

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Máquinas Ferramentas

Motores Elétricos utilizados em
Máquinas de Elevação e Movimentação de Materiais e
Máquinas Ferramentas

Prof. B. de M. Purquerio

São Carlos, março de 1996



MOTORES ELÉTRICOS UTILIZADOS EM MÁQUINAS DE ELEVAÇÃO E MOVIMENTAÇÃO DE MATERIAIS E MÁQUINAS FERRAMENTAS

1- INTRODUÇÃO

Dentre as fontes de energia conhecidas, a elétrica ocupa um lugar de destaque, particularmente devido às suas vantagens tais como a disponibilidade, segurança e o bom rendimento. Devido a isso, a aplicação geral de motores elétricos ampliou muito e recebeu um aprimoramento técnico grande.

Existem porém, situações onde ainda são necessários acionamentos que não são elétricos, ou sejam, os manuais, os a vapor e os que se utilizam de motores de combustão interna. Os primeiros aplicam-se a mecanismos de pequena potência e se limitam freqüentemente a aparelhos de uso irregular tais como em instalações de equipamentos ou em manutenção; os últimos, aplicam-se a aparelhos difíceis de serem ligados à rede elétrica tais como os guindastes de ferrovia, equipamentos de campo e flutuantes.

1.1- Construção e Características

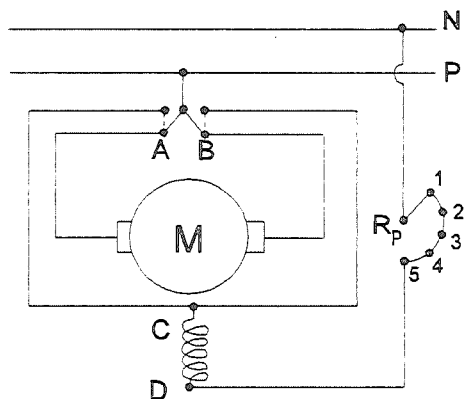
Os motores para aparelhos de elevação e movimentação de materiais devem ter grande conjugado de partida, de modo a permitir a aceleração das massas até a velocidade de regime, em pouco tempo; devem ter a possibilidade de serem ligados e desligados com freqüência e permitirem uma partida progressiva com auxílio de aparelhagem apropriada; o sentido da marcha deve ser reversível; deve ser capaz de exercer um momento de frenagem alto e é desejável que a variação da velocidade seja independente da carga.

Encontram-se atualmente no mercado motores para máquinas de elevação e movimentação de materiais, de corrente contínua para tensões de 110 e 220 V e de corrente alternada para 220, 380 e 440 V, sendo estas as voltagens mais freqüentes.

2 - MOTORES DE CORRENTE CONTINUA

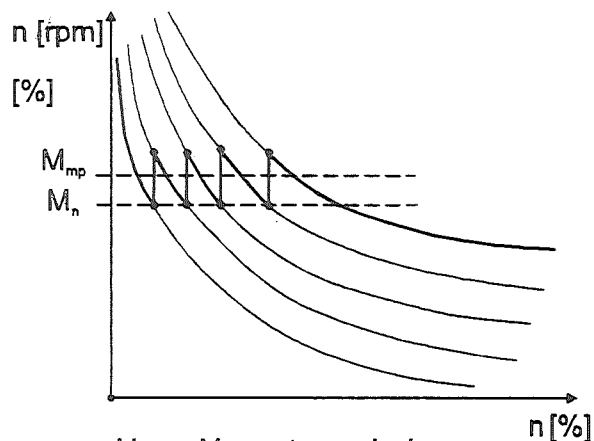
2.1 - Motor Série

No motor Série, os enrolamentos do induzido e do campo são ligados em série. Na partida, uma forte corrente passa através dos dois enrolamentos e o motor desenvolve um conjugado de partida muito forte (2,5 a 3,0 vezes o conjugado nominal). Para diminuir a corrente na partida é acrescentada no circuito do motor uma resistência que pode ser reduzida gradualmente. O motor série é ilustrado esquematicamente na Figura 2.1.



AB - Induzido
 CD - Indutor
 R_p - Resistência de partida

Figura 2.1 - Motor série.



M_n = Momento nominal
 M_{mp} = Momento médio de partida

Figura 2.2 - Momento médio de partida de motor série.

Na partida, mudando-se o reostato da posição 1 até a 5, varia-se a resistência e conseqüentemente a curva característica do motor. Dessa forma, o momento de partida varia em zigue-zague, em torno de um valor médio, conforme ilustra a Figura 2.2. Neste motor, a mudança do sentido de rotação, pode ser feita invertendo-se a polaridade do enrolamento do induzido (Figura 2.1).

A principal vantagem do motor série reside no fato de que ele adapta sua velocidade à carga, isto é, para grandes cargas trabalha a pequenas velocidades e vice versa (Figura 2.3).

Graças a esta propriedade, pode ser considerado como o motor ideal para os aparelhos de elevação. O seu uso porém, é quase exclusivo para instalações de corrente contínua.

O motor série tem a desvantagem de disparar quando completamente descarregado, mas normalmente o atrito dos mecanismos (ou o peso do moitão, no caso de elevação) é suficiente para impedir que isto aconteça. Por outro lado, durante a descida, nos mecanismos de elevação de carga, o motor funciona como gerador.

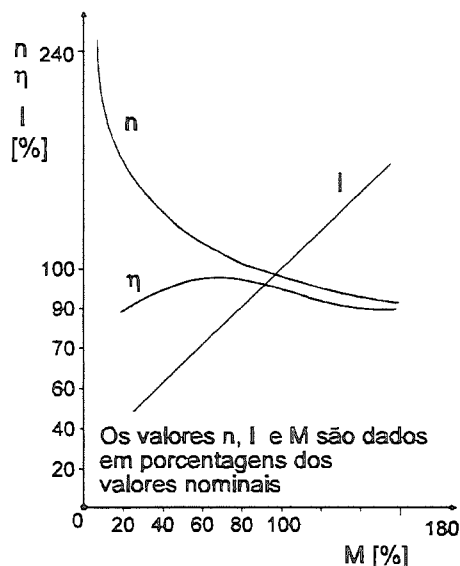


Figura 2.3 - Características do motor série

2.2- Motor Shunt

No motor *Shunt*, o induzido e o enrolamento de campo são ligados em paralelo, conforme ilustra o esquema da Figura 2.4.

O enrolamento de campo que, contrariamente ao motor série, é constituído de fios finos, recebe uma corrente constante e independente da corrente do induzido. Desta maneira, a velocidade do motor *Shunt* é praticamente independente da carga. Não apresenta o problema de disparo (Figura 2.5).

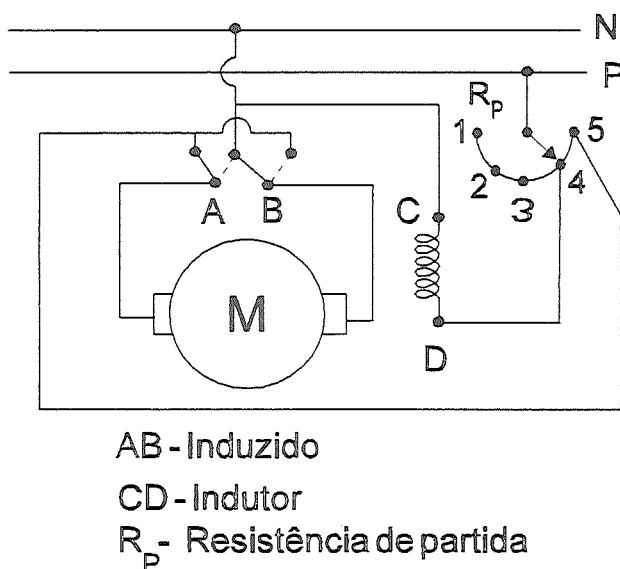


Figura 2.4 - Motor *shunt*.

