enrolamento, que continua igual a 220 Volts por fase:

$$U_f = U \sqrt{3}$$

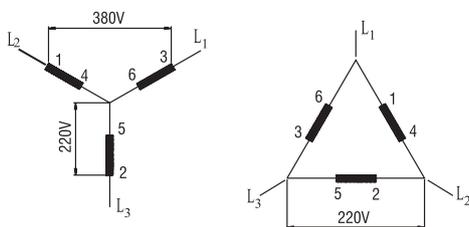


Figura 3.2 - Ligação estrela-triângulo Y - Δ

Este tipo de ligação exige seis terminais no motor e serve para quaisquer tensões nominais duplas, desde que a segunda seja igual à primeira multiplicada por $\sqrt{3}$.

Exemplos: 220/380 V - 380/660 V - 440/760 V
No exemplo 440/760 V, a tensão maior declarada serve para

indica que o motor pode ser acionado por chave estrela-triângulo.

c) Tripla tensão nominal

Podemos combinar os dois casos anteriores: o enrolamento de cada fase é dividido em duas metades para ligação série-paralelo. Além disso, todos os terminais são acessíveis para podermos ligar as três fases em estrela ou triângulo. Deste modo, temos quatro combinações possíveis de tensão nominal:

- 1) Ligação triângulo paralelo;
- 2) Ligação estrela paralela, sendo igual a tensão nominal igual a $\sqrt{3}$ vezes a primeira;
- 3) Ligação triângulo série, ou seja, a tensão nominal igual ao dobro da primeira opção;
- 4) Ligação estrela série, tensão nominal igual a $\sqrt{3}$ vezes a terceira opção. Mas, como esta tensão seria maior que 690 V, é indicada apenas como referência de ligação estrela-triângulo.

Exemplo: 220/380/440(760) V
Obs: 760 V (Somente para partida)

Este tipo de ligação exige 12 terminais e a figura 2.7 mostra a numeração normal dos terminais e o esquema de ligação para as três tensões nominais.

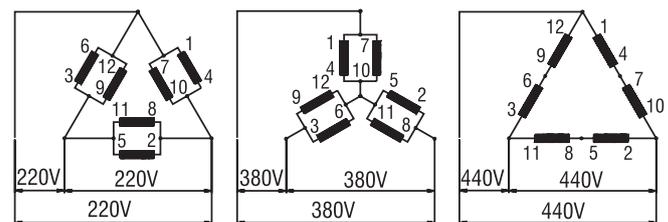


Figura 3.3

3.2 Frequência Nominal (Hz)

É a frequência da rede para a qual o motor foi projetado.

3.2.1 Ligação em Frequências Diferentes

Motores trifásicos com enrolamentos para 50 Hz poderão ser ligados também em rede de 60 Hz.

a) Ligando o motor de 50 Hz, com a mesma tensão, em 60 Hz:

- a potência do motor será a mesma;
- a corrente nominal é a mesma;
- a corrente de partida diminui em 17%;
- C_p/C_n diminui em 17%;
- C_m/C_n diminui em 17%;
- a velocidade nominal aumenta em 20%.

Nota: deverão ser observados os valores de potência requeridos, para motores que acionam equipamentos que possuem conjugados variáveis com a rotação.

b) Se alterar a tensão em proporção à frequência:

- aumenta a potência do motor 20%;
- a corrente nominal é a mesma;
- a corrente de partida será aproximadamente a mesma;
- o conjugado de partida será aproximadamente o mesmo;
- o conjugado máximo será aproximadamente o mesmo;
- a rotação nominal aumenta 20%.

3.3 Tolerância de Variação de Tensão e Frequência

Conforme as normas ABNT NBR 17094 (2008) e IEC 60034-1, para os motores de indução, as combinações das variações de tensão e de frequência são classificadas como Zona A ou Zona B (figura 3.4).

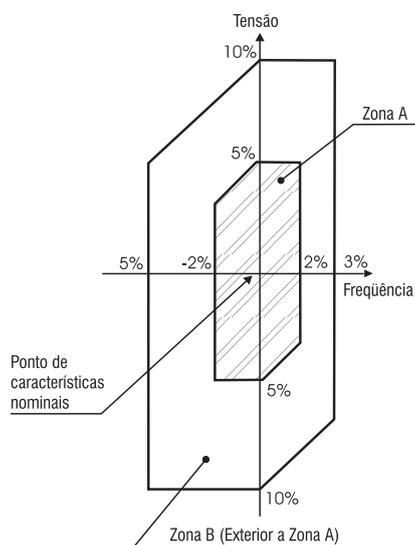


Figura 3.4 - Limites das variações de tensão e de frequência em funcionamento

Um motor deve ser capaz de desempenhar sua função principal continuamente na Zona A, mas pode não atender completamente às suas características de desempenho à tensão e frequência nominais (ver ponto de características nominais na figura 3.4), apresentando alguns desvios. As elevações de temperatura podem ser superiores àquelas à tensão e frequência nominais.

Um motor deve ser capaz de desempenhar sua função principal na Zona B, mas pode apresentar desvios superiores àquelas da Zona A no que se refere às características de desempenho à tensão e frequência nominais. As elevações de temperatura podem ser superiores às verificadas com tensão e frequência nominais e muito provavelmente superiores àquelas da Zona A. O funcionamento prolongado na periferia da Zona B não é recomendado.

Fonte: ABNT NBR 17094 (2008)

3.4 Limitação da Corrente de Partida em Motores Trifásicos

A partida de um motor trifásico de gaiola, deverá ser direta, por meio de contatores. Deve-se ter em conta que para um determinado motor, as curvas de conjugado e corrente são fixas, independente da carga, para uma tensão constante.

No caso em que a corrente de partida do motor é elevada podem ocorrer as seguintes consequências prejudiciais:

- a) Elevada queda de tensão no sistema de alimentação da rede. Em função disto, provoca a interferência em equipamentos instalados no sistema;
- b) O sistema de proteção (cabos, contatores) deverá ser superdimensionado, ocasionando um custo elevado;
- c) A imposição das concessionárias de energia elétrica que limitam a queda de tensão da rede.

Caso a partida direta não seja possível, devido aos problemas citados acima, pode-se usar sistema de partida indireta para reduzir a corrente de partida:

- chave estrela-triângulo
- chave compensadora
- chave série-paralelo
- partida eletrônica (Soft-Starter)

3.4.1 Partida Direta

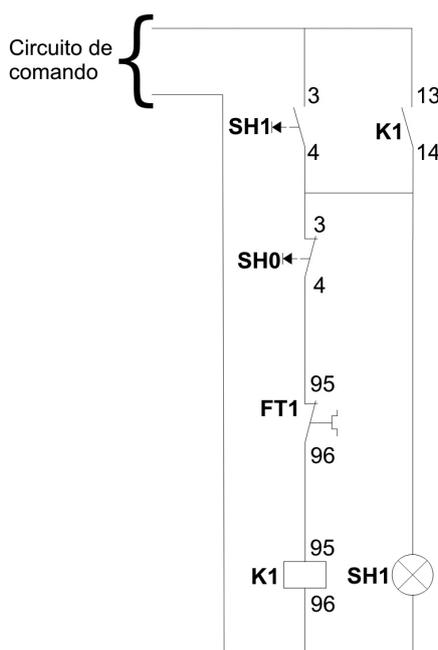


Figura 3.5 - Circuito de comando - partida direta

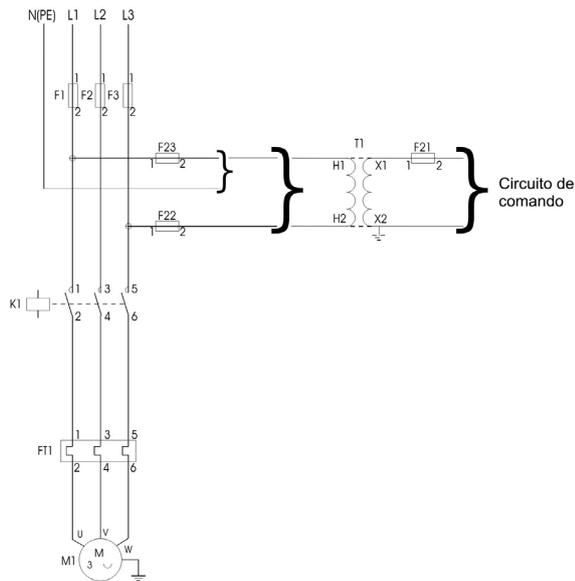


Figura 3.6 - Circuito de força - partida direta

- F1, F2, F3** - Fusíveis de força
- F21, F22, F23** - Fusíveis de comando
- T1** - Transformador de comando
- K1** - Contatores
- FT1** - Relé de sobrecarga
- SH1** - Botão de comando
- KT1** - Relé de tempo
- M1** - Motor

Acessórios opcionais

- Relé falta de fase
- Relé mínima e máxima tensão
- Amperímetro
- Voltímetro
- Ohmímetro

Diagrama Elétrico

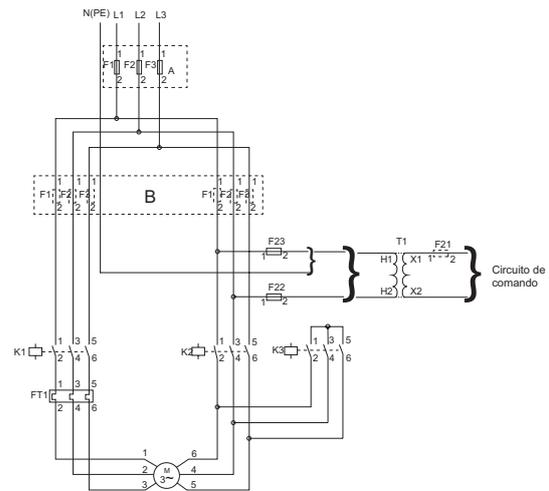


Figura 3.8 - Circuito de força - partida com chave estrela-triângulo

Observação: deve - se utilizar a conexão "A" (proteção por 3 fusíveis) para potências até 75 cv (220 V), 125 cv (380 V) e 175 cv (440 V). Acima dessas potências deve ser utilizada a conexão "B" (proteção por 6 fusíveis), onde o conjunto de fusíveis F1, F2, F3 é igual ao conjunto F4, F5, F6.

- F1, F2, F3** - Fusíveis de força
- (F1, F2, F3 e F4, F5, F6)** - Fusíveis de força
- F21, F22, F23** - Fusíveis de comando
- T1** - Transformador de comando
- K1, K2, K3** - Contatores
- FT1** - Relé de sobrecarga
- SH1** - Botão de comando
- KT1** - Relé de tempo
- M1** - Motor

Acessórios opcionais

- Relé falta de fase
- Relé mínima e máxima tensão
- Amperímetro
- Voltímetro
- Ohmímetro

3.4.2 Partida com Chave Estrela-Triângulo (Y - Δ)

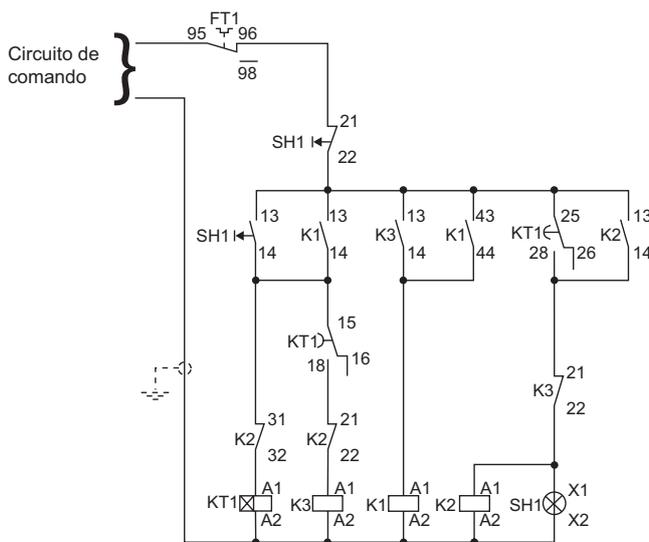


Figura 3.7 - Circuito de comando - partida com chave estrela-triângulo

É fundamental para a partida que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, ou seja, em 220/380 V, em 380/660 V ou 440/760 V. Os motores deverão ter no mínimo seis bornes de ligação. A partida estrela-triângulo poderá ser usada quando a curva de conjugado do motor é suficientemente elevada para poder garantir a aceleração da máquina com a corrente reduzida. Na ligação estrela, a corrente fica reduzida para 25% a 33% da corrente de partida na ligação triângulo.

O conjugado resistente da carga não poderá ultrapassar o conjugado de partida do motor (figura 3.9), nem a corrente no instante da mudança para triângulo poderá ser de valor inaceitável. Existem casos onde este sistema de partida não pode ser usado, conforme demonstra a figura 3.10.

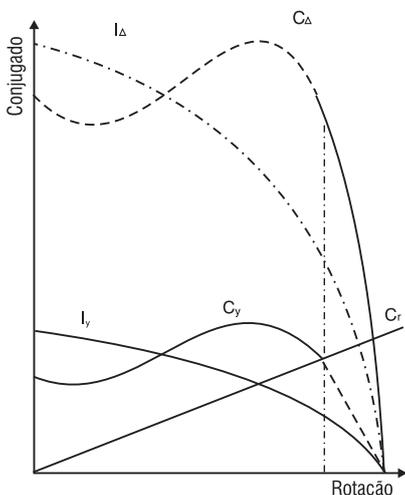


Figura 3.9 - Corrente e conjugado para partida estrela-triângulo de um motor de gaiola acionando uma carga com conjugado resistente C_r .
 I_{Δ} - corrente em triângulo
 I_{γ} - corrente em estrela
 C_{γ} - conjugado em estrela
 C_{Δ} - conjugado em triângulo
 C_r - conjugado resistente

Na figura 3.11 temos um alto conjugado resistente C_r . Se a partida for em estrela, o motor acelera a carga aproximadamente até 85% da rotação nominal. Neste ponto, a chave deverá ser ligada em triângulo. Neste caso, a corrente, que era aproximadamente a nominal, ou seja, 100%, salta repentinamente para 320%, o que não é nenhuma vantagem, uma vez que na partida era de somente 190%.

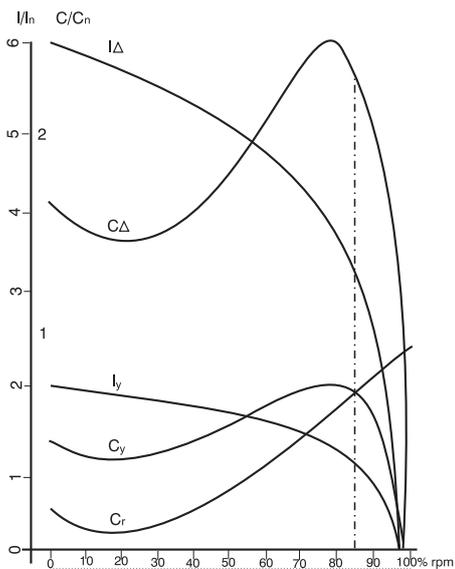


Figura 3.10

Na figura 3.11 temos o motor com as mesmas características, porém, o conjugado resistente C_r é bem menor. Na ligação Y, o motor acelera a carga até 95% da rotação nominal. Quando a chave é ligada em Δ , a

corrente, que era de aproximadamente 50%, sobe para 170%, ou seja, praticamente igual a da partida em Y. Neste

caso, a ligação estrela-triângulo apresenta vantagem, porque se fosse ligado direto, absorveria da rede 600% da corrente nominal. A chave estrela-triângulo em geral só pode ser empregada em partidas da máquina em vazio, isto é, sem carga. Somente depois de ter atingido pelo menos 90% da rotação nominal, a carga poderá ser aplicada. O instante da comutação de estrela para triângulo deve ser criteriosamente determinado, para que este método de partida possa efetivamente ser vantajoso nos casos em que a partida direta não é possível. No caso de motores tripla tensão nominal (220/380/440/760 V), deve-se optar pela ligação 220/380 V ou 440/(760) V, dependendo da rede de alimentação.

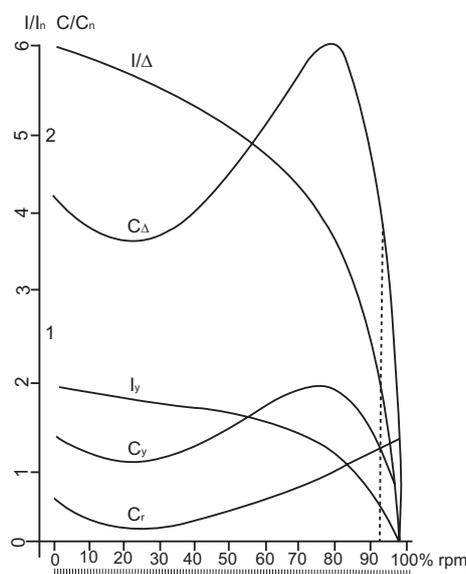
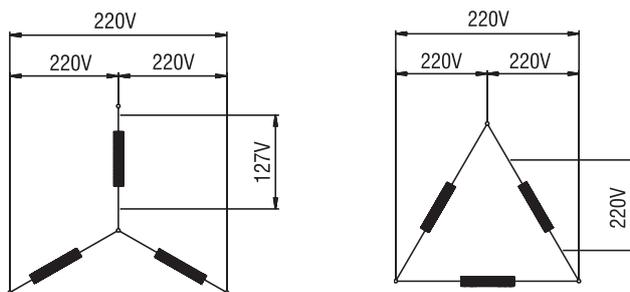


Figura 3.11

- I_{Δ} - corrente em triângulo
- I_{γ} - corrente em estrela
- C_{Δ} - conjugado em triângulo
- C_{γ} - conjugado em estrela
- C/C_n - relação entre o conjugado do motor e o conjugado nominal
- I/I_n - relação entre a corrente do motor e a corrente nominal
- C_r - conjugado resistente

Esquemáticamente, a ligação estrela-triângulo num motor para uma rede de 220 V é feita da maneira indicada na figura 3.12, notando-se que a tensão por fase durante a partida é reduzida para 127 V.



Partida γ

Marcha Δ

Figura 3.12

3.4.3 Partida com Chave Compensadora (Autotransformador)

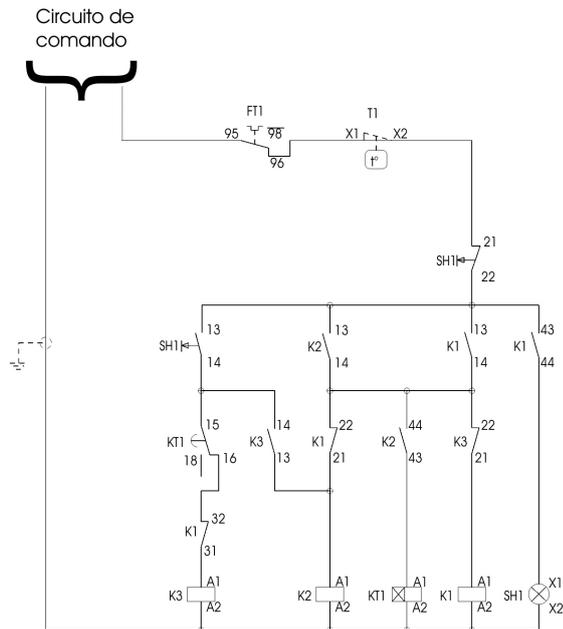


Figura 3.13 - Circuito de comando - partida com chave compensadora

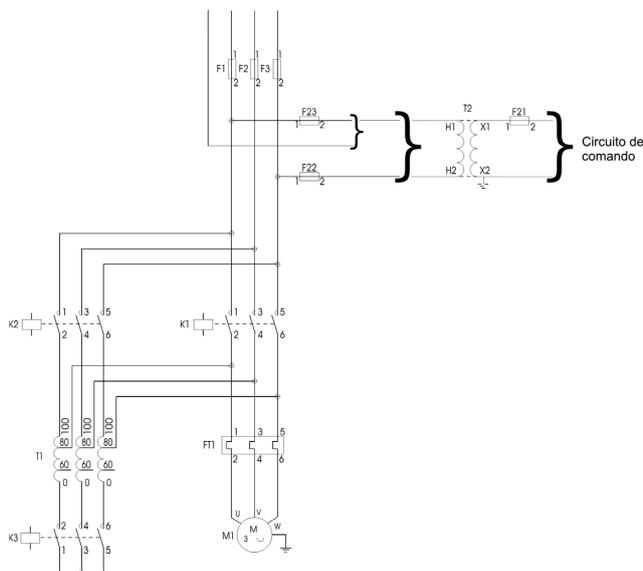


Figura 3.14 - Circuito de força - partida com chave compensadora

- F1, F2, F3** - Fusíveis de força
- (F1, F2, F3 e F4, F5, F6)** - Fusíveis de força
- F21, F22, F23** - Fusíveis de comando
- T1** - Transformador de comando
- K1, K2, K3 e K4** - Contatores
- 1FT1 e 2FT1** - Relé de sobrecarga
- SH1** - Botão de comando
- KT1** - Relé de tempo
- M1** - Motor

Acessórios opcionais

- Relé falta de fase
- Relé mínima e máxima tensão
- Amperímetro
- Voltímetro
- Ohmímetro

A chave compensadora pode ser usada para a partida de motores sob carga. Ela reduz a corrente de partida, evitando uma sobrecarga no circuito, deixando, porém, o motor com um conjugado suficiente para a partida e aceleração. A tensão na chave compensadora é reduzida através de autotransformador que possui normalmente taps de 50, 65 e 80% da tensão nominal.

Para os motores que partem com uma tensão menor que a tensão nominal, a corrente e o conjugado de partida devem ser multiplicados pelos fatores K_1 (fator de multiplicação da corrente) e K_2 (fator de multiplicação do conjugado) obtidos no gráfico da figura 3.15.

Exemplo: Para 85% da tensão nominal

$$\left(\frac{I_p}{I_n}\right) 85\% = K_1 \cdot \left(\frac{I_p}{I_n}\right) 100\% = 0,8 \left(\frac{I_p}{I_n}\right) 100\%$$

$$\left(\frac{C_p}{C_n}\right) 85\% = K_2 \cdot \left(\frac{C_p}{C_n}\right) 100\% = 0,66 \left(\frac{C_p}{C_n}\right) 100\%$$

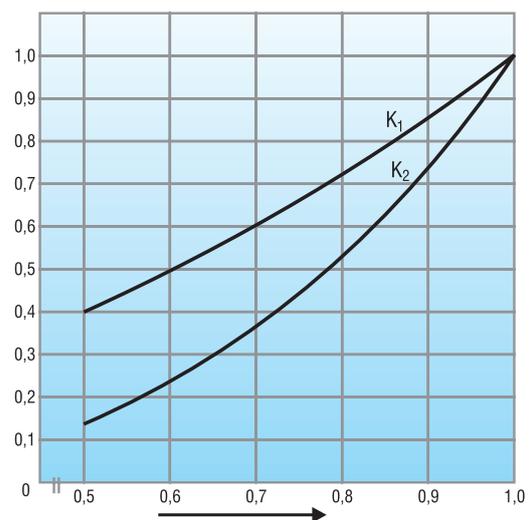


Figura 3.15 - Fatores de redução K_1 e K_2 em função das relações de tensão do motor e da rede U_m/U_n

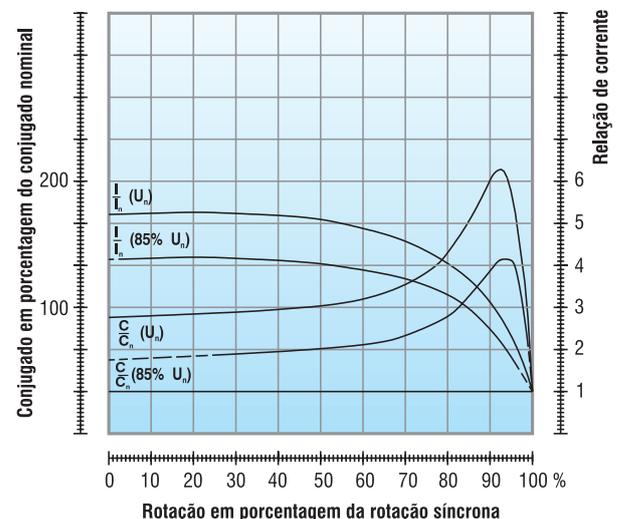


Figura 3.16 - Exemplo das características de desempenho de um motor de 425 cv, VI polos, quando parte com 85% da tensão

3.4.4 Comparação entre Chaves Estrela-Triângulo e Compensadoras “Automáticas”

1) Estrela-triângulo (automática)

Vantagens

- a) A chave estrela-triângulo é muito utilizada por seu custo reduzido.
- b) Não tem limite quanto ao seu número de manobras.
- c) Os componentes ocupam pouco espaço.
- d) A corrente de partida fica reduzida para aproximadamente 1/3.

Desvantagens

- a) A chave só pode ser aplicada a motores cujos seus seis bornes ou terminais sejam acessíveis.
- b) A tensão da rede deve coincidir com a tensão em triângulo do motor.
- c) Com a corrente de partida reduzida para aproximadamente 1/3 da corrente nominal, reduz-se também o momento de partida para 1/3.
- d) Caso o motor não atinja pelo menos 90% de sua velocidade nominal, o pico de corrente na comutação de estrela para triângulo será semelhante a corrente existente em uma partida direta, o que se torna prejudicial aos contatos dos contatores e não traz nenhuma vantagem para a rede elétrica.

2) Chave compensadora (automática)

Vantagens

- a) No tap de 65% a corrente de linha é aproximadamente igual à da chave estrela-triângulo, entretanto, na passagem da tensão reduzida para a tensão da rede, o motor não é desligado e o segundo pico é bem reduzido, visto que o Autotransformador por curto tempo se torna uma reatância.
- b) É possível a variação do tap de 65% para 80% ou até para 90% da tensão da rede, a fim de que o motor possa partir satisfatoriamente.

Desvantagens

- a) A grande desvantagem é a limitação de sua frequência de manobras. Na chave compensadora automática é sempre necessário saber a sua frequência de manobra para determinar o auto-transformador conveniente.
- b) A chave compensadora é bem mais cara do que a chave estrela-triângulo, devido ao auto-transformador.
- c) Devido ao tamanho do auto-transformador, a construção se torna volumosa, necessitando quadros maiores, o que torna o seu preço elevado.

