

1. Noções fundamentais

1.1 Motores elétricos

Motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. O motor de indução é o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica - baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando - com sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos. Os tipos mais comuns de motores elétricos são:

a) Motores de corrente contínua

São motores de custo mais elevado e, além disso, precisam de uma fonte de corrente contínua, ou de um dispositivo que converta a corrente alternada

comum em contínua. Podem funcionar com velocidade ajustável entre amplos limites e se prestam a controles de grande flexibilidade e precisão. Por isso, seu uso é restrito a casos especiais em que estas exigências compensam o custo muito mais alto da instalação.

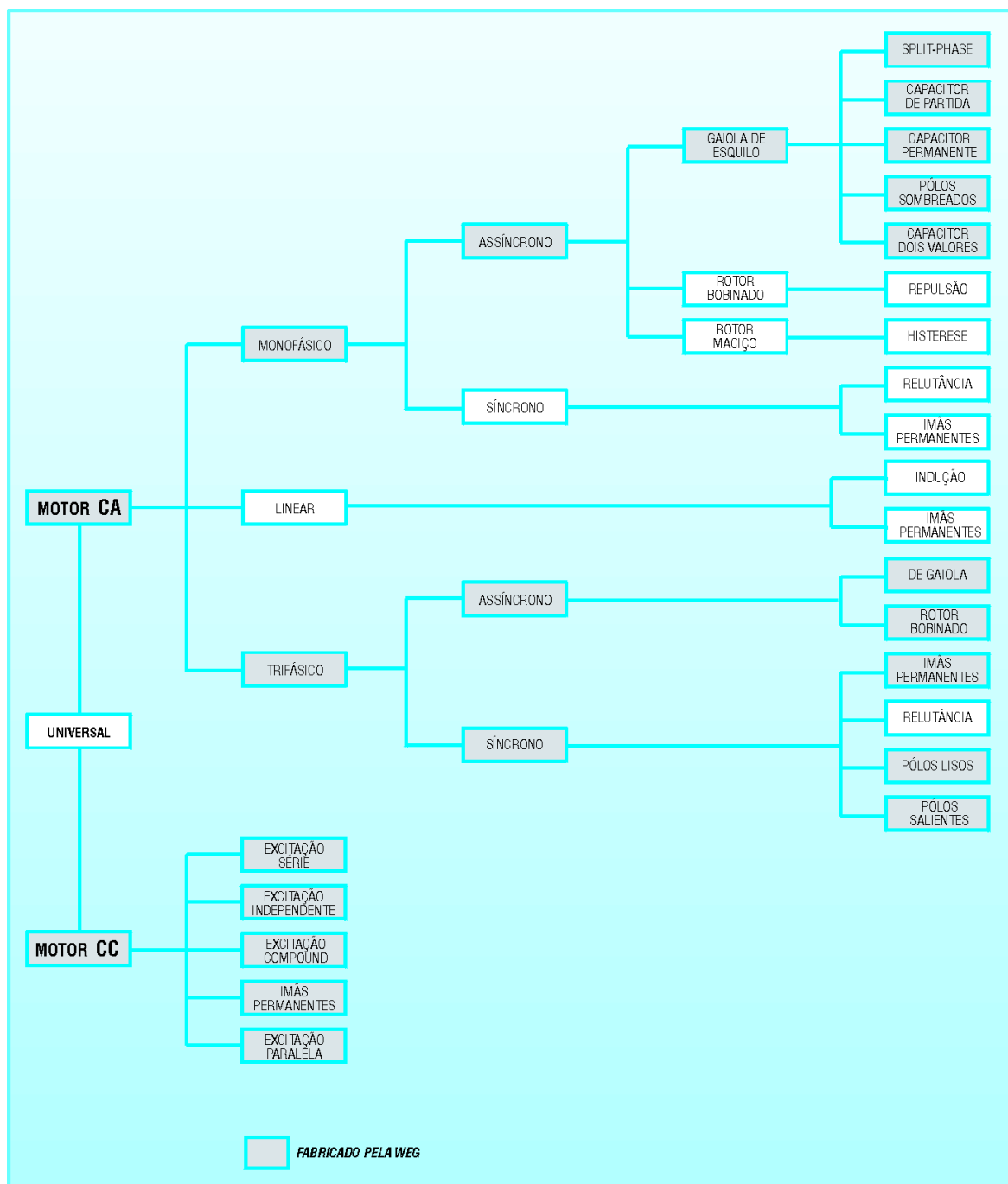
b) Motores de corrente alternada

São os mais utilizados, porque a distribuição de energia elétrica é feita normalmente em corrente alternada. Os principais tipos são:

- **Motor síncrono:** Funciona com velocidade fixa; utilizado somente para grandes potências (devido ao seu alto custo em tamanhos menores) ou quando se necessita de velocidade invariável.

- **Motor de indução:** Funciona normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo, é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas, encontradas na prática. Atualmente é possível controlarmos a velocidade dos motores de indução com o auxílio de inversores de frequência.

O UNIVERSO TECNOLÓGICO DE MOTORES ELÉTRICOS



ESPECIFICAÇÃO

Tabela 1.1

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 manual.

1.2.1 Conjugado

O conjugado (também chamado torque, momento ou binário) é a medida do esforço necessário para girar um eixo.

É sabido, pela experiência prática que, para levantar um peso por um processo semelhante ao usado em poços - ver figura 1.1 - a força F que é preciso aplicar à manivela depende do comprimento ℓ da manivela. Quanto maior for a manivela, menor será a força necessária.

Se dobrarmos o tamanho ℓ da manivela, a força F necessária será diminuída à metade.

No exemplo da figura 1.1, se o balde pesa 20N e o diâmetro do tambor é 0,20m, a corda transmitirá uma força de 20N na superfície do tambor, isto é, a 0,10m do centro do eixo. Para contrabalançar esta força, precisamos de 10N na manivela, se o comprimento ℓ for de 0,20m. Se ℓ for o dobro, isto é, 0,40m, a força F será a metade, ou seja 5N.

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 eixo a força é aplicada. O “esforço” é medido pelo conjugado, que é o produto da força pela distância, F x ℓ.

No exemplo citado, o conjugado vale:

$$C = 20N \times 0,10m = 10N \times 0,20m = 5N \times 0,40m = 2,0N.m.$$

$$C = F \cdot \ell \quad (N \cdot m)$$

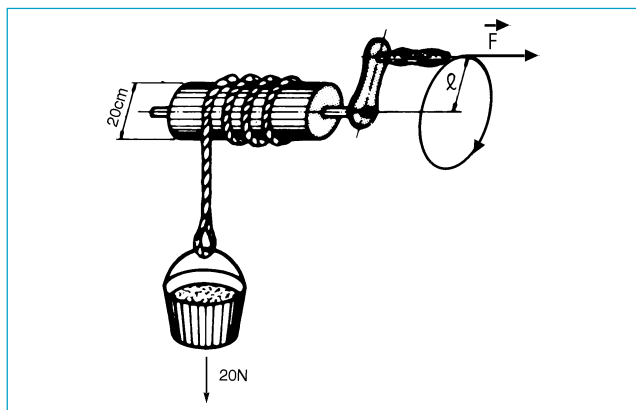


Figura 1.1

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 realizado para trazer o balde do fundo até a boca do poço é sempre a mesma, valendo 20N x 24,5m = 490Nm (note que 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).

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

OBS.: 1Nm = 1J = W . Δ t

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:

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

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

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

A unidade mais usual para medida de potência mecânica é o cv (cavalo-vapor), equivalente a 736W. Então as potências dos dois motores acima serão:

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

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

como, 1cv = 736W então,

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

Para movimentos circulares

$$C = F \cdot r \quad (N.m)$$

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

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

onde:

- C = conjugado em Nm
- F = força em N
- ℓ = braço de alavanca em m
- r = raio da polia em m
- v = velocidade angular em m/s
- d = diâmetro da peça em m
- n = velocidade em rpm

Relação entre unidades de potência

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

$$P (cv) = 1,359 P (kW)$$

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,

$$P = RI^2 \quad (W)$$

- Onde: U = tensão em volt
- I = corrente em ampére
- R = resistência em ohm
- P = potência média 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.

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

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:

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

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

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

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

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

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

OBS.:

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, como é o caso dos motores de indução, esta defasagem tem que ser levada em conta e a expressão fica:

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

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 1kW 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 ($S = U \times I$ para sistemas monofásicos e $S = \sqrt{3} \times U \times I$, 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 medidas 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.

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

ou,

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (W)$$

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.

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

ou,

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (VAr)$$

Triângulo de potências

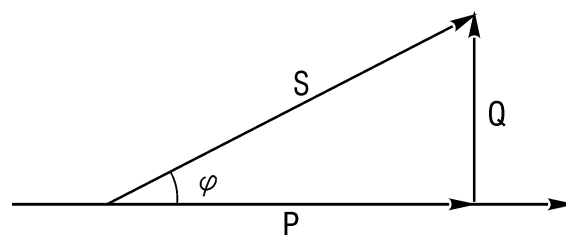


Figura 1.2 - Triângulo de potências (carga indutiva)

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 real (ativa) P e a potência aparente S (figura 1.2).

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

Assim,

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

Os termos, atrasado e adiantado, referem-se à fase da corrente em relação à fase da tensão.

Um motor não consome apenas potência ativa que é depois convertida em trabalho mecânico, 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. A relação entre potência ativa, medida em kW e a potência aparente medida em kVA, chama-se fator de potência.

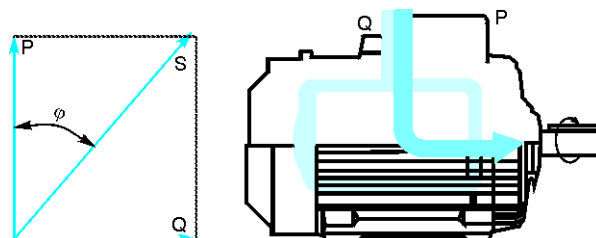


Figura 1.3 - O fator de potência é determinado medindo-se a potência de entrada, a tensão e a corrente de carga nominal

Importância do fator de potência

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 passasse dos então atuais 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.

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 à sua função. O fator de potência varia com a carga do motor. Os catálogos WEG indicam os valores típicos desta variação.

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 100cv (75kW), operando com 100% da potência nominal, com fator de potência original de 0,90. O fator de potência desejado é de 0,95.

Solução:

Utilizando-se da tabela 1.2, na intersecção da linha 0,90 com a coluna de 0,95, obtém-se o valor de 0,155, que multiplicado pela potência do motor em kW, resulta no valor da potência reativa necessária para elevar-se o fator de potência de 0,90 para 0,95.

$$\text{kVAr necessário} = 75 \times 0,155 = 11,625 \text{ kVAr}$$

Tabela 1.2 - Correção do fator de potência

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	1,359	
0,55	0,769	0,795	0,821	0,847	0,873	0,899	0,926	0,952	0,979	1,007	1,035	1,063	1,090	1,124	1,456	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	0,682	0,709	0,742	0,775	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	0,264	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	0,191	0,225	0,257	0,191	0,229	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								0,026	0,053	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									0,027	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	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,342	0,484		
0,91													0,030	0,061	0,093	0,127	0,164	0,206	0,253	0,314	0,456	
0,92														0,031	0,063	0,097	0,134	0,176	0,223	0,284	0,426	
0,93															0,032	0,068	0,103	0,145	0,192	0,253	0,395	
0,94																0,034	0,071	0,113	0,160	0,221	0,363	
0,95																	0,037	0,079	0,126	0,187	0,328	
0,96																			0,042	0,089	0,149	0,292
0,97																				0,047	0,108	0,251
0,98																					0,061	0,203
0,99																						0,142

1.2.6 Rendimento

O motor elétrico absorve energia elétrica da linha e a transforma em energia mecânica disponível no eixo. O rendimento define a eficiência com que é feita esta transformação.

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:

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

ou

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

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

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

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

1.3 Sistemas de corrente alternada monofásica

1.3.1 Generalidades

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

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.

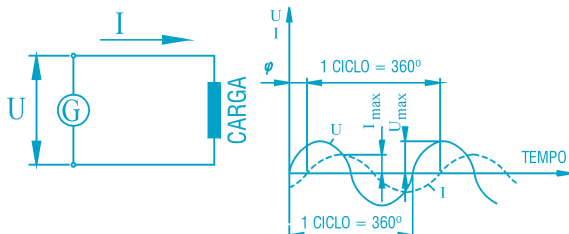


Figura 1.4a

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

Por exemplo: Se ligarmos uma “resistência” a um circuito de corrente alternada ($\cos \varphi = 1$) com $U_{m\acute{a}x} = 311$ volts e $I_{m\acute{a}x} = 14,14$ ampères, a potência desenvolvida será:

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

$$P = 2.200 \text{ watts}$$

OBS.: Na linguagem normal, quando se fala em tensão e corrente, por exemplo, 220 volts ou 10 ampères, 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”).

1.3.2 Ligações em série e paralelo

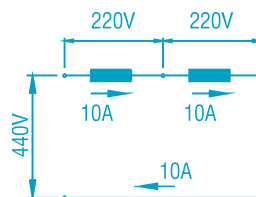


Figura 1.5a

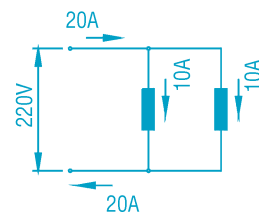


Figura 1.5b

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 as duas cargas são atravessadas pela corrente total do circuito. Neste caso, a tensão em cada carga será a metade da tensão do circuito para cargas iguais.

- 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 para cargas iguais.

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, isto é, as três tensões têm o mesmo valor eficaz $U_1 = U_2 = U_3$ conforme figura 1.6.

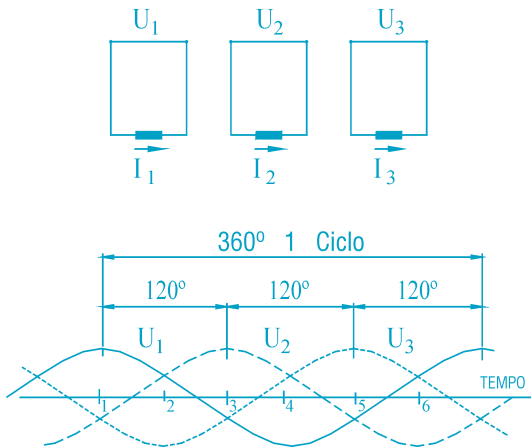


Figura 1.6

Ligando entre si os três sistemas monofásicos e eliminando os fios desnecessários, teremos um sistema trifásico: 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 suas 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 quaisquer dos três fios L_1 , L_2 e L_3 .

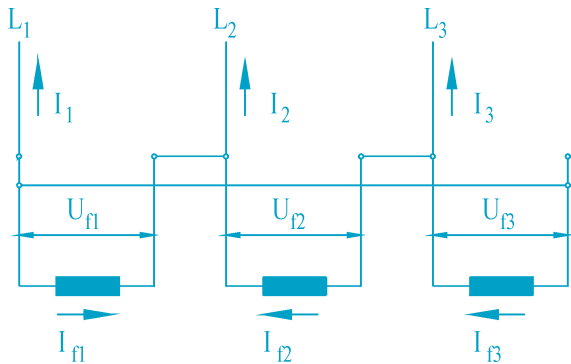


Figura 1.7a - Ligações

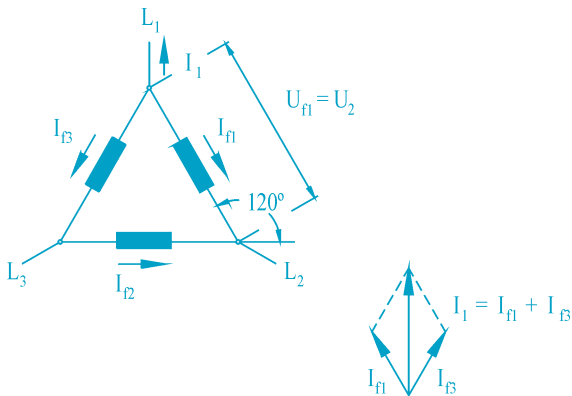


Figura 1.7b - Esquema

Figura 1.7c - Diagrama

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:

$$U = U_1$$

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

$$I = I_{f1} + I_{f3} \text{ (figura 1.7c)}$$

Exemplo: Temos um sistema equilibrado de tensão nominal 220 volts. A corrente de linha medida é 10 ampéres. 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 $U_f = U_1 = 220$ volts em cada uma das cargas.

Se $I = 1,732 \cdot I_f$, temos $I_f = 0,577 \cdot I = 0,577 \times 10 = 5,77$ ampéres 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.

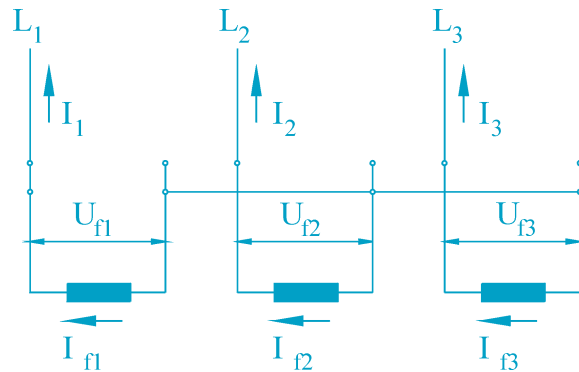


Figura 1.8a - Ligações

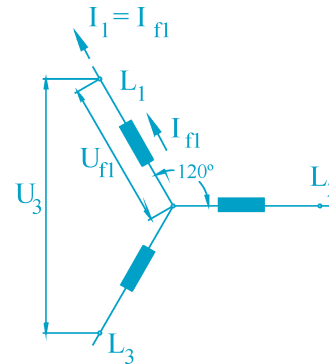


Figura 1.8b - Esquema

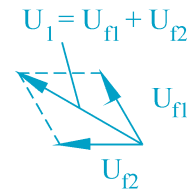


Figura 1.8c - Diagrama

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

$$I = I_f$$

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

$$U = U_{f1} + U_{f2} \text{ (figura 1.8c)}$$

Exemplo: Temos uma carga trifásica composta de três cargas iguais; cada carga é feita para ser ligada a uma tensão de 220 volts, absorvendo 5,77 ampéres.

Qual a tensão nominal do sistema trifásico que alimenta esta carga em suas condições normais (220 volts e 5,77 ampéres)? Qual a corrente de linha?

$$\begin{aligned} \text{Temos } U_l &= 220 \text{ volts (normal de cada carga)} \\ U &= 1,732 \times 220 = 380 \text{ volts} \\ I &= I_l = 5,77 \text{ ampéres} \end{aligned}$$

1.5 Motor de indução trifásico

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

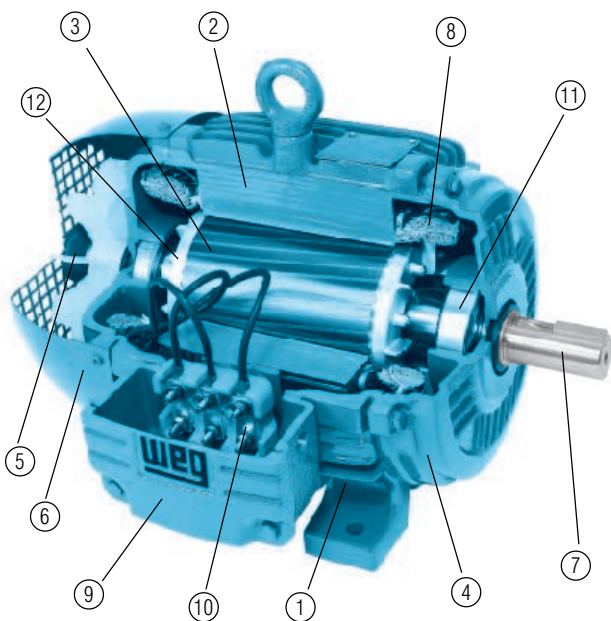


Figura 1.9

Estator

- Carcaça (1) - é a estrutura suporte do conjunto; de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com aletas.
- Núcleo de chapas (2) - as chapas são de aço magnético, tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas no ferro.
- Enrolamento trifásico (8) - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede trifásica de alimentação.

Rotor

- Eixo (7) - transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor. É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga.
- 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)

O foco deste manual é o “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, donde o seu nome de 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 dirigido conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente.

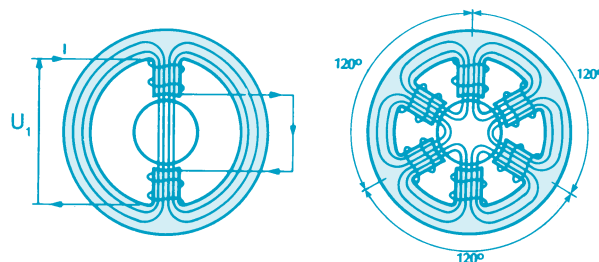


Figura 1.10a

Figura 1.10b

- a) Na figura 1.10a é indicado um “enrolamento monofásico” atravessado por uma corrente I , e o campo H é criado por ela; o enrolamento é constituído de um par de pólos (um pólo “norte” e um pólo “sul”), cujos efeitos se somam para estabelecer o campo H . O fluxo magnético atravessa o rotor entre os dois pólos 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 representado 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 transformado por três monofásicos espaçados entre si de 120° . Se este enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes I_1, I_2 e I_3 criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos H_1, H_2 e H_3 . Estes campos são espaçados entre si de 120° . 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 H_1, H_2 e H_3 naquele instante.