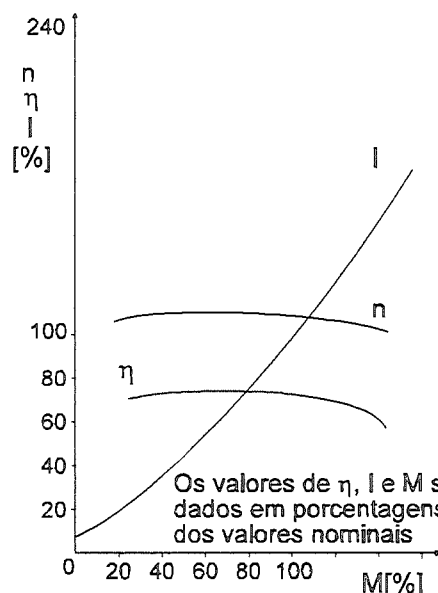


Figura 2.5 - Características do motor *shunt*.

Variando-se a intensidade do campo por meio de resistências, é possível, dentro de certos limites, regular a velocidade independentemente da carga. O conjugado de partida e a capacidade de sobrecarga desse motor são inferiores àquelas do motor série. Na descida, nos sistemas de elevação, esse motor trabalha como gerador.

O emprego do motor *Shunt* é raro e se limita aos casos onde se deseja uma velocidade constante e independente da carga.

2.3 - Motor Compound

O motor *Compound* é uma combinação do motor série e do motor *Shunt*, cujas características variam conforme a importância relativa dos enrolamentos série ou *shunt*. Nos aparelhos de elevação, sua utilização é limitada a casos especiais, por exemplo, quando se deseja que o motor não dispare e ao mesmo tempo se necessita de conjugados de partida elevados. A Figura 2.6 ilustra esse motor. A inversão do motor *compound* se faz invertendo-se a polaridade do induzido.

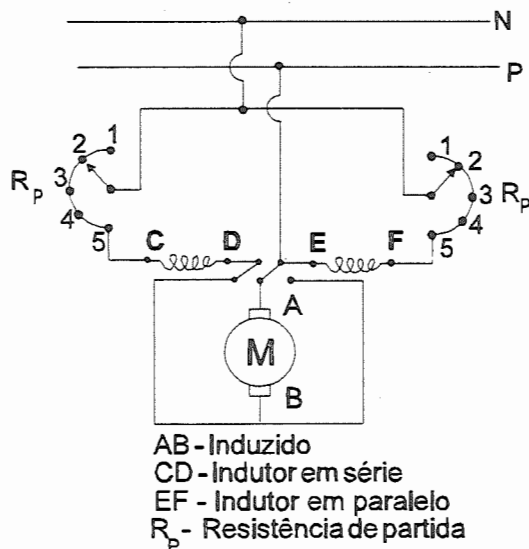


Figura 2.6 - Motor Compound.

3 - MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA

Os motores de corrente alternada são aplicados em praticamente todos os tipos de aparelhos de elevação e máquinas ferramentas. Eles podem ser síncronos ou assíncronos.

Nos motores assíncronos ou de indução trifásicos, o estator é ligado à rede enquanto que o rotor ou é ligado em curto-circuito ou é ligado através de anéis às resistências variáveis. O estator cria um campo magnético girante que arrasta o rotor. A diferença de velocidade entre o campo girante e o rotor denomina-se "escorregamento" e aumenta com a carga.

A rotação síncrona n_s ou do campo girante, depende do número de pares de polos p do estator e da frequência f da corrente trifásica, conforme mostra a equação 2.1.

As rotações síncronicas são fornecidas na Tabela 2.1 em função da frequência da rede e do número de polos.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [rpm]} \quad (2.1)$$

O escorregamento nos motores de corrente alternada, é dado pela equação 2.2, onde n é a rotação do motor.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.2)$$

Tabela 2.1 - Rotações Síncronas [rpm]

| Número de pares de polos | Frequência da rede | |
|--------------------------|--------------------|-------|
| | 50 Hz | 60 Hz |
| 1 | 3 000 | 3 600 |
| 2 | 1 500 | 1 800 |
| 3 | 1 000 | 1 200 |
| 4 | 750 | 900 |
| 5 | 600 | 720 |
| 6 | 500 | 600 |

Os motores de dupla polaridade possuem dois enrolamentos no estator com polaridades diferentes e permitem assim mudar a velocidade ligando no circuito, um ou outro dos enrolamentos. Em aparelhos de elevação o seu uso não é freqüente.

3.1 - Motores Assíncronos Curto Circuitados ou de Gaiola.

Os motores de gaiola são empregados para pequenas potências. Possuem o circuito esquematizado na Figura 3.1.

É um motor de construção simples e robusta. O seu comportamento na partida é definido pela curva característica mostrada na Figura 3.2. Apresenta o conjugado de partida relativamente baixo ($1,5 M_n$) e corrente de partida alta ($\sim 6 I_n$).

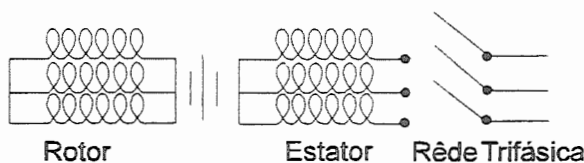


Figura 3.1 - Motor de gaiola.

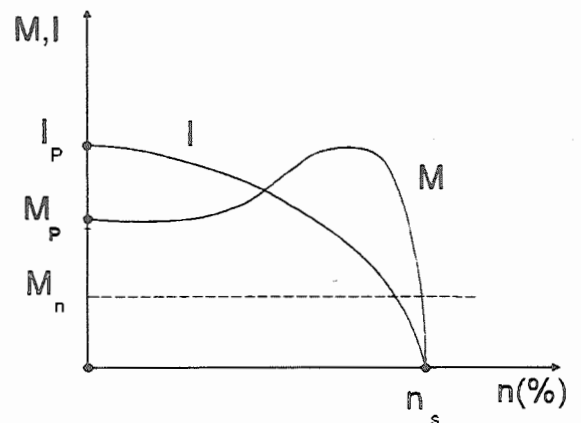


Figura 3.2 - Características do motor de gaiola.

Para aparelhos de elevação em que as partidas são freqüentes, preferem-se certos tipos de gaiola (dupla gaiola) que dão conjugados de partida suficientes ($1,5$ a $2,5 M_n$), com uma absorção de corrente moderada ($\sim 3,0 I_n$).

Os motores elétricos de gaiola eram classificados segundo a norma brasileira EB-120 da ABNT, em categorias. Essa norma foi substituída pela NBR-7094. A título ilustrativo, apresenta-se a classificação antiga, a saber:

a) Motores de Gaiola Classe A (Figura 3.3).

Para potências maiores que 7,5 CV.
Arranque com redução de voltagem.
Utilizado em Máquinas Ferramentas e instalações que requerem baixo momento de partida.

$$M_p = 1,5 M_n, \quad I_p = (5,0 - 7,0) I_n$$

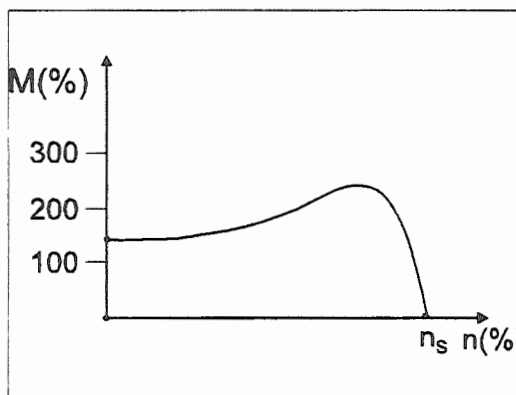


Figura 3.3 - Motor de gaiola classe A.

b) Motores de Gaiola Classe B (Figura 3.4)

Arranque a plena voltagem.
Utilizado em Máquinas Ferramentas, bombas centrífugas, compressores ou instalações que requerem baixo M_p .

$$M_p = 1,5 M_n, \quad I_p = (4,5 - 5,0) I_n$$

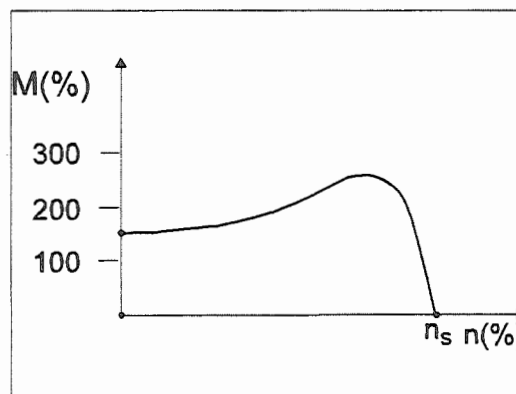


Figura 3.4 - Motor de gaiola classe B

Normalmente encontrados para potência maior que 5,0 CV.