3.4.5 Partida com Chave Série-Paralelo

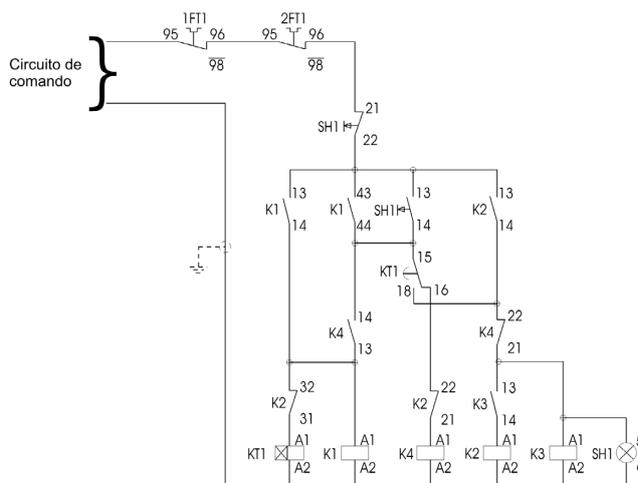


Figura 3.17 - Circuito de comando - partida chave série-paralelo

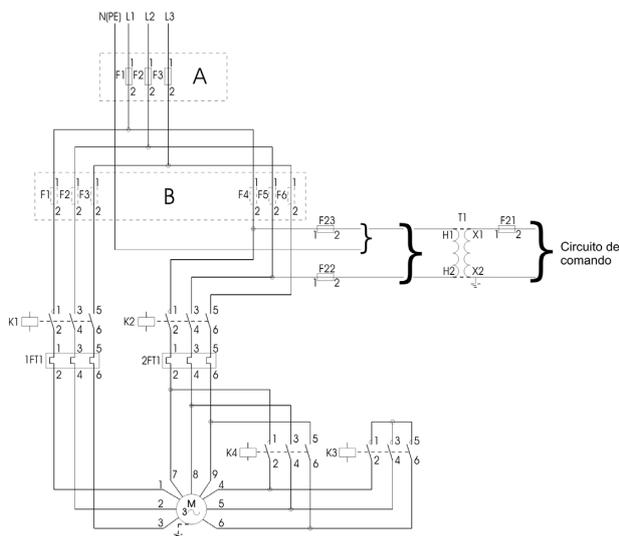


Figura 3.18 - Circuito de força - partida chave série-paralelo

- F1, F2, F3** - Fusíveis de força
- F21, F22, F23** - Fusíveis de comando
- T2** - Transformador de comando
- K1, K2, K3** - Contatores
- FT1** - Relé de sobrecarga
- T1** - Autotransformador
- SH1** - Botão de comando
- KT1** - Relé de tempo
- M1** - Motor

Acessórios opcionais

- Relé falta de fase
- Relé mínima e máxima tensão
- Amperímetro
- Voltímetro
- Ohmímetro

Para partida em série-paralelo é necessário que o motor tenha duas tensões nominais, sendo a menor delas igual a da rede a outra duas vezes maior.

Neste tipo de ligação, a tensão nominal mais comum é 220/440 V, ou seja: durante a partida o motor é ligado na configuração série até atingir sua rotação nominal e, então, faz-se a comutação para a configuração paralelo.

3.4.6 Partida Eletrônica (Soft-Starter)

O avanço da eletrônica permitiu a criação da chave de partida a estado sólido, a qual consiste de um conjunto de pares de tiristores (SCR) (ou combinações de tiristores/diodos), um em cada borne de potência do motor.

O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente para aplicar uma tensão variável aos terminais do motor durante a aceleração. No final do período de partida, ajustável tipicamente entre 2 e 30 segundos, a tensão atinge seu valor pleno após uma aceleração suave ou uma rampa ascendente, ao invés de ser submetido a incrementos ou saltos repentinos. Com isso, consegue-se manter a corrente de partida (na linha) próxima da nominal e com suave variação. Além da vantagem do controle da tensão (corrente) durante a partida, a chave eletrônica apresenta, também, a vantagem de não possuir partes móveis ou que gerem arco, como nas chaves mecânicas. Este é um dos pontos fortes das chaves eletrônicas, pois sua vida útil torna-se mais longa.

Tensões do motor	Tensão de serviço	Partida com chave estrela-triângulo	Partida com chave compensadora	Partida com chave série-paralela	Partida com Soft-Starter
220/380 V	220 V 380 V	SIM NÃO	SIM SIM	NÃO NÃO	SIM SIM
220/440 V	220 V 440 V	NÃO NÃO	SIM SIM	SIM NÃO	SIM SIM
380/660 V	380 V	SIM	SIM	NÃO	SIM
220/380/ 440 V	220 V 380 V 440 V	SIM NÃO SIM	SIM SIM SIM	SIM SIM NÃO	SIM SIM SIM

Tabela 3.1 - Métodos de Partida x Motores

3.5 Sentido de Rotação de Motores de Indução Trifásicos

Um motor de indução trifásico trabalha em qualquer sentido dependendo da conexão com a fonte elétrica. Para inverter o sentido de rotação, inverte-se qualquer par de conexões entre motor e fonte elétrica. Os motores WEG possuem ventilador bidirecional, exceto se informada em folha de dados ou placas adicionais o sentido de giro, proporcionando sua operação em qualquer sentido de rotação, sem prejudicar a refrigeração do motor. Motores sem ventilador, mas ventilados pela própria carga (ventilador como carga), devem atender a ventilação necessária ao motor, independente do sentido de rotação. Em caso de dúvidas, consulte a WEG.

4. Características de Aceleração

4.1 Conjugados

4.1.1 Curva Conjugado X Velocidade

Definição

O motor de indução tem conjugado igual a zero na velocidade síncrona. À medida que a carga aumenta, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor.

Representando num gráfico a variação do conjugado com a velocidade para um motor normal, vamos obter uma curva com aspecto representado na figura 4.1.

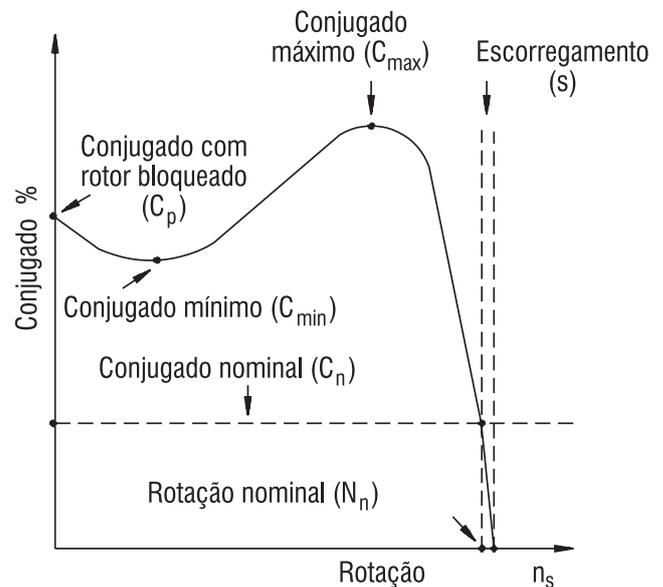


Figura 4.1 - Curva conjugado x rotação

Na figura 4.1 destacamos e definimos alguns pontos importantes. Os valores dos conjugados relativos a estes pontos são especificados pelas normas ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, conforme apresentados a seguir:

C_o : Conjugado básico - é o conjugado calculado em função da potência e velocidade síncrona.

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

$$C_o \text{ (Nm)} = \frac{7024 \cdot P \text{ (cv)}}{n_s \text{ (rpm)}} = \frac{9555 \cdot P \text{ (kW)}}{n_s \text{ (rpm)}}$$

C_n : Conjugado nominal ou de plena carga - é o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais.

C_p : Conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de partida ou conjugado de arranque - é o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor bloqueado, para todas as posições angulares do rotor, sob tensão e frequência nominais.

Este conjugado pode ser expresso em Nm ou, mais comumente, em porcentagem do conjugado nominal.

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

Na prática, o conjugado de rotor bloqueado deve ser o mais alto possível, para que o rotor possa vencer a inércia inicial da carga e possa acelerá-la rapidamente, principalmente quando a partida é com tensão reduzida.

C_{min} : Conjugado mínimo - é o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo. Na prática, este valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração, para que a partida não seja muito demorada, sobreaquecendo o motor, especialmente nos casos de alta inércia ou partida com tensão reduzida.

$C_{máx}$: Conjugado máximo - é o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominal, sem queda brusca de velocidade. Na prática, o conjugado máximo deve ser o mais alto possível, por duas razões principais:

- 1) O motor deve ser capaz de vencer, sem grandes dificuldades, eventuais picos de carga como pode acontecer em certas aplicações, como em britadores, calandras, misturadores e outras.
- 2) O motor não deve arriar, isto é, perder bruscamente a velocidade, quando ocorrem quedas de tensão, momentaneamente, excessivas.

4.1.2 Categorias - Valores Mínimos Normalizados de Conjugado

Conforme as suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas em norma (ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1), e são as seguintes:

Categoria N

Conjugado de partida normal, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores.

Categoria H

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregadores, cargas de alta inércia, britadores, etc.

Categoria D

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; alto escorregamento (+ de 5%). Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos e corrente de partida limitada. As curvas conjugado X velocidade das diferentes categorias podem ser vistas na figura 4.2.

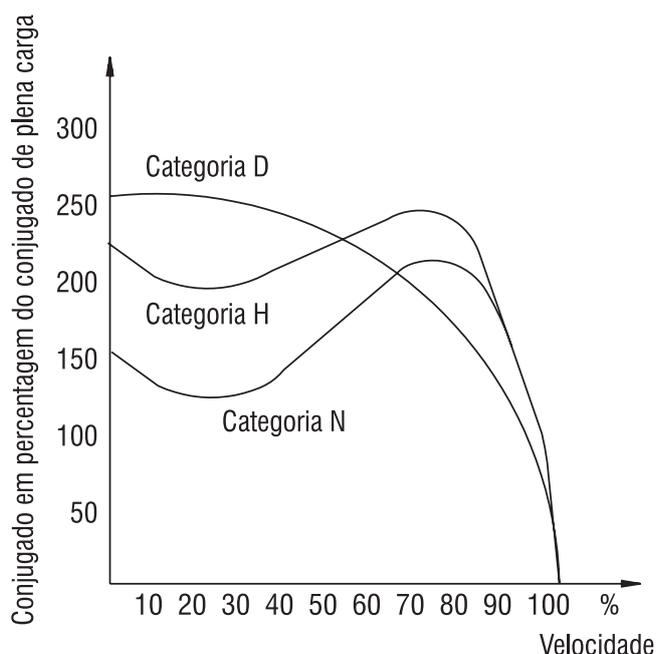


Figura 4.2 - Curvas Conjugado X Velocidade, das diferentes categorias

Categoria NY

Esta categoria inclui os motores semelhantes aos de categoria N, porém, previstos para partida estrela-triângulo. Para estes motores na ligação estrela, os valores mínimos do conjugado com rotor bloqueado e do conjugado mínimo de partida são iguais a 25% dos valores indicados para os motores categoria N.

Categoria HY

Esta categoria inclui os motores semelhantes aos de categoria H, porém, previstos para partida estrela-triângulo. Para estes motores na ligação estrela, os valores mínimos do conjugado com rotor bloqueado e do conjugado mínimo de partida são iguais a 25% dos valores indicados para os motores de categoria H.

Os valores mínimos de conjugado exigidos para motores das categorias N e H, especificados nas normas ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, são mostrados nas tabelas 4.1 e 4.2.

Para motores da categoria D, de IV, VI e VIII polos e potência nominal igual ou inferior a 150 cv, tem-se, segundo ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, que: a razão do conjugado com rotor bloqueado (C_p) para conjugado nominal (C_n) não deve ser inferior a 2,75. A norma não especifica os valores de C_{min} e $C_{máx}$.

A NBR 17094 não especifica os valores mínimos de conjugados exigidos para motores II polos, categorias H e D.

Número de polos		2			4			6			8		
Faixa de potências nominais		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

Tabela 4.1 - Motores Trifásicos - Conjugado com rotor bloqueado (C_p), conjugado mínimo de partida (C_{min}) e máximo (C_{max}), para motores de categoria N, relativos ao conjugado nominal (C_n).

Número de polos		4			6			8		
Faixa de potências nominais		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 ≤ 0,63	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

Tabela 4.2 - Motores Trifásicos - Conjugado com rotor bloqueado (C_p), conjugado mínimo de partida (C_{min}) e máximo (C_{max}), para motores de categoria H, relativos ao conjugado nominal (C_n).

Notas: a) os valores de C_p/C_n são iguais a 1,5 vezes os valores correspondentes da categoria N, não sendo porém, inferiores a 2,0;
 b) os valores de C_{min}/C_n são iguais a 1,5 vezes os valores correspondentes da categoria N, não sendo porém, inferiores a 1,4;
 c) os valores de C_{max}/C_n são iguais aos valores correspondentes da categoria N, não sendo porém, inferiores a 1,9 ou ao valor correspondente de C_{min}/C_n .



4.1.3 Características dos Motores WEG

Embora os motores WEG sejam, na sua maioria, declarados como pertencendo à categoria N, a exemplo da maioria dos motores encontrados no mercado, os valores reais típicos dos conjugados excedem os exigidos em norma. Na maioria dos casos excedem até mesmo, os mínimos exigidos para a categoria H. Isto significa uma curva conjugado x velocidade bastante alta, trazendo as seguintes vantagens:

- 1) Rápida aceleração em caso de partida pesada, como bombas de pistão, esteiras carregadas, cargas de alta inércia, compressores com válvulas abertas, etc.
- 2) Atendimentos de casos especiais, como os mencionados acima, com motores padrão de estoque, com vantagens de preço, prazo e entrega.
- 3) Permitem o uso de sistemas de partida com tensão reduzida, como chaves estrela-triângulo, em casos normais, sem prejuízo da perfeita aceleração da carga.
- 4) Devido ao elevado valor do conjugado máximo, enfrentam, sem perda brusca de rotação, os picos momentâneos de carga e as quedas de tensão passageiras. Isto é fundamental para o acionamento de máquinas sujeitas a grandes picos de carga, como britadores, calandras, etc.

4.2 Inércia da Carga

O momento de inércia da carga acionada é uma das características fundamentais para verificar, através do tempo de aceleração, se o motor consegue acionar a carga dentro das condições exigidas pelo ambiente ou pela estabilidade térmica do material isolante.

Momento de inércia é uma medida da resistência que um corpo oferece a uma mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo. Depende do eixo em torno do qual ele está girando e, também, da forma do corpo e da maneira como sua massa está distribuída. A unidade do momento de inércia é kgm².

O momento de inércia total do sistema é a soma dos momentos de inércia da carga e do motor ($J_t = J_m + J_{ce}$). No caso de uma máquina que tem "rotação diferente do motor" (por exemplo, nos casos de acionamento por polias ou engrenagens), deverá ser referida à rotação nominal do motor conforme abaixo:

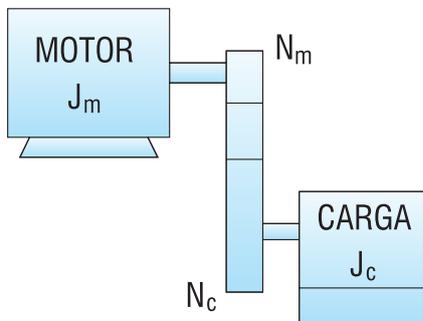


Figura 4.3 - Momento de inércia em rotações diferentes

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

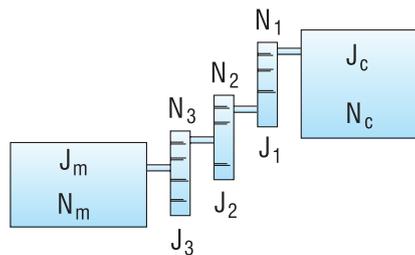


Figura 4.4 - Momento de inércia em velocidades diferentes

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

onde: J_{ce} - Momento de inércia da carga referido ao eixo do motor
 J_c - Momento de inércia da carga
 N_c - Rotação da carga
 N_m - Rotação nominal do motor

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

A inércia total de uma carga é um importante fator para a determinação do tempo de aceleração.

4.3 Tempo de Aceleração

Para verificar se o motor consegue acionar a carga, ou para dimensionar uma instalação, equipamento de partida ou sistema de proteção, é necessário saber o tempo de aceleração (desde o instante em que o equipamento é acionado até ser atingida a rotação nominal). O tempo de aceleração pode ser determinado de maneira aproximada pelo conjugado médio de aceleração.

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

- t_a - tempo de aceleração em segundos
- J_t - momento de inércia total em kgm²
- rps - rotação nominal em rotações por segundo
- C_{mmed} - conjugado médio de aceleração do motor em N.m.
- C_{rmed} - conjugado médio resistente de carga referido a eixo em N.m.
- J_m - momento de inércia do motor
- J_{ce} - momento de inércia da carga referido ao eixo
- C_a - conjugado médio de aceleração

O conjugado médio de aceleração obtém-se a partir da diferença entre o conjugado do motor e o conjugado da carga. Seu valor deveria ser calculado para cada intervalo de rotação (a somatória dos intervalos forneceria o tempo total de aceleração). Porém, na prática, é suficiente que se calcule graficamente o conjugado médio, isto é, a diferença entre a média do conjugado do motor e a média do conjugado da carga. Essa média pode ser obtida, graficamente, bastando que se observe que a soma das áreas A_1 e A_2 seja igual a área A_3 e que a área B_1 seja igual a área B_2 (ver figura 4.5).

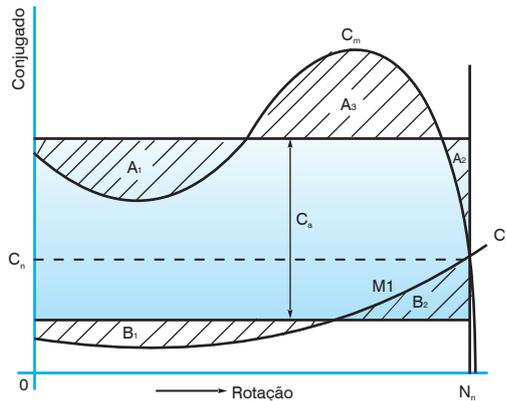


Figura 4.5 - Determinação gráfica do conjugado médio de aceleração

- C_n = Conjugado nominal
- C_m = Conjugado do motor
- C_r = Conjugado da carga
- C_a = Conjugado médio de aceleração
- N_n = Rotação nominal

4.4 Regime de Partida

Devido ao valor elevado da corrente de partida dos motores de indução, o tempo gasto na aceleração de cargas de inércia elevada resulta na elevação rápida da temperatura do motor. Se o intervalo entre partidas sucessivas for muito reduzido, isto levará a um aumento de temperatura excessivo no enrolamento, danificando-o ou reduzindo a sua vida útil. As normas ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1 estabelecem um regime de partida mínimo (S1) que os motores devem ser capazes de realizar:

- a) Duas partidas sucessivas, sendo a primeira feita com o motor frio, isto é, com seus enrolamentos à temperatura ambiente e a segunda logo a seguir, porém, após o motor ter desacelerado até o repouso.
- b) Uma partida com o motor quente, ou seja, com os enrolamentos à temperatura de regime.

A primeira condição simula o caso em que a primeira partida do motor é malograda, por exemplo, pelo desligamento da proteção, permitindo-se uma segunda tentativa logo a seguir. A segunda condição simula o caso de um desligamento acidental do motor em funcionamento normal, por exemplo, por falta de energia na rede, permitindo-se retomar o funcionamento logo após o restabelecimento da energia. Como o aquecimento durante a partida depende da inércia das partes girantes da carga acionada, a norma estabelece os valores máximos de inércia da carga para os quais o motor deve ser capaz de cumprir as condições acima. Os valores fixados para motores de II, IV, VI e VIII polos estão indicados na tabela 4.3.

Potencia nominal		Número de polos			
		II	IV	VI	VIII
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

Tabela 4.3 - Momento de inércia (J)

a) Os valores são dados em função de massa-raio ao quadrado. Eles foram calculados a partir da fórmula:

$$J = 0,04 \cdot P^{0,9} \cdot p^{2,5}$$

onde: P - potência nominal em kW
 p - número de pares de polos

b) Para valores intermediários de potência nominal, o momento de inércia externo, deve ser calculado pela fórmula acima. Para cargas com inércia maior que o valor de referência da tabela 4.3, principalmente nas potências maiores ou para determinação do número de partidas permitidas por hora, deverá ser consultada a nossa engenharia de aplicação, indicando os seguintes dados da aplicação:

- Potência requerida pela carga. Se o regime for intermitente, ver o último item: "regime de funcionamento".
- Rotação da máquina acionada.
- Transmissão: direta, correia plana, correias "V", corrente, etc.
- Relação de transmissão com croquis das dimensões e distâncias das polias, se for transmissão por correia.
- Cargas radiais anormais aplicadas à ponta do eixo: tração da correia em transmissões especiais, peças pesadas, presas ao eixo, etc.
- Cargas axiais aplicadas à ponta do eixo: transmissões por engrenagem helicoidal, empuxos hidráulicos de bombas, peças rotativas pesadas em montagem vertical, etc.
- Forma construtivas se não for B3D, indicar o código da forma construtiva utilizada.
- Conjugados de partida e máximos necessários.
- Descrição do equipamento acionado e condições de utilização.
- Momento de inércia ou GD² das partes móveis do equipamento, e a rotação a que está referida.
- Regime de funcionamento, não se tratando de regime contínuo, descrever detalhadamente o período típico do regime, não esquecendo de especificar:
 - a) Potência requerida e duração de cada período com carga;
 - b) Duração dos períodos sem carga (motor em vazio ou motor desligado);
 - c) Reversões do sentido de rotação;
 - d) Frenagem em contra-corrente.

Os motores devem ter seu número de partidas por hora conforme o regime de serviço indicado na placa de identificação e/ou conforme regime acordado em projeto. O excesso de partidas pode causar sobreaquecimento e consequente queima do motor elétrico. Em caso de dúvidas consulte a WEG.

4.5 Corrente de Rotor Bloqueado

4.5.1 Valores Máximos Normalizados

Os limites máximos da corrente com rotor bloqueado, em função da potência nominal do motor são válidos para qualquer polaridade, estão indicados na tabela 4.4, expressos em termos da potência aparente absorvida com rotor bloqueado em relação à potência nominal, kVA/cv ou kVA/kW.

$$\text{kVA/cv} = \frac{\text{Potência aparente com rotor bloqueado}}{\text{Potência nominal}}$$

$$\text{kVA/cv} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot U}{P(\text{cv}) \cdot 1000}$$

$$\text{kVA/kW} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot U}{P(\text{kW}) \cdot 1000}$$

sendo: I_p - Corrente de rotor bloqueado, ou corrente de partida

U - Tensão nominal (V)

P - Potência nominal (cv ou kW)

Faixa de potências		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

Tabela 4.4 - Valores máximos de potência aparente com rotor bloqueado (S_p / P_n), expressos pela razão para a potência de saída nominal (P_n)

Nota: para obter a relação I_p / I_n , deve-se multiplicar o valor de kVA/kW pelo produto do rendimento e fator de potência a plena carga.

I_p = Corrente com rotor bloqueado;

I_n = Corrente nominal

5. Regulagem da Velocidade de Motores Assíncronos de Indução

A relação entre velocidade, frequência, número de polos e escorregamento é expressa por

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

onde: n = rpm

f = frequência (Hz)

$2p$ = número de polos

s = escorregamento

Analisando a fórmula, podemos ver que para regular a velocidade de um motor assíncrono, podemos atuar nos seguintes parâmetros:

- $2p$ = número de polos
- s = escorregamento
- f = frequência da tensão (Hz)

5.1 Variação do Número de Polos

Existem três modos de variar o número de polos de um motor assíncrono, são eles:

- enrolamentos separados no estator;
- um enrolamento com comutação de polos;
- combinação dos dois anteriores.

Em todos esses casos, a regulagem de velocidade será discreta, sem perdas, porém, a carcaça será maior do que a de um motor de velocidade única.

5.1.1 Motores de Duas Velocidades com Enrolamentos Independentes

Esta versão apresenta a vantagem de se combinar enrolamentos com qualquer número de polos, porém, limitada pelo dimensionamento eletromagnético do núcleo (estator/rotor) e carcaça, geralmente, bem maior que o motor de velocidade única.

5.1.2 Dahlander

Motores de duas velocidades com enrolamento por comutação de polos é o sistema mais comum, também denominado "Dahlander". Esta ligação implica numa relação de polos de 1:2 com conseqüente relação de rotação de 2:1. Podem ser ligadas da seguinte forma (figura 5.1):

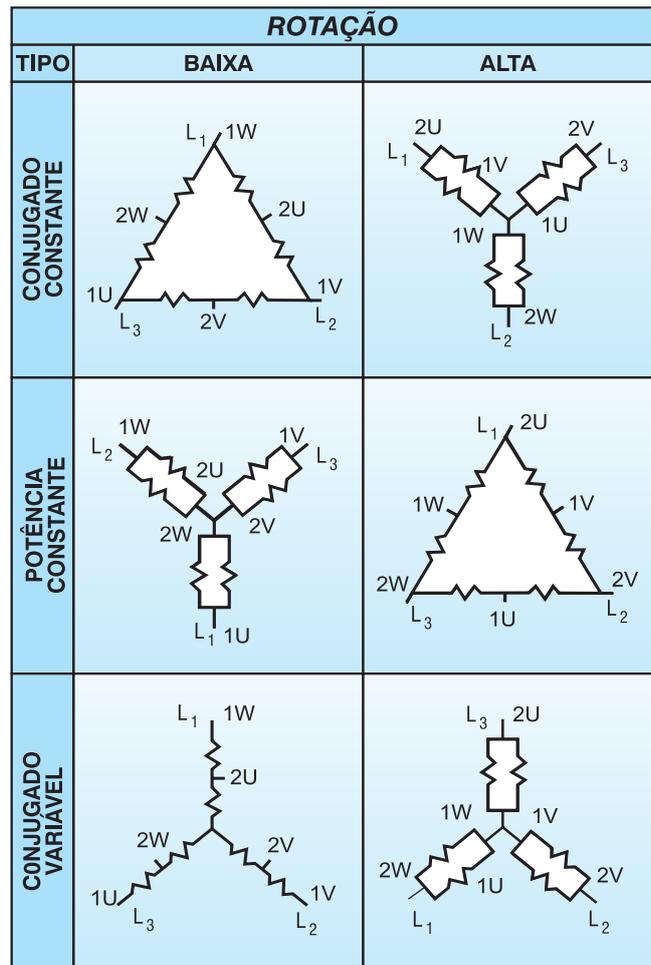


Figura 5.1 - Resumo das ligações Dahlander

■ Conjugado constante

O conjugado nas duas rotações é constante e a relação de potência é da ordem de 0,63:1. Neste caso o motor tem uma ligação de Δ/YY .

Exemplo:

Motor 0,63/1 cv - IV/II polos - Δ/YY .

Este caso se presta as aplicações cuja curva de torque da carga permanece constante com a rotação.

■ Potência constante

Neste caso, a relação de conjugado é 1:2 e a potência permanece constante. O motor possui uma ligação YY/Δ . Exemplo: 10/10 cv - IV/II polos - YY/Δ .

■ **Conjugado variável**

Neste caso, a relação de potência será de aproximadamente 1:4. É muito aplicado às cargas como bombas, ventiladores. Sua ligação é Y/YY.