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

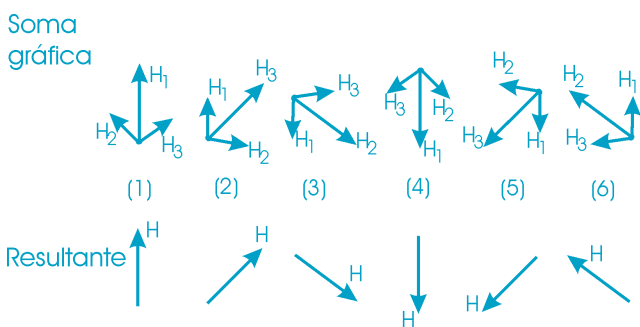


Figura 1.11

No instante (1), a figura 1.6, mostra que o campo H_1 é máximo e os campos H_2 e H_3 são negativos e de mesmo valor, iguais a 0,5. Os três campos são representados na figura 1.11 (1), parte superior, levando em conta que o campo negativo é representado por uma seta de sentido oposto ao que seria normal; 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 pólos girantes, de intensidade constante. Este campo girante, criado pelo

enrolamento trifásico do estator, induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo cortam as barras do rotor) as quais geram correntes, e conseqüentemente, um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo girante. Como campos opostos se atraem e como o campo do estator (campo girante) 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 pólos (2p) do motor e da frequência (f) da rede, em hertz.

Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de pólos, que se distribuem alternadamente (um “norte” e um “sul”) ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um par de pólos (p) a cada ciclo. Assim, como o enrolamento tem pólos ou “p” pares de pólos, a velocidade do campo será:

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

Exemplos:

a) Qual a rotação síncrona de um motor de 6 pólos, 50Hz?

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

b) Motor de 12 pólos, 60Hz?

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

Note que o número de pólos do motor terá que ser sempre par, para formar os pares de pólos. Para as frequências e “polaridades” usuais, as velocidades síncronas são:

Tabela 1.3 - Velocidades síncronas

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

Para motores de “dois pólos”, 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 pólos, teremos de acordo com o número de pólos, um giro “geométrico” menor, sendo inversamente proporcional a 360° em dois pólos.

Por exemplo: Para um motor de seis pólos teremos, em um ciclo completo, um giro do campo de 360° x 2/6 = 120° geométricos. Isto equivale, logicamente, a 1/3 da velocidade em dois pólos. Conclui-se, assim, que:

Graus geométricos = Graus mecânicos x 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 corrente induzidas.

Quanto maior a carga, maior terá que ser o conjugado necessário para acioná-la. Para obter o 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 cai a rotação do motor. 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 rpm, como fração da velocidade síncrona, ou como porcentagem desta

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

Para um dado escorregamento s(%), a velocidade do motor será, portanto

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

Exemplo: Qual o escorregamento de um motor de 6 pólos, 50Hz, se sua velocidade é de 960 rpm?

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

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

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.

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

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 em 60Hz.

2.1.1 Trifásico

As tensões trifásicas mais usadas nas redes industriais são:

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

O sistema trifásico estrela de baixa tensão, consiste de três condutores de fase (L1, L2, L3) e o condutor neutro (N), sendo este, conectado ao ponto estrela do gerador ou secundário dos transformadores (conforme mostra figura 2.1).

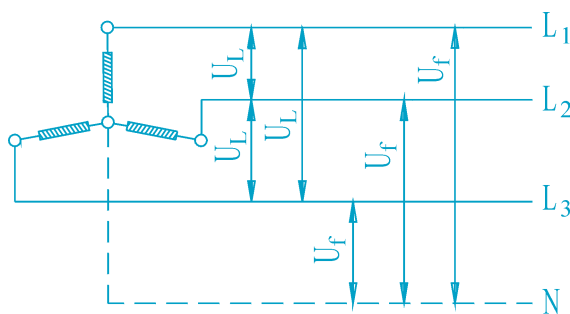


Figura 2.1 - Sistema trifásico

2.1.2 Monofásico

As tensões monofásicas padronizadas no Brasil são as de 115V (conhecida como 110V), 127V e 220V.

Os motores monofásicos são ligados à 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 entre as fases.

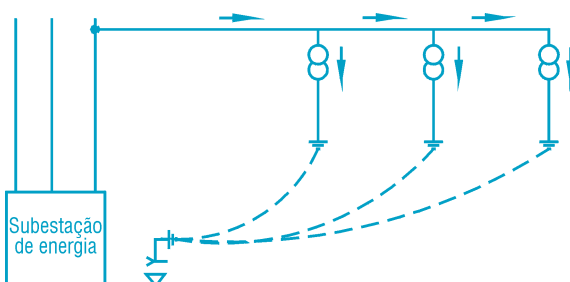
Monofásico com retorno por terra - MRT

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 monofásico a partir de alimentadores que não têm o condutor neutro. Dependendo da natureza do sistema elétrico existente e 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-triângulo.

Figura 2.2 - Sistema monofilar



b) Sistema monofilar com transformador de isolamento

Este sistema possui algumas desvantagens, além do custo do transformador,

como:

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

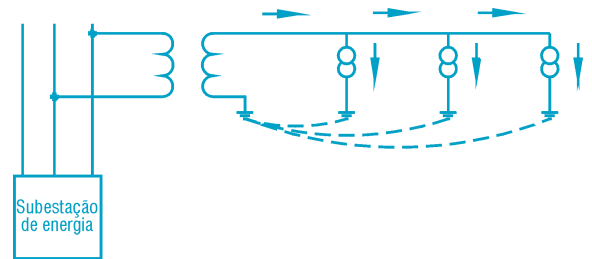


Figura 2.3 - Sistema monofilar com transformador de isolamento

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.

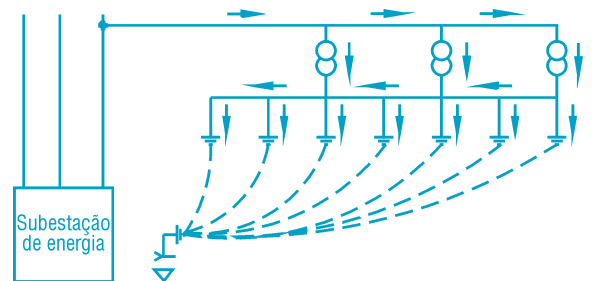


Figura 2.4 - Sistema MRT na versão neutro parcial

2.2 Tensão nominal

É a tensão para a qual o motor foi projetado.

2.2.1 Tensão nominal múltipla

A grande maioria dos motores é fornecida com terminais do enrolamento religáveis, de modo a poderem funcionar em redes de pelo menos duas tensões diferentes. Os principais tipos de religação de terminais 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 pólos 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 anterior, sem que se altere a tensão aplicada a cada bobina. Veja os exemplos das figuras 2.5a e b.

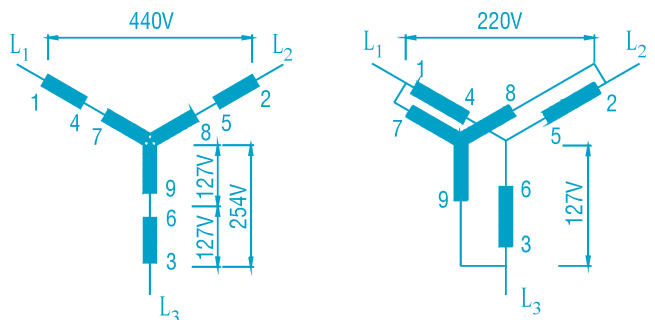


Figura 2.5a - Ligação série-paralelo Y

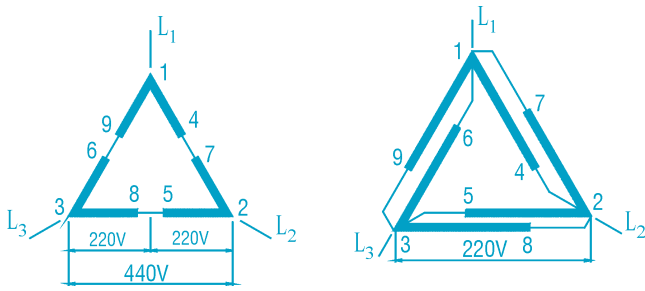


Figura 2.5b - Ligação série-paralelo Δ

Este tipo de ligação exige nove terminais no motor e a tensão nominal (dupla) mais comum, é 220/440V, ou seja, o motor é religado na ligação paralela quando alimentado com 220V e na ligação série quando alimentado em 440V. A figura 2.1 mostra a numeração normal dos terminais e o esquema de ligação para estes tipos de motores, tanto para motores ligados em estrela como em triângulo. O mesmo esquema serve para outras duas tensões quaisquer, desde que uma seja o dobro da outra, por exemplo, 230/460V

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, 220V (figura 2.6). Se ligarmos as três fases em estrela, o motor pode ser ligado a uma linha de tensão igual a $220 \times \sqrt{3} = 380$ volts sem alterar a tensão no enrolamento que continua igual a 220 volts por fase, pois,

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

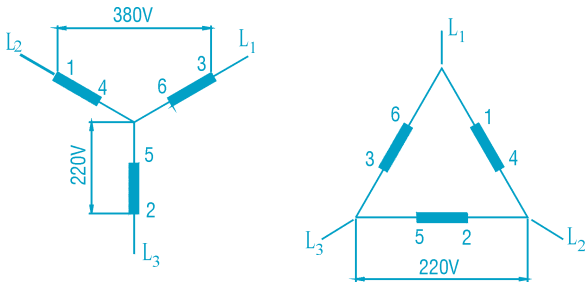


Figura 2.6 - Ligação estrela-triângulo Y - Δ

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

Nos exemplos 380/660V e 440/760V, a tensão maior declarada só serve para indicar que o motor pode ser acionado através de uma chave de partida estrela-triângulo.

Motores que possuem tensão nominal de operação acima de 660V deverão possuir um sistema de isolamento especial, apto a esta condição.

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 $\sqrt{3}$ vezes a primeira;
- 3) Ligação triângulo série, valendo o dobro da primeira;
- 4) Ligação estrela série, valendo $\sqrt{3}$ vezes a terceira. Mas, como esta tensão seria maior que 600V, é indicada apenas como referência de ligação estrela-triângulo.

Exemplo: 220/380/440(760) V

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.

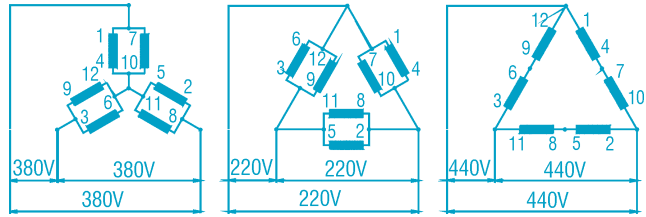


Figura 2.7

2.3 Frequência nominal (Hz)

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

2.3.1 Ligação em frequências diferentes

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

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

- a potência do motor será a mesma;
- a corrente nominal é a mesma;
- a corrente de partida diminui em 17%;
- o conjugado de partida diminui em 17%;
- o conjugado máximo diminui em 17%;
- a velocidade nominal aumenta em 20%.

Nota: Deverão ser observados os valores de potência requeridas, 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%.

Quando o motor for ligado em 60Hz com a bobinagem 50Hz, poderemos aumentar a potência em 15% para II pólos e 20% para IV, VI e VIII pólos.

2.4 Tolerância de variação de tensão e frequência

Conforme norma NBR 7094:1996 (cap. 4 - item 4.3.3). Para os motores de indução, as combinações das variações de tensão e de frequência são classificadas como Zona A ou Zona B, conforme figura 2.8.

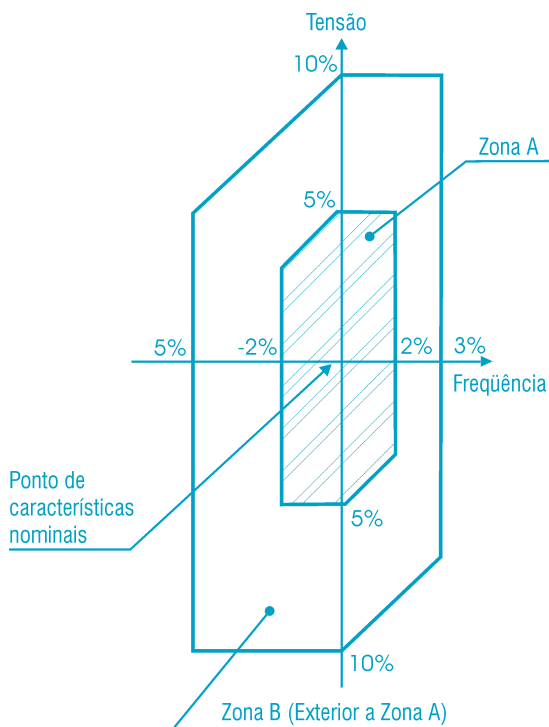


Figura 2.8 - Limites das variações de tensão e de frequência em funcionamento

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 2.8), 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.

2.5 Limitação da corrente de partida em motores trifásicos

Partida direta

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 conseqüências prejudiciais:

- Elevada queda de tensão no sistema de alimentação da rede. Em função disto, provoca a interferência em equipamentos instalados no sistema;
- O sistema de proteção (cabos, contatores) deverá ser superdimensionado, ocasionando um custo elevado;
- 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)

2.5.1 Partida com chave estrela-triângulo (Y - Δ)

É fundamental para a partida que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, ou seja, em 220/380V, em 380/660V ou 440/760V. 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 2.9), 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 2.10.

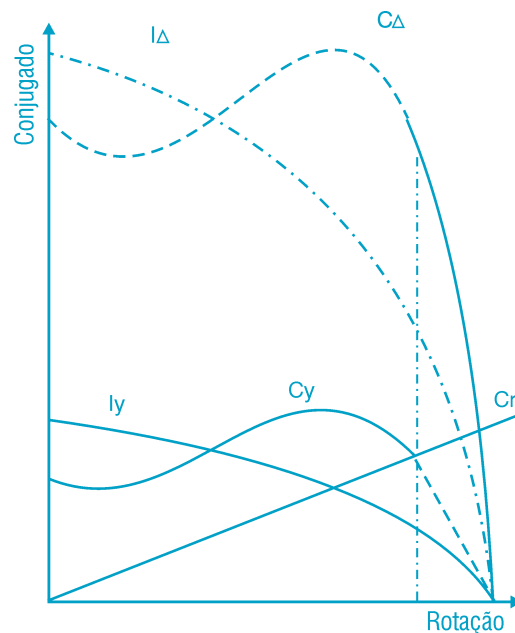


Figura 2.9 - Corrente e conjugado para partida estrela-triângulo de um motor de gaiola acionando uma carga com conjugado resistente Cr.

- I_{Δ} - corrente em triângulo
- I_Y - corrente em estrela
- C_Y - conjugado em estrela
- C_{Δ} - conjugado em triângulo
- C_r - conjugado resistente

Na figura 2.9 temos um alto conjugado resistente Cr. Se a partida for em estrela, a 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%.

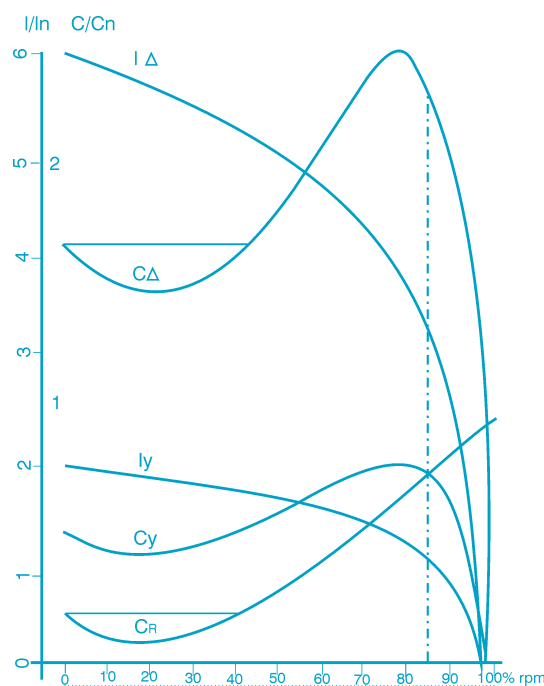


Figura 2.10

Na figura 2.11 temos o motor com as mesmas características, porém, o conjugado resistente Cr 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 (220/380/440/760V), deve-se optar pela ligação 220/380V ou 440/(760)V, dependendo da rede de alimentação.

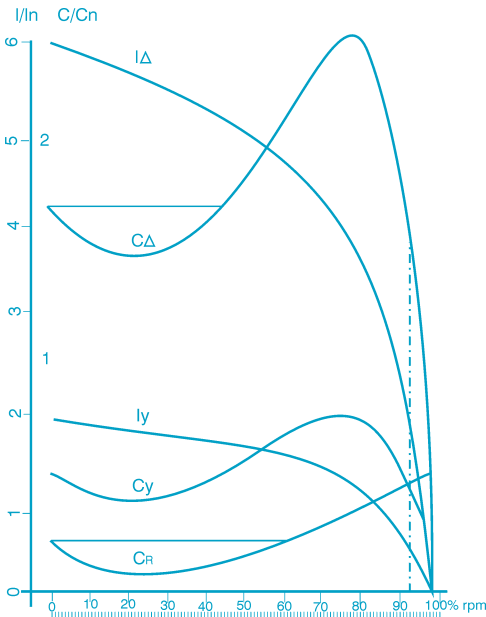


Figura 2.11

- I_{Δ} - corrente em triângulo
- I_Y - corrente em estrela
- C_{Δ} - conjugado em triângulo
- C_Y - conjugado em estrela
- C/C_n - relação entre o conjugado do motor e o conjugado nominal
- I/I_n - relação entre a corrente de partida e a corrente nominal
- Cr - conjugado resistente

Esquemáticamente, a ligação estrela-triângulo num motor para uma rede de 220V é feita da maneira indicada na figura 2.12, notando-se que a tensão por fase durante a partida é reduzida para 127V.

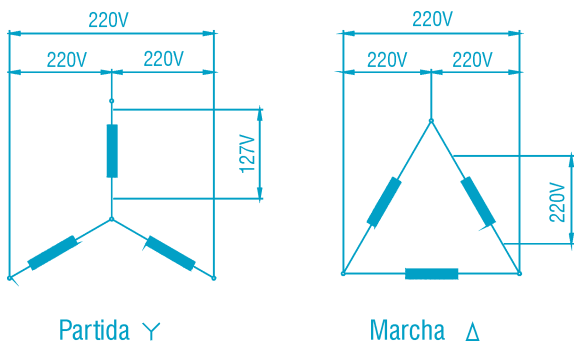


Figura 2.12

2.5.2 Partida com chave compensadora (auto-transformador)

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 2.13.

RELAÇÃO DE TENSÕES

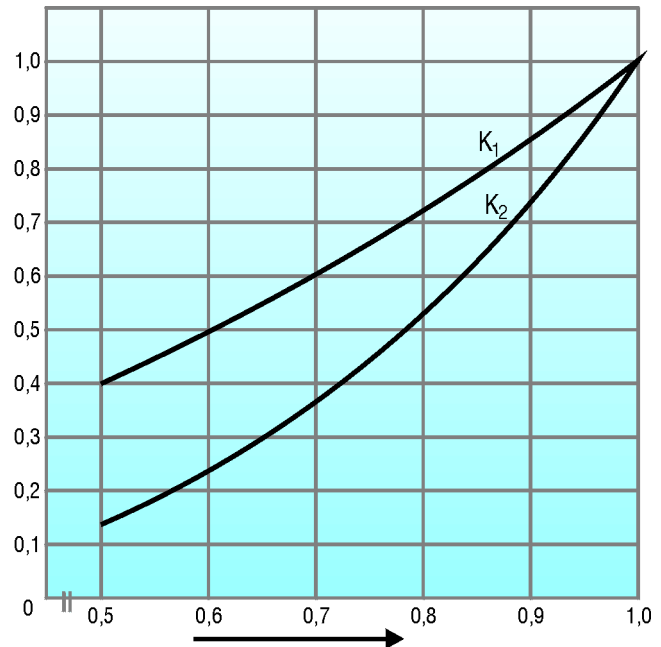


Figura 2.13 - Fatores de redução K_1 e K_2 em função das relações de tensão do motor e da rede U_m/U_n

Exemplo: Para 85% da tensão nominal

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

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

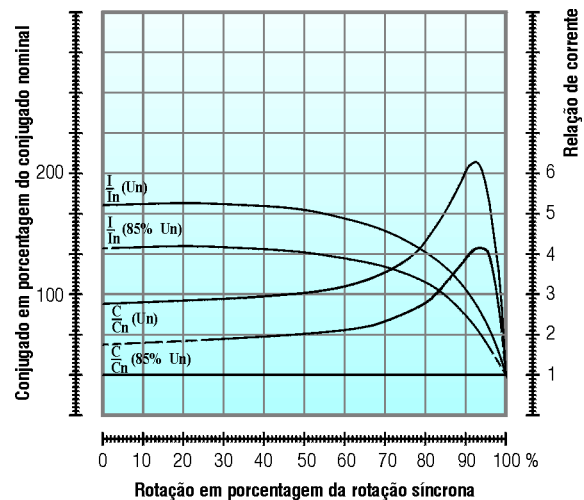


Figura 2.14 - Exemplo das características de desempenho de um motor de 425cv, VI pólos, quando parte com 85% da tensão

2.5.3 Comparação entre chaves estrela-triângulo e compensadoras “automáticas”

1) Estrela triângulo (automática)

Vantagens

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

Desvantagens

- A chave só pode ser aplicada a motores cujos seis bornes ou terminais sejam acessíveis.
- A tensão da rede deve coincidir com a tensão em triângulo do motor.
- Com a corrente de partida reduzida para aproximadamente 1/3 da corrente nominal, reduz-se também o momento de partida para 1/3.
- Caso o motor não atinja pelo menos 90% de sua velocidade nominal, o pico de corrente na comutação de estrela para triângulo será quase como se fosse 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

- No tap de 65% a corrente de linha é aproximadamente igual a 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 auto-transformador por curto tempo se torna uma reatância.
- 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 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 de acordo.
- A chave compensadora é bem mais cara do que a chave estrela-triângulo, devido ao auto-transformador.
- Devido ao tamanho do auto-transformador, a construção se torna volumosa, necessitando quadros maiores, o que torna o seu preço elevado.