c) Motores de Gaiola Classe C (Figura 3.5)

Dupla gaiola de esquilo.
Arranque a plena voltagem.
Utilizado em Britadores, transportadores que arrancam com carga ou instalações que requerem um forte M_p .

$$M_p = 2,25 M_n, \quad I_p = (4,5 - 5,0) I_n$$

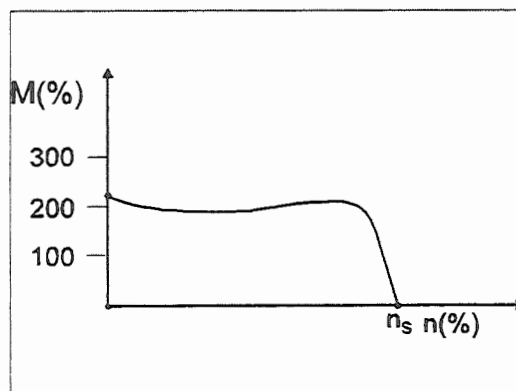


Figura 3.5 - Motor de gaiola classe C.

d) Motores de Gaiola Classe D (Figura 3.6)

Baixa corrente de partida.
Utilizado em Máquinas dotadas de volantes,
trefiladoras, pequenos guinchos.

$$M_p = 2,75 M_n$$

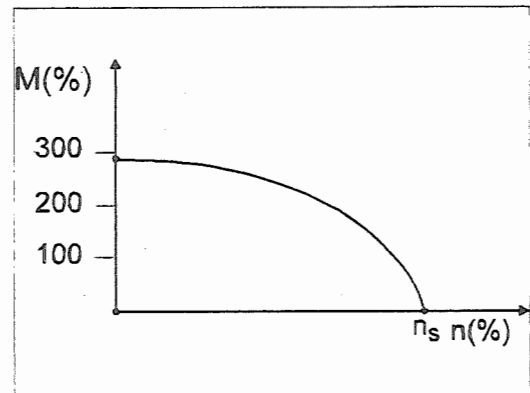


Figura 3.6 - Motor de gaiola classe D.

A norma brasileira NBR 7094 da ABNT, conforme as características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, classifica os motores de indução trifásicos com rotores de gaiola em categorias, cada uma delas adequada a um tipo de carga.

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 e máquinas operatrizes.

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, etc.

Categoria D - Conjugado de partida alto, corrente de partida normal, alto escorregamento (mais de 5%). Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores de cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos e corrente de partida limitada.

As curvas conjugado x velocidade dessas categorias são mostradas na Figura 3.7.

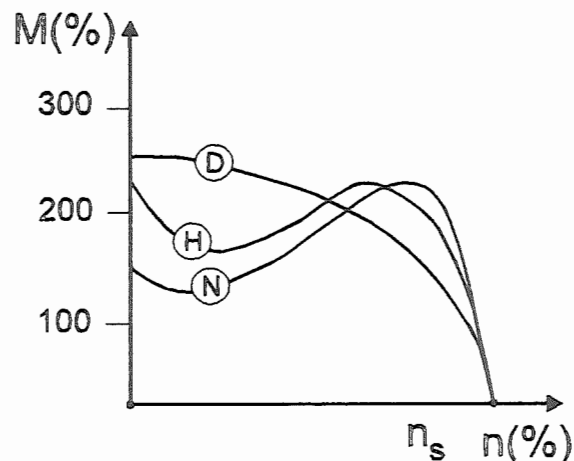


Figura 3.7 - Curvas conjugado x velocidade

3.2 - Motores Assíncronos de Anéis

Os motores assíncronos de anéis são os mais usados em máquinas de elevação. Permitem variar a velocidade por meio de resistências introduzidas no circuito do rotor, conforme mostra a Figura 3.8.

Nesse motor, a velocidade é tanto maior quanto menor for a resistência do motor. Na partida, variando-se a resistência do circuito do rotor, consegue-se conjugados altos com baixa corrente. Pode-se observar isto analisando as curvas características de um motor de anéis, conforme mostra a Figura 3.9.

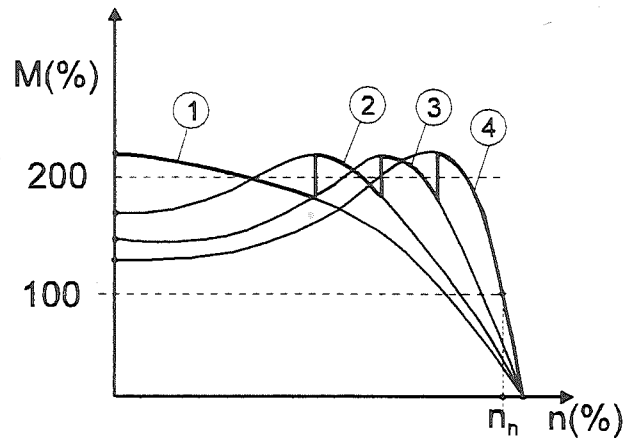
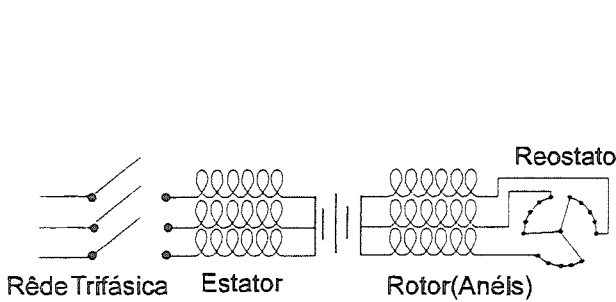


Figura 3.8 - Esquema do motor de anéis.

Figura 3.9 - Características do motor de anéis.

Uma desvantagem dos motores de anéis é a grande perda por efeito Joule que apresentam. Os motores de anéis são utilizados em elevadores, guindastes, pontes rolantes, guias de laminadores, escavadeiras elétricas, carregadores de carvão e minério.

4 - POTÊNCIA DOS MOTORES ELÉTRICOS

4.1 - Potência de Regime

A potência de regime é a potência que o motor fornece para elevar ou deslocar a carga total à velocidade normal e constante de regime, após o período de aceleração.

Tem-se, para os mecanismos de transporte de carga, as seguintes potências de regime.

a) Para a elevação,

$$N_r = \frac{Q \cdot v}{60 \cdot 75} \cdot \frac{1}{\eta} \text{ [CV]} \quad (4.1)$$

onde,

Q = carga nominal [kgf],

v = velocidade de subida [m/min],

η = rendimento do mecanismo de elevação.

b) para a translação,

$$N_t = (Q + G)W_t \cdot \frac{v_t}{60 \cdot 75} \cdot \frac{1}{\eta} \text{ [CV]} \quad (4.2)$$

onde,

Q = carga nominal [kgf],

G = peso próprio da ponte ou do carrinho [kgf],

W_t = coeficiente de resistência ao rolamento,

v_t = velocidade de translação [m/min],

η = rendimento do mecanismo de translação.

Somente o conhecimento da potência de regime não é suficiente para escolher um motor elétrico. A potência que se pode consumir de um motor elétrico é função do conjugado máximo exigido e do aquecimento do motor que, em relação à vida do isolamento do motor, não deve ultrapassar um certo limite.

4.2 - Aquecimento e Resfriamento de um Motor Elétrico

4.2.1 - Curva de Vida Térmica

O limite de temperatura do isolamento de um motor elétrico 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 utilizados em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme a ABNT - EB 120 são as seguintes: Classe A (105 °C), Classe E (120 °C), Classe B (130 °C), Classe F (155 °C) e Classe H (180 °C).

As classes A, B e F são as comumente utilizadas em motores normais. Os limites de temperatura recomendados pelas normas são normalmente encontrados nos catálogos dos fabricantes.

Denomina-se curva de vida térmica de um motor elétrico, a curva $T = f(\theta)$,

onde,

θ = temperatura,

T = vida do motor, ou seja, o tempo de trabalho contínuo possível.

