

## 1.4 CARACTERÍSTICAS DE ACELERAÇÃO

### 1.4.1 CONJUGADOS

#### 1.4.1.1 CURVA DE CONJUGADO X VELOCIDADE

Conforme foi explicado anteriormente, 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, vai-se obter uma curva com aspecto representado na figura 1.42.

$C_0$  – Conjugado básico: é o conjugado calculado em função da potência e velocidade síncrona;

$$C_0 (kgfm) = \frac{716 \times P(cv)}{n_s (rpm)} = \frac{794 \times P(kW)}{n_s (rpm)}$$

$$C_0 (Nm) = \frac{7094 \times P(cv)}{n_s (rpm)} = \frac{9555 \times P(kW)}{n_s (rpm)}$$

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

$n_N$  – Rotação nominal;

$n_S$  – Rotação síncrona.

$C_{\min}$  – 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 nominais, 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 perder bruscamente a velocidade quando ocorrem quedas de tensão, momentaneamente, excessivas.

$C_p$  – 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 consideração 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.

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

- 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 se destaca e definem-se alguns pontos importantes. Os valores dos conjugados relativos a estes pontos são especificados pela norma NBR 7094 da ABNT, e serão apresentados a seguir:

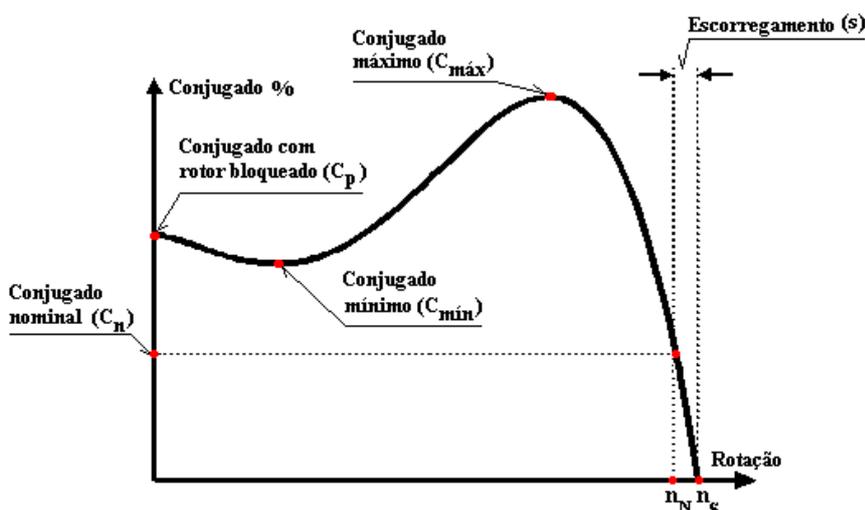


Figura 1.42 – Curva conjugado x rotação

### 1.4.1.2 CATEGORIAS – VALORES MÍNIMOS NORMALIZADOS

Conforme 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:

#### 1.4.1.2.1 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, com baixo conjugado de partida, como: bombas e máquinas operatrizes (conjugado linear e parabólico).

#### 1.4.1.2.2 CATEGORIA H

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal, baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregados, cargas de alta inércia, etc., (conjugado constante).

#### 1.4.1.2.3 CATEGORIA D

Conjugado de partida alto, corrente de partida normal, alto escorregamento (mais de 5%). Os motores WEG apresentam escorregamentos nas faixas de 5 a 8% e de 8 a 13%. Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos e cargas que necessitam de conjugado de partida muito alto e corrente de partida limitada.

Esta categoria inclui motores previstos para partida direta com quatro ou mais pólos, 0,37 KW (0,5 cv) a 110 KW (150 cv). O conjugado com rotor bloqueado expresso pela razão para o conjugado nominal deve ter o valor mínimo, a tensão nominal, de 2,75.

As curvas conjugado x velocidade das diferentes categorias são mostrados na figura 1.43. A norma NBR-7094 especifica os valores mínimos de conjugados exigidos para motores de categoria N, H e D. Estes valores de norma são mostrados nas tabelas (1.4.1.2.1) e (1.4.1.2.2).

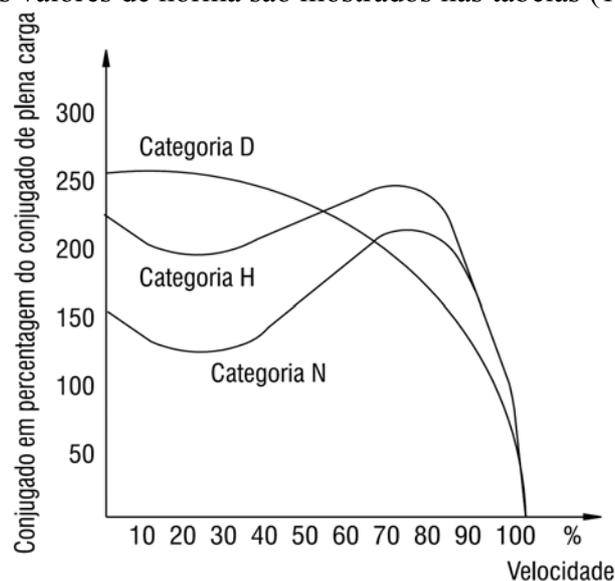


Figura 1.43 – Curvas Conjugados x Velocidade das Diferentes Categorias

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

Tabela 1.4.1.2.1 – Conjugado com rotor bloqueado ( $C_p$ ), Conjugado mínimo de partida ( $C_{min}$ ) e Conjugado máximo ( $C_{max}$ ) de motores de categoria N.