2.5.4 Partida com chave série-paralelo

Para partida em série-paralelo é necessário que o motor seja religável para duas tensões, a menor delas igual a da rede e a outra duas vezes maior. Este tipo de ligação exige nove terminais no motor e a tensão nominal mais comum é 220/440V, 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.

2.5.5 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.

Tabela 2.1 - Métodos de Partida x Motores

Execução dos enrolamentos	Tensão de serviço	Partida com chave estrela-triângulo	Partida com chave compensadora	Partida com chave série-paralela	Partida com Soft-starter
220/380	220V 380V	SIM NÃO	SIM SIM	NÃO NÃO	SIM SIM
220/440/230/460	220V/230V/ 440V/460V	NÃO NÃO	SIM SIM	SIM NÃO	SIM SIM
380/660	380V	SIM	SIM	NÃO	SIM
220/380/440/760	220V 380 440	SIM NÃO SIM	SIM SIM SIM	SIM NÃO NÃO	SIM SIM SIM

2.6 Sentido de rotação de motores de indução trifásicos

Um motor de indução trifásico trabalhará 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, proporcionando sua operação em qualquer sentido de rotação, sem prejudicar a refrigeração do motor.

3. Características de aceleração

3.1 Conjuguados

3.1.1 Curva conjugado X velocidade

Definição

O motor de indução tem conjugado igual a zero à velocidade síncrona. À medida que a carga vai aumentando, 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 3.1.

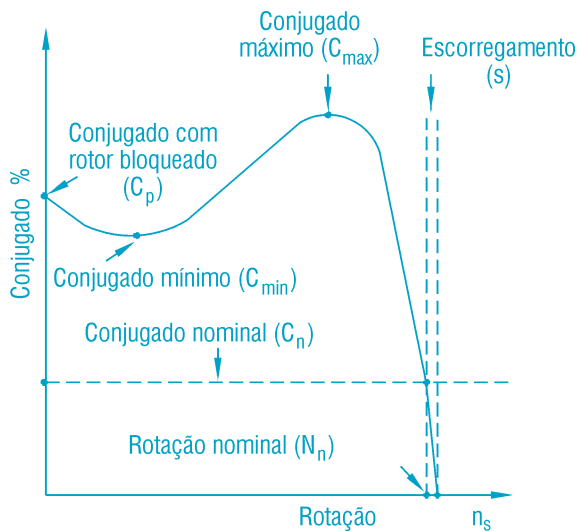


Figura 3.1 - Curva conjugado x rotação

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

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

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

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, ainda, conjugado de arranque** - é o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor bloqueado, para todas as posições angulares do rotor, sob tensão e frequência nominais.

Comentários

- Esta definição leva em conta o fato de que o conjugado com o rotor bloqueado pode variar um pouco conforme a posição em que se trava o motor.
- Este conjugado pode ser expresso em Nm ou, mais comumente, em porcentagem do conjugado nominal.

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

- 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.

Na curva abaixo destacamos e definimos alguns pontos importantes. Os valores dos conjuguados relativos a estes pontos são especificados pela norma NBR 7094 da ABNT, e serão apresentados a seguir:

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_{max} : **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:

- 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.
- O motor não deve arriar, isto é, perder bruscamente a velocidade, quando ocorrem quedas de tensão, momentaneamente, excessivas.

3.1.2 Categorias - valores mínimos normalizados

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 (NBR 7094), 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 alta, 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 conjuguados de partida muito altos e corrente de partida limitada. As curvas conjugado X velocidade das diferentes categorias podem ser vistas na figura 3.2.

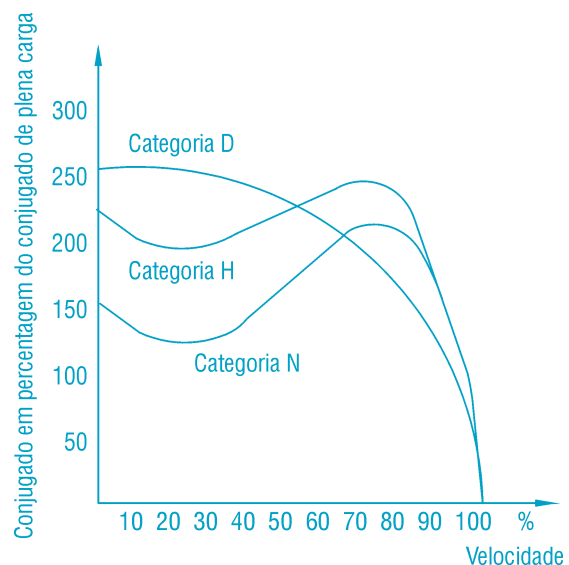


Figura 3.2 - Curvas Conjugado X Velocidade, das diferentes categorias

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 (4, 6 e 8 pólos), especificados pela norma NBR 7094, são mostrados nas tabelas 3.1 e 3.2.

Para motores da categoria D, de 4, 6 e 8 pólos e potência nominal igual ou inferior a 150cv, tem-se, segundo a NBR 7094, 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_{max} .

A NBR 7094 não especifica os valores mínimos de conjugados exigidos para motores 2 pólos, categorias H e D.

Tabela 3.1 – Conjugado com rotor bloqueado (C_p), conjugado mínimo de partida (C_{min}) e conjugado máximo (C_{max}) de motores de categoria N, relativos ao conjugado nominal (C_n).

Número de pólos		2			4			6			8		
Faixa de potências nominais		C_p	C_{min}	C_{max}	C_p	C_{min}	C_{max}	C_p	C_{min}	C_{max}	C_p	C_{min}	C_{max}
kW	cv	pu											
> 0,4 ≤ 0,63	> 0,54 ≤ 0,63	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 ≤ 140	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	> 140 ≤ 220	0,9	0,9	1,7	1,0	0,8	1,7	1,0	0,8	1,7	0,9	0,7	1,6
> 160 ≤ 250	> 220 ≤ 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 ≤ 540	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	> 540 ≤ 860	0,65	0,5	1,6	0,65	0,5	1,6	0,65	0,5	1,6	0,65	0,6	1,6

Tabela 3.2 – 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).

Número de pólos		4			6			8		
Faixa de potências nominais		C_p	C_{min}	C_{max}	C_p	C_{min}	C_{max}	C_p	C_{min}	C_{max}
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

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 .

3.1.3 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 em muito 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.

3.2 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 a rotação nominal do motor conforme abaixo:

MOMENTO DE INÉRCIA EM ROTAÇÕES DIFERENTES

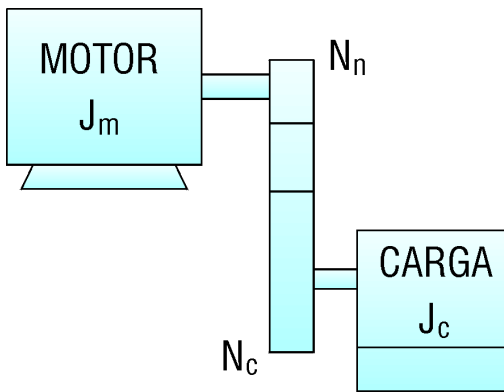


Figura 3.3 - Momento de inércia em rotações diferentes

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

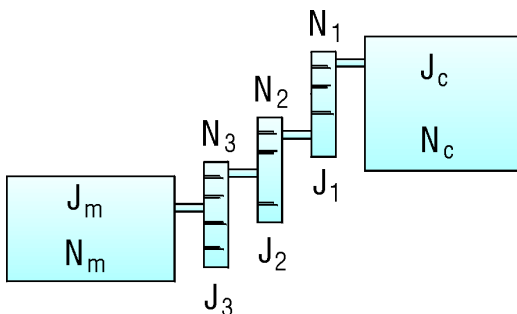


Figura 3.4 - Momento de inércia em velocidades diferentes

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

- 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_n - 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.

3.3 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 de aceleração 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 3.5).

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

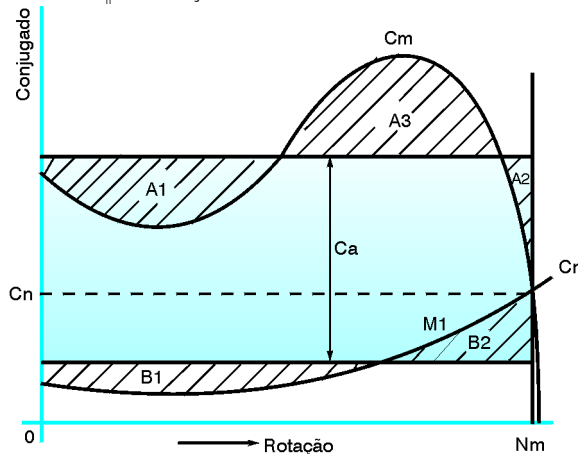


Figura 3.5 - Determinação gráfica do conjugado médio de aceleração

3.4 Regime de partida

Devido ao valor elevado da corrente de partida dos motores de indução, o tempo gasto na aceleração de cargas de inércia apreciável resulta na elevação rápida da temperatura do motor. Se o intervalo entre partidas sucessivas for muito reduzido, isto levará a uma aceleração de temperatura excessiva nos enrolamentos, danificando-os ou reduzindo a sua vida útil. A norma NBR 7094 estabelece um regime de partida mínimo que os motores devem ser capazes de realizar:

- 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.
- 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 2, 4, 6 e 8 pólos estão indicados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Momento de inércia (J)

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

Notas

- 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 pólos

- Para valores intermediários de potência nominal, o momento de inércia externo, deve ser calculado pela fórmula da nota a.

Para cargas com inércia maior que o valor de referência da tabela 3.3, o que pode ocorrer, 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:
 - ◆ Potência requerida e duração de cada período com carga;
 - ◆ Duração dos períodos sem carga (motor em vazio ou motor desligado);
 - ◆ Reversões do sentido de rotação;
 - ◆ Frenagem em contra-corrente.

3.5 Corrente de rotor bloqueado

3.5.1 Valores máximos normalizados

Os limites máximos da corrente com rotor bloqueado, em função da potência nominal do motor e válidos para qualquer número de pólos, estão indicados na tabela 3.4, expressos em termos da potência aparente absorvida com rotor bloqueado em relação à potência nominal, kVA/cv ou kVA/kW.

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

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

sendo: I_p - Corrente de rotor bloqueado, ou corrente de partida
U - Tensão nominal (V)
P - Potência nominal (cv ou kW)

Tabela 3.4 - Potência aparente com rotor bloqueado (S_p/P_n) para motores trifásicos

Faixa de potências nominais		S_p / S_n	
kW	cv	kVA/cv	kVA/kW
> 0,4 ≤ 6,3	> 0,54 ≤ 8,6	9,6	13
> 6,3 ≤ 25	> 8,6 ≤ 34	8,8	12
> 25 ≤ 63	> 34 ≤ 140	8,1	11
> 63 ≤ 630	> 140 ≤ 860	7,4	10

4. Regulagem da velocidade de motores assíncronos de indução

4.1 Introdução

A relação entre velocidade, frequência, número de pólos 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 pólos
s = escorregamento

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

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

4.2 Variação do número de pólos

Existem três modos de variar o número de pólos de um motor assíncrono, quais sejam:

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

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

4.2.1 Motores de duas velocidades com enrolamentos separados

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

4.2.2 Motores de duas velocidades com enrolamento por comutação de pólos

O sistema mais comum que se apresenta é o denominado "ligação Dahlander". Esta ligação implica numa relação de pólos de 1:2 com consequente relação de rotação de 1:2.

Podem ser ligadas da seguinte forma (figura 4.1):

- 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 0,63/1cv - IV/II pólos - 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: 10/10cv - IV/II pólos - 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: 1/4cv - IV/II pólos - Y/YY .

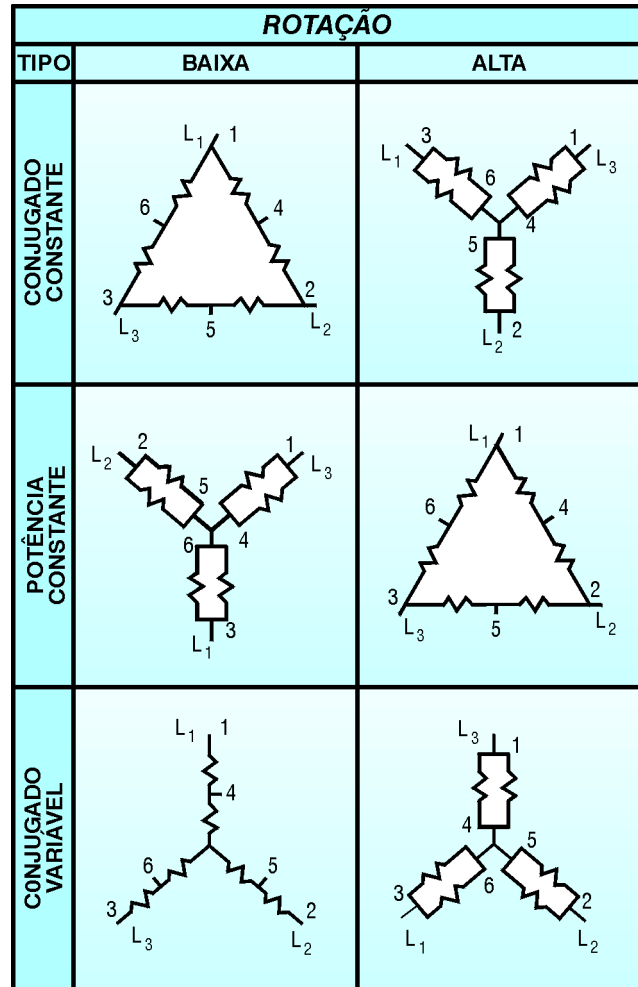


Figura 4.1 - Resumo das ligações Dahlander

4.2.3 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.

4.3 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:

- variação da resistência rotórica
- variação da tensão do estator
- variação de ambas, simultaneamente.

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

4.3.1 Variação da resistência rotórica

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

$$s = \frac{3R_2 I_2^2}{\omega_0 \cdot T} = \frac{p_{r2}}{\omega_0 \cdot T}$$

onde: p_{r2} = Perdas rotóricas (W)
 ω_0 = Rotação síncrona em rd/s
T = Torque ou conjugado do rotor
 R_2 = Resistência rotórica (ohms)
 I_2 = Corrente rotóricas (A)

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

Na figura a seguir, vemos o efeito do aumento do R_2 .

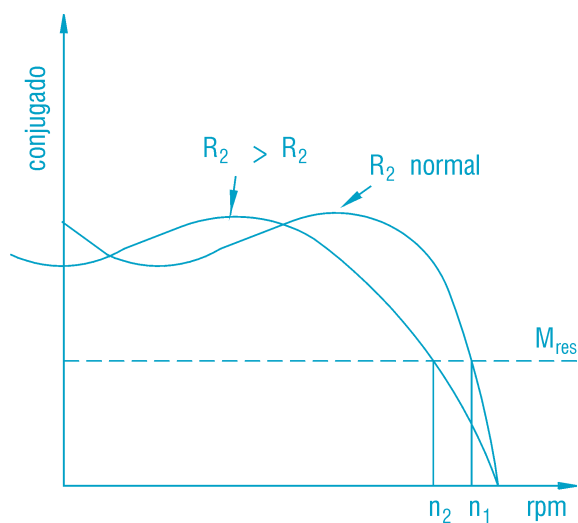


Figura 4.2 - Curva de conjugado com variação da resistência rotórica

4.3.2 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.

4.4 Inversores de frequência

Maiores informações sobre o uso de inversores de frequência para controle de velocidade, ver capítulo 9.3.

5. Características em regime

5.1 Elevação de temperatura, classe de isolamento

5.1.1 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 do motor 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 “varrer” 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 5.1, seja minimizada. Isto quer dizer que deve haver uma boa transferência de calor do interior do motor até a superfície externa.

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 5.1, vale a soma da queda interna com a queda externa.

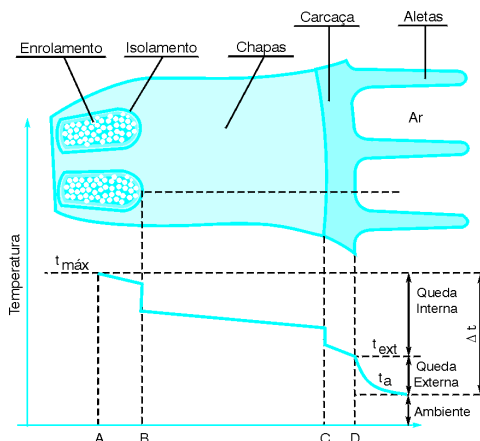


Figura 5.1

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 5.1, 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 haja “vazios” no interior da ranhura, isto é, as bobinas devem ser compactas e a impregnação com verniz deve ser perfeita.
- 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 e elevada queda de temperatura neste ponto.
- 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

Era comum, antigamente, verificar o aquecimento do motor, medindo, com a mão, a temperatura externa da carcaça. Em motores modernos, este método primitivo é completamente errado. Como vimos anteriormente, os critérios modernos de projeto, procuram aprimorar a transmissão de calor internamente, de modo que a temperatura do enrolamento fique pouco acima da temperatura externa da carcaça, onde ela realmente contribui para dissipar as perdas. Em resumo, a temperatura da carcaça não dá indicação do aquecimento interno do motor, nem de sua qualidade. Um motor frio por fora pode ter perdas maiores e temperatura mais alta no enrolamento do que um motor exteriormente quente.

5.1.2 Vida útil do motor

Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil da isolamento dos enrolamentos. 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 de trabalho dos materiais isolantes empregados. Um aumento de 8 a 10 graus na temperatura da isolamento reduz sua vida útil 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. Vida útil da 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 isolamento tem uma duração praticamente ilimitada, se a sua temperatura for mantida abaixo de um certo limite. Acima deste valor, a vida útil da isolamento 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.

5.1.3 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 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 NBR-7094, são as seguintes:

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

As classes B e F são as comumente utilizadas em motores normais.

5.1.4 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 preciso e mais confiável de se medir a temperatura de um enrolamento é através da variação de sua resistência ôhmica com a temperatura, que aproveita a propriedade dos condutores de variar sua resistência, segundo uma lei conhecida. A elevação da temperatura pelo método da resistência, é calculada por meio da seguinte fórmula, para condutores de cobre:

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

onde: $\Delta t =$ 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.

5.1.5 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) A temperatura ambiente é, no máximo 40 °C, por norma, e acima disso as condições de trabalho são consideradas especiais.
- b) 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, F e 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 5.1 abaixo:

Tabela 5.1 - Composição da temperatura em função da classe de isolamento

Classe de isolamento		A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	°C	40	40	40	40	40
$\Delta t =$ 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

Para motores de construção naval, deverão ser obedecidos todos os detalhes particulares de cada entidade classificadora, conforme tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Correção das temperaturas para rotores navais

Entidades classificadoras para uso naval	Máxima temperatura ambiente °C ta	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 Véritas	50	50	65	70	90
Norske Véritas	45	50	65	70	90
Lloyds Register of Shipping	45	50	65	70	90
RINa	45	50	70	75	—

5.2 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 a plena carga por:

- 1.25: para motores com fator de serviço igual ou superior a 1.15;
- 1.15: para motores com fator de serviço igual a 1.0 (NBR 5410)

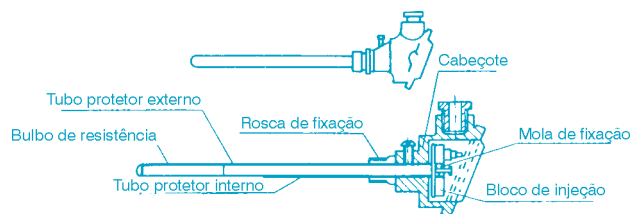
A proteção térmica é efetuada por meio de termoresistências (resistência calibrada), termistores, termostatos ou protetores térmicos. Os tipos de detectores a serem utilizados são determinados em função da classe de temperatura do isolamento empregado, de cada tipo de máquina e da exigência do cliente.

TIPO DE PROTETORES UTILIZADOS PELA WEG:

5.2.1 Termorresistores (PT-100)

São elementos onde sua operação é baseada na característica de variação da resistência com a temperatura, intrínseca a alguns materiais (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. Sua aplicação é ampla nos diversos setores de técnicas de medição e automatização de temperatura nas indústrias em geral. Geralmente, aplica-se em instalações de grande responsabilidade como, por exemplo, em regime intermitente muito irregular. Um mesmo detector pode servir para alarme e para desligamento. São obrigatórios em motores de segurança aumentada.

Desvantagem



Os elementos sensores e os circuitos de controle, possuem um alto custo. Figura 5.2 - Visualização do aspecto interno e externo dos termoresistores

A variação da temperatura poderá ser obtida com a fórmula

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

5.2.2 Termistores (PTC e NTC)

São detectores térmicos compostos de sensores semicondutores que variam sua resistência bruscamente ao atingirem uma determinada temperatura.