O fator determinante da vida do motor é a durabilidade do isolamento térmico. Devido a isto, os limites de elevação de temperatura dos motores são normalizados pela EB-120 que se baseia nas classes de isolamentos (A, B, H).

Assim, por exemplo, a elevação máxima de temperatura permitida de um enrolamento da classe A é de 50 °C, da classe B é de 70 °C e da classe H é de 110 °C.

A curva de vida térmica de um motor é do tipo exponencial e se caracteriza pelo fato de que na faixa de utilização, uma redução de 10 °C na temperatura dobra o valor da vida do motor.

A Figura 4.1 ilustra a curva de vida térmica típica de um motor elétrico.

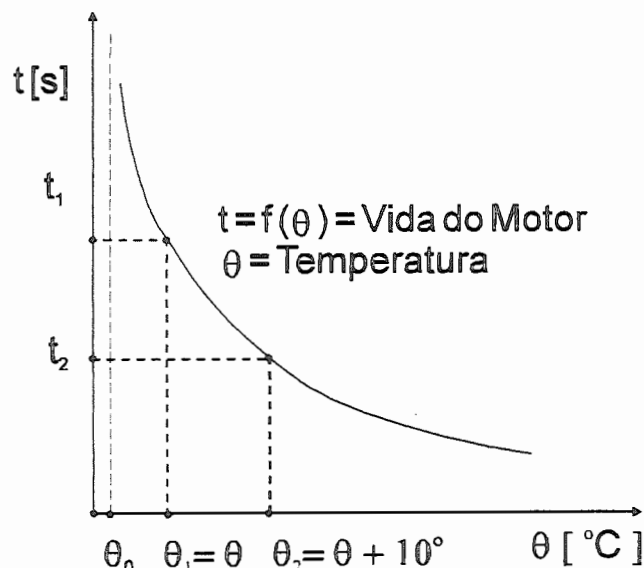


Figura 4.1 - Curva de vida térmica.

4.2.2 - Curva de aquecimento

A curva de aquecimento pode ser levantada experimentalmente, ou ser obtida analiticamente.

Da equação do equilíbrio térmico tem -se:

(Calor gerado por efeito Joule) = (Calor armazenado no motor) + (calor dissipado)

Assim,

$$(R \cdot i^2)dt = (C \cdot m)d\theta + (\alpha \cdot s \cdot \theta)dt \quad (4.3)$$

onde,

i = corrente elétrica,
 R = resistência elétrica,
 C e α = constantes,
 θ = temperatura,
 t = tempo,
 s = área de dissipação,
 m = massa do motor.

Rearranjando a equação (4.3) tem -se,

$$\frac{d\theta}{dt} + \theta \cdot \frac{\alpha \cdot s}{C \cdot m} = \frac{R \cdot i^2}{C \cdot m}$$

cuja solução é,

$$\theta = \frac{R \cdot i^2}{\alpha \cdot s} \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot s}{C \cdot m} t}\right)$$

Fazendo-se,

$$\theta = \frac{R \cdot i^2}{\alpha \cdot s} \quad e \quad t_k = \frac{C \cdot m}{\alpha \cdot s}$$

resulta,

$$\theta = \theta_0 \left(1 - e^{-t/t_k}\right) \quad (4.4)$$

Analisando a equação (4.4), se $t \rightarrow \infty$, tem-se que $\theta = \theta_0$. Praticamente, o tempo de funcionamento após o qual a temperatura se manterá a constante é dado por $t \approx 3t_k$, pois,

$$\theta = \theta_0 \left(1 - \frac{1}{e^3}\right) = 0,95\theta_0$$

conforme ilustra a Figura 4.2.

4.2.3 - Curva de resfriamento

Para o resfriamento do motor tem-se a seguinte equação de equilíbrio,

$$-(C \cdot m)d\theta + (\alpha' \cdot s \cdot \theta)dt = 0 \quad (4.5)$$

cuja solução é dada por,

$$\theta = \theta'_0 \cdot e^{-t/t_k} \quad (4.6)$$

Analisando a equação 4.6, se $t \rightarrow \infty$, tem-se $\theta \rightarrow 0$, conforme ilustra a Figura

4.3.

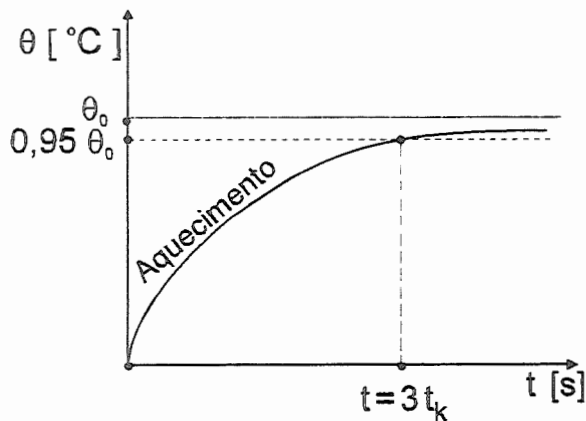


Figura 4.2 - Curva de aquecimento.

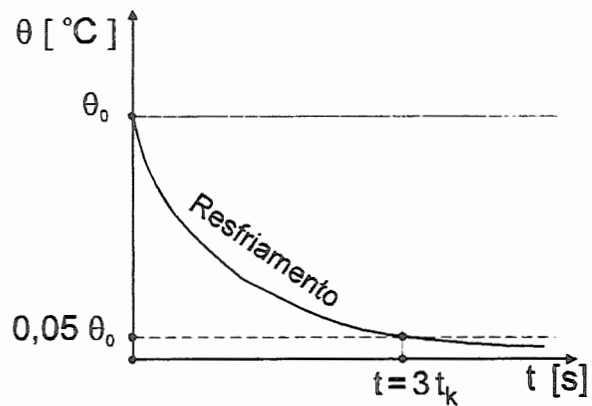


Figura 4.3 - Curva de resfriamento.

4.2.4 - Combinação das curvas

Quando se tem um tempo de funcionamento igual a t_a e um tempo de repouso igual a t_b , a temperatura máxima atingida torna-se função destes tempos, conforme pode ser visto na Figura 4.4.

4.3 - Regimes de Serviço

Regime de serviço de um motor elétrico é a variação de sua carga durante um intervalo de tempo fixo.

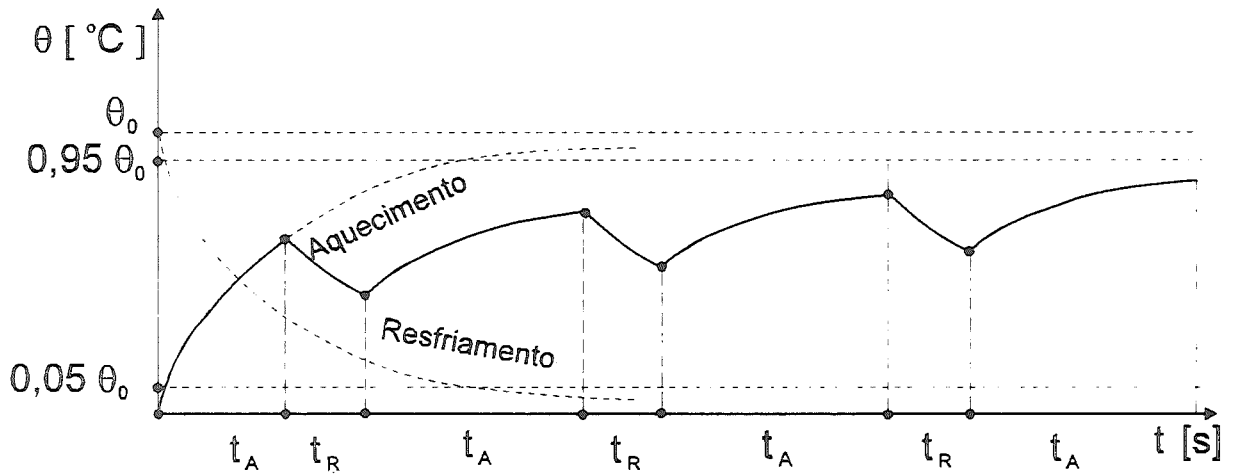


Figura 4.4 - Aquecimento e resfriamento combinados.