Exemplo: 1/4 cv - IV/II polos - Y/YY.

5.1.3 Motores com Mais de Duas Velocidades

É possível combinar um enrolamento Dahlander com um enrolamento simples ou mais. Entretanto, não é comum, e somente utilizado em aplicações especiais.

5.2 Variação do Escorregamento

Neste caso, a velocidade do campo girante é mantida constante, e a velocidade do rotor é alterada de acordo com as condições exigidas pela carga, que podem ser:

- a) variação da resistência rotórica
- b) variação da tensão do estator
- c) variação de ambas, simultaneamente.

Estas variações são conseguidas através do aumento das perdas rotóricas, o que limita a utilização desse sistema.

5.2.1 Variação da Resistência Rotórica

Utilizado em motores de anéis. Baseia-se na seguinte equação:

$$s = \frac{p_{r2}}{\omega_o \cdot T} = \frac{3 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{\omega_o \cdot T}$$

- onde:
- p_{r2} = Perdas rotóricas (W)
 - ω_o = Rotação síncrona em rd/s
 - T = Torque ou conjugado do rotor
 - R_2 = Resistência rotórica (Ohms)
 - I_2 = Corrente rotóricas (A)
 - s = Escorregamento

A inserção de uma resistência externa no rotor faz com que o motor aumente o escorregamento (s), provocando a variação de velocidade.

Na figura a seguir, vemos o efeito do aumento do R2.

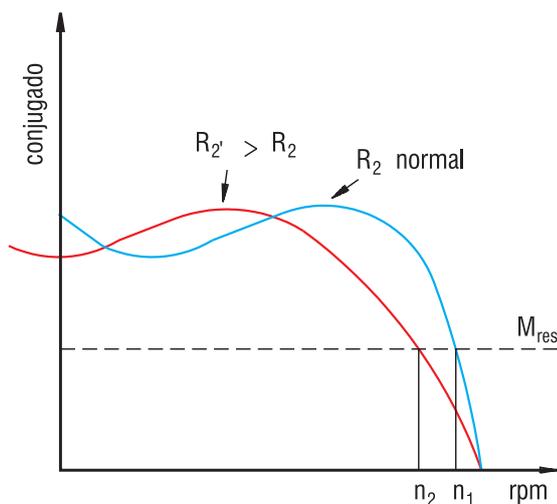


Figura 5.2 - Curva de conjugado com variação da resistência rotórica

5.2.2 Variação da Tensão do Estator

É um sistema pouco utilizado, uma vez que também gera perdas rotóricas e a faixa de variação de velocidade é pequena.

5.3 Inversores de Frequência

Maiores informações sobre o uso de inversores de frequência para controle de velocidade, ver capítulo "Aplicação de motores de indução alimentados por inversores de frequência".

6. Motofreio Trifásico

O motofreio consiste de um motor de indução acoplado a um freio monodisco, formando uma unidade integral compacta e robusta. O motor de indução é totalmente fechado com ventilação externa, com as mesmas características de robustez e desempenho da linha de motores.

O freio é construído com poucas partes móveis, que assegura longa duração com o mínimo de manutenção. A dupla face das pastilhas forma uma grande superfície de atrito, que proporciona pequena pressão sobre as mesmas, baixo aquecimento e mínimo desgaste. Além disso, o freio é resfriado pela própria ventilação do motor. A bobina de acionamento do eletroímã, protegida com resina epóxi, funciona continuamente com tensões de 10% acima ou abaixo da nominal.

A bobina de acionamento do eletroímã é alimentada por corrente contínua, fornecida por uma ponte retificadora composta de diodos de silício e varistores, que suprimem picos indesejáveis de tensão e permitem um rápido desligamento da corrente. A alimentação em corrente contínua proporciona maior rapidez e uniformidade de operação do freio.

O motofreio é geralmente aplicado em:

- Máquinas-ferramenta
- Teares
- Máquinas de embalagem
- Transportadores
- Máquinas de lavar e engarrafar
- Máquinas de bobinar
- Dobradeiras
- Guindastes
- Pontes-rolante
- Elevadores
- Ajustes de rolos de laminadores
- Máquinas gráficas

Enfim, em equipamentos onde são exigidos paradas rápidas por questões de segurança, posicionamento e redução de tempo de operação.



6.1 Funcionamento do Freio

Quando o motor é desligado da rede, o controle também interrompe a corrente da bobina e o eletroímã para de atuar. As molas de pressão empurram a armadura na direção da tampa traseira do motor. As pastilhas, que estão alojadas no disco de frenagem, são comprimidas entre as duas superfícies de atrito, a armadura e a tampa, freando o motor até que ele pare. Quando o motor é ligado na rede, a bobina é alimentada e a armadura é atraída contra a carcaça do eletroímã, vencendo a resistência das molas. As pastilhas ao ficarem livres deslocam-se axialmente em seus alojamentos ficando afastadas das superfícies de atrito. Assim, termina a ação de frenagem, deixando o motor partir livremente.

Opcionalmente pode ser fornecido disco de frenagem de lonas.

6.2 Esquemas de Ligação

O motofreio WEG admite três sistemas de ligações, proporcionando frenagem lentas, médias e rápidas.

a) Frenagem lenta

A alimentação da ponte retificadora da bobina do freio é feita diretamente dos terminais do motor, sem interrupção, conforme figura a seguir:

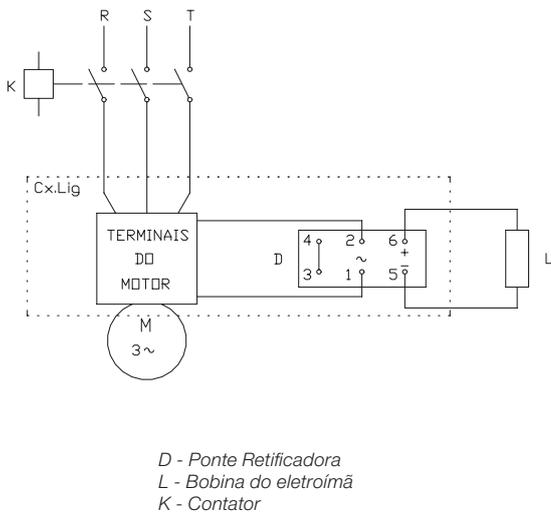


Figura 6.1 - Esquema de ligação para frenagem lenta

b) Frenagem média

Neste caso, intercala-se um contato para interrupção da corrente de alimentação da ponte retificadora no circuito de CA. É essencial que este seja um contato auxiliar NA do próprio contator ou chave magnética do motor, para garantir que se ligue ou desligue o freio simultaneamente com o motor.

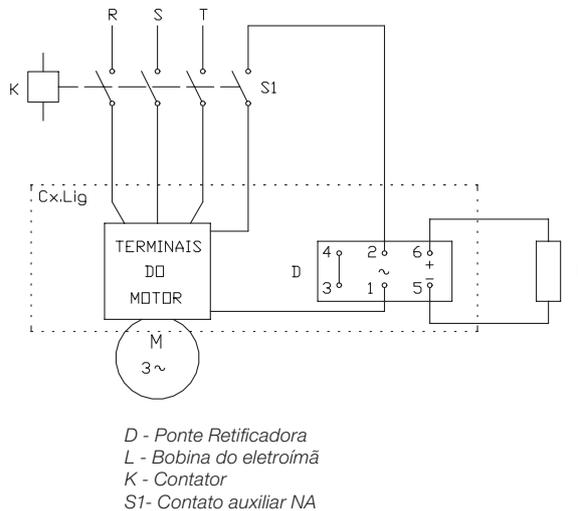


Figura 6.2 - Esquema de ligação para frenagem média

c) Frenagem rápida

Intercala-se o contato para interrupção diretamente num dos fios de alimentação da bobina, no circuito CC. É necessário que este seja um contato auxiliar NA do próprio contator ou chave magnética do motor.

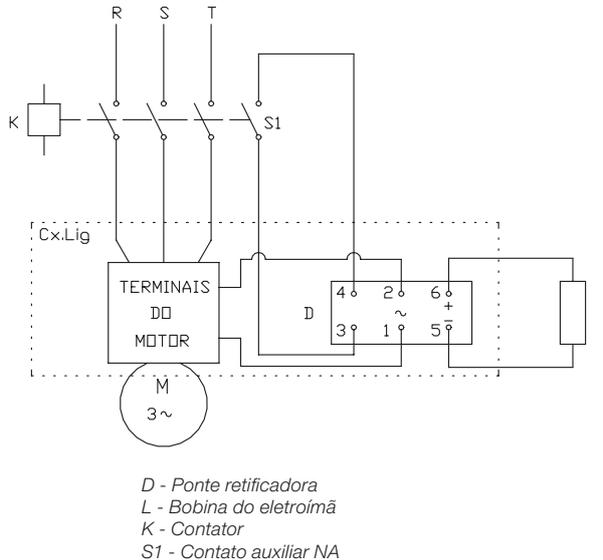


Figura 6.3 - Esquema de ligação para frenagem rápida

6.3 Alimentação da Bobina do Freio

A alimentação da ponte retificadora por corrente alternada, pode ser obtida de fonte independente ou dos terminais do motor. Esta alimentação poderá ser em 110/220 V, 440 V ou 575 V, de acordo com as características do conjunto ponte retificadora/bobina de freio.

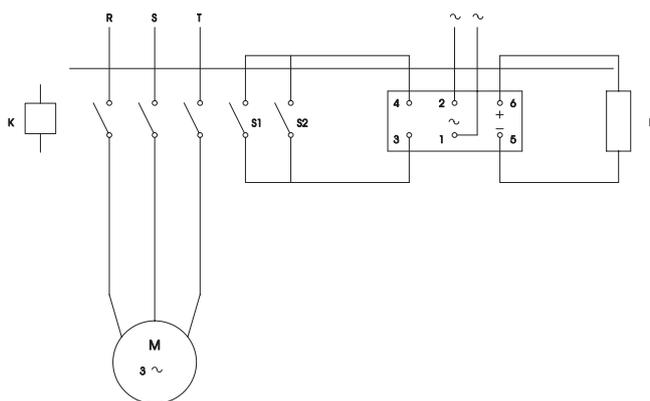
A bobina do freio também poderá ser fornecida em 24 Vcc, mas neste caso a alimentação deverá ser através de uma fonte independente (corrente contínua), dispensando o uso de ponte retificadora (PR).

Pelos terminais do motor

- Motor 220/380 V: ligar os terminais 1 e 2 da PR (220 Vca) entre os terminais 1 e 4 do motor.
 - Motor 380/660 V: ligar os terminais 1 e 2 da PR (220 Vca) entre o terminal 2 e o neutro.
 - Motor 220/380/440/760 V: ligar os terminais 1 e 2 da PR (220 Vca) entre os terminais 1 e 4 do motor.
 - Motor com 3 cabos (tensão única): ligar os terminais 1 e 2 da PR entre os terminais 1 e 2 do motor (caso a tensão da ponte for igual a do motor).
 - Motor dupla polaridade 220 V (PR 220 Vca):
 - alta rotação: ligar entre os terminais 4 e 6 do motor.
 - baixa rotação: ligar entre os terminais 1 e 2 do motor.
- Motor 440 V: ligar os terminais da ponte retificadora (440 Vca) nos terminais do motor.

Alimentação independente (CA)

Para motores de outras tensões, ligar os terminais da ponte retificadora à fonte independente de 220 V, porém com interrupção simultânea com a alimentação do motor. Com alimentação independente, é possível fazer eletricamente destravamento do freio, conforme figura abaixo.



- D - Ponte retificadora
- L - Bobina do eletroímã
- K - Contator
- S1 - Contato auxiliar NA
- S2 - Chave de destravamento elétrico

Figura 6.4 - Esquema de ligação para alimentação independente

6.4 Conjugado de Frenagem

Pode-se obter uma parada mais suave do motor diminuindo o valor do conjugado de frenagem, pela retirada de parte das molas de pressão do freio.

Importante!

As molas devem ser retiradas de maneira que as restantes permaneçam simetricamente dispostas evitando que continue existindo fricção mesmo após acionado o motor, e ocasione o desgaste desuniforme das pastilhas.

6.5 Ajuste do Entreferro

Os motofreios são fornecidos com o entreferro inicial, ou seja, a distância entre a armadura e a carcaça com o freio aplicado, pré-ajustado pela fábrica em seu valor mínimo indicado na tabela 6.1.

Por serem de construção simples, os motofreios praticamente dispensam manutenção, a não ser a ajustagem periódica do entreferro. Recomenda-se proceder uma limpeza interna, quando houver penetração de água, poeiras, etc, ou por ocasião da manutenção periódica do motor.

Carcaça	Entreferro inicial (mm)	Entreferro 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

Tabela 6.1

Com o desgaste natural das pastilhas, o entreferro aumenta gradativamente, não afetando o bom funcionamento do freio até que ele atinja o valor máximo indicado na tabela 6.1. Para reajustar o entreferro a seus valores iniciais, procede-se como segue:

- Retirar os parafusos de fixação e remover a tampa defletora;
- Remover o anel de proteção;
- Medir o entreferro em três pontos, próximos aos parafusos de regulagem, a qual é feita com um jogo de lâminas padrão (espião);
- Se a medida encontrada for maior ou igual ao valor máximo indicado, ou se as três leituras forem diferentes entre si, prosseguir a regulagem da seguinte maneira:
 - soltar as contraporcas e os parafusos de regulagem;
 - ajustar o entreferro ao seu valor inicial indicado na tabela 6.1, apertando por igual os três parafusos de regulagem. O valor do entreferro deve ser uniforme nos três pontos de medição e ser de tal forma, que a lâmina padrão correspondente ao limite inferior, penetre livremente em toda a volta, e a lâmina correspondente ao limite superior não possa ser introduzida em nenhum ponto;
 - apertar os parafusos de travamento até que sua ponta fique apoiada na tampa do motor. Não apertar em demasia;

4. apertar firmemente as contraporcas;
5. fazer verificação final do entreferro, procedendo as medições conforme o item 2;
6. recolocar a cinta de proteção;
7. recolocar a tampa defletora, fixando com os parafusos.

Intervalos para inspeção e ajuste do entreferro

O intervalo de tempo entre as reajustagens periódicas do entreferro, ou seja, o número de operações de frenagem até que o desgaste das pastilhas leve o entreferro ao seu valor máximo, depende da carga, das condições de serviço, das impurezas do ambiente de trabalho, etc. O intervalo ideal poderá ser determinado pela manutenção, observando-se o comportamento do motofreio nos primeiros meses de funcionamento, nas condições reais de trabalho.

O desgaste das pastilhas depende do momento de inércia da carga acionada.

A WEG dispõe de outras opções de freio para aplicações mais rigorosas (ex: pontes rolantes, tracionadores, redutores, etc). Em caso de dúvidas, consulte a WEG.

7. Características em Regime

7.1.1 Aquecimento do Enrolamento

Perdas

A potência útil fornecida pelo motor na ponta do eixo é menor que a potência que o motor absorve da linha de alimentação, isto é, o rendimento do motor é sempre inferior a 100%. A diferença entre as duas potências representa as perdas, que são transformadas em calor, o qual aquece o enrolamento e deve ser dissipado para fora do motor, para evitar que a elevação de temperatura seja excessiva. O mesmo acontece em todos os tipos de motores. No motor de automóvel, por exemplo, o calor gerado pelas perdas internas tem que ser retirado do bloco pelo sistema de circulação de água com radiador ou pela ventoinha, em motores resfriados a ar.

Dissipação do calor

O calor gerado pelas perdas no interior de um motor fechado é dissipado para o ar ambiente através da superfície externa da carcaça. Em motores fechados essa dissipação é normalmente auxiliada pelo ventilador montado no próprio eixo do motor. Uma boa dissipação depende:

- da eficiência do sistema de ventilação;
- da área total de dissipação da carcaça;
- da diferença de temperatura entre a superfície externa da carcaça e do ar ambiente ($t_{ext} - t_a$).

a) O sistema de ventilação bem projetado, além de ter um ventilador eficiente, capaz de movimentar grande volume de ar, deve dirigir esse ar de modo a cobrir toda a superfície da carcaça, onde se dá a troca de calor. De nada adianta um grande volume de ar se ele se espalha sem retirar o calor do motor.

b) A área total de dissipação deve ser a maior possível. Entretanto, um motor com uma carcaça muito grande, para obter maior área, seria muito caro e pesado, além de ocupar muito espaço. Por isso, a área de dissipação disponível é limitada pela necessidade de fabricar motores pequenos e leves. Isso é compensado em parte, aumentando-se a área disponível por meio de aletas de resfriamento, fundidas com a carcaça.

c) Um sistema de resfriamento eficiente é aquele que consegue dissipar a maior quantidade de calor disponível, através da menor área de dissipação. Para isso, é necessário que a queda interna de temperatura, mostrada na figura 7.1, seja minimizada. Isto quer dizer que deve haver uma boa transferência de calor do interior do motor até a superfície externa de temperatura.

O que realmente queremos limitar é a elevação da temperatura no enrolamento sobre a temperatura do ar ambiente. Esta diferença total (Δt) é comumente chamada “elevação de temperatura” do motor e, como é indicado na figura 7.1, vale a soma da queda interna com a queda externa.

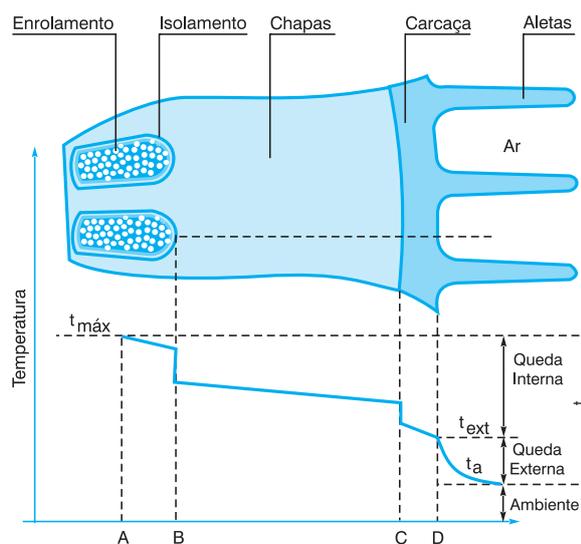


Figura 7.1

Como vimos, interessa reduzir a queda interna (melhorar a transferência de calor) para poder ter uma queda externa maior possível, pois esta é que realmente ajuda a dissipar o calor. A queda interna de temperatura depende de diversos fatores como indica a figura 7.1, onde as temperaturas de certos pontos importantes do motor estão representadas e explicadas a seguir:

- A - Ponto mais quente do enrolamento, no interior da ranhura, onde é gerado o calor proveniente das perdas nos condutores.
- AB - Queda de temperatura na transferência de calor do ponto mais quente até os fios externos. Como o ar é um péssimo condutor de calor, é importante que não hajam “vazios” no interior da ranhura, isto é, as bobinas devem ser compactas e a impregnação com verniz deve preencher o máximo possível os vazios.
- B - Queda através do isolamento da ranhura e no contato deste com os condutores de um lado, e com as chapas do núcleo, do outro. O emprego de materiais modernos melhora a transmissão de calor através do isolante; a impregnação perfeita, melhora o contato do lado interno, eliminando espaços vazios; o bom alinhamento das chapas estampadas, melhora o contato do lado externo, eliminando camadas de ar que prejudicam a transferência de calor.

- BC - Queda de temperatura por transmissão através do material das chapas do núcleo.
- C - Queda no contato entre o núcleo e a carcaça. A condução de calor será tanto melhor quanto mais perfeito for o contato entre as partes, dependendo do bom alinhamento das chapas, e precisão da usinagem da carcaça. Superfícies irregulares deixam espaços vazios entre elas, resultando mau contato e, portanto, má condução do calor.
- CD - Queda de temperatura por transmissão através da espessura da carcaça.

Graças a um projeto moderno, uso de materiais avançados, processos de fabricação aprimorados, sob um permanente Controle de Qualidade, os motores WEG apresentam uma excelente transferência de calor do interior para a superfície, eliminando “pontos quentes” no enrolamento.

Temperatura externa do motor

Segue abaixo os locais onde recomendamos verificar a temperatura externa de um motor elétrico, utilizando um medidor de temperatura calibrado, conforme a figura abaixo:



Figura 7.2

Importante!

Medir também a temperatura ambiente (máx. a 1 m de distância do motor)

7.1.2 Vida Útil do Motor

Conforme comentado no item “*materiais e sistemas de isolamento*”, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil do sistema de isolamento dos enrolamentos. Este é afetado por muitos fatores, como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é, sem dúvida a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados. Um aumento de 8 a 10 graus acima do limite da classe térmica na temperatura do sistema de isolamento, pode reduzir a vida útil do enrolamento pela metade.

Quando falamos em diminuição da vida útil do motor, não nos referimos às temperaturas elevadas, quando o isolante se queima e o enrolamento é destruído de repente. A vida útil do sistema de isolamento (em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queima), refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão aplicada e produza o curto-circuito. A experiência mostra que a capacidade de isolamento dos materiais tem uma duração praticamente ilimitada, se a sua temperatura for

mantida abaixo de um certo limite. Acima deste valor, a vida útil dos materiais isolantes vai se tornando cada vez mais curta, à medida que a temperatura de trabalho é mais alta. Este limite de temperatura é muito mais baixo que a temperatura de “queima” do isolante e depende do tipo de material empregado.

Esta limitação de temperatura se refere ao ponto mais quente da isolamento e não necessariamente ao enrolamento todo. Evidentemente, basta um “ponto fraco” no interior da bobina para que o enrolamento fique inutilizado.

Recomendamos utilizar sensores de temperatura como proteção adicional ao motor elétrico. Estes poderão garantir uma maior vida ao motor e confiabilidade ao processo.

A especificação de alarme e/ou desligamento deve ser realizada de acordo com a classe térmica do motor. Em caso de dúvidas, consulte a WEG.

7.1.3 Classes de Isolamento

Definição das classes

Como foi visto anteriormente, o limite de temperatura depende do tipo de material empregado. Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento (cada um formado pela combinação de vários materiais) são agrupados em CLASSES DE ISOLAMENTO, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que o material ou o sistema de isolamento pode suportar continuamente sem que seja afetada sua vida útil.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, são as seguintes:

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

7.1.4 Medida de Elevação de Temperatura do Enrolamento

É muito difícil medir a temperatura do enrolamento com termômetros ou termopares, pois a temperatura varia de um ponto a outro e nunca se sabe se o ponto da medição está próximo do ponto mais quente. O método mais confiável de se medir a temperatura de um enrolamento é através da variação de sua resistência ôhmica com a temperatura.

A elevação da temperatura pelo método da resistência, é calculada por meio da seguinte fórmula:

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

- onde:
- Δt = é a elevação de temperatura;
 - t_1 = a temperatura do enrolamento antes do ensaio, praticamente igual a do meio refrigerante, medida por termômetro;
 - t_2 = a temperatura dos enrolamentos no fim do ensaio;
 - t_a = a temperatura do meio refrigerante no fim do ensaio;
 - R_1 = Resistência do enrolamento antes do ensaio;
 - R_2 = Resistência do enrolamento no fim do ensaio.

7.1.5 Aplicação a Motores Elétricos

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento deve ser mantida abaixo do limite da classe. A temperatura total vale a soma da temperatura ambiente com a elevação de temperatura Δt mais a diferença que existe entre a temperatura média do enrolamento e a do ponto mais quente. As normas de motores fixam a máxima elevação de temperatura Δt , de modo que a temperatura do ponto mais quente fica limitada, baseada nas seguintes considerações:

- A temperatura ambiente é, no máximo 40 °C, por norma, e acima disso as condições de trabalho são consideradas especiais.
- A diferença entre a temperatura média e a do ponto mais quente não varia muito de motor para motor e seu valor estabelecido em norma, baseado na prática é 5 °C, para as classes A e E, 10 °C para as classes B e F e 15 °C para a classe H.

As normas de motores, portanto, estabelecem um máximo para a temperatura ambiente e especificam uma elevação de temperatura máxima para cada classe de isolamento. Deste modo, fica indiretamente limitada a temperatura do ponto mais quente do motor. Os valores numéricos e a composição da temperatura admissível do ponto mais quente, são indicados na tabela 7.1.

Classe de isolamento		A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	°C	40	40	40	40	40
Δt = elevação de temperatura (método da resistência)	°C	60	75	80	105	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	°C	5	5	10	10	15
Total: temperatura do ponto mais quente	°C	105	120	130	155	180

Tabela 7.1 - Composição da temperatura em função da classe de isolamento

Para motores de construção naval, deverão ser obedecidos todos os detalhes particulares de cada entidade classificadora, conforme tabela 7.2.

Entidades classificadoras para uso naval	Máxima temperatura ambiente (°C)	Máxima sobre elevação de temperatura permitida por classe de isolamento, Δt em °C (método de variação de resistência)			
		A	E	B	F
Germanischer Lloyd	45	55	70	75	96
American Bureau of Shipping	50	55	65	75	95
Bureau Veritas	50	50	65	70	90
Norske Veritas	45	50	65	70	90
Lloyds Register of Shipping	45	50	65	70	90
RINA	45	50	70	75	—

Tabela 7.2 - Correção das temperaturas para rotores navais

7.2 Proteção Térmica de Motores Elétricos

Os motores utilizados em regime contínuo devem ser protegidos contra sobrecargas por um dispositivo integrante do motor, ou um dispositivo de proteção independente, geralmente com relé térmico com corrente nominal ou de ajuste, igual ou inferior ao valor obtido multiplicando-se a corrente nominal de alimentação (I_n) pelo fator de serviço (FS), conforme a tabela:

Fator de Serviço do Motor (FS)	Ajuste da Corrente do relé
1,0 até 1,15	$I_n \cdot FS$
$\geq 1,15$	$(I_n \cdot FS) - 5\%$

Tabela 7.3 - Corrente de alimentação x Fator de serviço

A proteção térmica é efetuada por meio de termoresistências (resistência calibrada), termistores, termostatos ou protetores térmicos. Os tipos de sensores a serem utilizados são determinados em função da classe de temperatura do isolamento empregado, de cada tipo de máquina e da exigência do cliente.

7.2.1 Termoresistores (Pt-100)

São sensores de temperatura com princípio de funcionamento baseado na propriedade que alguns materiais que variam a resistência elétrica com a variação da temperatura (geralmente platina, níquel ou cobre). Possuem resistência calibrada que varia linearmente com a temperatura, possibilitando um acompanhamento contínuo do processo de aquecimento do motor pelo display do controlador, com alto grau de precisão e sensibilidade de resposta.

Um mesmo sensor pode servir para alarme (operação acima da temperatura normal de trabalho) e desligamento (geralmente ajustada para a máxima temperatura da classe de isolamento). As resistências dos cabos, dos contatos, etc., podem interferir na medição assim, existem diferentes tipos de configurações que podem ser realizadas buscando minimizar esses efeitos.