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

O tipo "PTC" é um termistor cuja resistência aumenta bruscamente para um valor bem definido de temperatura, especificado para cada tipo. Essa variação brusca na resistência interrompe a corrente no PTC, acionando um relé de saída, o qual desliga o circuito principal. Também pode ser utilizado para sistemas de alarme ou alarme e desligamento (2 por fase). Para o termistor "NTC" acontece o contrário do PTC, porém, sua aplicação não é normal em motores elétricos, pois os circuitos eletrônicos de controle disponíveis, geralmente são para o PTC.

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 ou freqüentes operações de reversão ou liga-desliga. Possuem um baixo custo, relativamente ao do tipo Pt-100, porém, necessitam de relé para comando da atuação do alarme ou operação.



Figura 5.3 - Visualização do aspecto externo dos termistores

5.2.3 Termostatos

São detectores térmicos do tipo bimetalício com contatos de prata normalmente fechados, que se abrem quando ocorre determinada elevação de temperatura. Quando a temperatura de atuação do bimetalício 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, quando solicitado pelo cliente. São ligados em série com bobina do contator. 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.

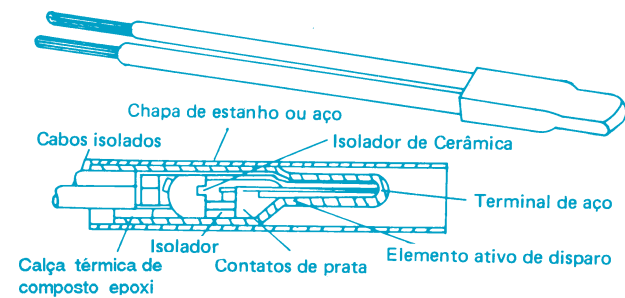


Figura 5.4 - Visualização do aspecto interno e externo do termostato

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, liga-se o termostato em série com a bobina do contator. Os termostatos são instalados nas cabeças de bobinas de fases diferentes.



Figura 5.5 - Instalação do termostato na cabeça da bobina

5.2.4 Protetores térmicos

São do tipo bimetalício com contatos normalmente fechados. Utilizados, principalmente, para proteção contra sobreaquecimento em motores de indução monofásicos, provocado por sobrecargas, travamento do rotor, quedas de tensão, etc. São aplicados quando especificados pelo cliente. O protetor térmico consiste basicamente em um disco bimetalício 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 deste, ocorre uma deformação do disco, tal que, os contatos se abrem e a alimentação do motor é interrompida. Após ser atingida uma temperatura inferior à especificada, o protetor deve religar. Em função de religamento, pode haver dois tipos de protetores:

- Protetor com religamento automático, onde o rearme é realizado automaticamente.
- Protetor com religamento manual, onde o rearme é realizado através de um dispositivo manual.

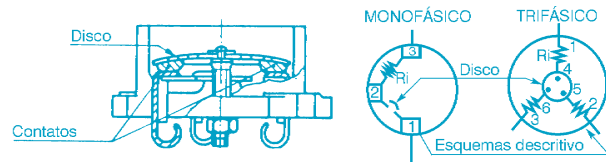


Figura 5.6 - Visualização do aspecto interno do protetor térmico

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

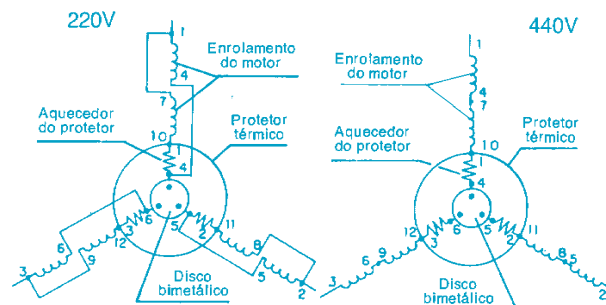


Figura 5.7 - Esquema de ligação do protetor térmico para motores trifásicos

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.

Tabela 5.3 - Comparativa entre os sistemas de ligação mais comuns

	TERMORESISTOR (PT-100)	TERMISTOR (PTC e NTC)	TERMOSTATO	PROTECTOR TÉRMICO
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 5.4 - Comparativa entre sistemas de proteção de motores

Causas de sobreaquecimento	Proteção em função da corrente		Proteção com sondas térmicas no motor
	Só fusível	Fusível e protetor 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	○	○	●

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

5.3 Regime de serviço

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 varia ou nos quais varia 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 seqüência real dos valores no tempo for indeterminada, deverá ser indicada uma seqüência fictícia não menos severa que a real.

5.3.1 Regimes padronizados

Os regimes de tipo e os símbolos alfa-numéricos a eles atribuídos, são indicados a seguir:

a) Regime contínuo (S1)

Funcionamento a carga constante de duração suficiente para que se alcance o equilíbrio térmico (figura 5.8).

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

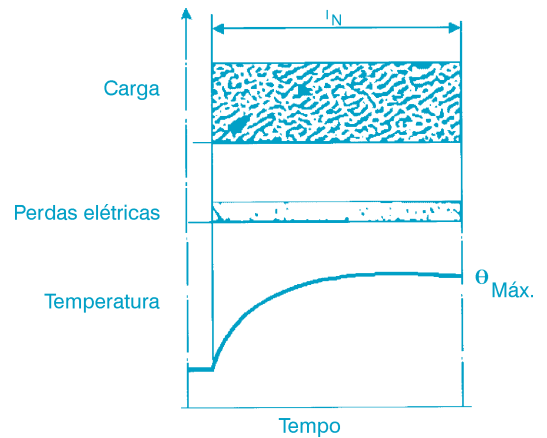


Figura 5.8

b) Regime de tempo limitado (S2)

Funcionamento a 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 igualdade de temperatura com o meio refrigerante (figura 5.9).

t_N = funcionamento em carga constante
 $q_{máx}$ = temperatura máxima atingida durante o ciclo

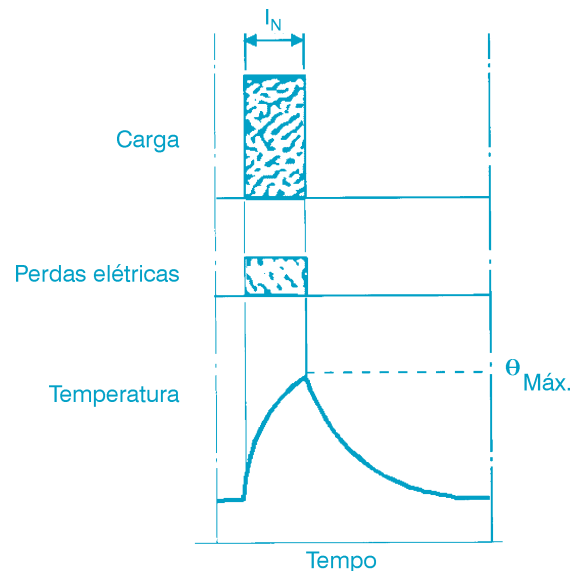


Figura 5.9

c) Regime intermitente periódico (S3)

Seqüência de ciclos idênticos, cada qual incluindo um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico durante um ciclo de regime e no qual a corrente de partida não afete de modo significativo a elevação de temperatura (figura 5.10)

- t_N = funcionamento em carga constante
- t_R = repouso
- q_{\max} = temperatura máxima atingida durante o ciclo

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

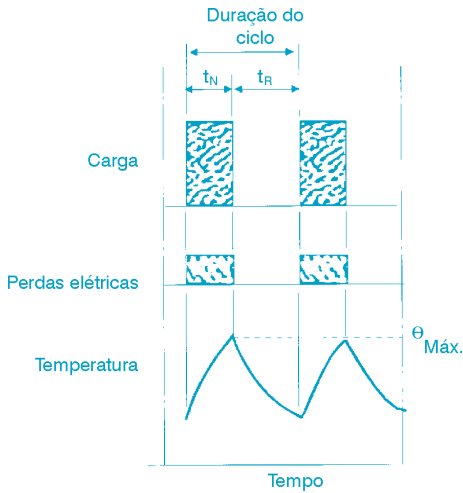


Figura 5.10

d) Regime intermitente periódico com partidas (S4)

Seqüência 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 5.11).

- t_D = partida
- t_N = funcionamento em carga constante
- t_R = repouso
- q_{\max} = temperatura máxima atingida durante o ciclo

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

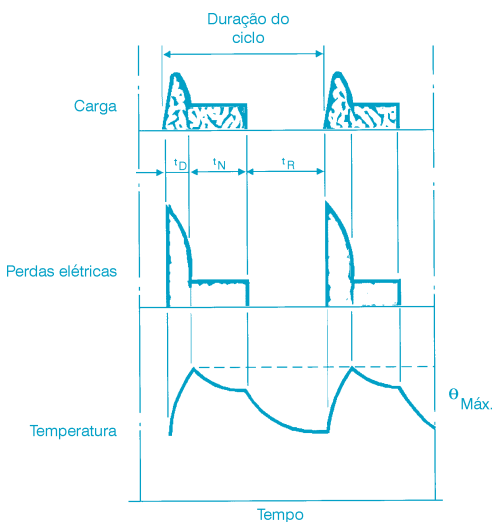


Figura 5.11

e) Regime intermitente periódico com frenagem elétrica (S5)

Seqüência 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 de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico (figura 5.12).

- t_D = partida
- t_N = funcionamento em carga constante
- t_F = frenagem elétrica
- t_R = repouso
- q_{\max} = temperatura máxima atingida durante o ciclo

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

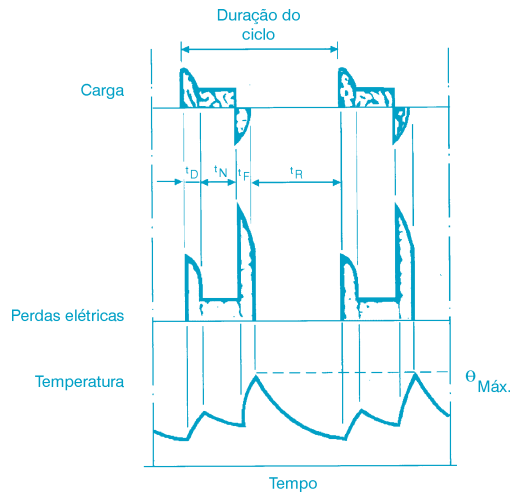


Figura 5.12

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

Seqüência 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 5.13)

- t_N = funcionamento em carga constante
- t_V = funcionamento em vazio
- q_{\max} = temperatura máxima atingida durante o ciclo

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

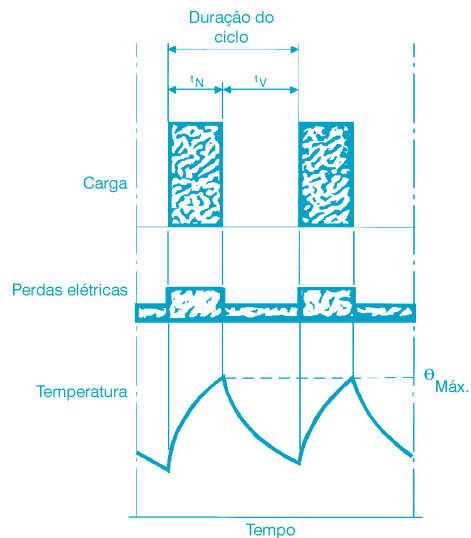


Figura 5.13

ESPECIFICAÇÃO

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

Seqüência 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 5.14).

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

Fator de duração do ciclo = 1

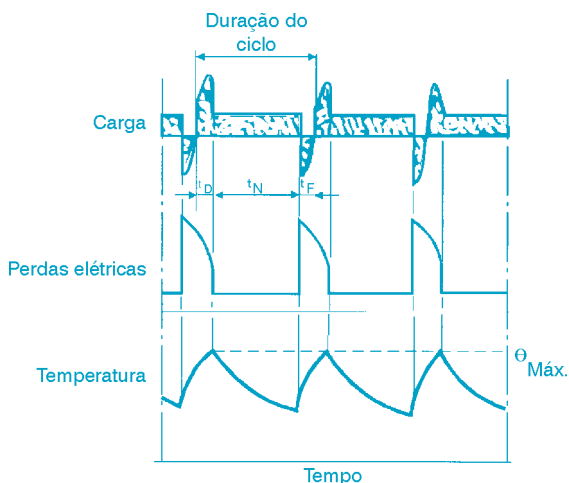


Figura 5.14

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

Seqüência de ciclos de regimes idênticos, cada ciclo consistindo de um período de partida e um período de funcionamento a carga constante, correspondendo a uma velocidade de rotação pré-determinada, seguidos de um ou mais períodos de funcionamento a outras cargas constantes, correspondentes a diferentes velocidades de rotação. Não existe período de repouso (figura 5.15).

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

Fator de duração de ciclo:

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

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

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

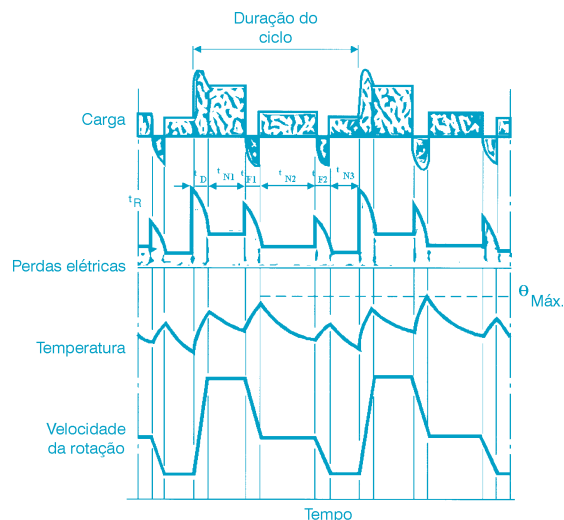


Figura 5.15

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 freqüentemente sobrecargas aplicadas que podem ser muito superiores às plenas cargas (figura 5.16).

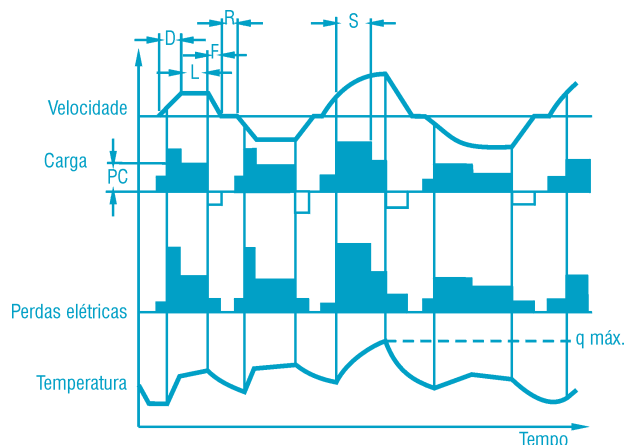


Figura 5.16

j) Regime com cargas constantes distintas (S10)

Regime com cargas constantes distintas, incluindo no máximo, quatro valores distintos de carga (ou cargas equivalentes), cada valor sendo mantido por tempo suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido. A carga mínima durante um ciclo de regime pode ter o valor zero (funcionando em vazio ou repouso). (Figuras 5.17a, b e c).

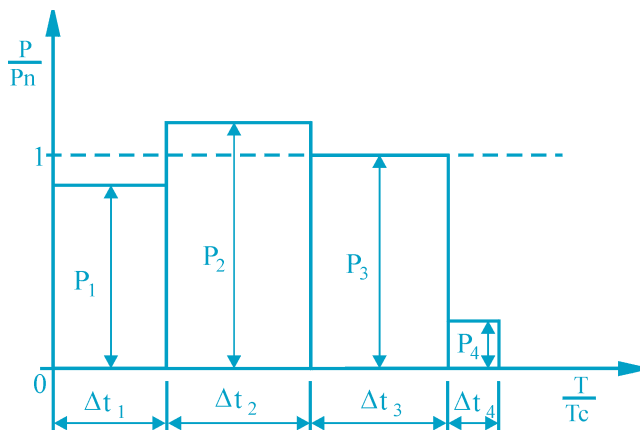


Figura 5.17a

ESPECIFICAÇÃO

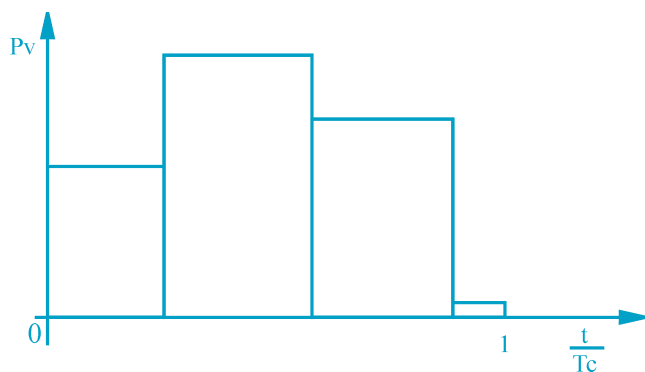


Figura 5.17b

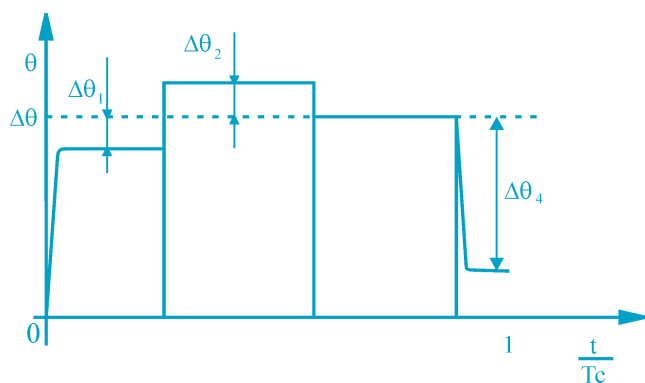


Figura 5.17c

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 contra-corrente, 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 ou, se ela varia conforme um gráfico de potência requerida durante um ciclo (a figura 5.14 mostra um gráfico simples, onde a potência varia no período de carga).
- 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 contra-corrente, etc.
- Duração dos períodos em carga e em repouso ou vazio.

5.3.2 Designação do regime tipo

O regime tipo é designado pelo símbolo descrito no item 5.3. 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 (FI).

onde:
Constante de energia cinética é a relação entre a energia cinética (armazena 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 FI. 10 33cv 740rpm 3min
onde: ● H.1 significa uma constante de energia cinética igual a 1s;
● FI.10 significa um fator de inércia igual a 10.
- 4) S10 para $\Delta t = 1,1/0,4; 1,0/0,3; 0,9/0,2; r/0,1; TL=0,6$, 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”.

5.3.3 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 exigida 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-se rapidamente. Deve-se sempre ter em mente que a potência solicitada ao motor é definida pelas características da carga, isto é, independentemente da potência do motor, ou seja: para uma carga de 90cv solicitada de um motor, por exemplo, independentemente deste ser de 75cv ou 100cv, a potência solicitada ao motor será de 90cv.

5.3.4 Potências equivalentes para cargas de pequena inércia

Evidentemente um motor elétrico deverá suprir à máquina acionada 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 freqüentemente necessário na prática, avaliar a solicitação imposta ao motor por um regime mais complexo que aqueles descritos nas normas. Uma forma usual é calcular a potência equivalente pela fórmula:

$$(P_m)^2 = \frac{1}{T} \sum_0^T P(t) \cdot \Delta t$$

- 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,

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

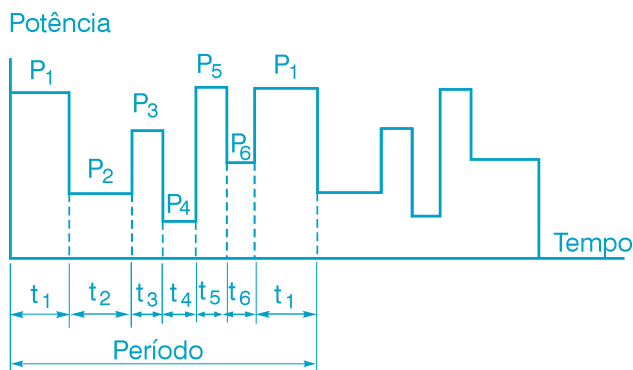


Figura 5.18 - Funcionamento contínuo com solicitações intermitentes

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 montados no próprio eixo do motor) a potência equivalente é calculada pela fórmula:

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

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

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

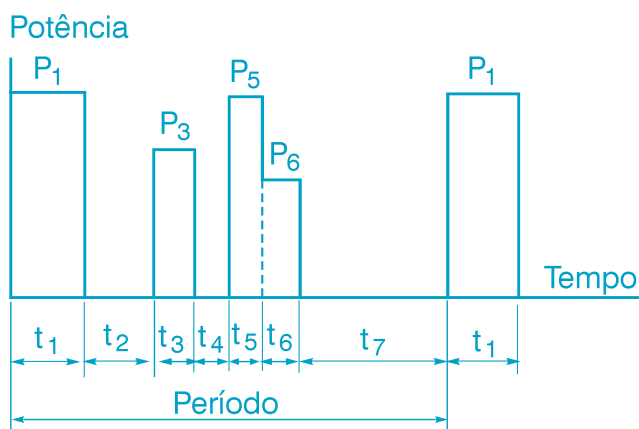


Figura 5.19 - Funcionamento com carga variável e com repouso entre os tempos de carga

5.4 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 NBR 7094 especifica os fatores de serviço usuais por potência.

6. Características de ambiente

A potência admissível do motor de indução é determinada levando-se em consideração, principalmente, dois fatores:

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

Conforme a NBR-7094, as condições usuais de serviço, são:

- Altitude não superior a 1.000 m acima do nível do mar;
- 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.

6.1 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.