4.3.1 Regime Contínuo

É o regime de serviço em que a carga se mantém praticamente constante durante um tempo limitado conforme ilustra a Figura 4.5.

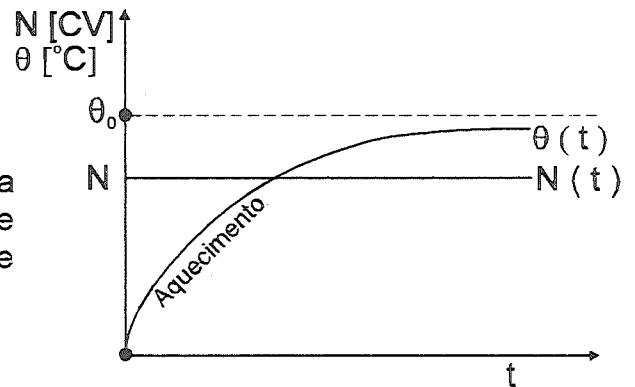


Figura 4.5 - Regime de serviço contínuo.

4.3.2 - Regime de tempo limitado

É o regime em que a carga se mantém praticamente constante, durante um intervalo de tempo especificado, seguindo-se um repouso suficiente para restabelecer a igualdade de temperatura do motor com o ambiente, conforme ilustra a Figura 4.6.

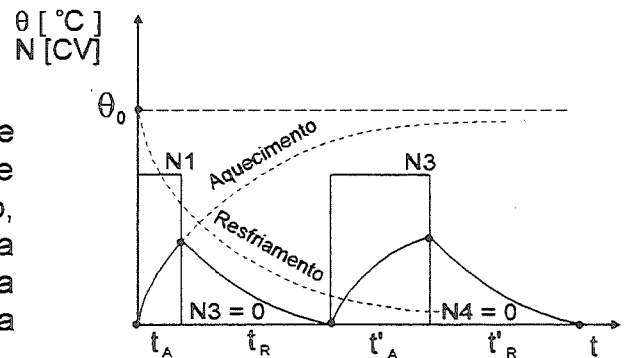


Figura 4.6 - Regime de serviço de tempo limitado

Os intervalos de tempo em que a máquina está em carga são chamados de períodos. Segundo a EB-120, os períodos padronizados são os ilustrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Períodos padronizados pela EB-120.

| Potência nominal do motor (CV) | Periodos Padronizados (minutos) |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 0 a 30 inclusive | 5 - 15 - 30 - 60 - 90 |
| 30 a 50 | 15 - 30 - 60 - 90 |
| 50 a 60 | 30 - 60 - 90 |
| maior de 60 | 60 - 90 |

4.3.3 - Regime intermitente

É o regime de serviço em que se alteram, dentro de um intervalo de tempo específico, um tempo de funcionamento em carga com outro em vazio ou em repouso.

O intervalo de tempo especificado para o regime intermitente é de 10 minutos.

Existem dois tipos de regime intermitente:

a) - Regime intermitente FR (F.de M. ou ED)

Regime de serviço em que, dentro de um intervalo de tempo básico, se sucedem períodos de funcionamento sob carga nominal e períodos de repouso com o motor desligado da fonte de alimentação. Figura 4.7.

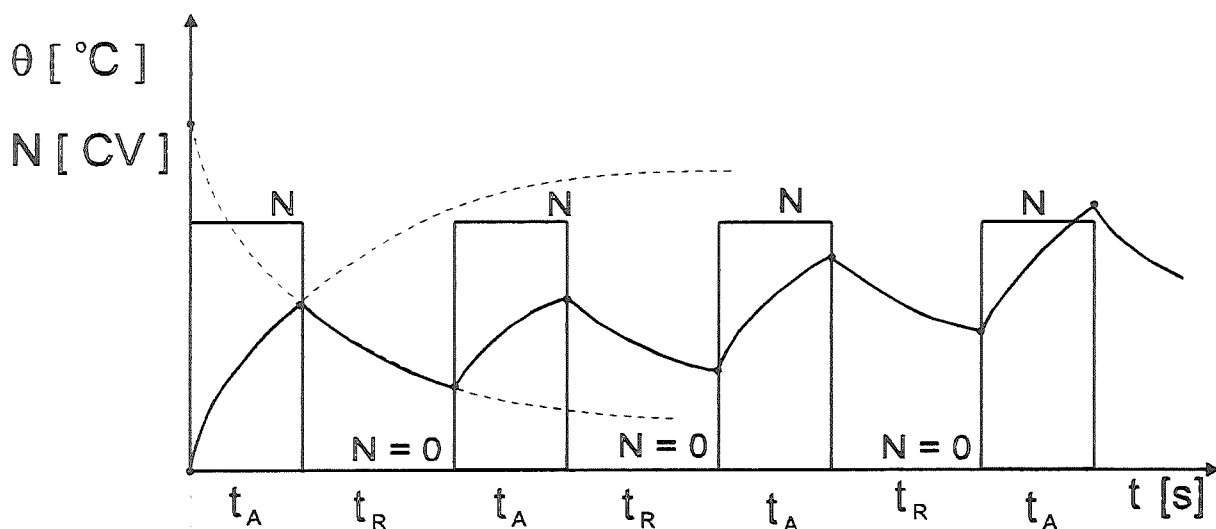


Figura 4.7 - Regime de serviço intermitente FR

$$FR = ED = F.de.M = \frac{\sum \text{Tempos em carga}}{\sum \text{Tempos em carga} + \sum \text{Tempos em repouso}} \times 100[\%]$$

Por exemplo, a indicação FR 40% de um motor elétrico significa que o motor pode suportar, sem causar aquecimento anormal, uma sucessão de ciclos de 10 minutos, dos quais 4 minutos são de funcionamento e 6 minutos são de repouso.

b) Regime intermitente FV

Regime de serviço em que, dentro de um intervalo de tempo básico, se sucedem períodos de funcionamento sob carga nominal e períodos de funcionamento em vazio, com o motor ligado à fonte de alimentação, conforme ilustra a Figura 4.8.

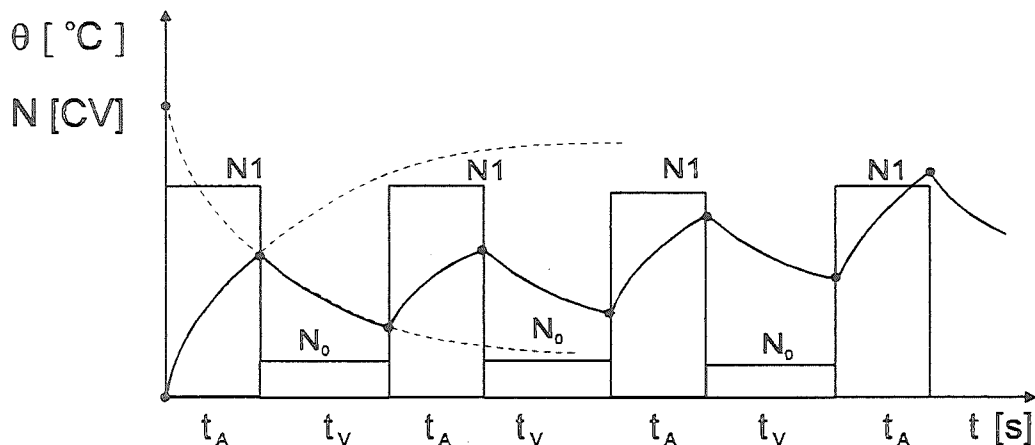


Figura 4.8 - Regime de serviço intermitente FV.

4.3.4 - Regime periódico

É o regime no qual as condições de carga e repouso se repetem periodicamente, conforme mostra a Figura 4.9.

4.3.5 - Regime variável

É o regime que apresenta variações irregulares da carga e dos intervalos de tempo, conforme esquematiza a Figura 4.10.