- A configuração de dois fios normalmente é satisfatória em locais onde o comprimento do cabo do sensor ao instrumento não ultrapassa 3,0 m para bitola 20 AWG.
- Na configuração de três fios (mais utilizada pela indústria) haverá uma compensação da resistência elétrica pelo terceiro fio.
- Na configuração de quatro fios (montagem mais precisa), existem duas ligações para cada terminal do bulbo (dois cabos para tensão e dois para corrente), obtendo-se um balanceamento total de resistências (é utilizada nos casos onde grande precisão é necessária).

Desvantagem

Os elementos sensores e os circuitos de controle possuem um alto custo.



Figura 7.3 - Visualização do aspecto interno e externo dos termoresistores

Para o Pt-100, a temperatura pode ser obtida com a fórmula a seguir, ou através de tabelas fornecidas pelos fabricantes.

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

r - resistência medida em Ohms

7.2.2 Termistores (PTC e NTC)

Os termistores são dispositivos feitos de materiais semicondutores, cuja resistência varia acentuadamente com a temperatura.

PTC - coeficiente de temperatura positivo
 NTC - coeficiente de temperatura negativo

O termistor “PTC” apresenta aumento da resistência com o aumento da temperatura e alguns são caracterizados por esta subida ser abrupta, o que os torna úteis em dispositivos de proteção de sobreaquecimento. O termistor “NTC” apresenta redução da resistência com o aumento da temperatura, normalmente não sendo utilizados em motores elétricos.

A brusca variação na resistência interrompe a corrente no PTC, acionando um relé de saída, o qual desliga o circuito principal. Os termistores podem ser usados para alarme e desligamento. Nesse caso, são necessários dois termistores, conectados em série, por fase.

Os termistores possuem tamanho reduzido, não sofrem desgastes mecânicos e têm uma resposta mais rápida em relação aos outros detectores, embora não permitam um acompanhamento contínuo do processo de aquecimento do motor. Os termistores com seus respectivos circuitos eletrônicos de controle oferecem proteção completa contra sobreaquecimento produzido por falta de fase, sobrecarga, sub ou sobretensões e operações frequentes de reversão ou liga-desliga. Possuem baixo custo, quando comparado ao do tipo Pt-100, porém, necessitam de relé para comando da atuação do alarme ou operação.



Figura 7.4 - Visualização do aspecto externo dos termistores

Segue abaixo a tabela dos principais PTC utilizados nos motores elétricos. Esta tabela relaciona as cores dos cabos do sensor PTC com sua temperatura de atuação.

Cores dos cabos		Temperatura C
		110
		120
		140
		160
		180

Tabela 7.4 - Cores dos cabos

A WEG possui o relé eletrônico RPW que tem a função específica de adquirir o sinal do PTC e atuar seu relé de saída. Para maiores informações consulte a WEG.

7.2.3 Protetores Térmicos Bimetálicos - Termostatos

São sensores térmicos do tipo bimetálico com contatos de prata normalmente fechados, que se abrem ao atingir determinada elevação de temperatura. Quando a temperatura de atuação do bimetálico baixar, este volta a sua forma, original instantaneamente, permitindo o fechamento dos contatos novamente. Os termostatos podem ser destinados para sistemas de alarme, desligamento ou ambos (alarme e

desligamento) de motores elétricos trifásicos. Em motores, os termostatos são instalados nas cabeças de bobinas de fases diferentes e ligados em série com a bobina do contator onde, dependendo do grau de segurança e da especificação do cliente, podem ser utilizados três termostatos (um por fase) ou seis termostatos (grupos de dois por fase).

Para operar em alarme e desligamento (dois termostatos por fase), os termostatos de alarme devem ser apropriados para atuação na elevação de temperatura prevista do motor, enquanto que os termostatos de desligamento deverão atuar na temperatura máxima do material isolante.

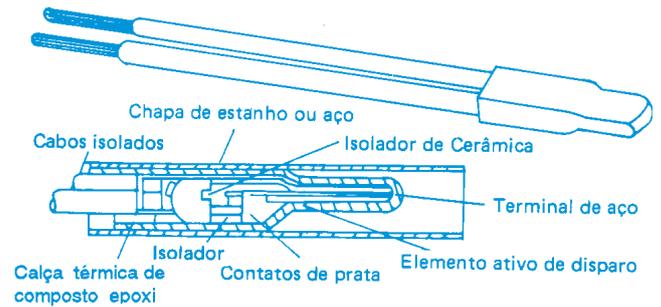


Figura 7.5 - Visualização do aspecto interno e externo do termostato

Os termostatos também são utilizados em aplicações especiais de motores monofásicos. Nestas aplicações, o termostato pode ser ligado em série com a alimentação do motor, desde que a corrente do motor não ultrapasse a máxima corrente admissível do termostato. Caso isto ocorra, o termostato deve ser ligado em série com a bobina do contator. Os termostatos são instalados nas cabeças de bobinas de fases diferentes.



Figura 7.6 - Instalação do protetor térmico bimetálico

Observação: a WEG recomenda utilizar sensores de temperatura na proteção do enrolamento e rolamentos, com o intuito de aumentar a vida útil e confiabilidade do motor elétrico.

7.2.4 Protetores Térmicos Fenólicos

São dispositivos do tipo bimetálico com contatos normalmente fechados utilizados principalmente em motores de indução monofásicos para proteção contra sobreaquecimento provocado por sobrecargas, travamento do rotor, quedas de tensão, etc.

O protetor térmico consiste basicamente em um disco bimetálico que possui dois contatos móveis, uma resistência e um par de contatos fixos. O protetor é ligado em série com a alimentação e devido à dissipação térmica causada pela passagem da corrente através da resistência interna, ocorre uma deformação do disco, fazendo os contatos abrir e a alimentação do motor ser interrompida.

Após ser atingida uma temperatura inferior à especificada, o protetor deve religar. Em função do religamento, pode haver dois tipos de protetores:

- a) Protetor com religamento automático;
- b) Protetor com religamento manual.

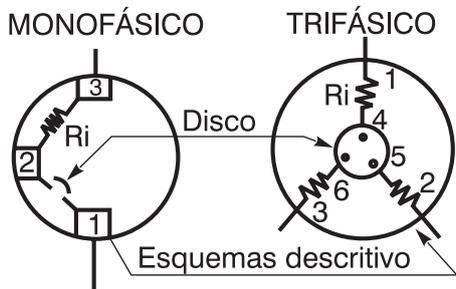
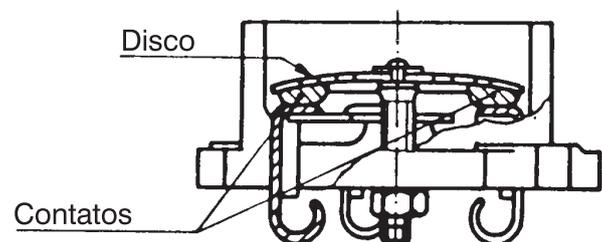


Figura 7.7 - Visualização do aspecto interno do protetor térmico

O protetor térmico também tem aplicação em motores trifásicos, porém, apenas em motores com ligação Y. O seguinte esquema de ligação poderá ser utilizado:

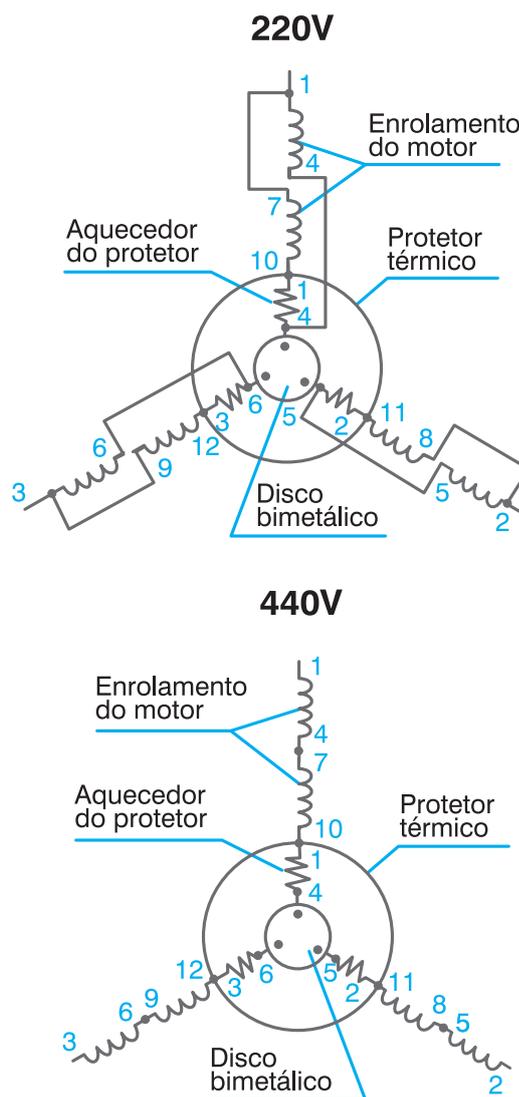


Figura 7.8 - Diagrama de ligação do protetor térmico para motores trifásicos

Vantagens

- Combinação de protetor sensível à corrente e à temperatura;
- Possibilidade de religamento automático.

Desvantagens

- Limitação da corrente, por estar o protetor ligado diretamente à bobina do motor monofásico;
- Aplicação voltada para motores trifásicos somente no centro da ligação Y.

Observação: a WEG recomenda utilizar sensores de temperatura na proteção do enrolamento e rolamentos, com o intuito de aumentar a vida útil e confiabilidade do motor elétrico.

	Termorresistor (Pt-100)	Termistor (PTC e NTC)	Protetor térmico bimetalico	Protetor térmico fenólico
Mecanismo de proteção	Resistência calibrada	Resistor de avalanche	■ Contatos móveis ■ Bimetálicos	Contatos móveis
Disposição	Cabeça de bobina	Cabeça de bobina	■ Inserido no circuito ■ Cabeça de bobina	Inserido no circuito
Forma de atuação	Comando externo de atuação na proteção	Comando externo de atuação na proteção	■ Atuação direta ■ Comando externo de atuação da proteção	Atuação direta
Limitação de corrente	Corrente de comando	Corrente de comando	■ Corrente do motor ■ Corrente do comando	Corrente do motor
Tipo de sensibilidade	Temperatura	Temperatura	Corrente e temperatura	Corrente e temperatura
Número de unidades por motor	3 ou 6	3 ou 6	3 ou 6 1 ou 3	1
Tipos de comando	Alarme e/ou desligamento	Alarme e/ou desligamento	■ Desligamento ■ Alarme e/ou desligamento	Desligamento

Tabela 7.5 - Protetores térmicos

Causas de sobreaquecimento	Proteção em função da corrente		Proteção com sondas térmicas, e relé térmico
	Só fusível ou disjuntor	Fusível e relé térmico	
Sobrecarga com corrente 1.2 vezes a corrente nominal	○	●	●
Regimes de carga S1 a S10	○	◐	●
Frenagens, reversões e funcionamento com partida frequentes	○	◐	●
Funcionamento com mais de 15 partidas por hora	○	◐	●
Rotor bloqueado	◐	◐	●
Falta de fase	○	◐	●
Variação de tensão excessiva	○	●	●
Variação de frequência na rede	○	●	●
Temperatura ambiente excessiva	○	○	●
Aquecimento externo provocado por rolamentos, correias, polias, etc	○	○	●
Obstrução da ventilação	○	○	●

Tabela 7.6 - Comparação entre sistemas de proteção de motores

Legenda: não protegido ○
semi-protégido ◐
totalmente protegido ●

Orientamos não utilizar disjuntores em caixa moldada para distribuição e minidisjuntores para proteção de partidas de motores elétricos devido a estes não atenderem a norma de proteção de motores elétricos pelos seguintes motivos:

- Geralmente estes disjuntores não possuem regulagem/ajuste da sua corrente térmica/sobrecarga nominal, tendo apenas valores fixos desta corrente nominal, e na maioria dos casos, não se igualando a corrente nominal do motor elétrico.
- Nos disjuntores, seu dispositivo térmico, não tem classe térmica de disparo (tipo 10, 20, 30, segundo ABNT NBR 60947-1), na qual tem como curva característica: $t_a =$ tempo de desarme $\times I_e =$ múltiplo de corrente ajustada no relé, e que relés de sobrecarga normais e eletrônicos possuem.
- Em casos de sistemas trifásicos, o dispositivo térmico dos disjuntores não possui a proteção por "falta de fase", pois seu dispositivo térmico não tem a "curva característica sobrecarga bipolar" - 2 fases que os relés de sobrecarga normais e eletrônicos possuem.

7.3 Regime de Serviço

Segundo a IEC 60034-1, é o grau de regularidade da carga a que o motor é submetido. Os motores normais são projetados para regime contínuo, (a carga é constante), por tempo indefinido, e igual a potência nominal do motor. A indicação do regime do motor deve ser feita pelo comprador da forma mais exata possível. Nos casos em que a carga não variar ou nos quais variar de forma previsível, o regime poderá ser indicado numericamente ou por meio de gráficos que representam a variação em função do tempo das grandezas variáveis. Quando a sequência real dos valores no tempo for indeterminada, deverá ser indicada uma sequência fictícia não menos severa que a real. A utilização de outro regime de partida em relação ao informado na placa de identificação pode levar o motor ao sobreaquecimento e consequente danos ao mesmo. Em caso de dúvidas consulte a WEG.

7.3.1 Regimes Padronizados

Conforme a NBR 17094-1, os regimes de tipo e os símbolos alfa-numéricos a eles atribuídos, são indicados a seguir:

a) Regime contínuo (S1)

Funcionamento à carga constante de duração suficiente para que se alcance o equilíbrio térmico (figura 7.9).

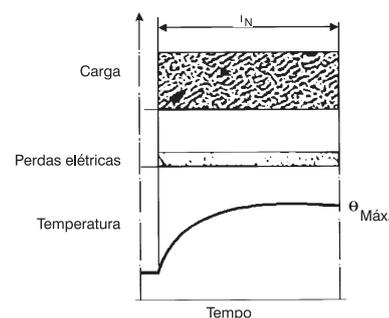


Figura 7.9

t_N = funcionamento em carga constante
 $\theta_{máx}$ = temperatura máxima atingida

b) Regime de tempo limitado (S2)

Funcionamento à carga constante, durante um certo tempo, inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico, seguido de um período de repouso de duração suficiente para restabelecer a temperatura do motor dentro de + 2K em relação à temperatura do fluido refrigerante (figura 7.10).

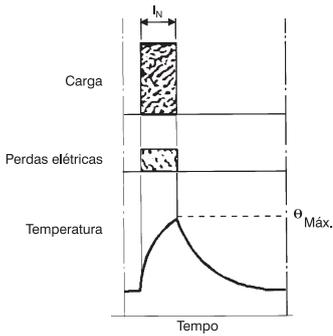


Figura 7.10

t_N = funcionamento em carga constante
 $\theta_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo

c) Regime intermitente periódico (S3)

Sequência de ciclos idênticos, cada qual incluindo um período de funcionamento com carga constante e um período desenergizado e em repouso. Neste regime o ciclo é tal que a corrente de partida não afeta de modo significativo a elevação de temperatura (figura 7.11)

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{t_N}{t_N + t_R} \cdot 100\%$$

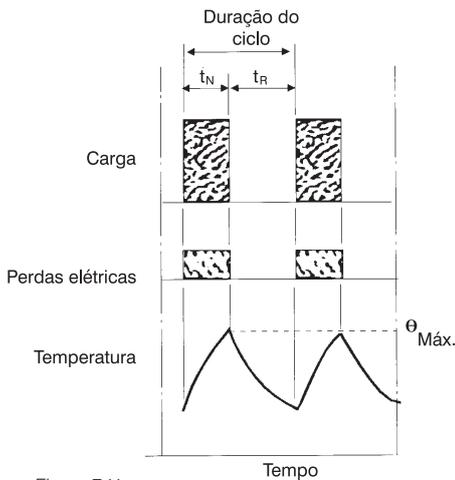


Figura 7.11

t_N = funcionamento em carga constante
 t_R = repouso
 $\theta_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo

d) Regime intermitente periódico com partidas (S4)

Sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos, para que se atinja o equilíbrio térmico (figura 7.12).

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{t_D + t_N}{t_D + t_N + t_R} \cdot 100\%$$

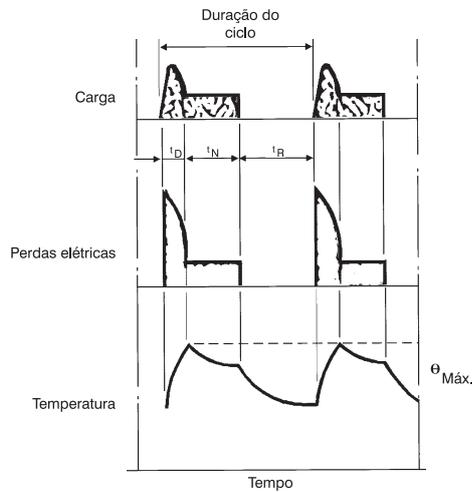


Figura 7.12

t_D = partida
 t_N = funcionamento em carga constante
 t_R = repouso
 $\theta_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo

e) Regime intermitente periódico com frenagem elétrica (S5)

Sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante, um período de frenagem elétrica e um período desenergizado e em repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico (figura 7.13).

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{t_D + t_N + t_F}{t_D + t_N + t_F + t_R} \cdot 100\%$$

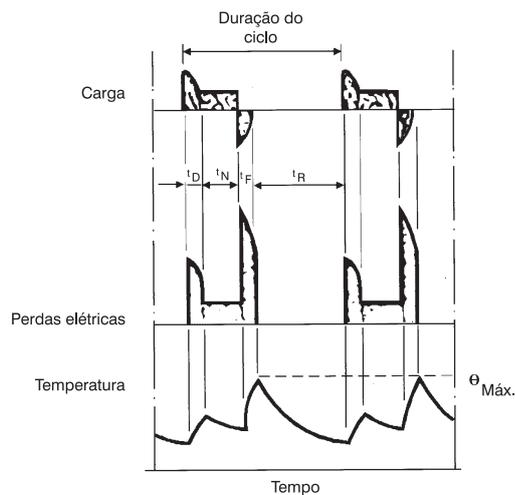


Figura 7.13

t_D = partida
 t_N = funcionamento em carga constante
 t_F = frenagem elétrica
 t_R = repouso
 $\theta_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo

f) Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente (S6)

Sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de funcionamento a carga constante e de um período de funcionamento em vazio, não existindo período de repouso (figura 7.14)

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{t_N}{t_N + t_V} \cdot 100\%$$

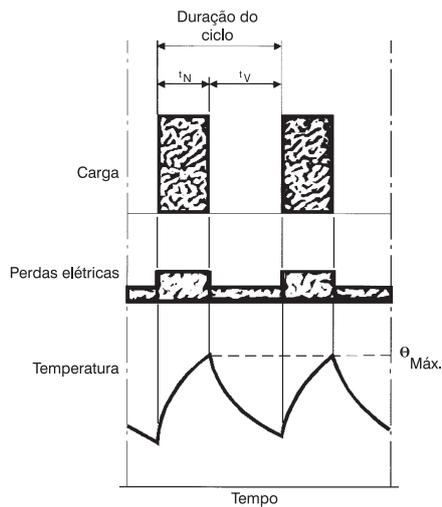


Figura 7.14

t_N = funcionamento em carga constante
 t_V = funcionamento em vazio
 $\theta_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo

g) Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica (S7)

Sequência de ciclos de regimes idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, de um período de funcionamento a carga constante e um período de frenagem elétrica, não existindo o período de repouso (figura 7.15).

Fator de duração do ciclo = 1

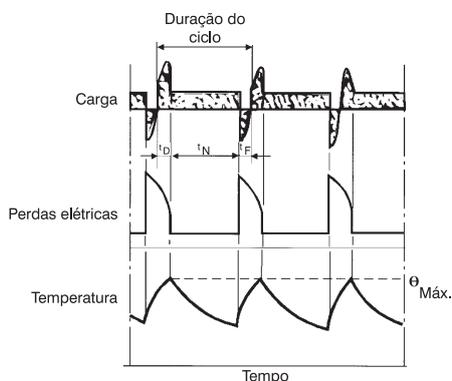


Figura 7.15

t_D = partida
 t_N = funcionamento em carga constante
 t_F = frenagem elétrica
 $\theta_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo

h) Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade de rotação (S8)

Sequência de ciclos de regimes idênticos, cada ciclo consistindo de um período de partida e um período de funcionamento a carga constante, correspondendo a uma determinada velocidade de rotação, seguidos de um ou mais períodos de funcionamento a outras cargas constantes, correspondentes a diferentes velocidades de rotação. Não existe período de repouso (figura 7.16).

Fator de duração de ciclo:

■ Para N1 = $\frac{t_D + t_{N1}}{t_D + t_{N1} + t_{F1} + t_{N2} + t_{F2} + t_{N3}} \cdot 100\%$

■ Para N2 = $\frac{t_{F1} + t_{N2}}{t_D + t_{N1} + t_{F1} + t_{N2} + t_{F2} + t_{N3}} \cdot 100\%$

■ Para N3 = $\frac{t_{F2} + t_{N3}}{t_D + t_{N1} + t_{F1} + t_{N2} + t_{F2} + t_{N3}} \cdot 100\%$

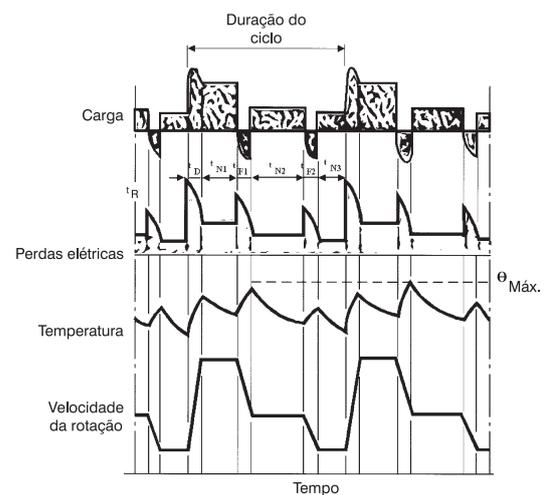


Figura 7.16

$t_{F1} - t_{F2}$ = frenagem elétrica
 t_D = partida
 $t_{N1} - t_{N2} - t_{N3}$ = funcionamento em carga constante
 $\theta_{m\acute{a}x}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo

i) Regime com variações não periódicas de carga e de velocidade (S9)

Regime no qual geralmente a carga e a velocidade variam não periodicamente, dentro da faixa de funcionamento admissível, incluindo frequentemente sobrecargas aplicadas que podem ser muito superiores à carga de referência (figura 7.17).

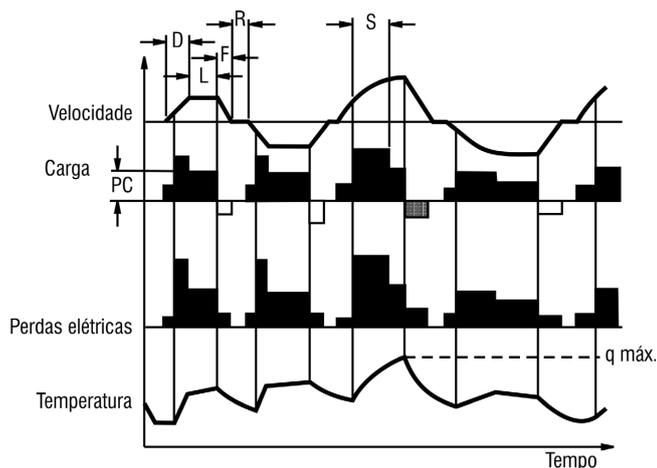


Figura 7.17

j) Regime com cargas constantes distintas (S10)

Regime consistindo em um número específico de valores distintos de cargas (ou cargas equivalentes) e, se aplicável, velocidade, sendo cada combinação carga/velocidade mantida por um tempo suficiente para permitir que a máquina alcance o equilíbrio térmico. A carga mínima durante um ciclo de regime pode ter o valor zero (funcionamento em vazio ou repouso desenergizado). Figuras 7.18a, b e c.

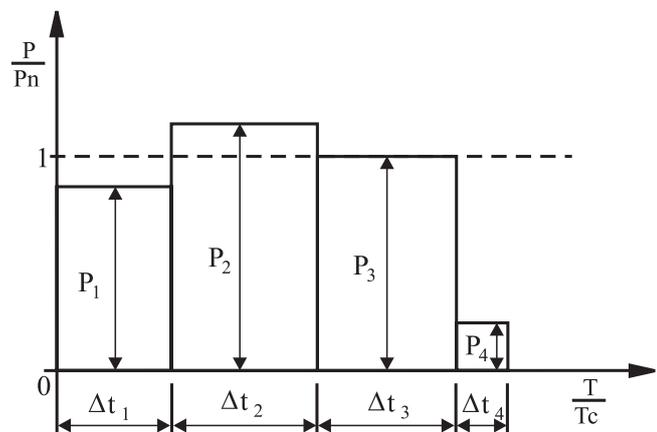


Figura 7.18a

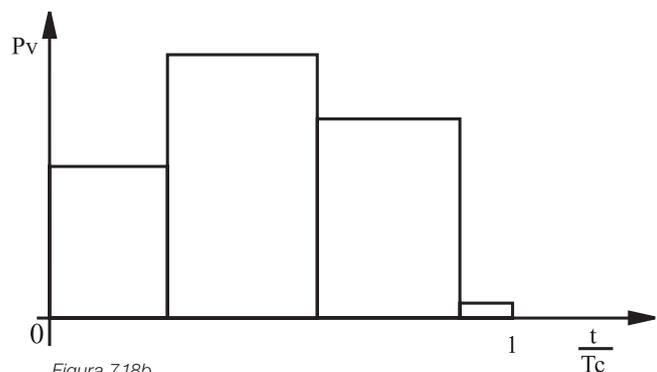


Figura 7.18b

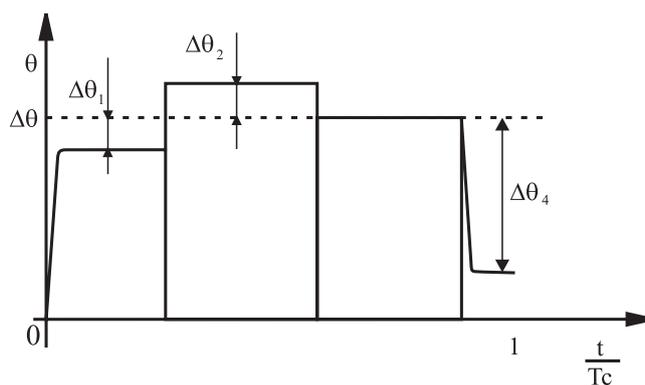


Figura 7.18c

Nota: nos regimes S3 e S8, o período é geralmente curto demais para que seja atingido o equilíbrio térmico, de modo que o motor vai se aquecendo e resfriando parcialmente a cada ciclo. Depois de um grande número de ciclos o motor atinge uma faixa de elevação de temperatura e equilíbrio.

k) Regimes especiais

Onde a carga pode variar durante os períodos de funcionamento, existe reversão ou frenagem por contracorrente, etc., a escolha do motor adequado, deve ser feita mediante consulta à fábrica e depende de uma descrição completa do ciclo:

- Potência necessária para acionar a carga. Se a carga varia ciclicamente, deve-se fornecer um gráfico de carga x tempo, como exemplificado na figura 7.15.
- Conjugado resistente da carga.
- Momento de inércia total (GD^2 ou J) da máquina acionada, referida à sua rotação nominal.
- Número de partidas, reversões, frenagens por contracorrente, etc.
- Duração dos períodos em carga e em repouso ou vazio.