A insuficiente troca de calor entre o motor e o ar circundante, leva a 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 ainda três soluções possíveis:

- A instalação de um motor em altitudes acima de 1.000 metros pode ser feita usando-se material isolante de classe superior.
- Motores com fator de serviço maior que 1,0 (1,15 ou maior) trabalharão satisfatoriamente em altitudes acima de 1.000 m com temperatura ambiente de 40 °C desde que seja requerida pela carga, somente a potência nominal do motor.
- Segundo a norma NBR-7094, a redução necessária na temperatura ambiente deve ser de 1% dos limites de elevação de temperatura para cada 100m de altitude acima de 1.000 m.

Exemplo:

Motor de 100cv, isolamento B, trabalhando numa altitude de 1.500 m acima do nível do mar, a temperatura permitida pelo ambiente marítimo será reduzida 5%.

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

6.2 Temperatura ambiente

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

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

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 pela redução da potência nominal do motor.

6.3 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 6.1.

Tabela 6.1 - Fator de multiplicação da potência útil em função da temperatura ambiente (T) em "°C" e de altitude (H) em "m"

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	0,78
45	0,95	0,92	0,90	0,88	0,85	0,82	0,80
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

Exemplo:

Um motor de 100cv, isolamento B, para trabalhar num local com altitude de 2.000 m e a temperatura ambiente é de 55 °C.

Da tabela 6.1 - $\alpha = 0,70$ logo

$$P'' = 0,7 \cdot P_n$$

O motor poderá fornecer apenas 70% de sua potência nominal.

6.4 Atmosfera ambiente

6.4.1 Ambientes agressivos

Ambientes agressivos, tais como estaleiros, instalações portuárias, indústria de pescados e múltiplas aplicações navais, indústria 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 desenvolveu uma linha de motores, projetados para atender os requisitos especiais e padronizados para as condições mais severas que possam ser encontradas. Os motores deverão ter as seguintes características especiais:

- enrolamento duplamente impregnado
- pintura anti-corrosiva alquídica, interna e externa
- placa de identificação de aço inoxidável
- elementos de montagem zincados
- ventilador de material não faiscante
- retentores de vedação entre o eixo e as tampas
- juntas de borracha para vedar caixa de ligação
- massa de calafetar na passagem dos cabos de ligação pela carcaça
- caixa de ligação de ferro fundido

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
- LLOYD'S REGISTER OS SHIPPING
- GERMANISCHER LLOYD

6.4.2 Ambientes contendo poeiras ou fibras

Para analisar se os motores podem ou não trabalhar nestes ambientes, devem ser informados os seguintes dados: tamanho e quantidade aproximada das fibras contidas no ambiente. O tamanho e a quantidade de fibras 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.

6.4.3 Locais que a ventilação do motor é 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.

6.4.4. Ambientes perigosos

Os motores a prova de explosão, destinam-se a trabalhar em ambientes classificados como perigosos por conterem gases, vapores, poeiras ou fibras inflamáveis ou explosivas. O capítulo 7 (ambientes perigosos) trata especificamente o assunto.

6.5 Graus 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.

6.5.1 Código de identificação

A norma NBR-6146 define os graus de proteção dos equipamentos elétricos por meio das letras características IP, seguidas por dois algarismos.

Tabela 6.2 - 1º ALGARISMO: Indica o grau de proteção contra penetração de corpos sólidos estranhos e contato acidental

1º ALGARISMO	
ALGARISMO	INDICAÇÃO
0	Sem proteção
1	Corpos estranhos de dimensões acima de 50mm
2	Corpos estranhos de dimensões acima de 12mm
3	Corpos estranhos de dimensões acima de 2,5mm
4	Corpos estranhos de dimensões acima de 1,0mm
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor
6	Totalmente protegido contra a poeira

Tabela 6.3 - 2º ALGARISMO: Indica o grau de proteção contra penetração de água no interior do motor

2º ALGARISMO	
ALGARISMO	INDICAÇÃO
0	Sem proteção
1	Pingos de água na vertical
2	Pingos de água até a inclinação de 15º com a vertical
3	Água de chuva até a inclinação de 60º com a vertical
4	Respingos de todas as direções
5	Jatos d'água de todas as direções
6	Água de vagalhões
7	Imersão temporária
8	Imersão permanente

As combinações entre os dois algarismos, isto é, entre os dois critérios de proteção, estão resumidos na tabela 6.4. 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.

Tabela 6.4 - Graus de proteção

Motor	Classes 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 15º com a vertical
	IP11	toque acidental com a mão	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 50mm	pingos de água na vertical
	IP12			pingos de água até uma inclinação de 15º com a vertical
	IP13			água de chuva até uma inclinação de 60º com a vertical
	IP21	toque com os dedos	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 12mm	pingos de água na vertical
	IP22			pingos de água até uma inclinação de 15º com a vertical
	IP23			água de chuva até uma inclinação de 60º com a vertical
Motores fechados	IP44	toque com ferramentas	corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 1mm	respingos de todas as direções
	IP54	proteção completa contra toque	proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	respingos de todas as direções
	IP55			jatos de água em todas as direções
	IP(W)55	proteção completa contra toques	proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	chuva maresia

6.5.2 Tipos usuais 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 blindados. Para aplicações especiais mais rigorosas, são comuns também os graus de proteção IPW55 (proteção contra intempéries), IP56 (proteção contra "água de vagalhões") e IP65 (totalmente protegido contra poeiras). 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.

6.5.3 Motores a prova de intempéries

A letra W, colocada entre as letras IP e os algarismos indicativos do grau de proteção, indica que o motor é protegido contra intempéries.

Exemplo:

IPW55 significa motor com grau de proteção IP55 quanto a penetração de poeiras e água, sendo, além disso, protegido contra intempéries (chuva, maresia, etc.), também chamados motores de uso naval.

Ambientes agressivos exigem que os equipamentos que neles trabalham, seja, 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. São a prova de tempo e adequados aos mais severos regimes de trabalho.

6.6 Resistência de aquecimento

As resistências de aquecimento são instaladas quando um motor elétrico é instalado em ambientes muito úmidos, com a possibilidade de ficar desligado por longos períodos, 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 110V, 220V e 440V. Dependendo da carcaça, serão empregados os resistores de aquecimento, conforme tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Resistência de aquecimento

Carcaça	Potência (W)
63 a 90	8
100 a 112	16
132	24
160 a 200	48
225 a 250	90
280 a 355	180

6.7 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 6.6, estão conforme NBR 7576.

Tabela 6.6 - Nível de potência sonora - dB(A) NBR 7565

Graus de proteção				IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44
Velocidade nominal (rpm) - "n"				n ≤ 960		960 < n ≤ 1320		1320 < n ≤ 1900		1900 < n ≤ 2360		2360 < n ≤ 3150		3150 < n ≤ 3750	
Faixas de potências nominais, P				Nível de potência sonora dB (A)											
Geradores de corrente		Motores													
Alternada kVA	Contínua kW	kW	cv												
P ≤ 1,1		P < 1,1	P < 1,5	73	73	76	76	77	78	79	81	81	84	82	86
1,1 < P < 2,2		1,1 < P < 2,2	1,5 < P < 3,0	74	74	78	78	81	82	83	85	85	86	86	91
2,2 < P < 5,5		2,2 < P < 5,5	3,0 < P < 7,5	77	78	81	82	85	86	86	90	89	93	93	95
5,5 < P < 11		5,5 < P < 11	7,5 < P < 15	81	82	85	85	88	90	90	93	93	97	97	96
11 < P < 22		11 < P < 22	15 < P < 30	84	86	88	88	91	94	93	97	96	100	97	100
22 < P < 37		22 < P < 37	30 < P < 50	87	90	91	91	94	98	96	100	99	102	101	102
37 < P < 55		37 < P < 55	50 < P < 75	90	93	95	94	96	100	98	102	101	104	103	104
55 < P < 110		55 < P < 110	75 < P < 150	93	96	97	95	100	103	101	104	103	106	105	106
110 < P < 220		110 < P < 220	150 < P < 300	97	99	100	102	103	106	103	108	105	109	107	110
220 < P < 630		220 < P < 630	300 < P < 860	99	102	103	105	106	108	106	109	107	111	110	113
630 < P < 1100		630 < P < 1100	860 < P < 1100	101	105	106	108	108	111	108	111	109	112	111	116
1100 < P < 2500		1100 < P < 2500	1500 < P < 3400	103	107	108	110	109	113	109	113	110	113	112	118
2500 < P < 6300		2500 < P < 6300	3400 < P < 8600	106	109	110	112	110	115	111	115	112	115	114	120

7. Ambientes perigosos

7.1 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.

7.2 Atmosfera explosiva

Uma atmosfera é explosiva quando a proporção de gás, vapor, pó 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

7.3 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, às áreas de risco são classificadas em divisões.

- Divisão I - Região onde se apresenta uma ALTA probabilidade de ocorrência de uma explosão.
- Divisão II - Região de menor probabilidade

Tabela 7.1 - Comparativo entre ABNT/IEC e NEC/API

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

Classes e grupos das áreas de risco

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

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

Classe I:

Gases ou vapores explosivos.

Conforme o tipo de gás ou vapor, temos:

- 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/IEC, as regiões de risco são divididas em:

- Grupo I - Para minas susceptíveis à liberação de grisú (gás a base de metano).
- Grupo II - Para aplicação em outros locais Sendo divididos em IIA, IIB e IIC.

Tabela 7.2 - Correspondência entre ABNT/IEC e NEC/API

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

Tabela 7.3 - Classificação de áreas conforme IEC e NEC

Atmosfera explosiva	IEC-79.10	NEC
Gases ou vapores	Zona 0 e Zona 1	Classe I Divisão 1
	Zona 2	Classe I Divisão 2
Poeiras	Zona 10	Classe II Divisão 1
	Zona 11	Classe II Divisão 1
Fibras	Zona 10	Classe II Divisão 1
	Zona 11	Classe II Divisão 2

7.4 Classes de temperatura

A temperatura máxima na superfície exposta do equipamento elétrico deve ser sempre menor que a temperatura de ignição do gás ou vapor os gases podem ser classificados para às classes de temperatura de acordo com sua temperatura de ignição, por meio do qual a máxima temperatura de superfície dá respectiva classe, deve ser menor que a temperatura dos gases correspondentes.

Tabela 7.4 - Classes de temperatura

IEC	Classes de temperatura	Temperatura máxima de superfície	NEC		Temperatura de ignição dos gases e/ou vapores
			Classes de temperatura	Temperatura máxima de superfície	
T2		300	T1	450	> 450
			T2	300	> 300
			T2A	280	> 280
			T2B	260	> 260
			T2C	230	> 230
T3		200	T2D	215	> 215
			T3	200	> 200
			T3A	180	> 180
			T3B	165	> 165
			T3C	160	> 160
T4		135	T4A	120	> 120
			T4	135	> 135
			T5	100	> 100
			T6	85	> 85
			T6	85	> 85

7.5 Equipamentos para áreas de risco (opções para os equipamentos)

Tabela 7.5

Tipo de proteção	Simbologia IEC/ABNT	Definição	Área de aplicação	Nomal ABNT ou IEC
A prova de explosão	Ex(d)	Capaz de suportar explosão interna sem permitir que se propague para o meio externo	zonas 1 e 2	IEC-79.1 NBR-5363
Segurança aumentada	Ex(e)	Medidas construtivas adicionais aplicadas a equipamentos que em condições normais de operação não produzem arco, centelha ou alta temperatura	zonas 1 e 2	IEC-79.7 NBR-9883
Não acendível	Ex(n)	Dispositivo ou circuitos que apenas em condições normais de operação, não possuem energia suficiente para inflamar a atmosfera explosiva	zona 2	IEC-79.15
Invólucro hermético	Ex(h)	Invólucro com fechamento hermético (por fusão de material)	zona 2	PROJ. IEC-31 (N) 36

Os ensaios e certificação desses equipamentos serão desenvolvidos pelo LABEX - Laboratório de Ensaio e Certificação de Equipamentos Elétricos com Proteção contra Explosão -, que foi inaugurado em 16/12/1986 e pertence ao conglomerado laboratorial do Centro de Pesquisas Elétricas - CEPEL da Eletrobrás. O quadro abaixo mostra a seleção dos equipamentos para as áreas classificadas de acordo com a norma IEC 79-14 ou VDE 0165. De acordo com a norma NEC, a relação dos equipamentos está mostrada no quadro abaixo:

Tabela 7.6

IEC-79-14 / VDE 0165	
ZONA 0	<ul style="list-style-type: none"> Ex-i ou outro equipamento, ambos especialmente aprovados para zona 0
ZONA 1	Equipamentos com tipo de proteção: <ul style="list-style-type: none"> a prova de explosão Ex-d presurização Ex-p segurança intrínseca Ex-i imersão em óleo Ex-o segurança aumentada Ex-e enchimento com areia Ex-q proteção especial Ex-s encapsulamento Ex-m
ZONA 2	<ul style="list-style-type: none"> Qualquer equipamento certificado para zona 0 ou 1 Equipamentos para zona 2 Não acendível Ex-n

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

Tabela 7.7

NORMA NEC	
DIVISÃO I	Equipamentos com tipo de proteção: <ul style="list-style-type: none"> a prova de explosão serão para classe I Ex-d presurização Ex-p imersão em óleo Ex-o segurança intrínseca Ex-i
DIVISÃO II	<ul style="list-style-type: none"> Qualquer equipamento certificado para divisão I Equipamentos incapazes de gerar faíscas ou superfícies quentes em invólucros de uso geral: não acendíveis.

7.6 Equipamentos de segurança aumentada - Proteção Ex-e

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 7.1 e 7.2).

- 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

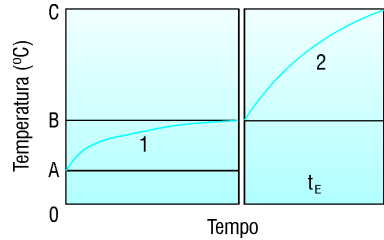


Figura 7.1 - Diagrama esquemático explicando o método de determinação do tempo " t_E "

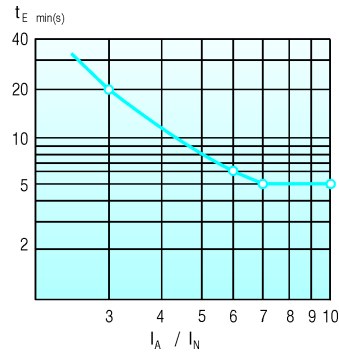


Figura 7.2 - Valor mínimo do tempo " t_E " em função da relação da corrente de arranque I_A / I_N

7.7 Equipamentos com invólucros a prova de explosão - Ex-d

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.

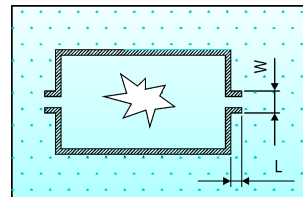


Figura 7.3 - Princípio da proteção Ex-d

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 Ex-d não permitirá que uma eventual explosão interna se propague ao ambiente externo. Para a segurança do sistema, a WEG controla os valores dos interstícios e as condições de acabamento das juntas, pois são responsáveis pelo volume de gases trocados entre o interior e exterior do motor.

Além de executar testes hidrostáticos em 100% das tampas, caixas de ligações e carcaças, com uma pressão quatro vezes maior que a verificada em testes realizados em laboratórios nacionais e internacionais de renome, realiza também testes de explosão provocada em institutos de pesquisa reconhecidos, como por exemplo o IPT de São Paulo.

8. Características construtivas

8.1 Dimensões

As dimensões dos motores elétricos WEG, são padronizadas de acordo com a NBR-5432, a qual, acompanha a International Electrotechnical Commission - IEC-72. Nestas normas, a dimensão básica para a padronização das dimensões de montagem de máquinas elétricas, é a altura do plano da base ao centro da ponta do eixo, denominado de H (figura 8.1).

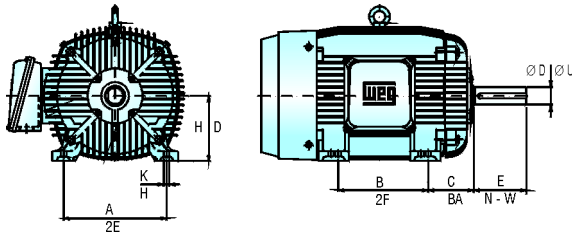


Figura 8.1

A cada altura de 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 (dimensão axial da distância entre centros dos furos dos pés), de forma que é possível ter-se em 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, podem assumir múltiplos valores a partir da carcaça H, igual a 355mm.

Para os clientes, que exigem carcaças padronizadas pela norma NEMA, a tabela 8.1, faz a comparação entre as dimensões H - A - B - C - K - D - E da ABNT/IEC e D - 2E - 2F - BA - H - U - NW da norma NEMA.

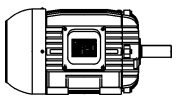
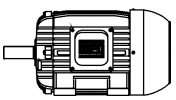
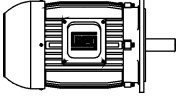
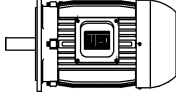
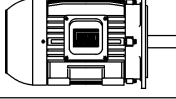
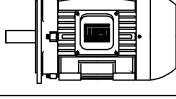
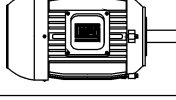
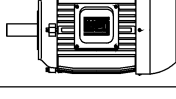
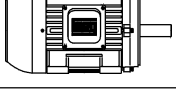
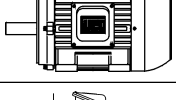

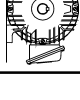
Tabela 8.1 - Comparação de dimensões ABNT/IEC e NEMA

ABNT / IEC NEMA	H D	A 2E	B EF	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	114	70	12	28j6	60
182 T	114,3	190,5	114,3	70	10,3	28,6	69,9
112 M	112	190	140	70	12	28j6	60
184 T	114,3	190,5	139,7	70	10,3	28,6	69,9
132 S	132	216	140	89	12	38k6	80
213 T	133,4	216	139,7	89	10,3	34,9	85,7
132 M	132	216	178	89	12	38k6	80
215 T	133,4	216	177,8	89	10,3	34,9	85,7
160 M	160	254	210	108	15	42k6	110
254 T	158,8	254	209,6	108	13,5	41,3	101,6
160 L	160	254	254	108	15	42k6	110
256 T	158,8	254	254	108	13,5	41,3	101,6
180 M	180	279	241	121	15	48k6	110
284 T	177,8	279,4	241,3	121	13,5	47,6	117,5
180 L	180	279	279	121	15	48k6	110
286 T	177,8	279,4	279,4	121	13,5	47,6	117,5
200 M	200	318	267	133	19	55m6	110
324 T	203,2	317,5	266,7	133	16,7	54	133,4
200 L	200	318	305	133	19	55m6	110
326 T	203,2	317,5	304,8	133	16,7	54	133,4
225 S	225	356	286	149	19	60m6	140
364 T	228,6	355,6	285,8	149	19,0	60,3	149,2
225 M	225	356	311	149	19	60m6	140
365 T	228,6	355,6	311,2	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	75m6	140
444 T	279,4	457,2	368,4	190	20,6	85,7	215,9
280 M	280	457	419	190	24	75m6	140
445 T	279,4	457,2	419,1	190	20,6	85,7	215,9
315 S	315	508	406	216	28	80m6	170
504 Z	317,5	508	406,4	215,9	31,8	92,1	269,9
315 M	315	508	457	216	28	80m6	170
505 Z	317,5	508	457,2	215,9	31,8	92,1	269,9
355 M	355	610	560	254	28	100m6	210
586	368,3	584,2	558,8	254	30	98,4	295,3
355 L	355	610	630	254	28	100m6	210
587	368,3	584,2	635	254	30	98,4	295,3

8.2 Formas construtivas normalizadas

Entende-se por forma construtiva, como sendo o arranjo das partes construtivas das máquinas com relação a sua fixação, a disposição de seus mancais e a ponta de eixo, que são padronizadas pela NBR-5031, IEC 34-7, DIN-42955 e NEMA MG 1-4.03. A NBR-5432, determina 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. Os quadros a seguir, indicam as diversas formas normalizadas.

Tabela 8.2a - Formas construtivas normalizadas (montagem horizontal)

Figura	Símbolo para				Carcaça	Fixação ou montagem
	Designação WEG	DIN 42950	IEC 34 Parte 7			
			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 pela 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					

(*) Subestrutura: bases, placa de base, fundações, trilhos, pedestais, etc.