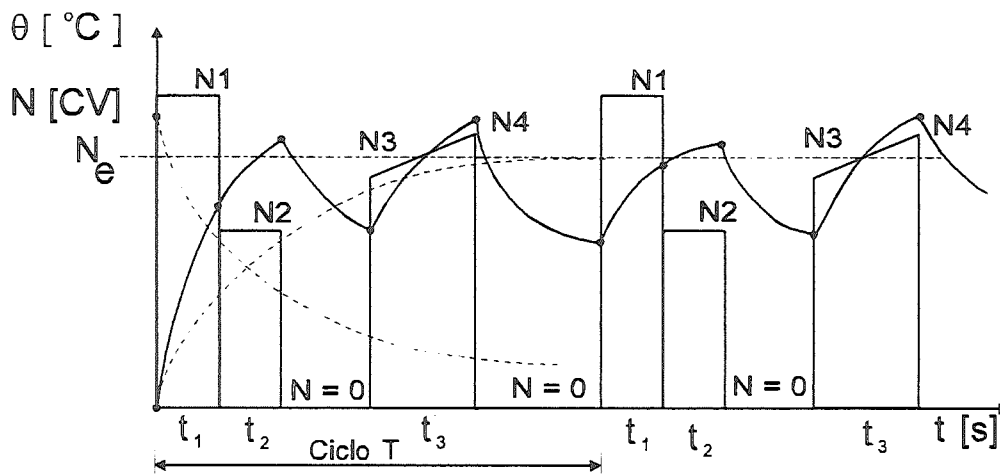


Figura 4.9 - Regime de serviço periódico.

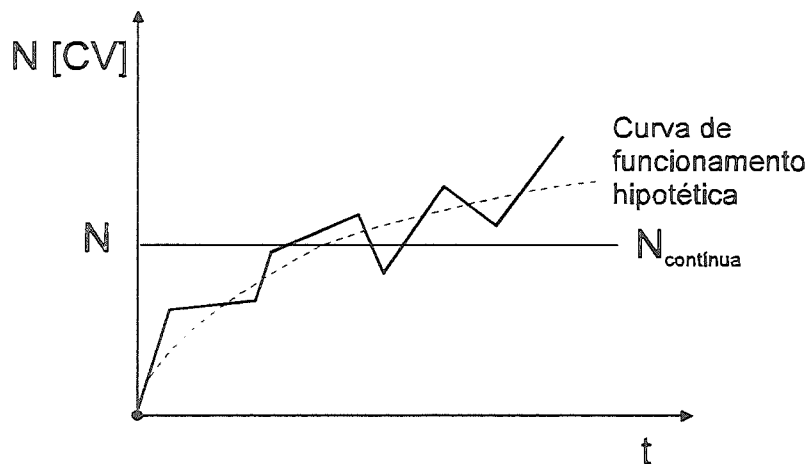


Figura 4.10 - Regime de serviço variável.

4.4 - Cálculo da Potência de Motores de Anéis

4.4.1 - Cálculo de potência através do diagrama de carga

O diagrama de carga de um motor elétrico mostra, a cada instante, a potência fornecida pelo motor. Para isso, necessita-se do conhecimento preciso do ciclo de trabalho da máquina, o que nem sempre é possível.

Através do diagrama de carga pode ser calculada a potência eficaz do motor, que é a potência que o motor deverá fornecer, trabalhando em regime contínuo, para produzir o mesmo aquecimento do regime do diagrama de carga.

As perdas elétricas, causas do aquecimento, são aproximadamente

proporcionais ao quadrado da intensidade da corrente. Admitindo-se a tensão e o rendimento constantes, a corrente proporcional ao momento e a velocidade constante, tem -se,

$$W = \int_{t_1}^{t_2} N^2 \cdot dt [\text{kCal}] \quad (4.8)$$

onde,

W = calor desenvolvimento no motor [kCal],
 k = constante,
 N = potência fornecida pelo motor em relação ao tempo [CV],
 t = tempo [s].

Para o caso do diagrama, de carga da Figura 4.9 tem - se,

$$W = k[N_1^2 \cdot t_1 + N_2^2 \cdot t_2 + \frac{1}{3}(N_3^2 + N_3 \cdot N_4 + N_4^2)t_3] \quad (4.9)$$

Mas, pela definição de potência equivalente,

$$W' = k \cdot N_e^2 \cdot T \quad e \quad W' = W$$

Portanto,

$$N_e = \sqrt{\frac{N_1^2 \cdot t_1 + N_2^2 \cdot t_2 + \frac{1}{3}(N_3^2 + N_3 \cdot N_4 + N_4^2)t_3}{T}}$$

Obtém-se, assim, uma primeira condição para escolha do motor. A potência de serviço contínuo do motor deve ser maior ou igual à potência eficaz calculada ou seja,

$$\boxed{N_{100} \geq N_e} \quad (4.10)$$

4.4.2 - Especificação da potência dos motores

Os fabricantes de motores geralmente especificam as condições de serviço às quais corresponde a potência nominal do motor (potência estampada na placa de identificação do motor). Quando falta esta indicação, supõe-se que o motor seja para um serviço contínuo.

Na prática, usam-se duas maneiras de especificar a potência de um motor:

a) pelo fator de funcionamento ED (FV, FR, F. de M.);

b) pelo período normalizado de 1/2 hora, 1 hora, ou contínuo.

É comum o problema onde se necessita de um motor com uma potência conhecida para um dado fator de funcionamento e se dispõe de um catálogo de motores cujas potências estão especificadas para um outro fator de funcionamento. Nesses casos, basta lembrar que para o regime intermitente, por exemplo funciona repousa FR, carga constante, tem-se:

$$N_e = \sqrt{\frac{1}{T} (N_{FR}^2 \cdot t_1)} = N_{FR} \sqrt{\frac{\text{Tempo em carga}}{T}}$$

ou seja,

$$N_e = N_{FR} \sqrt{FR} \quad (4.11)$$

Exemplificando,

$$N_e = N_{60} \sqrt{0,60} = N_{50} \sqrt{0,50}$$

Portanto,

$$\frac{N_{60}}{N_{50}} = \sqrt{\frac{0,50}{0,60}}$$

Assim, um motor que fornece para serviço com FR₆₀ uma potência de N₆₀ = 20CV, pode fornecer, quando em regime com FR₅₀, a potência de,

$$N_{50} = N_{60} \sqrt{\frac{0,60}{0,50}} = 20 \cdot 1,1 = 22,0 [CV]$$

A Figura 4.10 ilustra o exemplo analisado.

No caso em que o catálogo forneça valores de potência para certos FR ou tempos padronizados, pode-se fazer uma conversão aproximada segundo a Tabela 4.2.

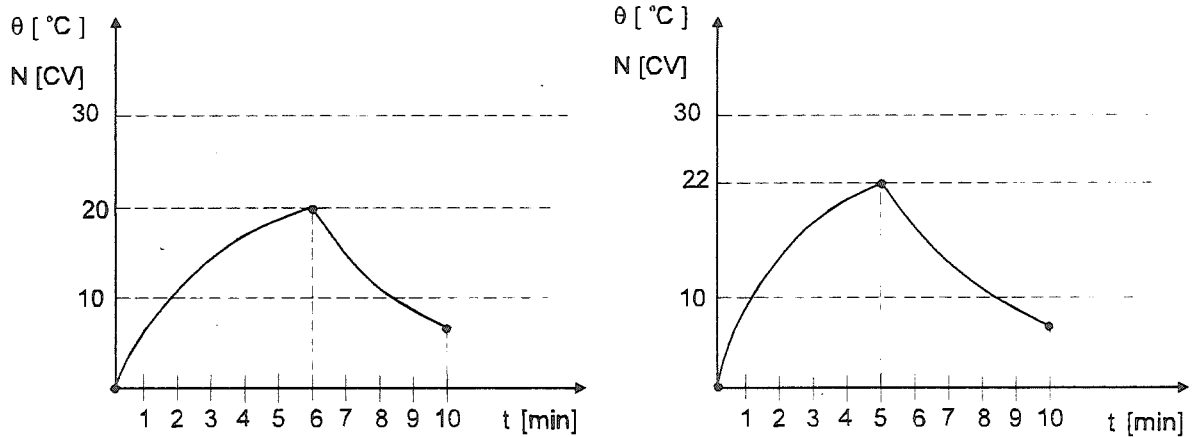


Figura 4.10 - Especificação de potências de motores elétricos.

Tabela 4.2 - Conversão aproximada de regimes de serviço.

| Regime intermitente | Regime de tempos limitados |
|---------------------|----------------------------|
| 20% | 30 minutos |
| 40% | 60 minutos |
| 60% | 90 minutos |
| 100% | contínuo (só p/ ilustrar) |

4.4.3 - Cálculo da potência através de coeficientes experimentais e do trabalho de aceleração.