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

Tabela 1.4.1.2.2 – Conjugado com rotor bloqueado ( $C_p$ ), Conjugado mínimo de partida ( $C_{min}$ ) e Conjugado máximo ( $C_{max}$ ) de motores de categoria H.

Os motores trifásicos de indução com rotor de anéis não se enquadram dentro destas categorias. Deverão ser atendidos os conjugados máximos especificados na norma da ABNT-EB 620.

#### 1.4.1.2.4 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.

#### 1.4.1.2.5 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.

#### 1.4.1.3 CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES WEG

Embora os motores WEG sejam, na sua maioria, declarados como pertencendo à categoria N, a exemplo da maioria dos motores encontrados no mercado, os valores reais típicos dos conjugados excedem 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:

- Rápida aceleração em caso de partida pesada, como bombas de pistão, esteiras carregadas, cargas de alta inércia, compressores com válvulas abertas, etc.
- Atendimentos de casos especiais, como os mencionados acima, com motores padrão de estoque, com vantagens de preço, prazo e entrega.
- Permitem o uso de sistemas de partida com tensão reduzida, como chaves estrela-triângulo, em casos normais, sem prejuízo da perfeita aceleração da carga.
- 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.

#### 1.4.2 INÉRCIA DA CARGA

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

Momento de inércia é uma medida da resistência que um corpo oferece a uma mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo. Depende do eixo em torno do qual ele está girando e, também, da forma do corpo e da maneira como sua massa está distribuída. A unidade do momento de inércia é  $\text{kgm}^2$ .

O momento de inércia total do sistema é a soma dos momentos de inércia da carga e do motor ( $J_t = J_m + J_c$ ).

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 a figura 1.44:

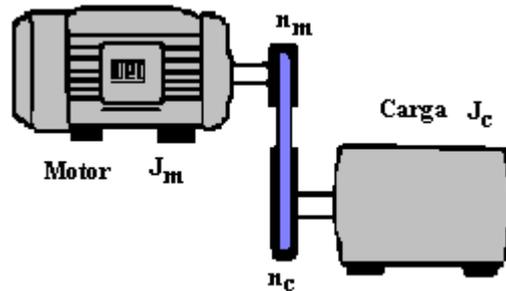


Figura 1.44 – Momento de inércia em rotações diferentes

$$J_{ce} = J_c \left( \frac{n_c}{n_N} \right)^2$$

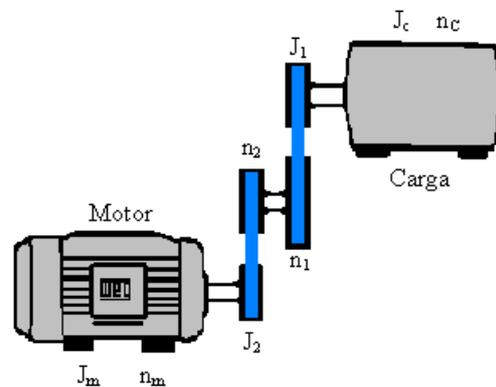


Figura 1.45 – Momento de inércia em velocidades diferentes

$$J_{ce} = J_c \left( \frac{n_c}{n_N} \right)^2 + J_1 \left( \frac{n_1}{n_N} \right)^2 + J_2 \left( \frac{n_2}{n_N} \right)^2$$

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.

### 1.4.3 TEMPO DE ACELERAÇÃO

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

O tempo de aceleração pode ser determinado de maneira aproximada pelo conjugado médio de aceleração.

$$t_a = 2\pi.n_N \cdot \left( \frac{J_t}{C_a} \right) = 2\pi.n_N \cdot \left( \frac{J_m + J_{ce}}{C_{mméd} - C_{rméd}} \right)$$

- Onde:
- $t_a$  – tempo de aceleração em segundos;
  - $J_t$  – momento de inércia total em  $\text{kgm}^2$ ;
  - $n_N$  – rotação nominal em rotações por segundo;
  - $C_{mméd}$  – conjugado médio de aceleração do motor em Nm;
  - $C_{rméd}$  – conjugado médio de aceleração de carga referido ao eixo em Nm;
  - $J_m$  – 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, diferença entre a média pode ser obtida, graficamente, bastando que se observe que a soma das áreas  $A_1$  e  $A_2$  seja igual à área  $A_3$  e que a área  $B_1$  seja igual à área  $B_2$ .