Tabela 8.2b - Formas construtivas normalizadas (montagem horizontal)

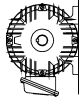

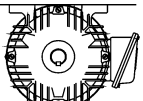

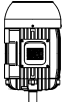


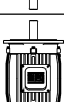



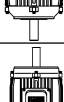
Figura	Símbolo para				Carcaça	Fixação ou montagem
	Designação WEG	DIN 42950	IEC 34 Parte 7			
			Código I	Código II		
	B7D	B7	IM B7	IM 1061	com pés	montado em parede pés à direita, olhando-se do lado do acionamento
	B7E					
	B8D	B8	IM B8	IM 1071	com pés	fixada no teto
	B8E					

Tabela 8.3 - Formas construtivas normalizadas (montagem vertical)

Figura	Símbolo para				Carcaça	Fixação ou montagem
	Designação WEG	DIN 42950	IEC 34 Parte 7			
			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 pela face superior do flange "C", para baixo
	V19	V19	IM V19	IM 3631	sem pés	fixada pela face superior do flange "C", para cima

8.3 Pintura

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

Tabela 8.4 - Planos de pintura

USO RECOMENDADO	PLANO	COMPOSIÇÃO OPERACIONAL
AMBIENTES NÃO AGRESSIVOS: não recomendado para exposição direta a vapores de ácidos, álcalis e solventes.	201	- 1 demão com 30 a 40 μm de tinta fundo primer sintético alquídico. - 1 demão com 30 a 40 μm de tinta de acabamento esmalte sintético alquídico.
AMBIENTES INDUSTRIAIS AGRESSIVOS ABRIGADOS: com resistência a vapores de ácidos, álcalis e solventes, como indústrias química, petroquímicas e fábricas de papel e celulose.	202	- 1 demão com 70 a 80 μm de tinta fundo epóxi poliamida. - 2 demãos com 35 a 70 μm cada, de tinta de acabamento epóxi poliamida.
AMBIENTES DE BAIXA AGRESSIVIDADE: não recomendado para exposição direta a vapores de ácidos, álcalis e solventes.	203	- 1 demão com 30 a 40 μm de tinta fundo primer sintético alquídico por imersão. - 1 demão com 30 a 40 μm de tinta fundo primer sintético alquídico por pulverização. - 1 demão com 30 a 40 μm de tinta de acabamento esmalte sintético alquídico.
AMBIENTES INDUSTRIAIS MARÍTIMOS DESABRIGADOS: com resistência a respingos de ácidos, álcalis e solventes.	204	- 1 demão com 75 a 90 μm de tinta fundo de etil silicato de zinco. - 1 demão com 120 a 140 μm de tinta primer epóxi poliamida. - 2 demãos com 35 a 75 μm cada, de tinta de acabamento poliuretano alifático.
AMBIENTES INDUSTRIAIS AGRESSIVOS DESABRIGADOS: com vapores de ácidos, álcalis e solventes, como indústrias químicas, petroquímicas e fábricas de papel e celulose.	205	- 2 demãos com 85 a 100 μm cada, de tinta fundo epóxi poliamida. - 2 demãos com 35 a 75 μm cada, de tinta de acabamento poliuretano alifático.
AMBIENTES INDUSTRIAIS MARÍTIMOS ABRIGADOS: com resistência a respingos de ácidos, álcalis e solventes.	206	- 1 demão com 75 a 90 μm de tinta fundo de etil silicato de zinco. - 1 demão com 40 a 45 μm de tinta primer epóxi poliamida. - 3 demãos com 80 a 115 μm cada, de tinta de acabamento epóxi poliamida.
AMBIENTES NÃO AGRESSIVOS: não recomendado para exposição direta a vapores de ácidos, álcalis e solventes.	207	- 1 demão com 30 a 40 μm de tinta fundo primer sintético alquídico. - 1 demão com 30 a 40 μm de tinta de acabamento laca nitrocelulose reativa.

9. Seleção e aplicação dos motores elétricos 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, notadamente 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 a 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 Alto Rendimento Plus. 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 a norma NBR-5383 e seus valores de rendimento certificados e estampados na placa de identificação do motor. A técnica de ensaio é o método B da IEEE 112. Os valores de rendimento são obtidos através do método de separação de perdas de acordo com a NBR-5383-128. Os motores de alto rendimento, série Plus, são padronizados conforme as normas IEC, mantendo a relação potência/carcaça, sendo portanto, intercambiáveis com todos os motores normalizados existentes no mercado. Embora de custo mais elevado que o motor de gaiola, a aplicação de motores de anéis, é necessária para partidas pesadas (elevada inércia), acionamento de velocidade ajustável ou quando é necessário limitar a corrente de partida mantendo um alto conjugado de partida.

Tabela 9.1 - Comparação entre diferentes tipos de máquinas

Tipo	Motor de indução de gaiola	Motor de indução de anéis
Projeto	Rotor não bobinado	Rotor bobinado
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 - frequente
Custo	Baixo	Alto

Na seleção correta dos motores, é importante considerar as características técnicas de aplicação e as características de carga, 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.

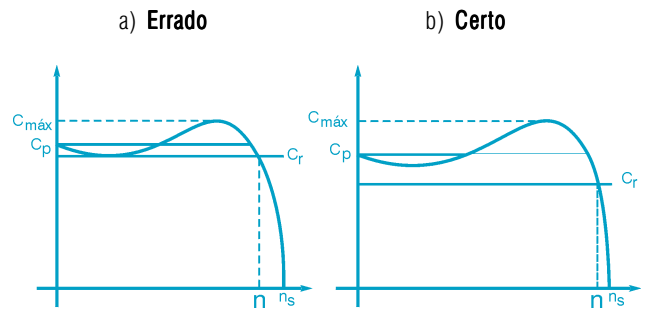


Figura 9.1 - Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga

- Onde: $C_{máx}$ = conjugado máximo
 C_p = conjugado de partida
 C_r = conjugado resistente
 n_s = rotação síncrono
 n = rotação nominal

O conjugado de aceleração assume valores bastante diferentes na fase de partida. O conjugado médio de aceleração (C_a) obtém-se a partir da diferença entre o conjugado do motor e o conjugado 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

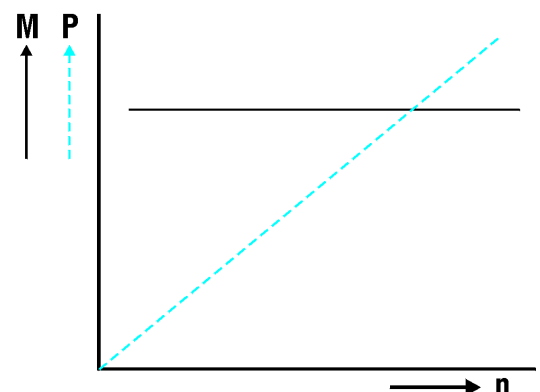


Figura 9.2

M = Conjugado resistente: constante

P = Potência: proporcional ao número de rotações (n)

Conjugado variável

Encontram-se casos de conjugado variável nas bombas, nos ventiladores, em que o conjugado varia com o quadrado na velocidade.

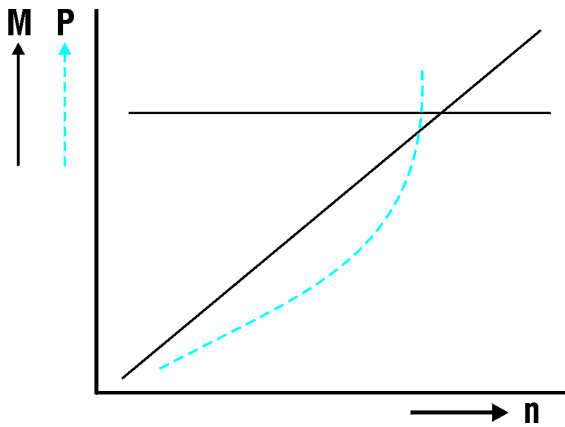


Figura 9.3

M = Conjugado resistente: proporcional ao número de rotações (n)

P = Potência: proporcional ao número de rotações ao quadrado (n^2)

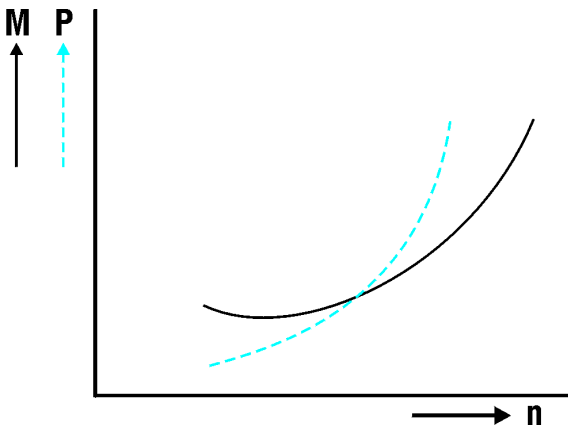


Figura 9.4

M = Conjugado resistente: proporcional ao número de rotações ao quadrado (n^2)

P = Potência: proporcional ao número de rotações ao cubo (n^3)

Potência constante

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

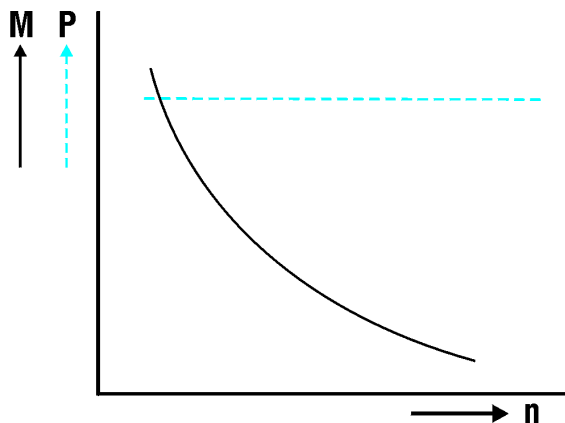


Figura 9.5

M = Conjugado resistente: inversamente proporcional ao número de rotações (n)

P = Potência constante

Para correta especificação do motor, são necessárias as seguintes informações na consulta:

Características da rede de alimentação

- Tensão de alimentação do motor (e dos aquecedores internos, quando necessários)
- Frequência nominal em Hz
- Método de partida (quando esta informação não for fornecida, será considerado como partida direta)

Características do ambiente

- Altitude
- Temperatura ambiente
- Atmosfera ambiente

Características construtivas

- Forma construtiva
- Potência em kW, velocidade em rpm
- Fator de serviço
- Potência térmica
- Sentido de rotação (horário ou anti-horário, olhando-se pelo lado do acionamento)

Características da carga

- Momento de inércia da máquina acionada e a que rotação está referida
- Curva de conjugado resistente
- Dados de transmissão
- Cargas axiais e seu sentido, quando existentes
- Cargas radiais e seu sentido quando existentes
- Regime de funcionamento da carga (n^o de partidas/hora).

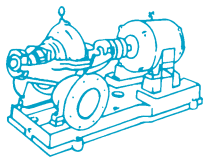
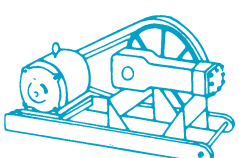
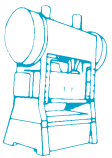
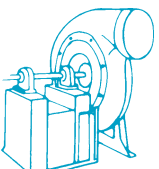
Em resumo, a correta seleção do motor implica que o mesmo satisfaça às exigências requeridas pela aplicação específica.

Sob este aspecto o motor deve, basicamente, ser capaz de:

- Acelerar a carga em tempo suficientemente curto para que o aquecimento não venha a danificar as características físicas dos materiais isolantes;
- Funcionar no regime especificado sem que a temperatura de suas diversas partes ultrapasse a classe do isolante, ou que o ambiente possa vir a provocar a destruição do mesmo;
- Sob o ponto de vista econômico, funcionar com valores de rendimento e fator de potência dentro da faixa ótima para a qual foi projetado.

9.1 Guia de seleção do tipo de motor para diferentes cargas

Tabela 9.2

Tipos de carga	Conjugado requerido		Característica da carga	Tipo de motor usado
	Partida	Máximo		
 Bombas centrífugas, ventiladores, furadeiras, compressores, retificadoras, trituradoras.	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 um função do quadrado da velocidade até um máximo, conseguindo 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 à sobrecargas, durante a velocidade nominal. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Conjugado de partida alto ○ Corrente de partida normal ○ Categoria N
 Prensas punçionadoras, 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 conjugado, alto ou baixo. Requerem partidas frequentes, paradas e reversões. ○ Máquinas acionadas, tais como: prensas punçionadoras, que podem usar volantes para suportar os picos de potência. ○ Pequena regulação 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 características 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)

9.2 Motores de Alto Rendimento WEG

a) Características construtivas:

Os motores de alto rendimento são motores projetados para, fornecendo a mesma potência útil (na ponta do eixo) que outros tipos de motores, consumirem menos energia elétrica da rede.

Construtivamente os motores de alto rendimento possuem as seguintes características:

- Chapas magnéticas de melhor qualidade (aço silício).
- Maior volume de cobre, que reduz a temperatura de operação.
- Enrolamentos especiais, que produzem menos perdas estatóricas.
- Rotores tratados termicamente, reduzindo perdas rotóricas.
- Altos fatores de enchimento das ranhuras, que provêm melhor dissipação do calor gerado.
- Anéis de curto circuito dimensionados para reduzir as perdas Joule.
- Projetos de ranhuras do motor são otimizados para incrementar o rendimento.

A linha Alto Rendimento Plus obedece a padronização da potência/polaridade x carcaça conforme a norma ABNT-NBR 8441. Isto facilita a troca/reposição de motores normalizados pelo Alto Rendimento Plus.

Todas estas características mencionadas acima permitem a esses motores obter um rendimento maior em relação aos motores Standard.

b) Porque usar motores de alto rendimento

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

Industrial	45,6%(119 Twh)
Residencial	26,5%(69 Twh)
Comercial	13,3%(35 Twh)
Outros	14,6%(38 Twh)
TOTAL	100%(261 Twh)

Analisando a tabela exposta acima, verifica-se que o maior consumo de energia elétrica está na indústria.

Dentro do ramo industrial, os motores elétricos são responsáveis por 51% do consumo total⁽¹⁾, o que justifica o uso de motores de alto rendimento. Preocupado com o iminente colapso no setor energético brasileiro, devido ao constante aumento na demanda de energia elétrica, e os baixos investimentos no setor, o governo criou em 30/12/1985 o Procel, "Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica", que tem como objetivo:

"Racionalizar o uso da energia elétrica e, como decorrência da maior eficiência, propiciar o mesmo produto ou serviço com menor consumo, eliminando desperdícios e assegurando redução global de custos e de investimentos em novas instalações no sistema elétrico".

c) Rendimentos mínimos para qualificação de motores alto rendimento

Inserida neste contexto a Nova NBR 7094: "Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução - Especificação", define os valores nominais mínimos para motores alto rendimento⁽²⁾ conforme tabela 9.2, que reproduzimos a seguir:

(1) Fonte: SIESE - Eletrobrás (Dez/98)

(2) Nota: item 13.1 da NBR 7094 define que tipos de motores se enquadram na definição de motores alto rendimento: "Para motores de indução, rotor de gaiola, trifásicos, regime tipo S1, uma velocidade, categorias N e H, grau de proteção IP44, IP54 ou IP55, de potência nominal igual ou superior a 0,75kW (1cv) e até 150kW (200cv), 2, 4, 6 e 8 pólos, 60Hz, tensão nominal igual ou inferior a 600V, qualquer forma construtiva ..."

Tabela 9.3 - Menores valores de rendimento nominal a plena carga, para motores de alto rendimento

Potência nominal		Velocidade síncrona rpm			
kW	cv	3600	1800	1200	900
		Rendimento nominal			
0,75	1,0	--	80,0	75,5	72,0
1,1	1,5	78,5	81,5	82,5	75,5
1,5	2,0	81,5	82,5	82,5	82,5
2,2	3,0	82,5	84,0	84,0	81,5
3,7	5,0	85,5	85,5	85,5	84,0
5,5	7,5	85,5	87,5	87,5	85,5
7,5	10,0	87,5	87,5	87,5	87,5
11,0	15,0	87,5	88,5	89,5	88,5
15,0	20,0	88,5	90,2	89,5	89,5
18,5	25,0	89,5	91,0	90,2	89,5
22,0	30,0	89,5	91,0	91,0	90,2
30,0	40,0	90,2	91,7	91,7	90,2
37,0	50,0	90,2	92,4	91,7	91,0
45,0	60,0	91,7	93,0	91,7	91,7
55,0	75,0	92,4	93,0	93,0	93,0
75,0	100,0	93,0	93,6	93,0	93,0
90,0	125,0	93,0	93,6	93,0	93,6
110,0	150,0	93,0	94,1	94,1	93,6
150,0	200	94,1	94,5	94,1	94,1

Os ensaios de determinação e rendimentos devem obedecer o método de ensaio da NBR 5383 denominado "Ensaio dinâmométrico com medição das perdas suplementares e medição direta das perdas no estator (I²R), no rotor (I²R), no núcleo e por atrito e ventilação".

As tolerâncias para os valores de rendimentos apresentados na tabela acima são definidas no capítulo 20 da NBR 7094.

Rendimento	Tolerância
$\eta \geq 0,851$	- 0,2 (1 - η)
$\eta < 0,851$	- 0,15 (1 - η)

Fazendo um paralelo com esta definição da norma, a WEG Motores dispõe de linhas de motores com Alto Rendimento que atendem as especificações desta norma, indo além em alguns itens:

- motores com grau de proteção IP21, IP23 etc
- potência nominal superiores a 150 kW
- frequências: 50 Hz
- motores com relação potência x carcaça igual a linha Standard permitindo intercambiabilidade
- motores para atmosferas explosivas (Ex-n, Ex-d, Ex-e, etc)
- motores com baixa corrente de partida (IP/IN \leq 6).

Em relação ao rendimento a WEG Motores, devido a globalização de seu mercado atende aos maiores valores exigidos na atualidade, que são os do mercado norte-americano.

A tabela a seguir, mostra estes valores, que estão comparados com os rendimentos exigidos pela NBR no gráfico logo a seguir, para motores IV pólos.

Tabela 9.4 - Menores valores de rendimentos para motores de alto rendimento (mercado norte-americano)

Potência nominal cv	Velocidade síncrona rpm			
	3600	1800	1200	900
	Rendimento nominal			
1,0	75,5	82,5	80,0	74,0
1,5	82,5	84,0	85,5	77,0
2,0	84,0	84,0	86,5	82,5
3,0	85,5	87,5	87,5	84,0
5,0	87,5	87,5	87,5	85,5
7,5	88,5	89,5	89,5	85,5
10,0	89,5	89,5	89,5	88,5
15,0	90,2	91,0	90,2	88,5
20,0	90,2	91,0	90,2	89,5
25,0	91,0	92,4	91,7	89,5
30,0	91,00	92,4	91,7	91,0
40,0	91,7	93,0	93,0	91,0
50,0	92,4	93,0	93,0	91,7
60,0	93,0	93,6	93,6	91,7
75,0	93,0	94,1	93,6	93,0
100,0	93,6	94,5	94,1	93,0
125,0	94,5	94,5	94,1	93,6
150,0	94,5	95,0	95,0	93,6
200,0	95,0	95,0	95,0	94,1
250,0	95,4	95,0	95,0	94,5
300,0	95,4	95,4	95,0	--
350,0	95,4	95,4	95,0	--
400,0	95,4	95,4	--	--
450,0	95,4	95,4	--	--
500,0	95,4	95,8	--	--

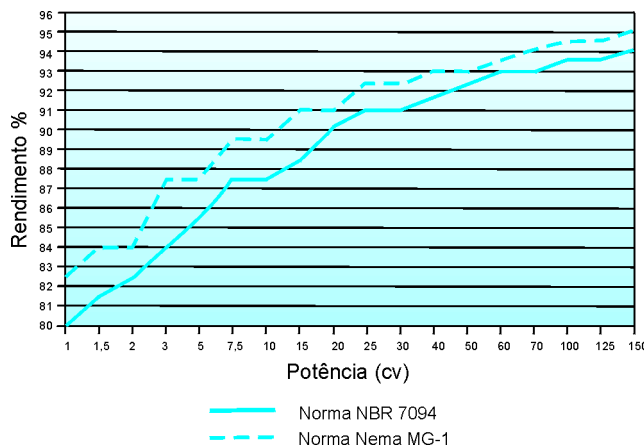


Figura 9.6

A WEG Motores também fornece motores especiais com alto rendimento mediante consulta. O motor alto rendimento tem custo superior ao Standard, porém devido à redução do consumo de energia em função do seu maior rendimento, é possível obter um retorno do investimento inicial rapidamente:

Critérios para cálculo do retorno do investimento:

- 1) Motores funcionando à plena carga, ou seja, fornecendo 100% de sua potência nominal (ponto ótimo de rendimento).
- 2) Motor funcionando em regime contínuo.
- 3) Retorno (anos) =

$$\frac{\Delta C}{0,736 \times cv \times Nh \times C \text{ kWh} \times \left(\frac{100}{\eta\%n} - \frac{100}{\eta\%ARP} \right)}$$

Sendo:

- ΔC = diferença de custo entre motor normal e Alto Rendimento Plus
- cv = potência do motor em cv (cavalo vapor)
- Nh = número de horas de trabalho do motor em um ano
- η%n = rendimento do motor normal
- η%ARP = rendimento do motor Alto Rendimento Plus
- CkWh = custo médio do kWh.

9.3 Aplicação de motores de indução alimentados por inversores de frequência

9.3.1 Introdução

O uso de motores elétricos de indução alimentados por inversores de frequência para acionamentos de velocidade variável tem crescido significativamente nos últimos anos em virtude das vantagens inerentes proporcionadas por esta aplicação, tais como a facilidade de controle e a economia de energia e à redução no preço dos inversores, liderada pelo desenvolvimento de componentes eletrônicos cada vez mais baratos. Tais acionamentos são aplicados principalmente em bombas, ventiladores, centrífugas e bobinadeiras.

As características construtivas de um motor de indução alimentado por uma rede senoidal são determinadas em função das características desta rede, das características da aplicação e das características do meio ambiente. No entanto, quando alimentado por inversor de frequência, também as características próprias do inversor exercem significativa influência sobre o comportamento do motor, determinando-lhe novas características construtivas ou de operação.

Outra influência sobre as características construtivas do motor alimentado por inversor de frequência está relacionada com o tipo de aplicação, mais especificamente com a faixa de velocidade na qual o motor irá trabalhar. Observa-se, portanto, que existem diferenças na maneira de especificar um motor de indução sem variação de velocidade alimentado por uma rede senoidal e um motor com variação de velocidade alimentado por inversor de frequência.