7.3.2 Designação do Regime Tipo

O regime tipo é designado pelo símbolo descrito no item 7.3. No caso de regime contínuo, este pode ser indicado, em alternativa, pela palavra “contínuo”. Exemplos das designações dos regimes:

1) S2 60 segundos

A designação dos regimes S2 a S8 é seguida das seguintes indicações:

- a) S2, do tempo de funcionamento em carga constante;
- b) S3 a S6, do fator de duração do ciclo;
- c) S8, de cada uma das velocidades nominais que constituem o ciclo, seguida da respectiva potência nominal e do seu respectivo tempo de duração.

No caso dos regimes S4, S5, S7 e S8, outras indicações a serem acrescentadas à designação, deverão ser estipuladas mediante acordo entre fabricante e comprador.

Nota: Como exemplo das indicações a serem acrescentadas, mediante o referido acordo às designações de regimes tipo diferentes do contínuo, citam-se as seguintes, aplicáveis segundo o regime tipo considerado:

- a) Número de partidas por hora;
- b) Número de frenagens por hora;
- c) Tipo de frenagens;
- d) Constante de energia cinética (H), na velocidade nominal, do motor e da carga, esta última podendo ser substituída pelo fator de inércia (F).

Onde: constante de energia cinética é a relação entre a energia cinética (armazenada no rotor à velocidade de rotação nominal) e a potência aparente nominal. Fator de inércia é a relação entre a soma do momento de inércia total da carga (referido ao eixo do motor) e do momento de inércia do rotor.

2) S3 25%; S6 40%

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

Onde: - H.1 significa uma constante de energia cinética igual a 1s;
- Fl.10 significa um fator de inércia igual a 10.

4) S10 para Δt = 1,1/0,4; 1,0/0,3; 0,9/0,2; r/0,1; TL = 0,6,

Onde: Δt está em p.u. (por unidade) para as diferentes cargas e suas durações respectivas e do valor de TL em p.u. para a expectativa de vida térmica do sistema de isolamento. Durante os períodos de repouso, a carga deve ser indicada pela letra "r".

7.3.3 Potência Nominal

É a potência que o motor pode fornecer, dentro de suas características nominais, em regime contínuo. O conceito de potência nominal, ou seja, a potência que o motor pode fornecer, está intimamente ligado à elevação de temperatura do enrolamento. Sabemos que o motor pode acionar cargas de potências bem acima de sua potência nominal, até quase atingir o conjugado máximo. O que acontece, porém, é que, se esta sobrecarga for excessiva, isto é, for exigido do motor uma potência muito acima daquela para a qual foi projetado, o aquecimento normal será ultrapassado e a vida do motor será diminuída, podendo ele, até mesmo, queimar rapidamente.

Deve-se sempre ter em mente que a potência solicitada ao motor é definida pelas características da carga, isto é, independente da potência do motor, ou seja: uma carga de 90 cv, independente se o motor for de 75 cv ou 100 cv, será solicitado do motor 90 cv.

7.3.4 Potências Equivalentes para Cargas de Pequena Inércia

Evidentemente um motor elétrico deve suprir à máquina acionada com a potência necessária, sendo recomendável que haja uma margem de folga, pois pequenas sobrecargas poderão ocorrer; ou ainda, dependendo do regime de serviço, o motor pode eventualmente suprir mais ou menos potência. Apesar das inúmeras formas normalizadas de descrição das condições de funcionamento de um motor, é frequentemente necessário na prática, avaliar a solicitação imposta ao motor por um regime mais complexo que aqueles descritos nas normas. Uma forma usual de calcular a potência equivalente pela fórmula:

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

Onde: P_m = potência equivalente solicitada ao motor
 $P(t)$ = potência, variável com o tempo, solicitada ao motor
 T = duração total do ciclo (período)

O método é baseado na hipótese de que a carga efetivamente aplicada ao motor acarretará a mesma solicitação térmica que uma carga fictícia, equivalente, que solicita continuamente a potência P_m . Baseia-se também no fato de ser assumida uma variação das perdas com

o quadrado da carga, e que a elevação de temperatura é diretamente proporcional às perdas. Isto é verdadeiro para motores que giram continuamente, mas são solicitados intermitentemente.

Assim,

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

Potência

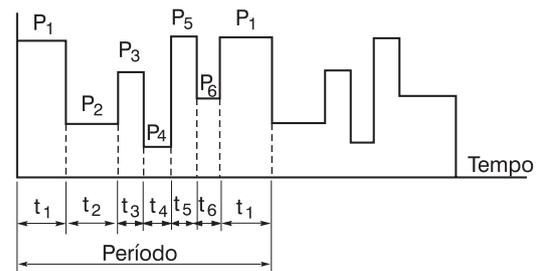


Figura 7.19 - Funcionamento contínuo com solicitações intermitentes

No caso do motor ficar em repouso entre os tempos de carga, a refrigeração deste será prejudicada. Assim, para os motores onde a ventilação está vinculada ao funcionamento do motor (por exemplo, motores totalmente fechados com ventilador externo montado no próprio eixo do motor) a potência equivalente é calculada pela fórmula:

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

onde: t_i = tempos em carga
 t_r = tempos em repouso
 P_i = cargas correspondentes

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

Potência

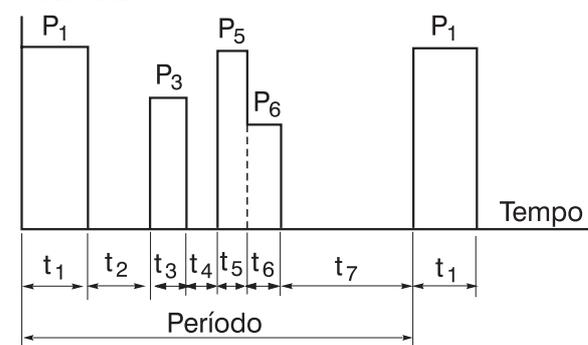


Figura 7.20 - Funcionamento com carga variável e com repouso entre os tempos de carga

7.4 Fator de Serviço (FS)

Chama-se fator de serviço (FS) o fator que, aplicado à potência nominal, indica a carga permissível que pode ser aplicada continuamente ao motor, sob condições especificadas. Note que se trata de uma capacidade de sobrecarga contínua, ou seja, uma reserva de potência que dá ao motor uma capacidade de suportar melhor o funcionamento em condições desfavoráveis. O fator de serviço não deve ser confundido com a capacidade de sobrecarga momentânea, durante alguns minutos. O fator de serviço FS = 1,0 significa que o motor não foi projetado para funcionar continuamente acima de sua potência nominal. Isto, entretanto, não muda a sua capacidade para sobrecargas momentâneas. A IEC 60034-1 especifica os fatores de serviço usuais por potência.

8. Características de Ambiente

Para analisar a viabilidade do uso de um motor em uma determinada aplicação deve-se levar em consideração alguns parâmetros entre os quais:

- Altitude em que o motor será instalado;
- Temperatura do meio refrigerante.

Conforme ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, as condições usuais de serviço, são:

- a) Altitude não superior a 1.000 m acima do nível do mar;
- b) Meio refrigerante (na maioria dos casos, o ar ambiente) com temperatura não superior a 40 °C e isenta de elementos prejudiciais.

Até estes valores de altitude e temperatura ambiente, considera-se condições normais e o motor deve fornecer, sem sobreaquecimento, sua potência nominal.

8.1 Altitude

Motores funcionando em altitudes acima de 1.000 m. apresentam problemas de aquecimento causado pela rarefação do ar e, conseqüentemente, diminuição do seu poder de arrefecimento (esfriamento). A insuficiente troca de calor entre o motor e o ar circundante, leva à exigência de redução de perdas, o que significa, também, redução de potência.

Os motores têm aquecimento diretamente proporcional às perdas e estas variam, aproximadamente, numa razão quadrática com a potência. Existem algumas alternativas de aplicações a serem avaliadas:

- a) A instalação de um motor em altitudes acima de 1.000 metros pode ser feita usando-se material isolante de classe superior.
- b) Segundo as normas ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, a redução necessária na temperatura ambiente deve ser de 1% dos limites de elevação de temperatura para cada 100 m de altitude acima de 1.000 m. Esta regra é válida para altitudes até 4.000 m. Valores acima, consultar a WEG.

Exemplo:

Motor de 100 cv, isolamento F com ΔT 80 K, trabalhando numa altitude de 1.500 m acima do nível do mar, a temperatura ambiente de 40 °C será reduzida em 5%, resultando em uma temperatura ambiente máxima estável de 36 °C. Evidentemente, a temperatura ambiente poderá ser maior desde que a elevação da temperatura seja menor do que a da classe térmica.

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

8.2 Temperatura Ambiente

Motores que trabalham em temperaturas inferiores a -20 °C, apresentam os seguintes problemas:

- a) Excessiva condensação, exigindo drenagem adicional ou instalação de resistência de aquecimento, caso o motor fique longos períodos parado.
- b) Formação de gelo nos mancais, provocando endurecimento das graxas ou lubrificantes nos mancais, exigindo o emprego de lubrificantes especiais ou graxa anticongelante (consulte nosso site).

Em motores que trabalham à temperaturas ambientes constantemente superiores a 40 °C, o enrolamento pode atingir temperaturas prejudiciais à isolação. Este fato tem que ser compensado por um projeto especial do motor, usando materiais isolantes especiais ou sobredimensionamento do motor.

8.3 Determinação da Potência Útil do Motor nas Diversas Condições de Temperatura e Altitude

Associando os efeitos da variação da temperatura e da altitude, a capacidade de dissipação da potência do motor pode ser obtida multiplicando-se a potência útil pelo fator de multiplicação obtido na tabela 8.1.

T/H	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
10	1,16	1,13	1,11	1,08	1,04	1,01	0,97
15	1,13	1,11	1,08	1,05	1,02	0,98	0,94
20	1,11	1,08	1,06	1,03	1,00	0,95	0,91
25	1,08	1,06	1,03	1,00	0,95	0,93	0,89
30	1,06	1,03	1,00	0,96	0,92	0,90	0,86
35	1,03	1,00	0,95	0,93	0,90	0,88	0,84
40	1,00	0,97	0,94	0,90	0,86	0,82	0,80
45	0,95	0,92	0,90	0,88	0,85	0,82	0,78
50	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77
55	0,88	0,85	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73
60	0,83	0,82	0,80	0,77	0,75	0,73	0,70

Tabela 8.1 Fator de multiplicação da potência útil em função da temperatura ambiente (T) em "°C" e de altitude (H) em "m"

Exemplo:

Um motor de 100 cv, isolamento F, para trabalhar num local com altitude de 2.000 m e a temperatura ambiente é de 55 °C. Da tabela 8.1 - $\alpha = 0,83$ logo $P'' = 0,83 \cdot P_n$. O motor poderá fornecer apenas 83% de sua potência nominal.

8.4 Atmosfera Ambiente

8.4.1 Ambientes Agressivos

Ambientes agressivos, tais como estaleiros, instalações portuárias, indústria de pescados e múltiplas aplicações navais, indústrias química e petroquímica, exigem que os equipamentos que neles trabalham, sejam perfeitamente adequados para suportar tais circunstâncias com elevada confiabilidade, sem apresentar problemas de qualquer espécie.

Para aplicação de motores nestes ambientes agressivos, a WEG possui uma linha específica para cada tipo de motores, projetados para atender os requisitos especiais e padronizados para as condições mais severas que possam ser encontradas. Tais motores podem possuir as seguintes características especiais:

- enrolamento duplamente impregnado
- pintura anti-corrosiva alquídica (interna e externa)
- elementos de montagem zincados
- vedação específica para a aplicação entre eixo e tampa (pode ser Retentor, W3Seal, etc.)
- Proteção adicional entre as juntas de passagem.

Para ambientes com temperaturas entre -16 °C e 40 °C e com umidade relativa $\leq 95\%$, recomenda-se utilizar pintura interna anticorrosiva. Para ambientes entre 40 °C e 65 °C também se recomenda utilizar pintura interna anticorrosiva, no entanto, deve ser aplicado um valor de derating para 40 °C.

Nota: com umidades superiores a 95% recomenda-se a pintura anti corrosiva juntamente com a resistência de aquecimento.

No caso de motores navais, as características de funcionamento específicas são determinadas pelo tipo de carga acionada a bordo. Todos os motores porém, apresentam as seguintes características especiais:

- elevação de temperatura reduzida para funcionamento em ambientes até 50 °C
- capacidade de suportar, sem problemas, sobrecargas ocasionais de curta duração de até 60% acima do conjugado nominal, conforme normas das Sociedades Classificadoras.

No que diz respeito ao controle rígido para assegurar a confiabilidade em serviço, os motores navais WEG se enquadram nas exigências de construção, inspeção e ensaios estabelecidos nas normas das Sociedades Classificadoras, entre as quais:

- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING
- BUREAU VERITAS
- CHINA CERTIFICATION SOCIETY
- DET NORSKE VERITAS
- GERMANISCHER LLOYD
- LLOYD'S REGISTER OS SHIPPING
- RINA S.p.A.

8.4.2 Ambientes Contendo Poeiras ou Fibras

Para analisar se os motores podem ou não trabalhar nestes ambientes, devem ser informados tamanho e quantidade aproximada das fibras contidas no ambiente. Esses dados são fatores importantes, pois, uma grande quantidade de poeira depositada sobre as aletas do motor pode funcionar como um isolante térmico, e fibras de maior tamanho podem provocar, no decorrer do tempo, a obstrução da ventilação prejudicando o sistema de refrigeração. Quando o conteúdo de fibras for elevado, devem ser empregados filtros de ar ou efetuar limpeza nos motores.

Evitar que a ventilação do motor seja prejudicada

Nestes casos, existem duas soluções:

- 1) Utilizar motores sem ventilação;
- 2) Para motores com ventilação por dutos, calcula-se o volume de ar deslocado pelo ventilador do motor, determinando a circulação de ar necessária para perfeita refrigeração do motor.

8.4.3 Ambientes Explosivos

Os motores à prova de explosão, não acendíveis, de segurança aumentada, e à prova de poeira, destinam-se a trabalhar em ambientes classificados como explosivos por conterem gases, vapores, poeiras ou fibras inflamáveis ou explosivos. O capítulo 9 (atmosferas explosivas) trata especificamente o assunto.

8.5 Grau de Proteção

Os invólucros dos equipamentos elétricos, conforme as características do local em que serão instalados e de sua acessibilidade, devem oferecer um determinado grau de proteção. Assim, por exemplo, um equipamento a ser instalado num local sujeito a jatos d'água, deve possuir um invólucro capaz de suportar tais jatos, sob determinados valores de pressão e ângulo de incidência, sem que haja penetração de água.

8.5.1 Código de Identificação

A norma ABNT NBR-IEC 60034-5 define os graus de proteção dos equipamentos elétricos por meio das letras características IP, seguidas por dois algarismos.

1º algarismo	
Algarismo	Indicação
0	Máquina não protegida
1	Máquina protegida contra objetos sólidos maiores que 50 mm
2	Máquina protegida contra objetos sólidos maiores que 12 mm
3	Máquina protegida contra objetos sólidos maiores que 2,5 mm
4	Máquina protegida contra objetos sólidos maiores que 1 mm
5	Máquina protegida contra poeira
6	Máquina totalmente protegida contra poeira

Tabela 8.2 - 1º ALGARISMO: Indica o grau de proteção contra penetração de corpos sólidos estranhos e contato acidental

2º algarismo	
Algarismo	Indicação
0	Máquina não protegida
1	Máquina protegida contra gotejamento vertical
2	Máquina protegida contra gotejamento de água, com inclinação de até 15°
3	Máquina protegida contra aspensão de água
4	Máquina protegida contra projeções de água
5	Máquina protegida contra jatos de água
6	Máquina protegida contra jatos potentes
7	Máquina protegida contra os efeitos da imersão temporária
8	Máquina protegida contra os efeitos da imersão contínua

Tabela 8.3 - 2º ALGARISMO: Indica o grau de proteção contra penetração de água no interior do motor

As combinações entre os dois algarismos, isto é, entre os dois critérios de proteção, estão resumidos na tabela 8.4. Note que, de acordo com a norma, a qualificação do motor em cada grau, no que se refere a cada um dos algarismos, é bem definida através de ensaios padronizados e não sujeita a interpretações, como acontecia anteriormente.

Motor	Grau de proteção	1º algarismo		2º algarismo
		Proteção contra contato	Proteção contra corpos estranhos	Proteção contra água
Motores abertos	IP00	não tem	não tem	não tem
	IP02	não tem	não tem	pingos de água até uma inclinação de 15° com a vertical
	IP11	toque acidental com a mão	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 50 mm	pingos de água na vertical
	IP12	toque acidental com a mão	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 50 mm	pingos de água até uma inclinação de 15° com a vertical
	IP13	toque acidental com a mão	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 50 mm	água de chuva até uma inclinação de 60° com a vertical
	IP21	toque com os dedos	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 12 mm	pingos de água na vertical
	IP22	toque com os dedos	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 12 mm	pingos de água até uma inclinação de 15° com a vertical
	IP23	toque com os dedos	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 12 mm	água de chuva até uma inclinação de 60° com a vertical
Motores fechados	IP44	toque com ferramentas	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 1 mm	respingos de todas as direções
	IP54	proteção completa contra toques	proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	respingos de todas as direções
	IP55	proteção completa contra toques	proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	jatos de água em todas as direções
	IP66	proteção completa contra toques	totalmente protegido contra acúmulo de poeiras nocivas	protegido contra água de varganhões

Tabela 8.4 - Graus de proteção

8.5.2 Tipos Usuais de Graus de Proteção

Embora alguns algarismos indicativos de grau de proteção possam ser combinados de muitas maneiras, somente alguns tipos de proteção são empregados nos casos normais. São eles: IP21, IP22, IP23, IP44 e IP55.

Os três primeiros são motores abertos e os dois últimos são motores fechados. Para aplicações especiais mais rigorosas, são comuns também os graus de proteção IP55W (proteção contra intempéries), IP56 (proteção contra “água de vagalhões”), IP65 (totalmente protegido contra poeiras) e IP66 (totalmente protegido contra poeiras e água de varganhões).

Vedação dos mancais

Para carcaças 225S/M a 355A/B está disponível como item de série o sistema de vedação WSeal®, composto por um anel V'Ring com duplo lábio e calota metálica montados sobre este anel.

Entre os demais sistemas de vedação disponíveis para a linha W22, está o revolucionário W3 Seal®, composto por três selos: V'Ring, O'Ring e Labirinto. Sistema desenvolvido pela WEG, contra acúmulo de impurezas sólidas e líquidas presentes no ambiente, que garante aos motores o grau de proteção IP66.

Outros graus de proteção para motores são raramente fabricados, mesmo porque, qualquer grau de proteção atende plenamente aos requisitos dos inferiores (algarismos menores). Assim, por exemplo, um motor IP55 substitui com vantagens os motores IP12, IP22 ou IP23, apresentando maior segurança contra exposição acidental à poeiras e água. Isto permite padronização da produção em um único tipo que atenda a todos os casos, com vantagem adicional para o comprador nos casos de ambientes menos exigentes.

8.5.3 Motores a Prova de Intempéries

Conforme a norma ABNT NBR-IEC 60034-5, o motor será a prova de intempéries quando de consequência de seu projeto (discussão técnica entre cliente e WEG), as proteções definidas proporcionem um correto funcionamento da máquina, em condição de exposição à água (chuva), ventos (poeiras) e neve.

A WEG utiliza a letra W junto à indicação do grau de proteção do motor para indicar que o motor tem um plano de pintura especial (à prova de intempéries). Os planos de pintura poderão variar de acordo com a agressividade do ambiente, o qual deverá ser informado pelo cliente durante especificação/solicitação do produto.

Ambientes agressivos exigem que os equipamentos que neles trabalham sejam perfeitamente adequados para suportar tais circunstâncias com elevada confiabilidade, sem apresentar problemas de qualquer espécie.

A WEG produz variada gama de motores elétricos com características técnicas especiais, apropriadas à utilização em estaleiros, instalações portuárias, indústria do pescado e múltiplas aplicações navais, além das indústrias químicas e petroquímicas e outros ambientes de condições agressivas. Sendo assim adequados aos mais severos regimes de trabalho.

8.6 Resistência de Aquecimento

As resistências de aquecimento são instaladas quando um motor elétrico é instalado em ambientes muito úmidos, (umidade > 95%) e/ou com possibilidade de ficar desligados por longos períodos (acima de 24 h), impedindo o acúmulo de água no interior do motor pela condensação do ar úmido.

As resistências de aquecimento, aquecem o interior do motor alguns graus acima do ambiente (5 a 10 °C), quando o motor está desligado. A tensão de alimentação das resistências de aquecimento, deverá ser especificada pelo cliente, sendo disponíveis em 110 V, 220 V e 440 V.

Dependendo da carcaça, serão empregados os resistores de aquecimento, conforme tabela 8.5.

Carcaça	Quantidade	Potência (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

Tabela 8.5 - Resistência de aquecimento

ATENÇÃO: As resistências de aquecimento só deverão ser energizadas com o motor desligado, caso contrário o motor poderá sofrer um sobreaquecimento, resultando em potenciais danos. Nos casos de manutenção no motor, o mesmo deverá ser completamente desenergizado, incluindo as resistências de aquecimento.

8.7 Limites de Ruídos

Os motores WEG atendem as normas NEMA, IEC e NBR que especificam os limites máximos de nível de potência sonora, em decibéis. Os valores da tabela 8.6, estão conforme IEC 60034-9.

Carcaça	2 polos		4 polos		6 polos		8 polos	
	Potência	Pressão	Potência	Pressão	Potência	Pressão	Potência	Pressão
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

Tabela 8.6 - Níveis máximos de potência e pressão sonora para motores trifásicos (IC411,IC511,IC611), a vazio, em dB (A), 60 Hz.

Nota 1: motores IC01,IC11,IC21 podem ter níveis de potência sonora maiores: 2 e 4 polos +7dB (A), - 6 e 8 polos +4dB (A)

Nota 2: os níveis de pressão e potência sonora para motores 2 e 4 polos com carcaça 355 são para ventiladores unidirecionais. Os demais são para ventiladores bi-direcionais.

Nota 3: valores para motores 50 Hz devem ser decrescidos : 2 polos -5dB (A) ; 4, 6 e 8 polos -3dB (A)

Na tabela 8.7 estão citados os incrementos a serem considerados nos valores de pressão e potência sonora, em dB (A), para motores operando em carga.

Carcaça	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

Tabela 8.7 - Incremento máximo estimado para pressão e potência sonora, em dB (A)

Nota 1: esta tabela fornece o incremento máximo esperado para condição em carga nominal.

Nota 2: os valores são válidos para 50 Hz e 60 Hz.



9. Atmosferas Explosivas

9.1 Áreas de Risco

Uma instalação onde produtos inflamáveis são continuamente manuseados, processados ou armazenados, necessita, obviamente, de cuidados especiais que garantam a manutenção do patrimônio e preservem a vida humana.

Os equipamentos elétricos, por suas próprias características, podem representar fontes de ignição, quer seja pelo centelhamento normal, devido a abertura e fechamento de contatos, quer seja por superaquecimento de algum componente, seja ele intencional ou causado por correntes de defeito.

9.2 Atmosfera Explosiva

Uma atmosfera é explosiva quando a proporção de gás, vapor, poeira ou fibras é tal, que uma faísca proveniente de um circuito elétrico ou o aquecimento de um aparelho provoca a explosão. Para que se inicie uma explosão, três elementos são necessários:

Combustível + oxigênio + faísca = explosão

9.3 Classificação das Áreas de Risco

De acordo com as normas ABNT/IEC, as áreas de risco são classificadas em:

Zona 0:

Região onde a ocorrência de mistura inflamável e/ou explosiva é contínua, ou existe por longos períodos. Por exemplo, a região interna de um tanque de combustível. A atmosfera explosiva está sempre presente.

Zona 1:

Região onde a probabilidade de ocorrência de mistura inflamável e/ou explosiva está associada à operação normal do equipamento e do processo. A atmosfera explosiva está frequentemente presente.

Zona 2:

Locais onde a presença de mistura inflamável e/ou explosiva não é provável de ocorrer, e se ocorrer, é por poucos períodos. Está associada à operação anormal do equipamento e do processo, perdas ou uso negligente. A atmosfera explosiva pode acidentalmente estar presente.

De acordo com a norma NEC/API 500, as áreas de risco são classificadas em divisões.

- Divisão 1 - Região onde se apresenta uma ALTA probabilidade de ocorrência de uma explosão.
- Divisão 2 - Região de menor probabilidade

Normas	Ocorrência de mistura inflamável		
	contínua	em condição normal	em condição anormal
IEC	Zona 0	Zona 1	Zona 2
NEC/API	Divisão 1		Divisão 2

Tabela 9.1 - Comparação entre ABNT/IEC e NEC/API

O processo ou armazenagem de poeira nos espaços confinados oferece risco potencial de explosão. Isso ocorre, quando misturada com o ar em forma de nuvens ou quando fica depositada sobre os equipamentos elétricos. Com relação à presença de poeira combustível, conforme a norma ABNT NBR IEC 61241-10, as áreas são classificadas em:

Zona 20:

Área na qual poeira combustível na forma de nuvem misturada com o ar está continuamente presente durante longos períodos.

Zona 21:

Área na qual poeira combustível na forma de nuvem misturada com o ar poderá estar presente durante a operação normal, ocorrendo ocasionalmente.

Zona 22

Área na qual poeira combustível na forma de nuvem é improvável que aconteça durante a operação normal, e se ocorrer será por curtos períodos.

Dentre os produtos que seus pós ou poeiras inflamáveis criam atmosferas explosivas no interior de ambientes confinados podemos citar o carvão, trigo, celulose, fibras e plásticos em partículas finamente divididas dentre outros.

9.3.1 Classes e Grupos das Áreas de Risco

Classes - Referem-se a natureza da mistura. O conceito de classes só é adotado pela norma NEC.

Grupos - O conceito de grupo está associado a composição química da mistura.