Quando não se conhece o diagrama de carga da máquina de elevação, é possível escolher os motores através de coeficientes experimentais.

Três são as condições que devem ser satisfeitas simultaneamente:

- a) Fator de funcionamento,
- b) Condição de carga relativa,
- c) Condição de trabalho de aceleração.

O fator de funcionamento já foi analisado no item 4.4.2, e a escolha do motor é indicada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Motores Assíncronos Trifásicos de Anéis Tipo P, M, MS.

| 4 Pólos $n_s = 1800$ rpm | | | | 6 Pólos $n_s = 1200$ rpm | | | |
|--------------------------|----------|------------------|------|--------------------------|-----------|------------------|------|
| Tipo | Potência | GD ² | Pêso | Tipo | Potência | GD ² | Pêso |
| | kW-CV | kgm ² | kg | | kW-CV | kgm ² | kg |
| 132Ma | 4,4-6 | 0,082 | 114 | 132Ma | 2,9-4 | 0,12 | 100 |
| 132Mb | 6,6-9 | 0,124 | 124 | 132Mb | 4,4-6 | 0,19 | 110 |
| 160La | 8-11 | 0,37 | 130 | 160La | 6,6-9 | 0,41 | 130 |
| 160La1 | 11-15 | 0,37 | 130 | 160La1 | 8-11 | 0,41 | 130 |
| 160Lb | 12,5-17 | 0,481 | 180 | 160Lb | 8-11 | 0,56 | 170 |
| 160Lb1 | 14,7-20 | 0,481 | 180 | 160Lb1 | 10-14 | 0,56 | 170 |
| 180La | 17-23 | 0,66 | 200 | 180L | 12,5-17 | 1,0 | 220 |
| 180Lb | 22-30 | 0,8 | 230 | 180L1 | 17,6-24 | 1,0 | 220 |
| 200La | 20-27 | 1,16 | 280 | 200L | 16,9-23 | 1,4 | 285 |
| 200La1 | 26-35 | 1,16 | 280 | 200La | 19,8-27 | 1,68 | 320 |
| 200Lb | 25-34 | 1,41 | 310 | 225Ma | 19,8-27 | 2,46 | 390 |
| 200Lb1 | 29,4-40 | 1,41 | 310 | 225Ma1 | 25-34 | 2,46 | 390 |
| 225Ma | 29,4-40 | 2,1 | 390 | 225Mb | 25-34 | 2,95 | 450 |
| 225Ma1 | 36,7-50 | 2,1 | 390 | 225MB1 | 29,4-40 | 2,95 | 450 |
| 225Mb | 44,1-60 | 2,58 | 415 | 250Ma | 29,4-40 | 4,16 | 495 |
| 250Ma | 40,4-55 | 2,6 | 440 | 250Ma1 | 33-45 | 4,16 | 495 |
| 250Ma1 | 44,1-60 | 2,6 | 440 | 250Mb | 40,4-55 | 5,2 | 535 |
| 250Mb | 51,5-70 | 3,23 | 480 | 280Ma | 51,5-70 | 6,92 | 620 |
| 250Mb1 | 55-75 | 3,25 | 480 | 280Mb | 62,5-75 | 8,57 | 700 |
| 250M | 62,5-85 | 4,1 | 550 | 280Mb1 | 66,2-90 | 8,57 | 700 |
| 280Ma | 81-110 | 5,83 | 700 | 315Ma | 80,8-110 | 14 | 980 |
| 280Mb | 95,5-130 | 7,35 | 740 | 315Ma1 | 86-117 | 14 | 980 |
| 315Ma | 110-150 | 12,2 | 1100 | 315Mb | 102,9-140 | 17 | 1150 |
| 315Mb | 147-200 | 14,1 | 1170 | 355La | 117,6-160 | 22 | 1750 |
| | | | | 355Lb | 161,7-220 | 30 | 1860 |

continua...

Tabela 4.3 (Continuação) - Motores Assíncronos Trifásicos de Anéis Tipo P, M, MS.

| 8 Pólos $n_s = 900$ rpm | | | | 10 Pólos $n_s = 720$ rpm | | | |
|-------------------------|----------|------------------|------|--------------------------|----------|------------------|------|
| Tipo | Potência | GD ² | Pêso | Tipo | Potência | GD ² | Pêso |
| | kW-CV | kgm ² | kg | | kW-CV | kgm ² | kg |
| 132Ma | 2,2-3 | 0,23 | 100 | 132M | 2,2-3 | 0,3 | 110 |
| 132Mb | 3-4 | 0,28 | 110 | 160La | 3,67-5 | 0,57 | 130 |
| 160La | 5,14-7 | 0,51 | 130 | 160Lb | 5,5-7,5 | 0,66 | 160 |
| 160Lb | 6,6-9 | 0,64 | 160 | 180L | 7,4-10 | 1,2 | 220 |
| 180L | 8-11 | 1,1 | 220 | 200La1 | 10,3-14 | 1,3 | 260 |
| 200L | 12,5-17 | 1,76 | 290 | 200Lb1 | 12,5-17 | 1,8 | 290 |
| 225Ma | 17-23 | 2,12 | 390 | 225M | 14,7-20 | 3,3 | 450 |
| 225Mb | 20-27 | 2,59 | 450 | 250Ma | 20-27 | 6,4 | 510 |
| 225Mb1 | 22-30 | 2,59 | 450 | 250Mb | 25-34 | 7,5 | 565 |
| 250Ma | 25-34 | 6,1 | 510 | 280Ma | 29,4-40 | 11,5 | 620 |
| 250Mb | 29,4-40 | 7,4 | 565 | 280Mb | 40,4-55 | 14 | 700 |
| 250Mb1 | 33-45 | 7,4 | 565 | 315Ma | 51,5-70 | 23 | 980 |
| 280Ma | 40,4-55 | 10,9 | 620 | 315Mb | 62,5-85 | 28 | 1150 |
| 280Mb | 51,4-70 | 10,9 | 620 | 355La | 80,8-110 | 38 | 1750 |
| 280M1 | 55-75 | 13,5 | 700 | 355La1 | 84,5-115 | 38 | 1750 |
| 315Ma | 62,5-85 | 20 | 980 | 355Lb | 103-140 | 45 | 1860 |
| 315Ma1 | 69,2-94 | 20 | 980 | 355Lb1 | 106-145 | 45 | 1860 |
| 315Mb | 81-110 | 25,4 | 1250 | 355Lc | 116-160 | 52 | 1970 |
| 315Mb1 | 88-120 | 25,4 | 1250 | 400La | 136-185 | 62 | 2150 |
| 355La | 103-140 | 38 | 1750 | 400Lb | 162-220 | 75 | 2380 |
| 355La1 | 110 -150 | 38 | 1750 | 400Lb1 | 169-230 | 75 | 2640 |
| 355Lb | 136-185 | 45 | 1860 | 450La | 206-280 | 110 | 3130 |
| 355Lb1 | 139-190 | 45 | 1860 | 450Lb | 265-360 | 140 | 3400 |
| 400La | 173-235 | 61 | 2350 | 450Lc | 320-435 | 170 | 3700 |
| 400Lb | 220-300 | 75 | 2600 | | | | |

Carga Relativa

A condição de carga relativa geralmente prevalece nos sistemas de elevação. Denomina-se carga relativa M_r , a relação,

$$M_r = \frac{M_o + M_r}{2M_r} \quad (4.12)$$

onde,

M_o = momento em vazio para movimentar o peso próprio,

M_R = momento de regime para movimentar a carga nominal Q ,

Fator de Carga Relativa

Define-se também, o fator de carga relativa f_r , para regime intermitente, como sendo,

$$f_r = \frac{N_{eR}}{N_R} \quad (4.13)$$

onde,

N_{eR} = potência equivalente de regime (produz o mesmo aquecimento com o motor em carga),

N_R = potência de regime à plena carga.