9.3.2 Características dos inversores

As seguintes características devem ser observadas quando for utilizado um inversor de frequência:

○ *Corrente nominal*

O inversor deverá ter sempre a sua corrente nominal igual ou maior que a corrente nominal do motor. Deve-se cuidar porque um mesmo inversor poderá ter várias correntes nominais diferentes em função do tipo de carga e da frequência de chaveamento. Normalmente existem dois tipos de carga: torque constante e torque variável. A carga tipo torque constante é aquela onde o torque permanece constante ao longo de toda a faixa de variação de velocidade, como por exemplo correias transportadoras, extrusoras, bombas de deslocamento positivo, elevação e translação de cargas. A carga tipo torque variável é aquela onde o torque aumenta com o aumento da velocidade, como é o caso de bombas e ventiladores centrífugos. Os inversores especificados para cargas com torque variável não necessitam de uma grande capacidade de sobrecarga (10% a 15% é suficiente) e por isso a sua corrente nominal pode ser maior. Este mesmo inversor, se aplicado em uma carga com torque constante, necessitará de uma capacidade de sobrecarga maior (normalmente 50%) e, portanto, a sua corrente nominal será menor.

A frequência de chaveamento também influi na corrente nominal do inversor. Quanto maior a frequência de chaveamento do inversor, mais a corrente se aproxima de uma senóide perfeita e, por isso, o ruído acústico de origem magnética gerado pelo motor é menor. Por outro lado, as perdas no inversor são maiores devido ao aumento na frequência de operação dos transistores (perdas devido ao chaveamento). Normalmente a corrente nominal é especificada para uma temperatura máxima de 40°C e uma altitude máxima de 1000m. Acima destes valores deverá ser aplicado um fator de redução na corrente nominal.

○ *Tensão nominal*

A tensão nominal do inversor é a mesma do motor. A alimentação do conversor é trifásica para potências acima de 5cv. Até 3cv pode-se ter alimentação monofásica ou trifásica. A desvantagem da alimentação monofásica é o desequilíbrio de corrente causada na rede de distribuição (trifásica) e a maior geração de correntes harmônicas na rede. Para alimentação trifásica deve-se cuidar para que o desbalanceamento entre fases não seja maior do que 2%, uma vez que um desbalanceamento maior pode provocar um grande desbalanceamento de corrente na entrada, danificando os diodos de entrada.

○ *Geração de harmônicas*

A norma IEEEE 519-1992 recomenda valores máximos para as harmônicas de corrente geradas por um equipamento. Na maioria dos casos é possível atender à norma desde que se coloque na entrada do inversor uma reatância de rede dimensionada para uma queda de tensão de 4% em relação à tensão fase-neutro, com corrente nominal; e desde que a potência total dos inversores instalados não ultrapasse a 20% da potência total da instalação. Se ultrapassar, haverá necessidade de outras medidas que dependerão de uma análise detalhada da instalação (sistema) elétrica.

○ *Compatibilidade eletromagnética*

Para altas frequências de chaveamento (acima de 9kHz), o inversor atua como “gerador” não intencional. Isto significa que equipamentos sensíveis às altas frequências (por exemplo, controladores de temperatura a termopar,

sensores diversos etc.) podem sofrer perturbação na sua operação devido ao inversor. Deve-se, portanto, verificar no manual do inversor os cuidados a serem tomados na sua instalação, para que se evite problemas de compatibilidade eletromagnética.

○ *Características de controle*

De uma forma geral pode-se dividir a forma de controle do inversor em 2 tipos: escalar e vetorial.

O controle escalar é aquele que impõe no motor uma determinada tensão/frequência, visando manter a relação V/F constante. É também chamado controle a laço aberto. A sua característica principal é que a precisão da velocidade no motor é função do escorregamento, o qual varia em função da carga, já que a frequência no estator é fixa e em baixas rotações, existe também a necessidade do inversor aumentar a relação V/F para compensar o efeito da queda na resistência estatórica, visando manter a capacidade de torque do motor em baixas rotações.

O controle vetorial possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle tanto do torque quanto da velocidade do motor. O nome vetorial advém do fato que para ser possível este controle, é feita uma decomposição vetorial da corrente do motor nos vetores que representam o torque e o fluxo no motor, de forma a possibilitar a regulação independente do torque e do fluxo. O controle vetorial pode ainda ser dividido em 2 tipos: **normal** e **“sensorless”**. O **controle vetorial normal** necessita ter no motor um sensor de velocidade (por exemplo um encoder incremental). Este tipo de controle permite a maior precisão possível no controle da velocidade e do torque, inclusive com o motor parado. O **controle vetorial “sensorless”** não necessita de sensor de velocidade. A sua precisão é quase tão boa quanto a do controle vetorial normal, com maiores limitações principalmente em baixíssimas rotações e velocidade zero.

9.3.3 Variação da velocidade através do uso de inversores

○ *Sistemas de variação de velocidade*

Existem vários sistemas de variação de velocidade, conforme mostra a figura 9.7.

ESPECIFICAÇÃO

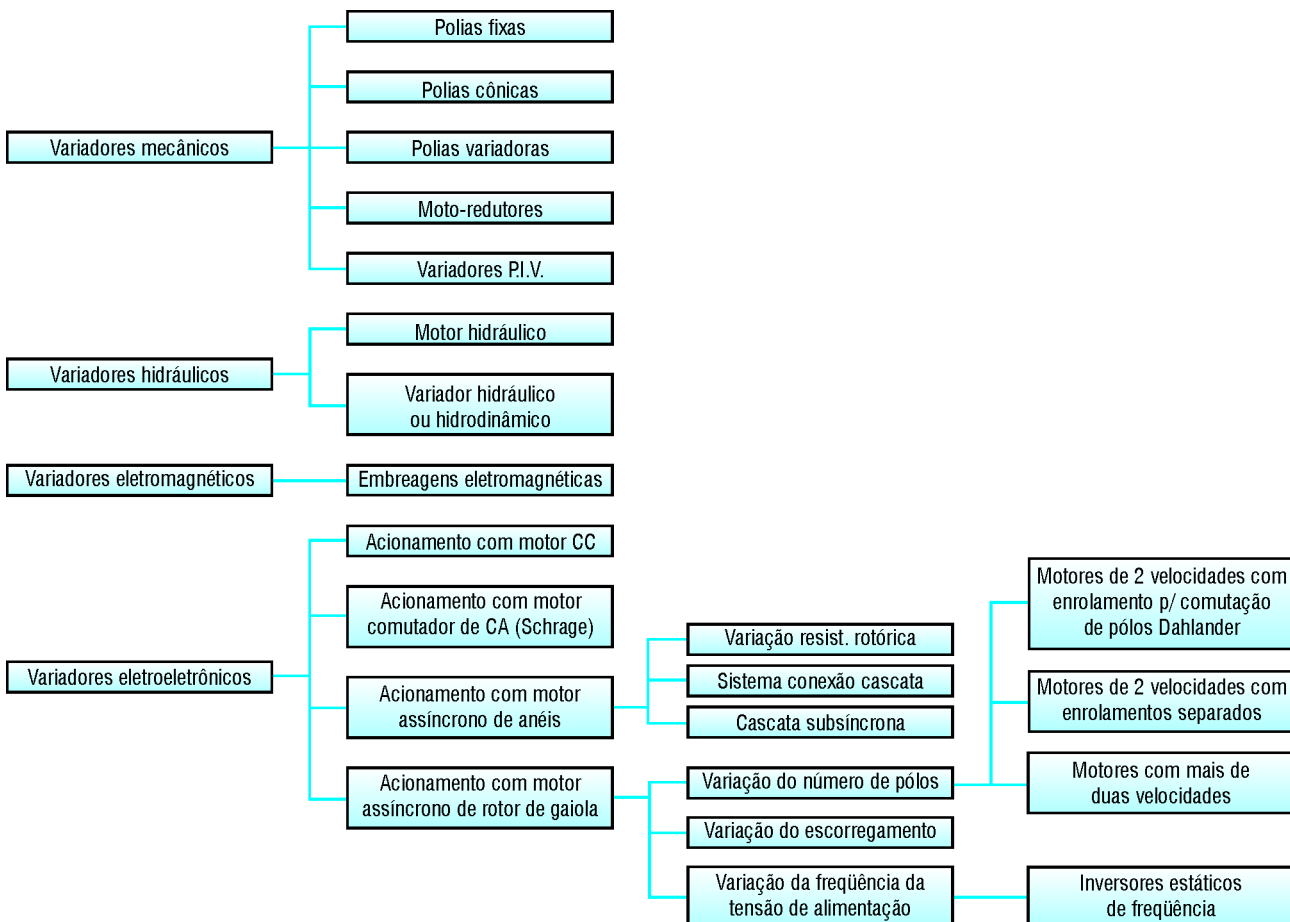


Figura 9.7

○ *Variação da velocidade através dos inversores estáticos de frequência*

A velocidade dos motores de indução é dada pela seguinte equação:

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

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

Pela equação percebe-se a possibilidade de obtenção de várias velocidades para um mesmo motor através da variação da frequência. Os **inversores estáticos de frequência** atuam como uma fonte de frequência variável para o motor, permitindo um ajuste contínuo de velocidade e conjugado. O escorregamento do motor é mantido constante, portanto as perdas podem ser otimizadas de acordo com as condições de carga.

Através do equacionamento da máquina assíncrona, sabe-se que, para o conjugado desenvolvido pelo motor assíncrono vale a seguinte equação:

$$C = \Phi_m \cdot I_2$$

e que o fluxo depende da relação V_1 / f_1 . Desprezando-se a queda de tensão na resistência R_1 e na reatância de dispersão X_{d1} do estator, pode-se dizer que:

$$\Phi_m \cong \frac{V_1}{f_1}$$

- onde: Φ_m = fluxo de magnetização [Wb]
 I_2 = corrente do rotor [A]
 V_1 = tensão estatórica [V]
 f_1 = frequência da tensão estatórica [Hz]

Para possibilitar a operação do motor com torque constante para diferentes velocidades, deve-se variar a tensão V_1 proporcionalmente com a variação da frequência f_1 , mantendo desta forma o fluxo constante. A variação V_1 / f_1 é feita linearmente até a frequência base (nominal) do motor. Acima desta, a tensão que já é a nominal permanece constante e há então apenas a variação da frequência que é aplicada ao enrolamento do estator.

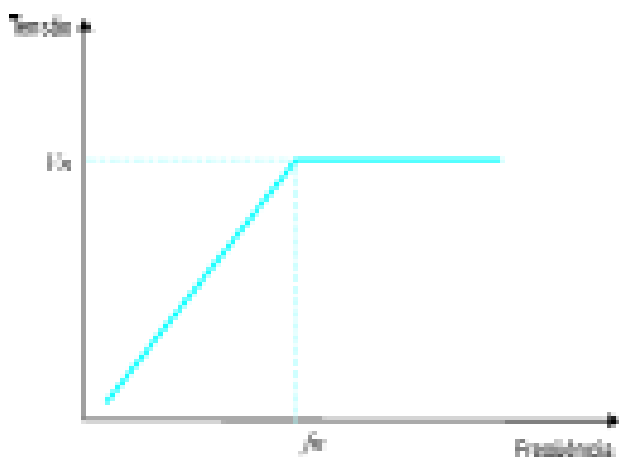


Figura 9.8 - Curva representativa da tensão V em função da frequência f

Com isto determina-se uma área acima da frequência base (nominal) chamada região de enfraquecimento de campo, ou seja, uma região onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque também começa a diminuir. Assim, a curva característica torque x velocidade do motor acionado com inversor de frequência pode ser representada conforme figura 9.9:

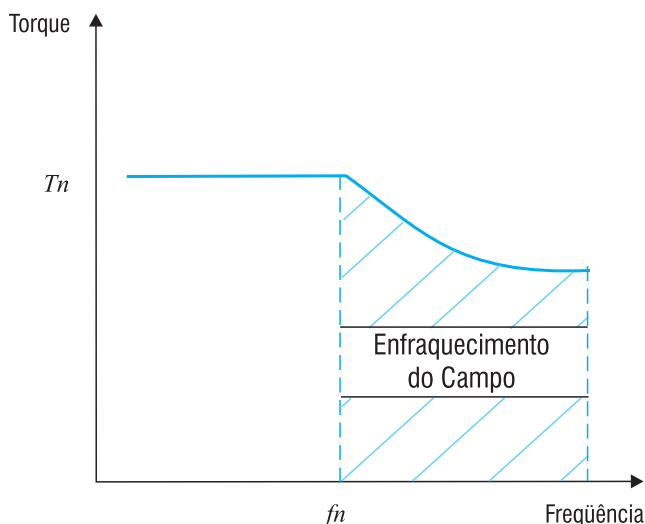


Figura 9.9 - Curva característica torque x velocidade

Pode-se notar então, que o torque permanece constante até a frequência base e, acima desta, começa a decrescer. A potência de saída do inversor de frequência cresce linearmente até a frequência base e permanece constante acima desta, conforme pode ser observado na figura 9.10.

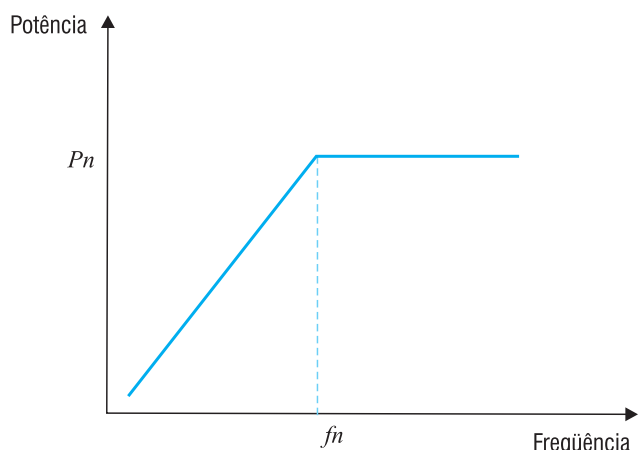


Figura 9.10 - Curva característica da potência de saída do inversor

A figura 9.11, a seguir, mostra o comportamento idealizado do torque em função da velocidade para a máquina assíncrona. Com a variação da frequência obtém-se um deslocamento paralelo da curva característica torque x velocidade em relação à curva característica para frequência base.

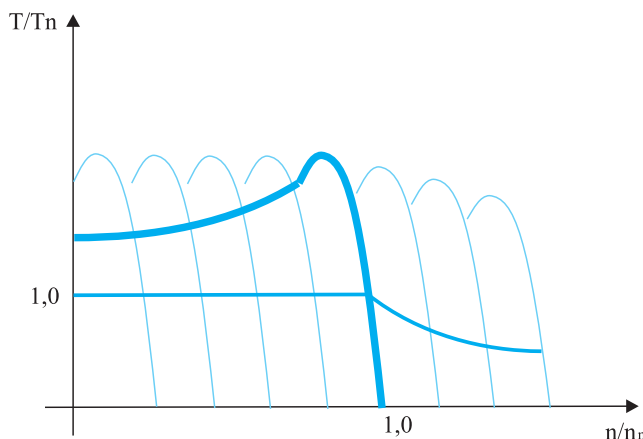


Figura 9.11 - Curva característica torque x velocidade

ESPECIFICAÇÃO

A figura 9.12, mostra a estrutura de um inversor de frequência:

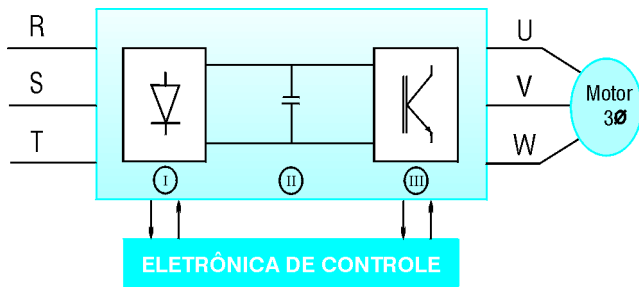


Figura 9.12 - Estrutura de um conversor de frequência

- I - Circuito Retificador (ponte retificadora a diodos)
- II - Circuito Intermediário (filtro capacitivo)
- III - Circuito Inversor (chave eletrônica, neste caso formada por transistores)

O circuito retificador (I) transforma a tensão alternada de entrada (RST) em tensão contínua que é filtrada no circuito intermediário (II). Esta tensão contínua alimenta o circuito inversor (III). Através de tiristores ou transistores, o circuito inversor fornece um sistema de corrente alternada (UVW) de frequência e tensão variáveis. Deste modo, um motor de indução trifásico acoplado pode ser operado com variação de velocidade.

○ **Limites de velocidade**

A máxima velocidade de operação do motor é limitada por considerações mecânicas, porém não há ressalvas ao limite mínimo de velocidade de operação.

A Norma NEMA MG1 - parte 30 - 1993 - revisão 1 nos traz diretrizes a respeito da máxima velocidade segura de operação com acoplamento direto. Sempre que não se tiver segurança em relação às sobrevelocidades, limites de operação, etc. o fabricante deverá ser consultado, pois a vida dos rolamentos é afetada pelo tempo de operação em velocidades variadas. Para aplicações com controle de velocidade do motor com alta precisão, independente das variações de carga no eixo, deverá ser instalado no motor um sensor de velocidade, que pode ser um taco de pulsos ou encoder.

Observação: A WEG possui Linha Inverter Duty com e sem encoder.

9.3.4 Condições de serviço

○ **Condições usuais de serviço**

As condições usuais de serviço serão as mesmas descritas no Capítulo 6.

Observação: Não existe limitação em relação ao regime de serviço, uma vez que o uso de motores com inversores de frequência é adequado para diversas cargas e velocidades diferentes. Neste caso, de acordo com a Norma NBR-7094, o regime mais geral é o S9.

○ **Condições não usuais de serviço**

O fabricante deve ser consultado se existir qualquer condição não usual que possa afetar a construção ou operação do motor. Entre estas condições estão as seguintes:

- a) Atmosferas agressivas ou Áreas Classificadas
- b) Funcionamento em que:
 - 1) há uma excessiva relação V/f na partida;
 - 2) baixos níveis de ruído sejam requeridos;
 - 3) a tensão na rede é desbalanceada em mais do que 1%.
- c) Funcionamento em velocidades acima da máxima velocidade definida por considerações mecânicas.
- d) Funcionamento em salas de pobre ventilação, poços ou em posições inclinadas.
- e) Funcionamento sujeitos a:
 - 1) impactos torcionais provocados pela carga;
 - 2) sobrecargas anormais repetitivas;

9.3.5 Características de desempenho dos motores

As características de desempenho dos motores de indução alimentados por inversores de frequência são influenciadas pelas características de desempenho dos inversores e pelas condições de operação da carga. Com o objetivo de fazer uma análise mais detalhada do comportamento do motor de indução, podemos considerar separadamente as influências das harmônicas de tensão do inversor e as influências da rotação sobre o motor. As harmônicas de tensão do inversor influenciam o comportamento térmico do motor, o rendimento, os critérios para correção do fator de potência, o ruído sonoro de origem magnética e a geração de corrente pelo eixo do motor enquanto que a variação de rotação influencia o comportamento térmico para motores auto-ventilados, o rendimento e o ruído sonoro emitido pelo ventilador.

Influência das harmônicas de tensão do inversor sobre o motor

○ **Sobre a elevação de temperatura**

Correntes harmônicas são introduzidas quando as tensões de linha aplicadas a um motor de indução polifásico apresentam componentes de tensão em frequências diferentes da frequência nominal (ou fundamental) da fonte. As perdas por efeito Joule no enrolamento do estator de motores de indução causadas pelas harmônicas de correntes tendem a aumentar a temperatura de estabilização térmica dos motores e reduzir o seu rendimento. Para evitar o superaquecimento do motor, deve-se reduzir o seu torque nominal a fim de manter a temperatura dentro do limite da classe térmica. Outra maneira é sobredimensionar o motor. Evidentemente, o comportamento térmico é diferente para cada tipo de motor e de inversor. Pode-se, no entanto, de acordo com a norma NEMA MG 1-parte 30, seção IV, relacionar a redução no torque do motor, chamada de "derating factor" com o fator de harmônicas de tensão FHV, através do gráfico da figura 9.13.

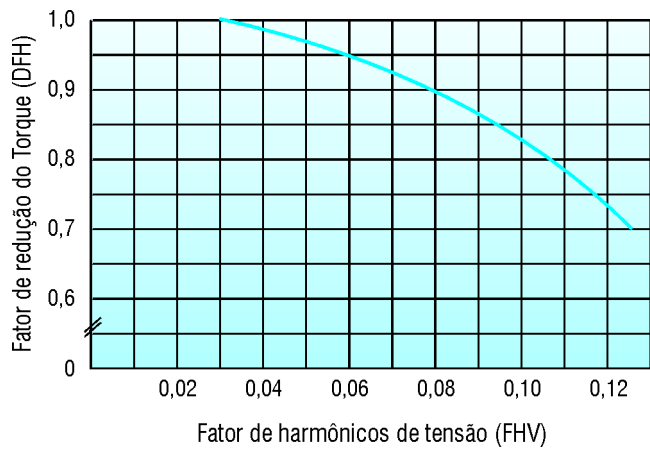


Figura 9.13 - Torque do motor alimentado por inversor de frequência em função do fator de harmônicas de tensão

○ **Sobre o rendimento**

O rendimento do motor de indução alimentado por inversor de frequência diminui devido ao aumento nas perdas causado pelas correntes harmônicas no enrolamento do motor. Pode-se determinar de forma aproximada o novo rendimento do motor em função do fator de redução do torque através da seguinte equação:

$$\eta_c = \frac{DFH^2}{1 + DFH^2 - \eta}$$

Onde: η = é o rendimento do motor alimentado por fonte senoidal sem conteúdo harmônico;

η_c = é o rendimento do motor alimentado por inversor de frequência;
 DFH = é o fator de redução do torque em função do conteúdo de harmônicas.

ESPECIFICAÇÃO

○ Sobre a correção do Fator de Potência

Se for usado banco de capacitores para correção do F.P., o dimensionamento deste banco deverá levar em conta a existência das harmônicas, a característica da carga em função da rotação evitando assim, sobreexcitação do motor, ressonâncias e sobretensões no banco.