Classe I

Gases ou vapores explosivos. Conforme o tipo de gás ou vapor, temos:

- GRUPO A - acetileno
- GRUPO B - hidrogênio, butadieno, óxido de eteno
- GRUPO C - éter etílico, etileno
- GRUPO D - gasolina, nafta, solventes em geral.

Classe II

Poeiras combustíveis ou condutoras. Conforme o tipo de poeira, temos:

- GRUPO E
- GRUPO F
- GRUPO G

Classe III

Fibras e partículas leves e inflamáveis.

De acordo com a norma ABNT NBR IEC 60079-0, os grupos de risco são divididos em:

- Grupo I - Para minas suscetíveis à liberação de grisu (gás a base de metano).
- Grupo II - Para aplicação em outros locais com gases explosivos, sendo divididos em IIA, IIB e IIC.

- Grupo III – Para aplicação em locais com atmosfera explosiva de poeiras, sendo dividido em:
 - III A – Fibras combustíveis
 - III B – Poeiras não condutoras
 - III C – Poeiras condutoras

Gases	Grupo acetileno	Grupo hidrogênio	Grupo etano	Grupo propano
IEC	II C	II C	II B	II A
NEC/API	Classe I Gr A	Classe I Gr B	Classe I Gr C	Classe I Gr D

Tabela 9.2 - Correspondência entre ABNT/IEC e NEC/API para gases

Poeiras e fibras	Poeiras de alta condutividade	Poeiras de leve condutividade	Poeiras não condutoras	Fibras combustíveis
Normas				
ABNT NBR IEC	III C	III C	III B	III A
NEC/API	Classe II Gr E	Classe II Gr F	Classe II Gr G	Classe III

Tabela 9.3 - correspondência entre normas NBR/IEC e NEC/API para poeiras e fibras combustíveis

9.3.2 Tipo de Proteção do Invólucro

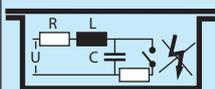
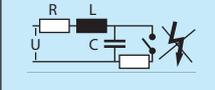
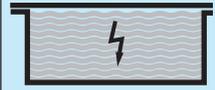
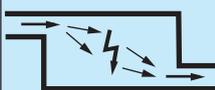
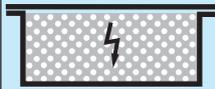
Símbolo do tipo	Definição	Representação simplificada
"d"	À prova de explosão Tipo de proteção em que as partes podem causar a ignição de uma atmosfera explosiva. São confinadas em um invólucro capaz de suportar a pressão desenvolvida durante uma explosão interna de uma mistura explosiva impedindo a transmissão da explosão para o meio externo.	
"e"	Segurança aumentada Medidas que são aplicadas, com o fim de evitar a possibilidade de temperatura excessiva e a aparição de arcos ou faíscas no interior e sobre as partes externas do material elétrico produzidas sob funcionamento normal.	
"i"	Segurança intrínseca "ia", "ib", "ic" Tipo de proteção, no qual nenhuma faísca nem qualquer efeito térmico, produzido nas condições de teste prescritas pela norma (funcionamento normal e condições de falha), é capaz de provocar a inflamação de um ambiente explosivo.	
"m"	Encapsulagem "ma", "mb", "mc" Tipo de proteção no qual as peças que podem inflamar um ambiente explosivo, por faíscas ou por aquecimento, são encapsuladas numa resina suficientemente resistente às influências ambientais, de tal maneira que o ambiente explosivo não pode ser inflamado.	
"n"	Tipo de proteção "n" "nA", "nC", "nR" Tipo de proteção aplicado a material elétrico de modo que, em funcionamento normal e em certas condições anormais específicas, não possa inflamar o ambiente explosivo. Há 3 categorias de materiais: sem produção de faíscas (nA), produção de faíscas (nC), encapsulados de respiração limitada (nR).	
"o"	Imersão em óleo Tipo de proteção, onde o equipamento elétrico ou partes do equipamento elétrico, estejam submersos por um líquido protetor de tal maneira que um atmosfera de gás explosiva que possa estar acima do mesmo ou fora do invólucro não possa causar explosão.	
"p"	Pressurizado "px", "py", "pz" Tipo de proteção que protege contra o ingresso de uma atmosfera externa para dentro do invólucro ou para dentro do ambiente, mantendo o gás protetor numa pressão acima da pressão da atmosfera externa.	
"q"	Preenchimento com areia Tipo de proteção no qual as partes capazes de incendiar uma atmosfera de gás explosivo são fixas e completamente envoltas pelo material de preenchimento para prevenir a ignição da atmosfera explosiva externa.	
"t"	Proteção por invólucro Tipo de proteção em que as partes que podem causar a ignição de uma atmosfera explosiva são confinados em um invólucro total ou parcialmente protegido contra o ingresso de poeiras e que a temperatura máxima de superfície é limitado.	

Tabela 9.5 - Tipo de proteção do invólucro

Atmosfera explosiva	ABNT / IEC	NEC
Gases ou vapores	Zona 0 e Zona 1	Classe I Divisão 1
	Zona 2	Classe I Divisão 2
Poeiras Combustíveis	Zona 20 e Zona 21	Classe II Divisão 1
	Zona 22	Classe II Divisão 2

Tabela 9.4 - Classificação de áreas conforme IEC e NEC

9.4 Classes de Temperatura

A temperatura máxima na superfície interna e/ou externa do equipamento elétrico deve ser sempre menor que a temperatura de ignição do gás ou vapor. Os gases podem ser classificados para as classes de temperatura de acordo com sua temperatura de ignição, onde a máxima temperatura de superfície da respectiva classe, deve ser menor que a temperatura dos gases correspondentes.

IEC		NEC		Temperatura de ignição dos gases e/ou vapores
Classes de temperatura	Temperatura máxima de superfície	Classes de temperatura	Temperatura máxima de superfície	
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

Tabela 9.6 - Classes de temperatura

9.5 Equipamentos para Áreas de Risco

Os quadros abaixo mostram a seleção dos equipamentos para as áreas classificadas de acordo com a norma ABNT NBR IEC 60079-14:

ABNT NBR IEC 60079-14	
Zona	Proteção possível
Zona 0	Ex "iA"
	Ex "mA"
	Equipamentos especialmente aprovados para Zona 0
Zona 1	Equipamentos certificados para Zona 0
	Ex "d"
	Ex "de"
	Ex "e"
	Ex "px", Ex "py"
	Ex "jB"
	Ex "q"
	Ex "o"
	Ex "mB"
Zona 2	Equipamentos certificados para Zona 0 e Zona 1
	Ex "pZ"
	Ex "iC"
	Ex "n"
	Ex "mC"

Tabela 9.7 - Tipos de proteção para atmosferas explosivas com gases inflamáveis.

De acordo com a norma NEC, a relação dos equipamentos está mostrada no quadro abaixo:

DIVISÃO 1	Equipamentos com tipo de proteção: <ul style="list-style-type: none"> ■ à prova de explosão Ex"d" ■ pressurização Ex"p" ■ imersão em óleo Ex"o" ■ segurança intrínseca Ex"i"
DIVISÃO 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ qualquer equipamento certificado para divisão 1 ■ equipamentos incapazes de gerar faíscas ou superfícies quentes em invólucros de uso geral

Tabela 9.8

9.6 Equipamentos de Segurança Aumentada

É o equipamento elétrico que, sob condições de operação não produz arcos, faíscas ou aquecimento suficiente para causar ignição da atmosfera explosiva para o qual foi projetado.

Tempo t_E - tempo necessário para que um enrolamento de corrente alternada, quando percorrido pela sua corrente de partida, atinja a sua temperatura limite, partindo da temperatura atingida em regime nominal, considerando a temperatura ambiente ao seu máximo. Abaixo, mostramos os gráficos que ilustram como devemos proceder a correta determinação do tempo " t_E " (figuras 9.1 e 9.2).

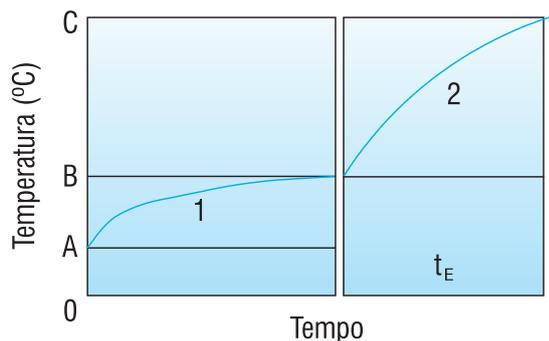


Figura 9.1 - Diagrama esquemático explicando o método de determinação do tempo " t_E "

- A - temperatura ambiente máxima
- B - temperatura em serviço nominal
- C - temperatura limite
- 1 - elevação da temperatura em serviço
- 2 - elevação da temperatura com rotor bloqueado

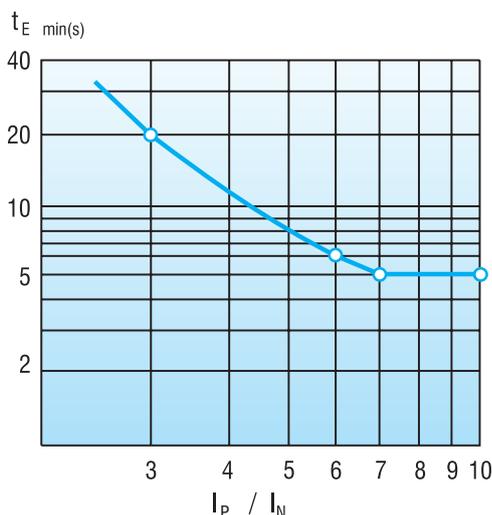


Figura 9.2 - Valor mínimo do tempo " t_E " em função da relação da corrente de partida I_P / I_N

9.7 Equipamentos à Prova de Explosão

É um tipo de proteção em que as partes que podem inflamar uma atmosfera explosiva, são confinadas em invólucros que podem suportar a pressão durante uma explosão interna de uma mistura explosiva e que previne a transmissão da explosão para uma atmosfera explosiva.

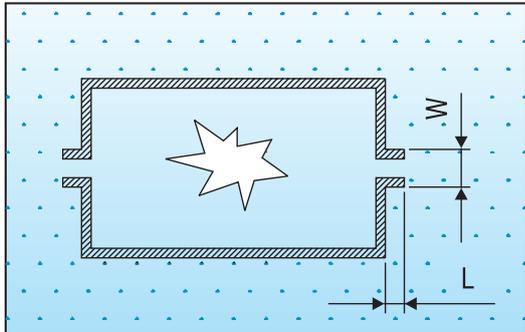


Figura 9.3 - Princípio da proteção

O motor elétrico de indução (de qualquer proteção), não é estanque, ou seja, troca ar com o meio externo. Quando em funcionamento, o motor se aquece e o ar em seu interior fica com uma pressão maior que a externa (o ar é expelido); quando é desligada a alimentação, o motor se resfria e a pressão interna diminui, permitindo a entrada de ar (que neste caso está contaminado). A proteção não permitirá que uma eventual explosão interna se propague ao ambiente externo. Para a segurança do sistema, a WEG controla os valores dos interstícios (tolerâncias entre encaixes) e as condições de acabamento das juntas, pois são responsáveis pelo volume de gases trocados entre o interior e exterior do motor.

10. Características Construtivas

10.1 Dimensões

As dimensões dos motores elétricos WEG são padronizadas de acordo com a ABNT NBR-15623 a qual acompanha a *International Electrotechnical Commission - IEC-60072*. Nestas normas a dimensão básica para a padronização das dimensões de montagem de máquinas elétricas girantes é a altura do plano da base ao centro da ponta do eixo, denominado pela letra H (Ver figura 10.1 abaixo).

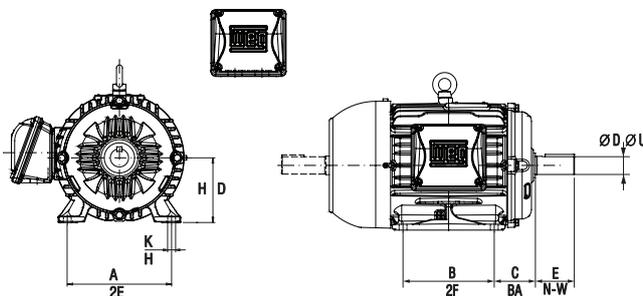


Figura 10.1

A cada altura da ponta de eixo H é associada uma dimensão C, distância do centro do furo dos pés do lado da ponta do eixo ao plano do encosto da ponta de eixo. A cada dimensão H, contudo, podem ser associadas várias dimensões B (distância entre centros dos furos dos pés), de forma que é possível ter-se motores mais “longos” ou mais “curtos”. A

dimensão A, distância entre centros dos furos dos pés, no sentido frontal, é única para valores de H até 315 mm, mas pode assumir múltiplos valores a partir da carcaça H igual a 355 mm. Para os clientes que exigem carcaças padronizadas pela norma NEMA, a tabela 10.1 faz a comparação entre as dimensões H - A - B - C - K - D - E da norma da ABNT/IEC e D, 2E, 2F, BA, H, U, N-W da norma NEMA.

ABNT / IEC NEMA	H D	A 2E	B 2F	C BA	K H	Ø D Ø U	E N-W
63	63	100	80	40	7	11j6	23
71	72	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	140	70	12	28j6	60
182 T	114,3	190,5	139,7	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	180	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
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
355 L	355	610	630	254	28	100m6	210
587	368,3	584,2	635	254	30	98,4	295,3

Tabela 10.1 - Comparação de dimensões ABNT/IEC e NEMA



10.2 Formas Construtivas Normalizadas

Entende-se por forma construtiva, como sendo o arranjo das partes construtivas das máquinas com relação à sua fixação, à disposição de seus mancais e à ponta de eixo, que são padronizadas pela NBR-5031, IEC 60034-7, DIN-42955 e NEMA MG 1-4.03. A ABNT NBR IEC 15623 e a IEC 60072 determinam que a caixa de ligação de um motor deve ficar situada de modo que a sua linha de centro se encontre num setor compreendido entre o topo do motor e 10 graus abaixo da linha de centro horizontal deste, do lado direito, quando o motor for visto do lado do acionamento. As tabelas a seguir indicam as diversas formas normalizadas.

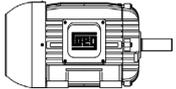
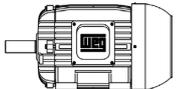
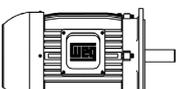
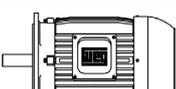
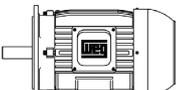
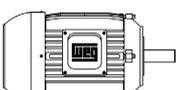
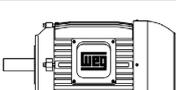
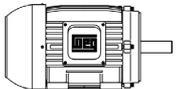
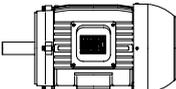
Figura	Símbolo para					Fixação ou montagem
	Designação WEG	DIN 42950	IEC 60034 Parte 7		Carcaça	
			Código I	Código II		
	B3D	B3	IM B3	IM 1001	com pés	montada sobre subestrutura (*)
	B3E					
	B5D	B5	IM B5	IM 3001	sem pés	fixada pelo flange "FF"
	B5E					
	B35D	B3/B5	IM B35	IM 2001	com pés	montada sobre subestrutura pelos pés, com fixação suplementar pelo flange "FF"
	B35E					
	B14D	B14	IM B14	IM 3601	sem pés	fixada pelo flange "C"
	B14E					
	B34D	B3/B14	IM B34	IM 2101	com pés	montado sobre subestrutura pelos pés, com fixação suplementar pelo flange "C"
	B34E					
	B6D	B6	IM B6	IM 1051	com pés	montado em parede, pés à esquerda olhando-se do lado do acionamento
	B6E					

Tabela 10.2a - Formas construtivas normalizadas (montagem horizontal)
 (*) Subestrutura: bases, placa de base, fundações, trilhos, pedestais, etc.

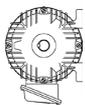
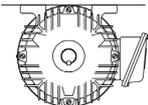
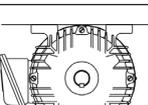
Figura	Símbolo para					Fixação ou montagem
	Designação WEG	DIN 42950	IEC 60034 Parte 7		Carcaça	
			Código I	Código II		
	B7D	B7	B7	IM 1061	com pés	Montado em paredépés à direita, olhando-se do lado do acionamento
	B7E					
	B8D	B8	IM B8	IM 1071	sem pés	fixada no teto
	B8E					

Tabela 10.2b - Formas construtivas normalizadas (montagem horizontal)

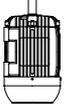
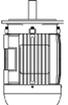
Figura	Símbolo para					Fixação ou montagem
	Designação WEG	DIN 42950	IEC 60034 Parte 7		Carcaça	
			Código I	Código II		
 (*)	V5	V5	IM V5	IM 1011	com pés	montada em parede ou sobre subestrutura
	V6	V6	IM V6	IM 1031	com pés	montada em parede ou sobre subestrutura
 (*)	V1	V1	IM V1	IM 3011	sem pés	fixada pelo flange "FF", para baixo
	V3	V3	IM V3	IM 3031	sem pés	fixada pelo flange "FF", para cima
 (*)	V15	V1/V5	IM V15	IM 2011	com pés	montada em parede com fixação suplementar pelo flange "FF", para baixo
	V36	V3/V6	IM V36	IM 2031	com pés	fixada em parede com fixação suplementar pelo flange "FF", para cima
 (*)	V18	V18	IM V18	IM 3611	sem pés	fixada pelo flange "C", para baixo
	V19	V19	IM V19	IM 3631	sem pés	fixada pelo flange "C", para cima

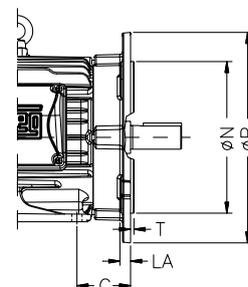
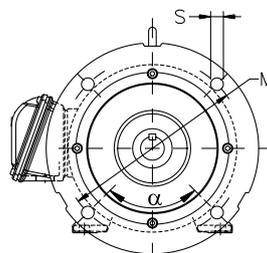
Tabela 10.3 - Formas construtivas normalizadas (montagem vertical)

Nota: Recomendamos a utilização do chapéu protetor para motores que operem na vertical com ponta de eixo para baixo e que fiquem expostos ao tempo. Recomendamos a utilização do chapéu de borracha na ponta de eixo (lado acoplado) na utilização de motores verticais com eixo para cima.

10.3 Dimensões dos Flanges

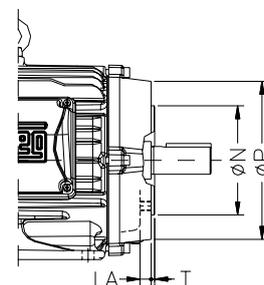
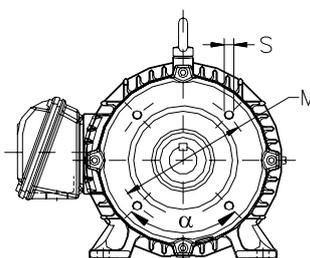
Flange “FF”

Flange “FF”									
Caraça	Flange	LA	M	N	P	S	T	α	Nº de furos
63	FF-115	9	115	95	140	10	3	45°	4
71	FF-130		130	110	160		10		
80	FF-165	10	165	130	200	12	3,5		
90						15	4		
100	FF-215	11	215	180	250	15	4		
112	FF-265	12	265	230	300	19	5		
132								19	5
160	FF-300	18	300	250	350	19	5		
180	FF-350		350	300	400				
200	FF-400	18	400	350	450	19	5	22°30'	8
225	FF-500		500	450	550				
250	FF-600		600	550	660				
280	FF-740		740	680	800				
315		22	600	550	660	24	6		
355	FF-740		740	680	800				



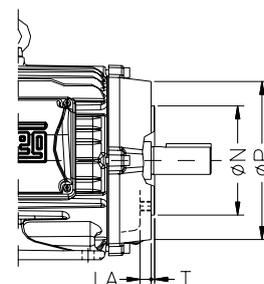
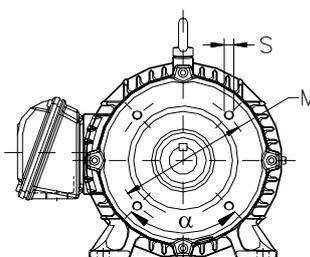
Flange “C”

Flange “C”									
Caraça	Flange	LA	M	N	P	S	T	α	Nº de furos
63	FC-95	8,5	95,2	76,2	143	UNC 1/4"x20	4	45°	4
71		10							
80		15							
90	FC-149	12	149,2	114,3	165	UNC 3/8"x16	6,3		
100		13,5							
112	FC-184	9	184,2	215,9	225	UNC 1/2"x13	6,3		
132		19,5							
160	FC-228	13,5	228,6	266,7	280	UNC 5/8"x11	6,3	22°30'	8
180	FC-279	18,5	279,4	317,5	395				
200			FC-355	355,6	406,4	455	6,3		
225	FC-368	33,5	368,3	419,1					
250			FC-355	355,6	406,4	455	6,3		
280	FC-368	33,5	368,3	419,1	455	6,3	22°30'	8	
315			FC-368	368,3					419,1
355	FC-368	33,5	368,3	419,1	455	6,3	22°30'	8	



“C-DIN” Flange

Flange “C-DIN”									
Caraça	Flange	LA	M	N	P	S	T	α	Nº de furos
63	C-90	9,5	75	60	90	M5	2,5	45°	4
71	C-105	8	85	70	105	M6			
80	C-120	10,5	100	80	120	M8	3		
90	C-140	12	115	95	140				
100	C-160	13,5	130	110	160	M10	3,5		
112									
132	C-200	15,5	165	130	200	M10	3,5		



10.4 Pintura

O plano de pintura abaixo, apresenta as soluções que são adotadas para cada aplicação.

Equivalências dos Planos de Pintura WEG x ISO 12944							
Planos de pintura (TBG 0122)	Classificação da corrosividade do ambiente ISO 12944-2	Durabilidade estimada (anos)			Espessura total (µm) ISO 12944	Exemplos considerando ambientes com clima tipicamente temperado	
		5	5 a 15	> 15		Exterior	Interior
203A	C2	L			70-90	Atmosferas com baixo nível de poluição. Na maioria, áreas rurais.	Ambientes frios onde podem ocorrer condensação, ex: depósitos, salas esportivas.
207N	C3		M		80-150	Atmosferas urbanas ou industriais, poluição moderada com dióxido de enxofre. Área litorânea com baixa salinidade.	Salas de produção com alta umidade e poluição no ar. Ex: alimentos, lavanderias, cervejarias, etc.
205E	C3		M		80-150		
202P	C3			H	80-150		
202E	C3			H	80-150		
212P	C5 (I e M)			H	280-320	C5I: Área industrial com elevada umidade e atmosfera agressiva.	C5I: Edifícios ou áreas que podem ocorrer condensação e alta poluição
212E	C5 (I e M)			H	280-320		
214P	C5 (I e M)			H	120-200	C5M: Área litorânea e offshore com elevada salinidade.	C5M: Edifícios ou áreas que podem ocorrer condensação e alta poluição.
216P	C5 (I e M)			H	280-320		

Tabela 10.4 - Planos de pintura

Nota: os planos de pintura WEG atendem às normas Petrobras



10.4.1 Pintura Tropicalizada ou Tropicalização

Altos índices de umidade podem levar a um desgaste prematuro do sistema de isolamento, que é o principal responsável pela vida útil do motor. Ambientes com até 95% de umidade relativa não requerem proteções adicionais além da resistência de aquecimento para evitar a condensação de água no interior do motor. Entretanto, para ambientes com níveis de umidade superiores a 95% aplica-se nas partes internas do motor uma pintura epóxi conhecida como pintura tropicalizada.

11. Seleção e Aplicação dos Motores Trifásicos

Na engenharia de aplicação de motores é comum e, em muitos casos prático, comparar as exigências da carga com as características do motor. Existem muitas aplicações que podem ser corretamente acionadas por mais de um tipo de motor, e a seleção de um determinado tipo, nem sempre exclui o uso de outros tipos.

Com o advento do computador, o cálculo pode ser aprimorado, obtendo-se resultados precisos que resultam em máquinas dimensionadas de maneira mais econômica.

Os motores de indução WEG, de gaiola ou de anel, de baixa e média tensão, encontram vasto campo de aplicação, notoriamente nos setores de siderúrgica, mineração, papel e celulose, saneamento, químico e petroquímico, cimento entre outros, tornando-se cada vez mais importante a seleção do tipo adequado para cada aplicação. A seleção do tipo adequado de motor, com respeito ao conjugado, fator de potência, rendimento e elevação de temperatura, isolamento, tensão e grau de proteção mecânica, somente pode ser feita, após uma análise cuidadosa, considerando parâmetros como:

- Custo inicial
- Capacidade da rede
- Necessidade da correção do fator de potência
- Conjugados requeridos
- Efeito da inércia da carga
- Necessidade ou não de regulação de velocidade
- Exposição da máquina em ambientes úmidos, poluídos e/ou agressivos



O motor assíncrono de gaiola é o mais empregado em qualquer aplicação industrial, devido à sua construção robusta e simples, além de ser a solução mais econômica, tanto em termos de motores como de comando e proteção.

O meio mais adequado na atualidade para reduzir os gastos de energia é usar motores WEG da linha Premium e Super Premium. Está comprovado, por testes, que estes motores especiais têm até 30% a menos de perdas, o que significa uma real economia. Estes motores são projetados e construídos com a mais alta tecnologia, com o objetivo de reduzir perdas e incrementar o rendimento. Isto proporciona baixo consumo de energia e menor despesa. São os mais adequados nas aplicações com variação de tensão. São testados de acordo com as normas NBR 5383 e IEC 60034-1 e seus valores de rendimento certificados e estampados na placa de identificação do motor. A técnica de ensaio é o método B da IEEE STD 112. Os valores de rendimento são obtidos através do método de separação de perdas de acordo com as normas NBR 5383 e IEC 60034-1

Os motores Premium, são padronizados conforme as normas IEC, mantendo a relação potência/carcaça, sendo portanto, intercambiáveis com todos os motores normalizados existentes no mercado.