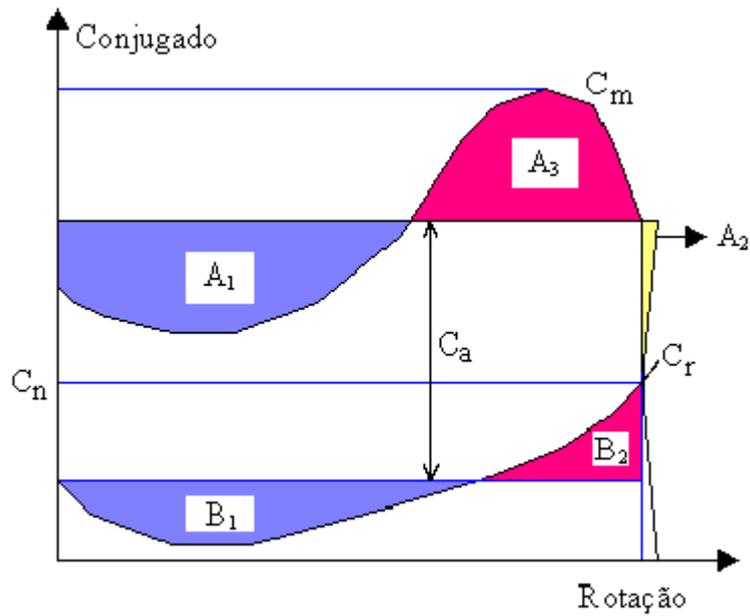


Figura 1.46 – Determinação gráfica do conjugado médio de aceleração

Onde:

- $C_n$  – conjugado nominal;
- $C_m$  – conjugado do motor;
- $C_r$  – conjugado da carga;
- $C_a$  – conjugado médio de aceleração;
- $n_N$  – rotação nominal.

#### 1.4.4 REGIME DE PARTIDA

Devido ao valor elevado da corrente de partida dos motores de indução, o tempo gasto na aceleração de cargas de inércia 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 não foi bem sucedida, 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 retornar o funcionamento logo após o restabelecimento da energia. Como o aquecimento durante a partida depende da inércia das partes girantes da carga acionada, a norma estabelece os valores máximos de inércia da carga para os quais o motor deve ser capaz de cumprir as condições acima, os valores fixados para motores de II, IV, VI e VIII pólos estão indicados na tabela 1.4.4.1.

Potência Nominal		Número de pólos			
		II	IV	VI	VIII
kW	cv	kgm <sup>2</sup>			
0,4	0,54	0,0018	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	0,645	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	4,94	10,2
18	22	0,485	2,74	7,56	15,5
25	34	0,725	4,10	11,3	23,2
40	54	1,11	6,26	17,2	35,4
63	86	1,67	9,42	26,0	53,3
100	140	2,52	14,3	39,3	80,8
160	220	3,85	21,8	60,1	123
250	340	5,76	32,6	89,7	184
400	540	8,79	49,7	137	281
630	860	13,2	74,8	206	423

Tabela 1.4.4.1 – Momento de inércia (J) – NBR7094

#### Notas:

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

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

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 acima.

Para cargas com inércias maiores que o valor de referência da tabela 1.4.4.1, 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 heliocoidal, empuxos hidráulicos de bombas, peças rotativas pesadas em montagem vertical, etc.
- Forma construtiva 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  $GD^2$  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 de regime, não se 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 contracorrente.

### 1.4.5 CORRENTE DE ROTOR BLOQUEADO

#### 1.4.5.1 VALORES MÁXIMOS NORMALIZADOS

Os limites máximos da corrente com rotor bloqueado, em função da potência nominal do motor é válido para qualquer número de pólos, estão indicados na tabela 1.4.5.1.1, expressos em termos da potência aparente absorvida com rotor bloqueado em relação à potência nominal, kva/cv ou kva/kW.

$$\frac{kva}{cv} = \frac{\text{potência aparente com rotor bloqueado}}{\text{potência nominal}}$$

$$\frac{kva}{cv} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot U}{P(cv) \times 1000}; \quad \frac{kva}{kW} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot U}{P(kW) \times 1000}$$

Sendo:  $I_p$  – Corrente de rotor bloqueado, ou corrente de partida;  
 $U$  – Tensão nominal (V);  
 $P$  – Potência nominal (cv ou kW).

Faixa de potências nominais		$S_p / S_n$	
kW	cv	kva/kW	kva/cv
>0,37 ≤ 6,3	>0,5 ≤ 8,6	13	9,6
>6,3 ≤ 25	>8,6 ≤ 34	12	8,8
>25 ≤ 63	>34 ≤ 86	11	8,1
>63 ≤ 630	>86 ≤ 856	10	7,4

Tabela 1.4.5.1.1 – Potência aparente com rotor bloqueado ( $S_p/S_n$ ) para motores trifásicos – NBR 7094

#### 1.4.5.2 INDICAÇÃO DA CORRENTE

A indicação do valor da corrente de rotor bloqueado na placa de identificação do motor é prescrita na norma NBR 7094, a qual indica diretamente o valor de  $I_p/I_n$  que é a relação entre a corrente de rotor bloqueado e a corrente nominal.