○ Sobre o Ruído Sonoro de origem eletromagnética

A experiência tem mostrado que, tipicamente para a frequência nominal, ocorre um aumento de 6 dB(A) no nível de pressão sonora quando o motor é alimentado por inversor de frequência do tipo tensão imposta ou corrente imposta. Para inversores WEG do tipo PWM com controle escalar, o aumento no ruído (nível de pressão sonora) está entre 2 e 11 dB(A) para as frequências de chaveamento menores ou iguais a 7,2 kHz. Para a frequência de chaveamento de 14,4kHz ou acima, o acréscimo de ruído é menor do que 2dB(A). Para os inversores de frequência WEG do tipo PWM com controle vetorial, o aumento no ruído (nível de pressão sonora) é menor do que 8dB(A) para frequências de chaveamento menores ou iguais a 5 kHz.

Influência da variação da rotação sobre o motor

○ Sobre a elevação da temperatura

Para motores auto-ventilados, a redução na ventilação nas baixas rotações faz com que seja necessária uma diminuição no torque que o motor pode fornecer ou um sobredimensionamento de modo a manter sua temperatura dentro dos limites da classe térmica.

A redução do torque dos motores fechados em função da frequência de operação está representada na figura 9.14.

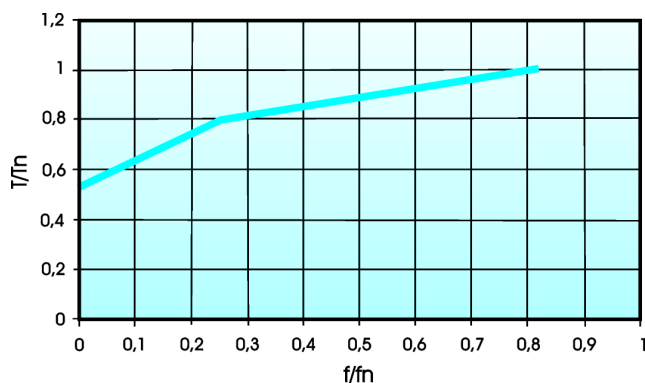


Figura 9.14 - Curva de torque x frequência para motores fechados auto-ventilados com carcaça de ferro fundido

A curva é baseada em uma forma de onda senoidal e fluxo nominal no entreferro. A redução adicional no torque devido às harmônicas de tensão deve ser aplicada em sobreposição à redução da ventilação e está apresentada na figura 9.15.

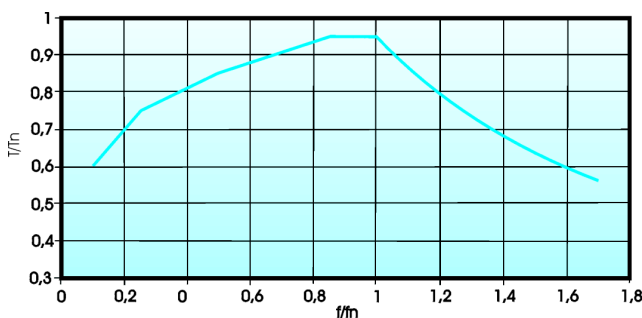


Figura 9.15 - Influência das harmônicas e da rotação conjuntamente sobre o motor

○ Sobre o rendimento

Nas baixas rotações, a potência fornecida pelo motor é baixa e como as perdas variam muito pouco nesta situação, o rendimento é menor, uma vez que as perdas se tornam proporcionalmente maiores em relação à potência fornecida pelo motor.

○ Sobre o ruído sonoro emitido pelo sistema de ventilação

O ruído sonoro emitido pelo sistema de ventilação do motor decresce à medida que a rotação do motor diminui.

Influência das harmônicas e da rotação conjuntamente sobre o motor

Para efeito de dimensionamento do motor operando com inversor de frequência, o fator de redução do torque "derating factor" é determinado através do gráfico da figura 9.15, que leva em consideração as influências da rotação e das harmônicas simultaneamente.

9.3.6 Características do sistema de isolamento

O sistema de isolamento de um motor de indução, quando alimentado por inversor de frequência, fica submetido a uma multiplicidade de fatores adversos que podem levá-lo à ruptura de sua integridade dielétrica, ou seja, podem provocar o rompimento do dielétrico isolante, levando a máquina à falha prematura. A degradação do sistema isolante pode ocorrer devido a causas térmicas, elétricas ou mecânicas, ou por uma combinação de todos estes fatores.

Atualmente, com o uso generalizado de motores acionados por inversores de frequência, o foco do problema tem se voltado sobretudo para a suportabilidade do isolante dos fios, trazendo à tona importantes questões sobre cuidados e melhorias necessárias, visto que estes ficam submetidos a altos picos de tensão, provocados pela rapidez do crescimento dos pulsos gerados pelo inversor (rise time), bem como pela alta frequência com que estes picos são produzidos (frequência de pulsação).

○ Sistema de isolamento

Devido aos efeitos extras originados pela pulsação dos inversores, quando alimentando motores elétricos, o sistema de isolamento convencional, o qual tem sido usado com amplo sucesso em todos os casos de alimentação com fontes senoidais tradicionais (50/60 Hz), não atende aos requisitos necessários para este tipo de alimentação, ou seja, os seguintes critérios devem ser adotados:

Para **MOTORES STANDARD WEG**:

- **Para tensões até 460V (inclusive)** → Não há a necessidade de se usar filtros.

- **Para tensões superiores a 460V e inferiores a 575V** → usar filtros para cabos de alimentação maiores do que 20 metros.

- **Para tensões iguais ou superiores a 575V** → usar filtros para qualquer comprimento dos cabos de alimentação.

Lembramos que para linha WEG Inverter Duty não há necessidade de uso de filtros em nenhuma hipótese pois esta linha possui sistema de isolamento especial e também usa fios adequados para suportar os picos de tensão característicos da aplicação com inversores. Enquanto que os motores normais com tensão ≤ 600 V devem suportar em seus terminais (segundo Norma NEMA MG1- parte 30) picos de tensão de até 1 kV para um "rise time" maior ou igual a 2 μ s (2 micro segundos), os motores da linha Inverter Duty suportam até 1,6 kV para um "rise time" muito menor do que 2 μ s, porém maior ou igual a 0,1 μ s (0,1 micro segundos), o que demonstra sua larga vantagem nesta aplicação.

10. 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 pela norma NBR-7094. Para a realização destes ensaios, deve ser seguida a NBR-5383, que define os procedimentos a serem seguidos para a execução dos ensaios. A seguir são listados os ensaios de rotina, tipo e especial. Outros ensaios não citados, podem ser realizados pelo fabricante, desde que exista um acordo entre as partes interessadas.

Tabela 10.1

Item Nº	Relação de ensaios	Classificação do ensaio			Observações
	Ensaio (de / para)	Rotina	Tipo	Especial	
1	Medição da resistência de isolamento	X	X		
2	Medição da resistência elétrica do enrolamento (do estator e do rotor para motores de anéis, a frio)	X	X		
3	Dielétrico	X	X		
4	Em vazio (sob tensão nominal) para determinação de: 4.1 Potência de entrada 4.2 Corrente	X	X		Permite a determinação da soma das perdas no núcleo e das perdas por atrito e ventilação
5	Com rotor bloqueado, para determinação de: 5.1 Corrente 5.2 Conjugado 5.3 Potência absorvida	X	X		Não aplicável a motores com rotor bobinado
6	Medição de tensão secundária	X	X		Aplicável somente a motores com rotor bobinado
7	Partida com levantamento das curvas características conjugado x velocidade e corrente velocidade, para determinação de: 7.1 Conjugado de partida, incluindo os valores dos conjugados mínimo e máximo 7.2 Corrente de partida			X	Não aplicável a motores com rotor bobinado, exceto para conjugado máximo
8	Temperatura		X		
9	Determinação do rendimento a 100%, 75% e 50% da potência nominal		X		
10	Determinação das perdas a 100%, 75% e 50% da potência nominal		X		
11	Determinação do fator de potência a 100%, 75% e 50% da potência nominal		X		
12	Determinação do escorregamento a 100%, 75% e 50% da potência nominal		X		
13	Determinação do conjugado máximo		X		
14	Sobrevelocidade			X	
15	Nível de ruído (potência sonora em vazio)			X	Ver NBR 7565
16	Tensão no eixo e medição da resistência de isolamento do mancal			X	Geralmente feito em motores com potência nominal $\geq 350\text{kW}$ (500cv)
17	Vibração (valor eficaz máximo de vibração em milímetros por segundo)			X	
18	Medição da tangente do ângulo de perdas			X	Para motores com tensão nominal $\geq 5\text{kV}$ e $\leq 24\text{kV}$ e com potência nominal $\geq 5\text{MW}$. Ver NBR 5117

Os ensaios classificados como de Tipo, são aqueles realizados em um ou mais motores fabricados, conforme um certo projeto para comprovar que este projeto satisfaz à determinadas especificações.

Os ensaios classificados como Especiais, são aqueles não considerados como ensaios de Rotina ou de Tipo na tabela, devendo ser realizados mediante acordo prévio entre fabricante e comprador.

NOTA: Ensaios em que há solicitação de curvas características são considerados ensaios Especiais (ver itens 4, 5, 7 e 9 da tabela).

10.1 Motores alimentados por inversores de frequência

○ Método de Ensaio

O método de ensaio definido para motores alimentados por inversores de frequência deverá estar de acordo com a norma IEEE STD 112 (Procedimento de Teste para Geradores e Motores de Indução Trifásicos).

○ Instrumentos de Medição

Quando um motor é alimentado pela tensão comercial da rede (50/60Hz), os instrumentos de medição utilizados são geralmente voltímetros e amperímetros do tipo ferro móvel e wattímetros do tipo eletrodinâmico. Porém, quando o motor é alimentado por um inversor de frequência, a instrumentação utilizada deve ser especial, devido às componentes harmônicas produzidas pelo sistema de controle do inversor (geralmente PWM). Portanto, para medições de grandezas elétricas de motores alimentados por inversores de frequência, deverão ser utilizados instrumentos apropriados.

11. Anexos

11.1 Sistema Internacional de Unidades - SI

GRANDEZAS	NOMES	UNIDADES
Aceração	metro por segundo ao quadrado	m/s ²
Aceração angular	radiano por segundo ao quadrado	rad/s ²
Atividade	um por segundo	s ⁻¹
Ângulo plano	radiano	rad
Ângulo sólido	esterorradiano	sr
Área	metro quadrado	m ²
Calor de massa	Joule por quilograma e por Kelvin	J/kgK
Quantidade de luz	lúmen-segundo	lms
Quantidade de eletricidade	Coulomb	C
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	Siemens por metro	S/m
Convergência	dioptria	di
Densidade de fluxo de energia	Watt por metro quadrado	W/m ²
Dose absorvida	Joule por quilograma	J/kg
Eficiência luminosa	lúmen por Watt	lm/W
Emitância luminosa	lúmen por metro quadrado	lm/m ²
Energia	Joule	J
Entropia	Joule por Kelvin	J/K
Excitação luminosa	lux-segundo	lx
Exposição	Coulomb por quilograma	C/kg
Fluxo (de massa)	quilograma por segundo	Kg/s
Fluxo luminoso	lúmen	lm
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	Henry	H
Intensidade de campo elétrico	Volt por metro	V/m
Intensidade de campo magnético	Ampère por metro	A/m
Intensidade luminosa	candela	cd
Intensidade energética	Watt por esterorradiano	W/lsr
Intensidade de corrente	Ampère	A
Intervalo de frequências	oitava	
Comprimento	metro	m
Luminância energética	Watt por esterorradiano-metro quadrado	W/sr m ²
Luminância	candela por metro quadrado	cd/m ²
Iluminamento	lux	lx
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
Nível de potência	Bel	B
Número de ondas	um por metro	m ⁻¹
Potência	Watt	W
Pressão	Newton por metro quadrado	N/m ²

GRANDEZAS	NOMES	UNIDADES
Relutância	Ampère por Weber	A/Wb
Resistência elétrica	Ohm	W
Resistividade de massa	Ohm-quilograma por metro quadrado	W kg/m ²
Resistividade	Ohm-metro	W m
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

11.2 Conversão de unidades

De	multiplicar por	para obter
A		
Acre	4047	m ²
Acre	0,001563	milhas ²
Acre	43560	pés ²
Atmosfera física	76	cm.Hg
Atmosfera técnica	1	kgf/cm ²
Atmosfera física	1,033	kgf/cm ²
Atmosfera física	10332	kgf/m ²
Atmosfera física	14,70	Libra-força/pol. ²
B		
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 . (—)	0,0173	W/cm ² . (—)
BTU/h ² . (—)	0,0833	BTU/h.pé ² . (—)
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/seg	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 . (—)	4,19	W/cm ² . (—)
Cal/kg.cm ² . °C	7380	BTU/h.pé ² . °F
Cal/kg.cm ² . °C	4,19	W/cm ² . °C
Cal/kg.cm ² . °C	2,91	HP/pé ² . °F
Cavalo-vapor (cv)	0,9863	HP
cv	632	kcal
cv	542,5	Lb.pé/s
cv	75	kg.m/s
cv	735,5	W
cm	0,3937	polegada
cm ³	1,308.10 ⁻⁶	jarda ³
cm ³	3,531.10 ⁻⁶	pé ³
cm ³	0,06102	Pol. ³

De	multiplicar por	para obter
cm	0,01316	atmosfera física
cm de Hg	136	kg/m ²
cm ²	1,076.10 ⁻³	pé ²
cm ²	0,1550	pol. ²
cm/s	1,1969	pé/min
cm/s	0,036	km/h
D		
Dina	1,020.10 ⁻⁶	grama
Dina	2,248.10 ⁻⁶	Libra
E		
Erg	9,480.10 ⁻¹¹	BTU
Erg	1,020.10 ⁻³	g.cm
Erg	3,7250.10 ⁻¹⁴	HPH
Erg	10 ⁻⁷	J
Erg	0,2778.10 ¹³	kW.h
Erg	7,367.10 ⁻⁸	Libra-força.pé
Erg	2,389.10 ⁻¹¹	kcal
Erg	1,020.10 ⁻⁸	kgm
Erg/s	1,341.10 ⁻¹⁰	HP
Erg/s	1,433.10 ⁻⁹	kcal/min.
Erg/s	10 ⁻¹⁰	KW
Erg/s	4,427.10 ⁻⁶	Libra-força-pé/min.
Erg	1,020.10 ⁻⁸	kgm
Erg/s	1,341.10 ⁻¹⁰	HP
Erg/s	1,433.10 ⁻⁹	kcal/min.
Erg/s	10 ⁻¹⁰	KW
Erg/s	4,427.10 ⁻⁶	Libra-força-pé/min.
Erg/s	7,3756.10 ⁻⁸	Libra-força-pé/s
G		
Grau Celsius	$(\frac{9}{5} \text{ } ^\circ\text{C} - 32) + 32$	^o F
Grau Celsius	$(\text{ } ^\circ\text{C}) + 273,15$	K
Grau Fahrenheit	$(\text{ } ^\circ\text{C} - 32) \frac{5}{9}$	^o C
Grau (trigonométrico)	0,01745	radiano
Grama	9,804.10 ⁻⁵	j/cm
Grama	0,205.10 ⁻³	Libra
Grama/cm	5,600.10 ⁻³	Libra/pol
Grama/cm ³	0,03613	Libra/pol ³
H		
Hectare	2,471	acre
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	33000	libra-força.pé/min.
HP	550	Libra-força.pé/s
HPH	2,684.10 ⁶	J
HPH	0,7457	kW.h
HPH	1,98.10 ⁶	Libra-força.pé
HPH	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
K		
$\frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$	0,671	$\frac{^\circ\text{F}}{\text{Pie}}$

De	multiplicar por	para obter
$\frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$	8,05	$\frac{^\circ\text{F}}{\text{pol}}$
$\frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$	2,77.10 ⁻³	$\frac{^\circ\text{C}}{\text{cm}}$
$\frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$	0,0116	$\frac{^\circ\text{C}}{\text{cm}}$
$\frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$	0,205	$\frac{^\circ\text{F}}{\text{cm}}$
kcal/h.m ² . ^o C	2,78.10 ⁻⁵	BTU/h.pé ² . ^o F
kcal/h.m ² . ^o C	1,16.10 ⁻⁴	Cal/s.cm ² . ^o C
kcal/h.m ² . ^o C	8,07.10 ⁻⁵	W/cm ² . ^o C
kg	2,205	HP/pé. ^o C
kgf/cm ²	2048	Libra
kgf/cm ²	14,22	Libra-força/pé ²
kgf/cm ³	0,06243	Libra-força/pol ²
kgf/cm ³	3,613.10 ⁻⁵	Libra/pé ³
km	1094	Libra/pol ³
km	3281	Jarda
km	0,6214	pé
km ²	0,3861	Milha
km ²	10,76.10 ⁻⁶	Milha ²
km/h	27,78	pé ²
km/h	0,6214	cm/s
km/h	0,5396	Milha/h
km/h	0,9113	nó
kgf	9,807	pé/s
kW	56,92	J/m (N)
kW	1,341	BTU/min
kW	14,34	HP
kW/h	3413	kcal/min
kW/h	859850	BTU
kW/h	1,341	Cal
kW/h	3,6.10 ⁶	HPh
kW/h	2,655.10 ⁶	J
kW/h	3,671.10 ⁹	Libra pé
kW/h		kgm
L		
Libra-força.pé/s	0,1945	kcal/min
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	0,06804	atmosfera
Libra-força.pol ²	0,07301	kg/cm ²
Libra-força.pol ³	1728	atmósfera
Libra-força.pé/min	3,24.10 ⁻⁴	kg/cm ²
Libra-força.pé/min	2,260.10 ⁻⁵	Libra-força.pol ³
Libra-força.pé/s	0,07717	kcal/min
Libra-força	16	kW
Litro	0,2642	BTU/min
Litro/min	5,886.10 ⁻⁴	onça
Libra-força/pé	3,24.10 ⁻⁴	galão
Libra-força/pé	1,488	pé ³ /s
Libra-força/pé	3,766.10 ⁻⁷	kcal
Libra-força/pé	0,1383	kg/m
Libra-força/pé ²	4,725.10 ⁻⁴	kW.h
Libra-força/pé ²	0,0421	kgfm
Libra-polegada quadrada (sq.in.lb)	2,93 x 10 ⁻⁴	atmosfera física
		kg/m ²
		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

De	multiplicar por	para obter
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 (marítima)	2027	Jarda
Milha (marítima)	1,853	km
Milha (marítima)	6080,27	pé
Milha quadrada	2,590	km ²
Milha terrestre	1609	m
Milha terrestre	0,8684	milha marítima
Milha terrestre	5280	pé
Milha	0,001	polegada
Milímetro	0,03937	polegada
N		
Newton	1.10 ⁵	Dina
Nó	1,8532	km/h
Nó	1,689	pé/s
Newton (N)	0,1019	Quilograma-força (kgf) ou quiloponde (kp)
Newton-metro	0,1019	Quilograma-força (mkgf) ou quiloponde-metro (mkp)
Newton-metro (Nm)	0,7376	Libra-força pé (ft. lb)
O		
Onça	437,5	grão
Onça	28,349	grama
Onça	31,103	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	1,585.10 ⁻³	cv.h
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
Quilômetro	9,294.10 ⁻³	BTU
Quilômetro	9,804	J
Quilômetro	2,342.10 ⁻³	kcal
Quilômetro	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)

De	multiplicar por	para obter
R		
Radiano	3438	min.
rpm	6,0	grau/s
rpm	0,1047	radiano/s
Radiano/s	0,1592	rpm
T		
Ton.curta	2000	Libra
Ton.curta	907,18	kg
Ton.longa	2240	Libra
Ton.longa	1016	kg
Ton.	2205	Libra
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

11.3 Normas Brasileiras - ABNT

Principais normas utilizadas em máquinas elétricas girantes		
Número de registro	Título	Assunto
NBR-5031	Máquinas Elétricas Girantes	Classificação das formas construtivas e montagens (antiga CB-20)
NBR-5110	Máquinas Elétricas Girantes	Classificação dos métodos de resfriamento. Classificação.
NBR-5363	Involucros a Prova de Explosão para Equipamentos Elétricos	Especificação
NBR-5383	Máquinas Elétricas Girantes/ Máquinas de Indução	Determinação das características - Método de ensaio.
NBR-5418	Instalações Elétricas em Ambientes com Líquidos, Gases ou Vapores Inflamáveis	
NBR-5432	Máquinas Elétricas Girantes	Dimensões e potências. - Padronização.
NBR-6146	Involucros de Equipamentos Elétricos - Proteção	Graus de proteção mecânica, proporcionado pelos involucros. Especificação (antiga NB-201)
NBR-7034	Materiais Isolantes Elétricos - Classificação Térmica	Classificação (antiga P-PB 130)
NBR-7094	Máquinas Elétricas Girantes	Motores de indução - Especificação.
NBR 7565	Máquinas Elétricas Girantes	Limites de ruído - Especificação.
NBR-7566	Máquinas Elétricas Girantes	Nível de ruído transmitido através ar - Método de medição num campo-livre sobre um plano refletor / Método de Ensaio.
NBR-8089	Pontas de Eixo Cilíndricas e Cônicas	Padronização.
NBR-8441	Máquinas Elétricas Girantes	Motores de indução de gaiola, trifásicos, fechados - Correspondência entre potência nominal e dimensões. Padronização.
NBR-8839	Máquinas Elétricas Girantes	Identificação dos terminais e do sentido de rotação. Padronização.