Tipo	Motor de indução de gaiola	Motor de indução de anéis
Projeto	Rotor não enrolamento	Rotor enrolamento
Corrente de partida	Alta	Baixa
Conjugado de partida	Baixo	Alto
Corrente de partida / corrente nominal	Alta	Baixa
Conjugado máximo	> 160% do conjugado nominal	> 160% do conjugado nominal
Rendimento	Alto	Alto
Equipamento de partida	Simple para partida direta	Relativamente simples
Equipamento de proteção	Simple	Simple
Espaço requerido	Pequeno	Reostato requer um espaço grande
Manutenção	Pequena	Nos anéis e escovas - frequente
Custo	Baixo	Alto

Tabela 11.1 - Comparação entre diferentes tipos de máquinas

Na seleção correta dos motores, é importante considerar as características técnicas de aplicação e as características de carga, meio ambiente e alimentação no que se refere a aspectos mecânicos para calcular:

a) Conjugado de partida

Conjugado requerido para vencer a inércia estática da máquina e produzir movimento. Para que uma carga, partindo da velocidade zero, atinja a sua velocidade nominal, é necessário que o conjugado do motor seja sempre superior ao conjugado da carga.

b) Conjugado de aceleração

Conjugado necessário para acelerar a carga à velocidade nominal. O conjugado do motor deve ser sempre maior que o conjugado de carga, em todos os pontos entre zero e a rotação nominal. No ponto de interseção das duas curvas, o conjugado de aceleração é nulo, ou seja, é atingido o ponto de equilíbrio a partir do qual a velocidade permanece constante. Este ponto de interseção entre as duas curvas deve corresponder a velocidade nominal.

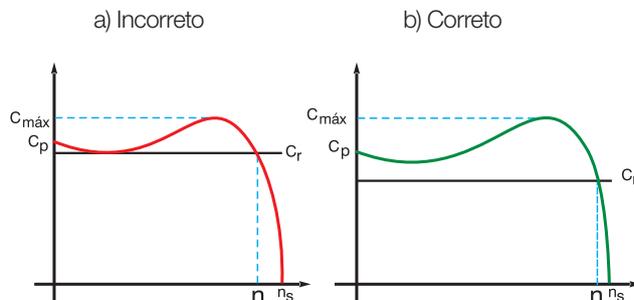


Figura 11.1 - Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga

Onde: $C_{m\max}$ = conjugado máximo
 C_p = conjugado de partida
 C_r = conjugado resistente
 n_s = rotação síncrona
 n = rotação nominal

O conjugado de aceleração assume valores bastante diferentes na fase de partida. O conjugado médio de aceleração (C_{aj}) obtém-se a partir da diferença entre o conjugado do motor e o conjugado resistente da carga.

c) Conjugado nominal

Conjugado nominal necessário para mover a carga em condições de funcionamento à velocidade específica. O conjugado requerido para funcionamento normal de uma máquina pode ser constante ou varia entre amplos limites. Para conjugados variáveis, o conjugado máximo deve ser suficiente para suportar picos momentâneos de carga. As características de funcionamento de uma máquina, quanto ao conjugado, podem dividir-se em três classes:

■ Conjugado constante

Nas máquinas deste tipo, o conjugado permanece constante durante a variação da velocidade e a potência aumenta proporcionalmente com a velocidade.

————— Conjugado requerido pela máquina
 - - - - - Potência requerida pela máquina

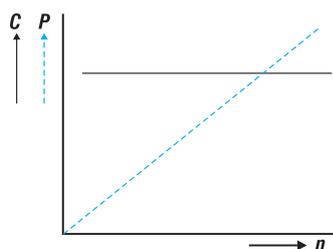


Figura 11.2

C = Conjugado resistente: constante
 P = Potência: proporcional à velocidade (n)

■ **Conjugado variável**

Encontram-se casos de conjugado variável nas bombas e nos ventiladores.

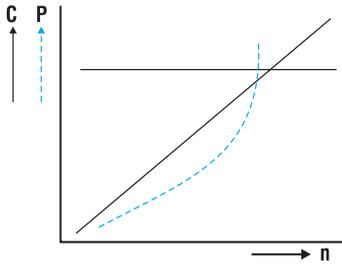


Figura 11.3

C = Conjugado resistente: proporcional à velocidade (n)
P = Potência: proporcional à velocidade ao quadrado (n²)

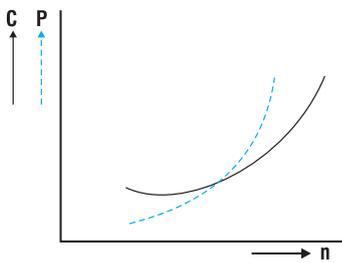


Figura 11.4

C = Conjugado resistente: proporcional à velocidade ao quadrado (n²)
P = Potência: proporcional à velocidade ao cubo (n³)

■ **Potência constante**

As aplicações de potência constante requerem uma potência igual à nominal para qualquer velocidade.

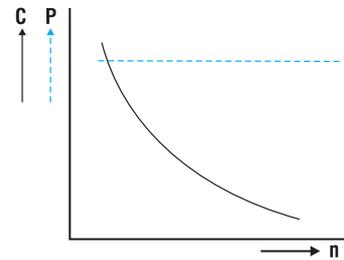


Figura 11.5

C = Conjugado resistente: inversamente proporcional à velocidade ao quadrado (n²)
P = Potência constante

11.1 Seleção do Tipo de Motor para Diferentes Cargas

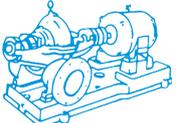
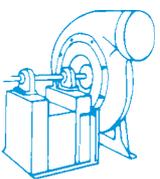
Tipos de carga	Conjugado requerido		Característica da carga	Tipo de motor usado
	Partida	Máximo		
 Bombas centrífugas, ventiladores, furadeiras, compressores, retificadoras, trituradores.	Entre 1 e 1,5 vezes o conjugado nominal	Valores máximos entre 220% e 250% do nominal	<ul style="list-style-type: none"> Condições de partidas fáceis, tais como: engrenagens intermediárias, baixa inércia ou uso de acoplamentos especiais, simplificam a partida. Máquinas centrífugas, tais como: bombas onde o conjugado aumenta ao quadrado da velocidade até um máximo, conseguido na velocidade nominal. Na velocidade nominal pode estar sujeita a pequenas sobrecargas. 	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado normal Corrente de partida normal Categoria N
 Bombas alternativas, compressores, carregadores, alimentadores, laminadores de barras.	Entre 2 e 3 vezes o conjugado nominal	Não maior que 2 vezes o conjugado nominal	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado de partida alto para vencer a elevada inércia, contra pressão, atrito de parada, rigidez nos processos de materiais ou condições mecânicas similares. Durante a aceleração, o conjugado exigido cai para o valor do conjugado nominal. É desaconselhável sujeitar o motor a sobrecargas, durante a velocidade nominal. 	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado de partida alto Corrente de partida normal Categoria N
 Prensas puncionadoras, guindastes, pontes rolantes, elevadores de talha, tesouras mecânicas, bombas de óleo para poços.	3 vezes o conjugado nominal	Requer 2 a 3 vezes o conjugado nominal. São consideradas perdas durante os picos de carga.	<ul style="list-style-type: none"> Cargas intermitentes, as quais requerem conjugado de partida, alto ou baixo. Requerem partidas frequentes, paradas e reversões. Máquinas acionadas, tais como: prensas puncionadoras, que podem usar volantes para suportar os picos de potência. Pequena regulagem é conveniente para amenizar os picos de potências e reduzir os esforços mecânicos no equipamento acionado. A alimentação precisa ser protegida dos picos de potências, resultantes das flutuações de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado de partida alto Corrente de partida normal Alto escorregamento Categoria D
 Ventiladores, máquinas-ferramentas.	Algumas vezes precisa-se somente de parte do conjugado nominal; e outros, muitas vezes o conjugado nominal.	1 ou 2 vezes o conjugado nominal em cada velocidade.	<ul style="list-style-type: none"> Duas, três ou quatro velocidades fixas são suficientes. Não é necessário o ajuste de velocidade. O conjugado de partida pode ser pequeno (ventiladores) ou alto (transportadores). As características de funcionamento em várias velocidades, podem variar entre potência constante, conjugado constante ou de conjugado variável. Máquinas de cortar metal tem potência constante; Cargas de atrito são típicas de conjugado constante; Ventiladores são de conjugado variável. 	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado normal ou alto (velocidades múltiplas)

Tabela 11.2 - Características para diferentes cargas.

11.2 Níveis de Rendimentos Exigidos no Brasil

11.2.1 O Programa de Eficiência Energética no País

O assunto eficiência energética começou a ser discutido nos EUA após a crise energética na década de 70. No Brasil, o governo começou a trabalhar no assunto após o famoso apagão de 2001. Desde então foram criados mecanismos para que todos os fabricantes de produtos eletro-eletrônicos pudessem contribuir para a diminuição do consumo de energia elétrica. O governo aprovou diversas leis que obrigavam diversos fabricantes de máquinas e equipamentos a projetarem produtos mais eficientes.

A estrutura do consumo de energia elétrica no Brasil apresenta-se da seguinte maneira⁽¹⁾:

Industrial	43,2% (128,6 TWH)
Residencial	25,3% (75,9 TWH)
Comercial	15,8% (47,4 TWH)
Outros	15,7% (47,1 TWH)
TOTAL	100% (300 TWH)

Tabela 11.3 - Consumo de energia elétrica no Brasil.

A tabela acima mostra que o setor industrial é responsável por quase metade de todo consumo de energia no país, sendo os motores elétricos responsáveis por aproximadamente 55%⁽¹⁾. Isso significa que quase ¼ de toda energia elétrica consumida no país provém do consumo de motores elétricos industriais.

Níveis mínimos de rendimento

Em 2001 o governo estabeleceu através da Lei 10.295 os níveis mínimos de eficiência energética para máquinas e equipamentos consumidores de energia. No caso dos motores elétricos existiam duas referências para rendimentos: padrão e alto rendimento. Em 2005, o governo aprovou a portaria 553 que estabelece a partir de 2010 uma nova referência de rendimento mínimo, bem parecido com o alto rendimento. Dessa forma, fabricantes de máquinas e consumidores finais são obrigados a adquirirem produtos que atendam aos novos níveis de rendimento mínimos estabelecidos.

11.2.2 Motores Premium e Super Premium WEG

Conforme mostrado no tópico 1.2.6, em todos os motores elétricos, a potência elétrica absorvida é sempre maior que a potência mecânica disponível na ponta de eixo, ou seja, a potência consumida na rede elétrica é sempre maior que a potência do motor. Essa diferença deve-se às diversas perdas que o motor possui, pois se trata de um conversor eletromecânico.

O rendimento está relacionado a essas perdas inerentes ao funcionamento do próprio motor. Quanto maior o rendimento do motor, menor são estas perdas. De maneira mais fácil, quanto maior o rendimento do motor, menor será o gasto com energia.

Os motores Premium e Super Premium foram desenvolvidos para proporcionar um menor consumo de energia elétrica da rede devido ao seu elevado rendimento. Construtivamente estes motores possuem as seguintes características:

- Chapas magnéticas de melhor qualidade;
- Maior volume de material condutor, que reduz a temperatura de operação;
- Rotores tratados termicamente, reduzindo perdas rotóricas;
- Altos fatores de enchimento das ranhuras, que provêm melhor dissipação do calor gerado;
- Projeto das ranhuras do motor otimizado para incrementar o rendimento.

As linhas Premium e Super Premium seguem o padrão, dos motores instalados, de potência/polaridade e tamanho de carcaça*, facilitando a troca/reposição de motores em operação.

** Alguns motores das linhas Premium e Super Premium podem apresentar comprimentos maiores.*

Porque usar motores Premium e Super Premium

Várias são as vantagens dos motores Premium e Super Premium, mas vamos destacar algumas delas:

- a) Possui todas as vantagens da plataforma W22 + fator de serviço de 1,25. Produto inovador com maior reserva de potência para eventuais sobrecargas;
- b) Vida útil prolongada. O projeto da plataforma W22 permite trabalhar durante um período maior;
- c) Possui o maior rendimento do mercado. Produto que reduz consideravelmente a conta de energia;
- d) Possui o menor custo operacional do mercado. As características da plataforma W22 aliadas ao maior rendimento reduzem os custos envolvendo manutenção e energia elétrica;
- e) Produto sustentável. Por consumir menos energia ele ajuda a diminuir o impacto ambiental.

LEI DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA REFERENTE AOS RENDIMENTOS MÍNIMOS DE MOTORES ELÉTRICOS

W22 Plus - Rendimento atende ao estabelecido na Portaria Interministerial nº 553.

W22 Premium - Motor de indução que supera a Portaria Interministerial nº 553.

W22 Super Premium - Motor de indução de altíssima eficiência - maior rendimento encontrado no mercado. Supera em dois níveis a Portaria Interministerial nº 553.

"Dispõe sobre a regulamentação específica que define os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução, rotor de gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados, para comercialização ou uso no Brasil."

Neste decreto, estão definidos os critérios de rendimento não só para os motores, mas também para as máquinas e equipamentos importados que tem algum motor elétrico acoplado.

O decreto na íntegra encontra-se no site: www.weg.net/green

11.2.3 WMagnet Drive System®

O WMagnet Drive System® é um conjunto composto por um motor de corrente alternada, trifásico, síncrono com rotor de ímãs permanentes e por um inversor de frequência*.

A utilização de ímãs permanentes elimina as perdas Joule no rotor obtendo assim níveis de rendimento mais elevados, comparados ao nível de rendimento IE-4. Com a eliminação dessas perdas, o motor trabalha com temperatura reduzida proporcionando assim a redução do tamanho da carcaça e aumento da vida útil do motor.

A utilização do inversor de frequência possibilita controle contínuo da velocidade do motor. Fornece torque constante em toda a sua faixa de rotação, inclusive em 0 rpm, sem a necessidade de ventilação forçada em baixas frequências. Devido à forma construtiva do rotor, à tecnologia do processo de balanceamento utilizado e à redução de carcaça, os motores WMagnet apresentam baixos níveis de vibração e ruído quando comparados com motores de indução da mesma potência.



Figura 11.6

*Os motores WMagnet são acionados somente através de uma linha de inversores de frequência CFW-11, desenvolvida com software específico para esta função.

11.3 Aplicação de Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência

O acionamento de motores elétricos de indução por meio de inversores de frequência (denominados também conversores estáticos de frequência) é uma solução amplamente utilizada na indústria, e que se constitui atualmente no método mais eficiente para o controle de velocidade dos motores de indução. Tais aplicações fornecem uma série de benefícios, comparadas a outros métodos de variação de velocidade. Estas, porém, dependem de um dimensionamento adequado para que possam ser efetivamente vantajosas na comparação entre eficiência energética e custos. Dentre os muitos benefícios estão a redução de custos, o controle à distância, a versatilidade, o aumento de qualidade, de produtividade e a melhor utilização da energia.

11.3.1 Aspectos Normativos

Com o grande avanço verificado nas aplicações de motores elétricos com inversores de frequência torna-se cada vez maior a necessidade de se elaborar e adotar normas que padronizem os procedimentos de avaliação desses acionamentos. Ainda não existe uma norma nacional que estabeleça critérios para o uso de conversores eletrônicos no acionamento de máquinas CA.

No entanto, as principais normas internacionais que

abordam o assunto são:

- **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 used with adjustable-voltage or adjustable-frequency controls or both
- **NEMA MG1** - Part 31: Definite purpose inverter-fed polyphase motor

11.3.2 Variação da Velocidade do Motor por Meio de Inversores de Frequência

A relação entre a rotação, a frequência de alimentação, o número de polos e o escorregamento de um motor de indução obedece à seguinte equação:

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

onde: n = rotação [rpm]
 f = frequência da rede [Hz]
 p = número de polos
 s = escorregamento

A análise da fórmula mostra que a melhor maneira de se variar a velocidade de um motor de indução é por meio da variação da frequência de alimentação. Os inversores de frequência transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e consequentemente a velocidade mecânica do motor. Dessa forma, o inversor atua como uma fonte de frequência variável para o motor. Pela teoria do motor de indução, o torque eletromagnético desenvolvido obedece à seguinte equação:

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

E, desprezando-se a queda de tensão na impedância do enrolamento estático, o seu fluxo magnetizante vale:

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

onde: T : torque ou conjugado disponível na ponta de eixo (N.m)
 Φ_m : fluxo de magnetização (Wb)
 I_2 : corrente rotórica (A) (depende da carga)
 V_1 : tensão estatórica (V)
 $k1$ e $k2$: constantes (dependem do material e do projeto)

No entanto, para que o motor possa trabalhar em uma faixa de velocidades, não basta variar a frequência de alimentação. Deve-se variar também a amplitude da tensão de alimentação, de maneira proporcional à variação de frequência. Assim, o fluxo e, por conseguinte, o torque eletromagnético do motor, permanecem constantes, enquanto o escorregamento é mantido. Dessa forma, basicamente a variação da relação V/f é linear até a frequência base (nominal) de operação do motor. Acima dessa, a tensão, que é igual à nominal do motor, permanece constante e há apenas a variação da frequência estatórica.

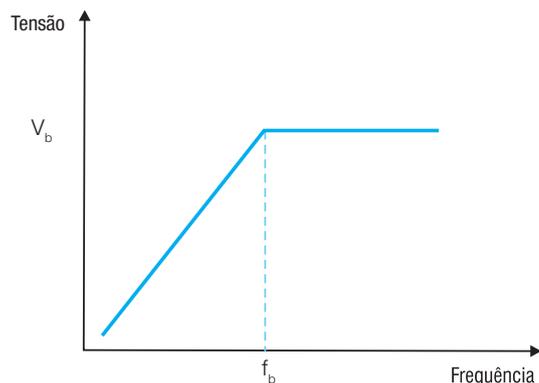


Figura 11.7

Assim, acima da frequência base de operação caracteriza-se a região de enfraquecimento de campo, na qual o fluxo diminui, provocando redução de torque. O torque fornecido pelo motor, portanto, é constante até a frequência base de operação, decrescendo gradativamente nas frequências de operação acima desta.

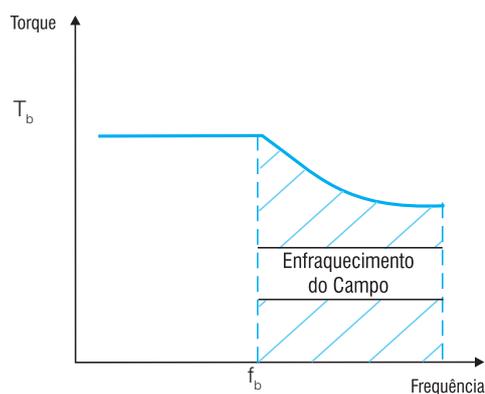


Figura 11.8

Como a potência é o resultado do produto do torque pela rotação, a potência útil do motor cresce linearmente até a frequência base e permanece constante acima desta.

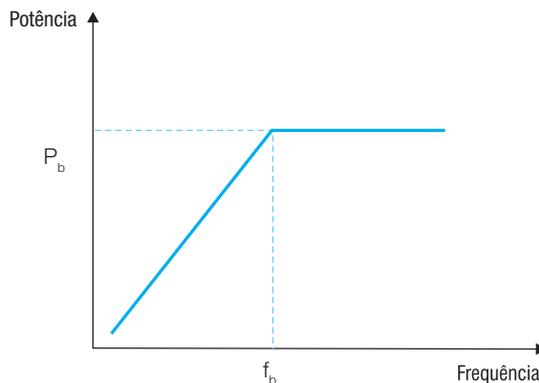


Figura 11.9

11.3.3 Características dos Inversores de Frequência

A obtenção da tensão e frequência desejadas por meio dos inversores de frequência passa basicamente por três estágios:

- Ponte de diodos - Retificação (transformação CA – CC) da tensão proveniente da rede de alimentação;
- Filtro ou Link CC - Alisamento/regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores;
- Transistores IGBT - Inversão (transformação CC – CA) da tensão do link CC por meio de técnicas de modulação por largura de pulso (PWM). Este tipo de modulação permite a variação da tensão/frequência de saída pela ação de transistores (chaves eletrônicas), sem afetar a tensão do link CC.

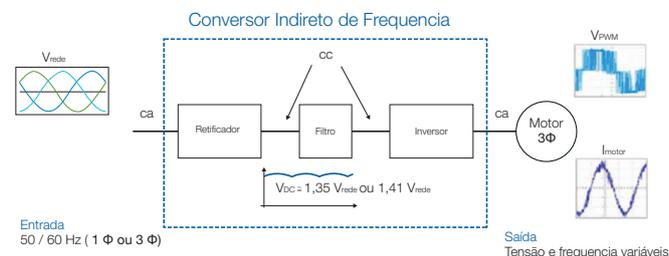


Figura 11.10

11.3.3.1 Modos de Controle

Basicamente existem dois tipos de controle dos inversores eletrônicos: o escalar e o vetorial.

O controle escalar baseia-se no conceito original do inversor de frequência: impõe no motor uma determinada relação tensão/frequência, visando manter o fluxo magnético do motor aproximadamente constante. Aplicável quando não há necessidade de respostas rápidas a comandos de torque e velocidade, esse modo de controle é particularmente interessante quando há conexão de múltiplos motores a um único inversor. O controle é realizado em malha aberta e a precisão da velocidade é função do escorregamento do motor, o qual varia com a carga. Para melhorar o desempenho do motor nas baixas velocidades, alguns inversores possuem funções especiais como a compensação de escorregamento (que atenua a variação da velocidade em função da carga) e o boost de tensão

(aumento da relação V/f para compensar o efeito da queda de tensão na resistência estática e manter a capacidade de torque do motor) em baixas rotações. Esse controle é o mais utilizado devido à sua simplicidade e devido ao fato de que a grande maioria das aplicações não requer alta precisão e/ou rapidez no controle da velocidade.

O controle vetorial possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle do torque e da velocidade do motor. O controle decompõe a corrente do motor em dois vetores: um que produz o fluxo magnetizante e outro que produz torque, regulando separadamente o torque e o fluxo. O controle vetorial pode ser realizado em malha aberta ("sensorless") ou em malha fechada (com realimentação).

- Com sensor de velocidade – requer a instalação de um sensor de velocidade (por exemplo, um encoder incremental) no motor. Esse tipo de controle permite a maior precisão possível no controle da velocidade e do torque, inclusive em rotação zero.
- Sensorless – tem a vantagem de ser mais simples do que o controle com sensor, porém, apresenta limitações de torque principalmente em baixíssimas rotações. Em velocidades maiores é praticamente tão bom quanto o controle vetorial com realimentação.

11.3.3.2 Harmônicas

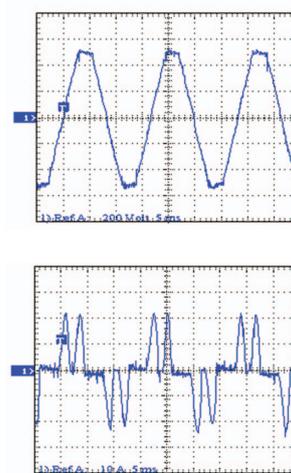
O sistema (motor + inversor) é visto pela fonte de alimentação como uma carga não linear, cuja corrente possui harmônicas. De forma geral, considera-se que o retificador produz harmônicas características de ordem $h = np \pm 1$ no lado CA, assim, no caso da ponte retificadora com 6 diodos (6 pulsos), as principais harmônicas geradas são a 5ª e a 7ª, cujas amplitudes podem variar de 10% a 40% da fundamental dependendo da impedância de rede. Já para retificadores de 12 pulsos (12 diodos) as harmônicas mais expressivas são a 11ª e a 13ª. As harmônicas superiores geralmente possuem menor amplitude e são mais fáceis de filtrar. A maioria dos inversores de baixa tensão comerciais, entretanto, são de 6 pulsos.

O parâmetro que quantifica o distúrbio causado pelas harmônicas na rede de alimentação é o THD (Distorção Harmônica Total), o qual é geralmente fornecido pelo fabricante do inversor e definido como:

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

onde: A_h : valores eficazes das componentes harmônicas
 A_1 : valor eficaz da componente fundamental
 h : ordem da harmônica

A norma IEEE Std.512 recomenda valores máximos para as harmônicas de corrente geradas por um equipamento elétrico. A maioria dos fabricantes de inversores atuais toma precauções no projeto dos seus equipamentos para garantir que os limites de THD estabelecidos por essa norma sejam respeitados.

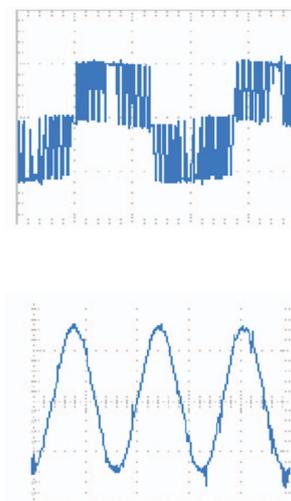


Forma de onda típica de tensão na entrada de um inversor PWM de 6 pulsos (frequência da rede 50 Hz ou 60 Hz)

Figura 11.11

11.3.4 Influência do Inversor no Desempenho do Motor

O motor de indução acionado por inversor PWM está sujeito a harmônicas que podem acarretar aumento de perdas e temperatura, assim como dos níveis de vibração e ruído, em comparação com a condição de alimentação senoidal. A influência do inversor sobre o motor depende de uma série de fatores relacionados com o controle, tais como a frequência de chaveamento, a largura efetiva, e o número de pulsos dentre outros.



Forma de onda típica de corrente nos terminais do motor alimentado com tensão PWM

Figura 11.12

Basicamente, para reduzir as harmônicas geradas por um inversor de frequência PWM, existem as seguintes soluções: instalação de filtros de saída (reatâncias de carga, filtros dV/dt, filtros senoidais, etc.), utilização de inversor com maior número de níveis (topologias mais sofisticadas), melhoria na qualidade da modulação PWM (aprimoramento do padrão de pulsos) e aumento da frequência de chaveamento.

Além disso, quando da alimentação do motor por inversor, podem aparecer outros efeitos, que não se devem especificamente às harmônicas, mas que são também relevantes e não devem ser desprezados, tais como o stress do sistema de isolamento e a circulação de corrente pelos mancais.

Considerações em relação ao rendimento

A falta de uma norma que especifique o procedimento de ensaio para avaliação do rendimento do sistema (inversor + motor) permite que o ensaio seja realizado de diferentes maneiras. Portanto, os resultados obtidos não devem influenciar na aceitação ou não do motor, exceto mediante acordo entre fabricante e comprador, conforme colocam as normas internacionais. A experiência mostra, porém, que de maneira geral as seguintes observações são válidas:

- O motor de indução, quando alimentado por um inversor de frequência PWM, tem seu rendimento diminuído, em relação a um motor alimentado por tensão puramente senoidal, devido ao aumento nas perdas ocasionado pelas harmônicas.
- Em aplicações de motores com inversores deve ser avaliado o rendimento do sistema (inversor + motor) e não apenas do motor.
- Devem ser consideradas as características do inversor e do motor, tais como: frequência de operação, frequência de chaveamento, condição de carga e potência do motor, taxa de distorção harmônica do sinal fornecido pelo inversor, etc.
- Instrumentos especiais, capazes de medir o valor eficaz verdadeiro (true RMS) das grandezas elétricas, devem ser utilizados.
- O aumento da frequência de chaveamento tende a diminuir o rendimento do inversor e aumentar o rendimento do motor.

Influência do inversor na elevação de temperatura do motor

O motor de indução pode apresentar uma elevação de temperatura maior, quando alimentado por inversor, do que quando alimentado com tensão senoidal. Essa sobrelevação de temperatura é decorrente do aumento das perdas do motor, em função das componentes harmônicas do sinal PWM, aliada à redução da ventilação quando da operação do motor autoventilado em baixas frequências. Basicamente existem as seguintes soluções para evitar o sobreaquecimento do motor:

- Redução do torque nominal (sobredimensionamento do motor);
- Utilização de sistema de ventilação independente;
- Utilização do “fluxo ótimo” (solução exclusiva WEG).

Crítérios de redução de torque (derating)

Para manter a temperatura dos motores de indução WEG dentro de níveis aceitáveis, quando alimentados por inversor de frequência, devem ser obedecidos os limites de carga apresentados nas figuras 11.13 e 11.14.

Nota: motores para áreas classificadas devem ser avaliados caso a caso e a WEG deve ser consultada.

Fluxo Ótimo

A solução fluxo ótimo foi desenvolvida com o objetivo de tornar os motores WEG aptos a operarem em baixas velocidades com torque constante, mantendo sua temperatura dentro dos limites da classe térmica, sem a necessidade de ventilação forçada ou sobredimensionamento da carcaça.

O estudo da composição das perdas nos motores elétricos e da sua relação com a frequência, o fluxo, a corrente e a variação de velocidade permitiu a determinação de um valor ótimo de fluxo para cada rotação.

A incorporação da solução obtida nos inversores CFW09 e CFW11 permite que haja uma contínua minimização das perdas do motor ao longo de toda a faixa de operação, a qual é realizada automaticamente pelo inversor.

Importante!

Essa solução não deve ser utilizada com cargas de torque variável ou acima da frequência base e só é possível quando:

- Os motores das linhas Premium e Super Premium (atendem ao nível IE3 ou acima)
- O motor é alimentado por inversor de frequência WEG (CFW11 ou CFW09 versão 2.40 ou acima);
- É utilizado controle vetorial sensorless.

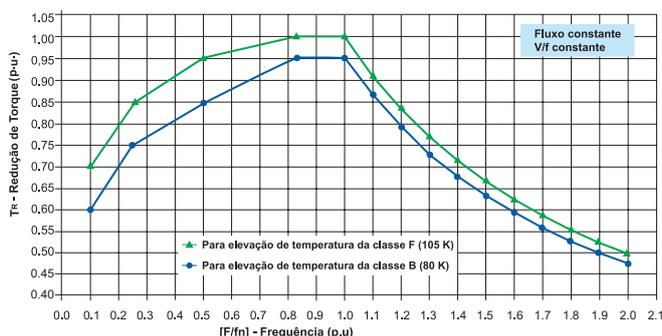


Figura 11.13 - Condição de fluxo constante

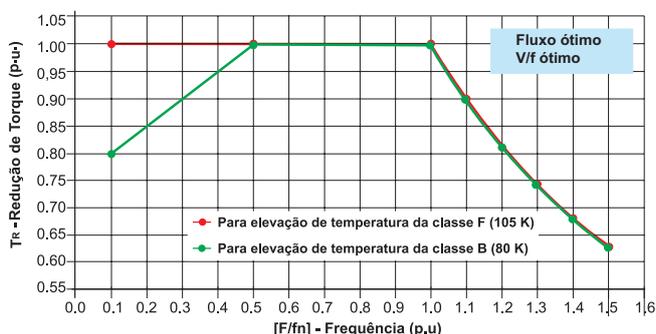


Figura 11.14 - Condição de fluxo ótimo

Os inversores de frequência modernos utilizam transistores de potência (normalmente IGBTs), cujos chaveamentos ocorrem em velocidades muito elevadas, em frequências da ordem de kHz. Para atingirem tais chaveamentos, os transistores possuem tempos de início de condução e bloqueio muito rápidos, que resultam em pulsos de tensão com elevado dV/dt (taxa de variação da tensão no tempo). Quando esses inversores são utilizados em conjunto com um motor de indução, os pulsos, em combinação com as impedâncias do cabo e do motor, podem gerar nos terminais do motor sobretensões (*overshoots*) repetitivas, que reduzem a vida útil do sistema isolante. Os *overshoots* afetam especialmente o isolamento entre espiras de enrolamentos randômicos e seu valor é determinado, basicamente, pelos seguintes fatores: tempo de subida (*rise time*) do pulso de tensão, comprimento do cabo, mínimo tempo entre pulsos, frequência de chaveamento e o uso de múltiplos motores.

Crítérios de isolamento

Na utilização de motores de indução trifásicos de baixa tensão WEG com inversores devem ser obedecidos os critérios definidos a seguir. Se alguma das condições apresentadas na tabela não for satisfeita, deve ser instalado filtro entre o inversor e o motor.

Nota: motores para áreas classificadas devem ser avaliados caso a caso e a WEG deve ser consultada.

Tensão nominal do motor	Tensão de pico nos terminais do motor (fase-fase)	dV/dt* nos terminais do motor (fase-fase)	Rise Time*	Tempo mínimo entre pulsos
$V_{NOM} \leq 460 \text{ V}$	$\leq 1600 \text{ V}$	$\leq 5200 \text{ V}/\mu\text{s}$	$\geq 0,1 \mu\text{s}$	$\geq 6 \mu\text{s}$
$460 \text{ V} < V_{NOM} \leq 575 \text{ V}$	$\leq 1800 \text{ V}$	$\leq 6500 \text{ V}/\mu\text{s}$		
$575 \text{ V} < V_{NOM} \leq 690 \text{ V}$	$\leq 2200 \text{ V}$	$\leq 7800 \text{ V}/\mu\text{s}$		

Tabela 11.4

* Definição conforme a norma NEMA MG1- Part 30

O fenômeno da tensão/corrente induzida no eixo provém fundamentalmente de desequilíbrios existentes no circuito magnético dos motores. Causas usuais desse problema, que acomete principalmente máquinas grandes, são excentricidades e outras imperfeições decorrentes do processo de fabricação. Com o advento dos inversores PWM, porém, o problema foi agravado, passando a ocorrer também em máquinas de potências menores, pois os motores passaram a ser alimentados por formas de ondas desequilibradas e que possuem componentes de alta frequência. Assim, as causas de tensão induzida no eixo devido aos inversores de frequência somam-se àquelas intrínsecas ao motor e que também provocam a circulação de corrente pelos mancais.

A maior causa de correntes pelos mancais, quando o motor é acionado por um inversor PWM, é devido às tensões de modo comum. A alta frequência da tensão modo comum produzida pelo inversor faz com que as reatâncias capacitivas dentro do motor fiquem baixas, permitindo que a corrente atravesse o acoplamento formado pelo rotor, eixo e mancal em direção à terra.

Tensão modo comum e circuito equivalente do motor para as altas frequências

Diferentemente da tensão trifásica senoidal, a tensão trifásica PWM não é equilibrada, ou seja, a soma vetorial instantânea das tensões nas três fases na saída de um inversor de frequência não é igual a zero, mas igual a um potencial elétrico de alta frequência. Correntes de modo comum podem resultar dessa tensão modo comum de alta frequência e, havendo capacitâncias do motor para a terra, a corrente tenderá a fluir para a terra, atravessando rotor, eixo e mancal para a tampa aterrada.

Os caminhos percorridos pelas correntes de modo comum podem ser observados no modelo do circuito equivalente do motor para altas frequências, no qual os mancais são representados por capacitâncias. Em altas velocidades não há contato entre o rotor e a pista externa do rolamento (aterrada), devido à distribuição plana do filme de graxa.

O potencial do rotor pode então aumentar com relação à terra até atingir um nível capaz de romper o filme de graxa, quando ocorre faiscamento e a corrente de descarga flui através dos rolamentos. Essa corrente tem natureza aleatória e é denominada “componente de descarga capacitiva”.

Essas descargas dão origem a pequenos furos, que começam a se sobrepor e, caso haja correntes de descarga por longo tempo, sulcos (crateras) serão formados. A erosão acarreta redução da vida útil dos rolamentos e pode provocar falha da máquina. A outra componente de corrente, que circula permanentemente pela espira característica formada por eixo, mancais e carcaça, é denominada “componente de condução”.

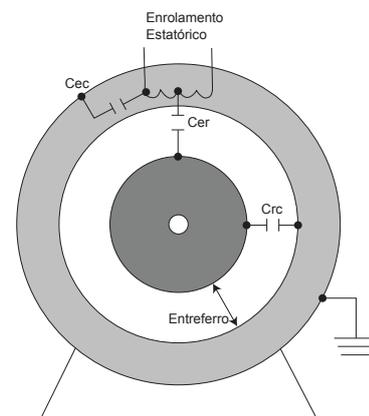


Figura 11.15 - Corrente de descarga capacitiva.

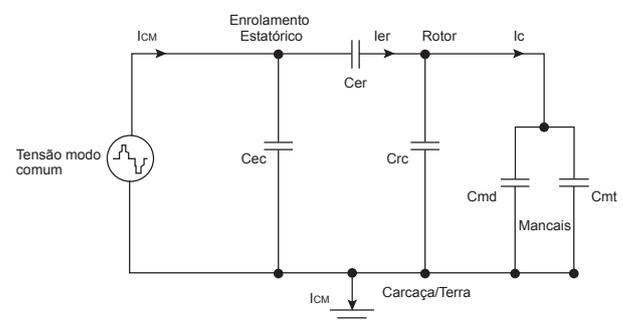


Figura 11.16 - Capacitância do motor.

Circuito equivalente para alta frequência onde:

- C_{er} : capacitor formado entre o enrolamento estatótico e as chapas do rotor
- C_{rc} : capacitor formado entre as chapas do rotor e do estator
- C_{ec} : capacitor formado entre enrolamento estatótico e carcaça
- $C_{md/mt}$: capacitância do mancal dianteiro/traseiro, formada entre a pista de rolagem do anel interno/externo e as esferas metálicas
- I_{CM} : corrente total de modo comum
- I_{er} : corrente de descarga capacitiva do estator para o rotor
- I_c : corrente de descarga capacitiva pelos mancais.

Critérios de proteção dos mancais

Quando há utilização de motores de indução trifásicos de baixa tensão WEG com inversores de frequência, devem ser obedecidos os critérios para a proteção dos mancais apresentados a seguir:

Nota: motores para áreas classificadas devem ser avaliados caso a caso – consultar a WEG.

LINHA W22		
Tamanho da Carcaça (IEC)	Padrão	Opcional
225 ≤ mod < 315	<ul style="list-style-type: none"> Sem proteção 	<ul style="list-style-type: none"> Mancal traseiro isolado Mancal dianteiro isolado Sistema de aterramento de escovas entre a carcaça e o eixo no lado não acionado
315 e 355	<ul style="list-style-type: none"> Mancal traseiro isolado Sistema de aterramento de escovas entre a carcaça e o eixo no lado acionado 	<ul style="list-style-type: none"> Ambos os mancais isolados

Tabela 11.5 - Proteção dos mancais.

Os motores de indução possuem basicamente três fontes de ruído: o sistema de ventilação, os rolamentos e a interação entre ondas eletromagnéticas. Quando os rolamentos estão em bom estado, porém, o ruído gerado por eles é praticamente desprezível, comparado com o ruído gerado pelas outras fontes.

Motores alimentados com tensão senoidal, principalmente aqueles de polaridades mais baixas (rotações mais elevadas), têm no sistema de ventilação a sua principal fonte de ruído. Já nos motores de polaridades maiores e rotações menores frequentemente predomina o ruído de origem eletromagnética.

Por outro lado, em acionamentos de velocidade variável - especialmente nas baixas frequências de operação, nas quais o ruído devido à ventilação diminui - o ruído eletromagnético pode ser a maior fonte de ruído para motores de quaisquer polaridades, devido ao conteúdo harmônico da tensão.

Critérios de ruído

Resultados de ensaios laboratoriais (medições de 4 pontos efetuadas em câmara acústica semi-anecóica com o inversor colocado fora da câmara) realizados com vários motores e inversores WEG utilizando diversas frequências de chaveamento têm mostrado que os motores de indução trifásicos WEG, quando alimentados por inversores de frequência PWM e operando na frequência nominal (tipicamente 50 ou 60 Hz), apresentam no máximo 11 dB(A) de acréscimo no seu nível de pressão sonora global.

Notas:

- O aumento da frequência de chaveamento tende a reduzir o ruído de origem eletromagnética produzido pelo motor.
- Os critérios de ruído acima valem apenas para motores de carcaças ≤ 355

LEIA MAIS!!

Informações mais detalhadas sobre aplicações de motores de indução alimentados por inversores de frequência podem ser encontradas no Guia Técnico - Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência PWM, disponível para download em www.weg.net.

12. Informações Ambientais

12.1 Embalagem

Os motores elétricos são fornecidos em embalagens de papelão, plástico ou madeira. Estes materiais são recicláveis ou reutilizáveis. Toda a madeira utilizada nas embalagens dos motores WEG provém de reflorestamento e não sofre nenhum tratamento químico para conservação.

12.2 Produto

Os motores elétricos, sob aspecto construtivo, são fabricados essencialmente com metais ferrosos (aço, ferro fundido), metais não ferrosos (cobre, alumínio) e plástico.

13. Ensaios

A finalidade deste capítulo é definir os ensaios que podem ser realizados por solicitação de clientes, com ou sem presença de inspetor.

São agrupados em ENSAIOS DE ROTINA, TIPO e ESPECIAL, conforme definidos pelas normas ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1. Para a realização destes ensaios, deve ser seguida a NBR-5383, que define os procedimentos a serem seguidos para a execução dos ensaios. Outros ensaios não citados, podem ser realizados pelo fabricante, desde que exista um acordo entre as partes interessadas.

Listas de Testes					
Item nº	Descrição	Ensaio de Rotina	Ensaio de Tipo	Ensaio Especial	Conforme norma
1	Resistência do enrolamento a frio	X	X		NBR 5383-1
2	Ensaio de rotor bloqueado	X	X		NBR 5383-1
3	Ensaio de elevação de temperatura	N.A.	X		NBR 5383-1
4	Ensaio em carga	N.A.	X		NBR 5383-1
5	Ensaio de conjugado máximo	N.A.	X		NBR 5383-1
6	Ensaio em vazio	X	X		NBR 5383-1
7	Ensaio de vibração	N.A.	N.A.	X	NBR/IEC 60034-14
8	Nível de ruído	N.A.	N.A.	X	NBR 7565
9	Ensaio de tensão aplicada (dielétrico)	X	X		NBR 5383-1
10	Ensaio de resistência de isolamento	X	X		NBR 5383-1
11	Índice de polarização	N.A.	N.A.	X	NBR 5383-1
12	Curva conjugado x rpm	N.A.	N.A.	X	NBR 5383-1
13	Sobrevelocidade	N.A.	N.A.	X	NBR 5383-1
14	Tensão no eixo	N.A.	N.A.	X	NBR 5383-1
15	Resistência de isolamento dos mancais	N.A.	N.A.	X	NBR 5383-1
16	Excesso de conjugado momentâneo	N.A.	N.A.	X	NBR 17094-1
17	Sobrecorrente ocasional	N.A.	N.A.	X	NBR 17094-1

Tabela 13.1 - Ensaios

* N.A.: Não Aplicável

13.1 Motores Alimentados por Inversores de Frequência

Quando o motor for alimentado por inversor, os testes são realizados com alimentação senoidal, com exceção do ensaio de elevação de temperatura, que pode ser realizado com alimentação PWM quando solicitado.

14. Anexos

14.1 Sistema Internacional de Unidades - SI

Grandezas	Nomes	Unidades
Aceleração	metro por segundo ao quadrado	m/s ²
Aceleração angular	radiano por segundo ao quadrado	rad/s ²
Ângulo plano	radiano	rad
Ângulo sólido	esferorradiano	sr
Área	metro quadrado	m ²
Calor específico	Joule por quilograma e por Kelvin	J/kgK
Capacitância	Farad	F
Vazão	metro cúbico por segundo	m ³ /s
Condutância	Siemens	S
Condutividade térmica	Watt por metro e por Kelvin	W/mK
Condutividade elétrica	Siemens por metro	S/m
Densidade de fluxo de energia	Watt por metro quadrado	W/m ²
Dose absorvida	Joule por quilograma	J/kg
Energia	Joule	J
Entropia	Joule por Kelvin	J/K
Fluxo (de massa)	quilograma por segundo	Kg/s
Fluxo magnético	Weber	Wb
Frequência	Hertz	Hz
Força	Newton	N
Gradiente de temperatura	Kelvin por metro	K/m
Impulsão	Newton-segundo	Ns
Indução magnética	Tesla	T
Indutância	Henri	H
Intensidade de campo elétrico	Volt por metro	V/m
Intensidade de campo magnético	Ampère por metro	A/m
Intensidade luminosa	candela	cd
Intensidade de corrente	Ampère	A
Intervalo de frequências	oitava	
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	Kg
Massa específica	quilograma por metro cúbico	Kg/m ³
Momento de força	Newton-metro	Nm
Momento cinético	quilograma-metro quadrado-segundo	Kgm ² /s
Momento de inércia	quilograma-metro quadrado	Kgm ²
Potência	Watt	W
Pressão	Newton por metro quadrado	N/m ²
Relutância	Ampère por Weber	A/Wb
Resistência elétrica	Ohm	Ω
Resistividade de massa	Ohm-quilograma por metro quadrado	Ωkg/m ²
Resistividade	Ohm-metro	Ωm
Temperatura termodinâmica	Kelvin	K
Tensão elétrica	Volt	V
Tensão superficial	Newton por metro	N/m
Tempo	segundo	s
Velocidade angular	radiano por segundo	rad/s
Velocidade	metro por segundo	m/s
Viscosidade dinâmica	Newton-segundo por metro quadrado	Ns/m ²
Viscosidade cinemática	metro quadrado por segundo	m ² /s
Volume	metro cúbico	m ³

Tabela 14.1

14.2 Conversão de Unidades

De	multiplicar por	para obter
BTU	$3,94.10^{-4}$	HP.h
BTU	$2.928.10^{-4}$	kW.h
BTU/h	107,5	kgm/s
BTU/h	0,2931	W
BTU/h ² . $\frac{^{\circ}\text{F}}{\text{Pie}}$	0,0173	W/cm ² . $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{cm}}$
BTU/h ² . $\frac{^{\circ}\text{F}}{\text{Pé}}$	0,0833	BTU/h.pé ² . $\frac{^{\circ}\text{F}}{\text{Pie}}$
BTU/h.pé ² . ^{°F}	$5,68.10^{-4}$	W/cm ² . ^{°C}
BTU/h.pé ² . ^{°F}	$3,94.10^{-4}$	HP/pé ² . ^{°F}
BTU/min	0,01758	kW
BTU/min	17,58	W
BTU/s	$2,93.10^{-4}$	kW
BTU/s	$3,93.10^{-4}$	HP
BTU/s	$3,94.10^{-4}$	cv
C		
Caloria (grama)	$3,9683.10^{-3}$	BTU
Caloria (grama)	$1,5596.10^{-6}$	HP.h
Caloria (grama)	$1,1630.10^{-6}$	kW.h
Caloria (grama)	3600/860	Joule
Cal/s.cm ² . $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{cm}}$	4,19	W/cm ² . $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{cm}}$
cv	75	kg.m/s
cv	735,5	W
cm	0,3937	pol.
cm ³	$1,308.10^{-6}$	jarda ³
cm ³	$3,531.10^{-6}$	pé ³
cm ³	0,06102	pol. ³
cm ²	$1,076.10^{-3}$	pé ²
cm ²	0,1550	pol. ²
cm/s	0,036	km/h
G		
Grau Celsius	$(^{\circ}\text{C} \frac{9}{5}) + 32$	F
Grau Celsius	$(^{\circ}\text{C}) + 273,15$	K
Grau Fahrenheit	$(\text{F} - 32) \frac{5}{9}$	^{°C}
Grau trigonométrico	0,01745 Grau radiano	
H		
HP	42,44	BTU/min
HP	1,014	cv
HP (caldeira)	33479	BTU/h
HP	10,68	kcal/min
HP	76,04	kg.m/s
HP	0,7457	kW
HP	550	Libra-força.pé/s
HP.h	$2,684.10^6$	J
HP.h	0,7457	kW.h
HP.h	$1,98.10^6$	Libra-força.pé
HP.h	$2,737.10^5$	kgm
J		
Jarda ³	0,7646	m ³
Joule	$9,480.10^{-4}$	BTU
Joule	0,7376	Libra-força.pé
Joule	$2,389.10^{-4}$	kcal
Joule	22,48	Libra
Joule	1	W

De	multiplicar por	para obter
K		
$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$	0,671	$\frac{^{\circ}\text{F}}{\text{Pie}}$
kg	2,205	Libra
kgf/cm ²	14,22	Libra-força/pol ²
kgf/cm ³	$3,613.10^{-5}$	Libra/pol ³
km	1094	Jarda
km	3281	pé
km	0,6214	Milha
km ²	0,3861	Milha ²
km ²	$10,76.10^{-6}$	pé ²
km/h	27,78	cm/s
km/h	0,6214	Milha/h
km/h	0,5396	nó
km/h	0,9113	pé/s
kgf	9,807	J/m (N)
kW	56,92	BTU/min
kW	1,341	HP
kW	14,34	kcal/min
kW/h	3413	BTU
kW/h	859850	Cal
kW/h	1,341	HP.h
kW/h	$3,6.10^6$	J
kW/h	$2,655.10^6$	Libra pé
kW/h	$3,671.10^5$	kgm
L		
Libra-força.pé/s	$1,356.10^{-3}$	kW
Libra-força.pé ³	0,01602	g/cm ³
Libra-força.pé ³	16,02	kg/m ³
Libra-força.pol	17,86	kg/m
Libra-força.pol ²	0,07301	kg/cm ²
Libra-força.pé/min	$3,24.10^{-4}$	kcal/min
Libra-força.pé/min	$2,260.10^{-5}$	kW
Libra-força.pé/s	0,07717	BTU/min
Libra-força	16	onça
Litro	0,2642	galão
Litro/min	$5,886.10^{-4}$	pé ³ /s
Libra-força/pé	$3,24.10^{-4}$	kcal
Libra-força/pé	1,488	kg/m
Libra-força/pé	$3,766.10^{-7}$	kW.h
Libra-força/pé	0,1383	kgfm
Libra-força/pé ²	0,0421	kg/m ²
Libra-polegada quadrada (sq.in.lb)	$2,93 \times 10^{-4}$	Quilograma-metro quadrado (kgm ²)
M		
m	1,094	Jarda
m	$5,396.10^{-4}$	milha marítima
m	$6,214.10^{-4}$	milha terrestre
m	39,37	pol.
m ³	35,31	pé ³
m ³	61023	pol. ³
m	1,667	cm/s
m/min	0,03238	nó
m/min	0,05408	pés/s
m ²	10,76	pé ²
m ²	1550	pol. ²
m.kg	7,233	Libra-força.pé
m/s	2,237	milha/h
m/s	196,8	pé/min
Micrômetro	10^{-6}	m
Milha/h	26,82	m/min
Milha/h	1467	pé/s
Milha quadrada	2,590	km ²
Milha	0,001	pol.
Milimetro	0,03937	pol.

14.3 Normas - ABNT e IEC

De	multiplicar por	para obter
N		
Newton	1.10 ⁵	Dina
Nó	1,8532	km/h
Nó	1,689	pé/s
Newton	0,1019	Quilograma-força (kgf) ou quiloponde (kp)
Newton-metro	0,1019	Quilograma-força (mkgf) ou quiloponde-metro (mkp)
Newton-metro	0,7376	Libra-força pé (ft. lb)
O		
Onça	28,349	grama
P		
Pé	0,3048	m
Pé/min	0,508	cm/s
Pé/min	0,01667	pé/s
Pés/s	18,29	m/min
Pé/s	0,6818	milha/h
Pé/s	0,5921	nó
Pé/s	1,097	km/h
Pé ²	929	cm ²
Pé	30,48	cm
Pé ³	28,32	litro
Pé ³ /Lb	0,06242	m ³ /kg
Pé ³ /min	472	cm ³ /s
Pol.	25,40	mm
Pol. ³	0,01639	litro
Pol. ³	1,639.10 ⁻⁵	m ³
Pol. ³	5,787.10 ⁻⁴	pé ³
Q		
Quilo caloria	3,9685	BTU
Quilo caloria	1,560.10 ⁻²	HP.h
Quilo caloria	4,186	J
Quilo caloria	426,9	kgm
Quilo caloria	3,088	Libra-força.pé
Quilôgrâmetro	9,294.10 ⁻³	BTU
Quilôgrâmetro	9,804	J
Quilôgrâmetro	2,342.10 ⁻³	kcal
Quilôgrâmetro	7,233	libra-força.pé
Quilograma-força (kgf) ou quiloponde (kp)	2,205	Libra-força (lb)
Quilograma-força metro (mkgf) ou quiloponde metro (mkp)	7,233	Libra-força-pe (ft. lb)
Quilowatt (kW)	1,358	Cavalo vapor (cv)
Quilograma-metro quadrado (kgm ²)	23,73	Libra-pé quadrado (sq. ft. lb)
R		
Radiano	3438	min.
rpm	6,0	grau/s
rpm	0,1047	radiano/s
Radiano/s	0,1592	rpm
W		
Watt	0,05688	BTU/min
Watt	1,341.10 ⁻³	HP
Watt	0,01433	kcal/min
Watt	44,26	Libra-força.pé/min
Watt	0,7378	Libra-força.pé/s

Tabela 14.2

Principais normas para Máquinas Elétricas Gigantes		
ABNT	IEC	Conteúdo
ABNT NBR 5031	IEC 60034-7	Classificação das formas construtivas e montagens
ABNT NBR 5110	IEC 60034-6	Classificação dos métodos de resfriamento
ABNT NBR 5383-1	IEC 60034-1	Motores de indução trifásicos - Ensaio
ABNT NBR 15623-1	IEC 60072-1/2	Dimensões e séries de potências para máquinas elétricas gigantes - Padronização - Designação de carcaças entre 56 a 400 e flanges entre e flanges entre 55 a 1 080
ABNT NBR IEC 60085:2012	IEC 60085	Materiais isolantes elétricos - Classificação térmica
ABNT NBR IEC 60034-9	IEC 60034-9	Limites de ruído
ABNT NBR 17094-1	IEC 60034-1	Motores de indução
ABNT NBR 17094-2		Parte 1: trifásicos Parte 2: monofásicos
ABNT NBR IEC 60079	IEC 60079	Série de normas de segurança para atmosferas explosivas
ABNT NBR IEC 60529	IEC 60529	Graus de proteção para invólucros de equipamentos elétricos (código IP)





Grupo WEG - Unidade Motores
Jaraguá do Sul - SC - Brasil
Telefone: (47) 3276-4000
motores@weg.net
www.weg.net
www.youtube.com/wegvideos
[@weg_wr](https://www.instagram.com/weg_wr)