Como visto anteriormente, para se obter o mesmo aquecimento é preciso que,

$$N_{eR}^2 (t_R + t_o) = N_R^2 \cdot t_R + N_o^2 \cdot t_o$$

ou seja,

$$N_{eR} = \sqrt{\frac{N_R^2 \cdot t_R + N_o^2 \cdot t_o}{(t_R + t_o)}} \quad e,$$

$$f_r = \sqrt{\frac{N_R^2 \cdot t_R + N_o^2 \cdot t_o}{N_R^2 (t_R + t_o)}}$$

Admitindo-se que $t_o = t_R$ e que a rotação do motor seja constante,

$$f_r = \sqrt{\frac{N_R^2 + N_o^2}{2N_R^2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{M_o}{M_R}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}$$

Como,

$$M_R = \frac{M_0 + M_R}{2M_R}$$

ou,

$$\frac{M_0}{M_R} = 2M_R - 1$$

Substituindo,

$$f_R = \sqrt{1 - 2M_R + 2M_R^2} \quad (4.14)$$

Com relação ao aquecimento, uma das condições que o motor deve satisfazer é que,

$$N_n \geq N_{eR} = f_r N_r \quad (4.15)$$

Para determinar a potência do motor em regime contínuo, tem-se,

$$N_e \sqrt{100} = N_{eR} \sqrt{ED}$$

e como, $N_n \geq N_e$, fica,

$$N_n \geq N_{eR} \sqrt{\frac{ED}{100}}$$

A Tabela 4.4 fornece valores práticos da carga relativa M_r e a Figura 4.11 ilustra o acima exposto.

Tabela 4.4 - Valores práticos de M_r

| M_r | Sistemas de Elevação e Transporte |
|-------------|---|
| 0,55 a 0,6 | Sistema de elevação de carga (presa diretamente no gancho) |
| 0,75 a 0,80 | Sistema de elevação de carga (carga em caçamba) |
| 0,65 a 0,75 | Sistemas comuns de elevação em carros das pontes rolantes |
| 0,75 a 0,90 | Sistemas comuns de elevação em pontes rolantes e guindastes |
| 0,85 a 0,95 | Sistemas de rotação ou translação de guindastes de caçamba. |
| 0,90 a 1,00 | Sistemas de translação de pontes e porticos. |

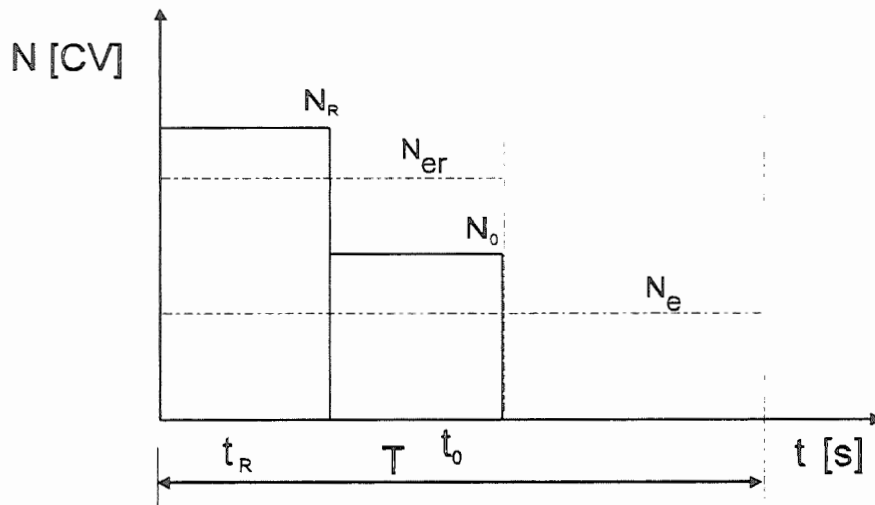


Figura 4.11 - Potência equivalente.

Então, segundo a equação (4.14), pode-se obter os valores para os fatores de carga relativa f_r , a saber:

| | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|-----|
| M_r | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,0 |
| f_r | 0,71 | 0,72 | 0,76 | 0,82 | 0,91 | 1,0 |

4.4.4 - Condição do trabalho de aceleração

Durante a fase de aceleração o motor tem que ser capaz de acelerar as massas até a velocidade de regime, durante um tempo limitado, e seu aquecimento não deve ultrapassar os limites admissíveis. Caso a frenagem seja realizada pelo motor, também ela deverá ser considerada no cálculo do aquecimento.

Geralmente, esta condição predomina nos sistemas de translação de pontes rolantes e rotação de guindastes e determina a escolha do motor.

a) Quanto ao conjugado

Para a translação de uma ponte rolante, a potência de aceleração é dada por,

$$N_A = \frac{Q + G + G_0}{g} \cdot \gamma \cdot \frac{v}{60 \cdot 75} \cdot \frac{\beta}{\eta} [\text{CV}] \quad (4.17)$$

onde,

G = peso próprio da ponte (kgf),

Q = carga (kgf),

G_0 = Peso próprio do carrinho (kgf),

γ = aceleração (m/seg^2),

v = velocidade de regime (m/min),

η = rendimento,

β = coeficiente que leva em conta a inércia das massas em movimento de rotação (engrenagem, rodas, acoplamentos rotor, etc) = 1,1 a 1,3.

Tem-se ainda, durante a aceleração, a potência perdida por atrito (potência de regime) que é dada por,

$$N_R = (Q + G + G_0) \cdot W_t \cdot \frac{v}{60 \cdot 75} \cdot \frac{1}{\eta} [\text{CV}] \quad (4.18)$$

coef. relativo ao ndam

Então, a condição que o motor deverá satisfazer é dada por,

$$N_n \geq \frac{N_A + N_R}{C_p}$$

Para motores de anéis, o conjugado de partida é igual a 2,5 vezes o conjugado nominal ($C_p \approx 2,5 C_n$) e, para motores série, $C_p \approx 1,7 C_n$.

b) Quanto ao aquecimento.

Quanto ao aquecimento do motor, levando em consideração a aceleração, têm-se a potência equivalente de plena carga, N_{ep} , que para o ciclo da Figura 4.12 é dada pela equação (4.19).

$$N_{ep} = \sqrt{\frac{(N_A + N_R)^2 t_A + N_R^2 t_R + N_f^2 t_f}{t_A + t_R + t_f}} \quad (4.19)$$

E também,

$$ED = \frac{t_A + t_R + t_f}{T}$$

A potência equivalente de plena carga como foi calculada, não leva em conta a variação da carga ($N_R = \text{cte}$), motivo pelo qual deve-se ter

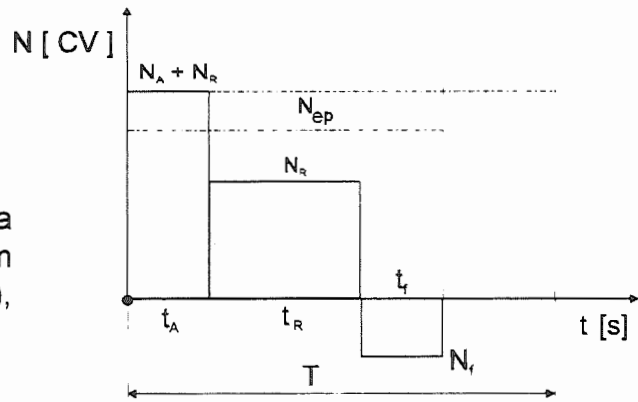


Figura 4.12 - Potência equivalente de plena carga.

$$N_n \geq N_{ep} \cdot fr \quad (4.20)$$

No caso do aparelho estar sujeito à ação do vento, esta deve ser levada em conta.

4.5 - Cálculo da Potência de Motores de Gaiola.

Os motores de gaiola apresentam certas dificuldades quanto à definição da potência pelos seguintes motivos:

- a) corrente de partida alta, resulta em aquecimento elevado;
- b) alta velocidade de regime, resulta em maior tempo na partida e portanto elevado aquecimento.

O desenvolvimento do cálculo da potência do motor de gaiola será feito através de um exemplo com o auxílio da Figura 4.13, que esquematiza um sistema de translação de carro de ponte rolante.

4.5.1 - Momento de partida

Considerando a Figura 4.13, na partida do carro tem-se,

$$M_p = M_R + M_A + M'_A$$

onde,

- M_R = momento de regime,
- M_A = momento para acelerar as massas em translação,
- M'_A = momento para acelerar as massas em rotação.

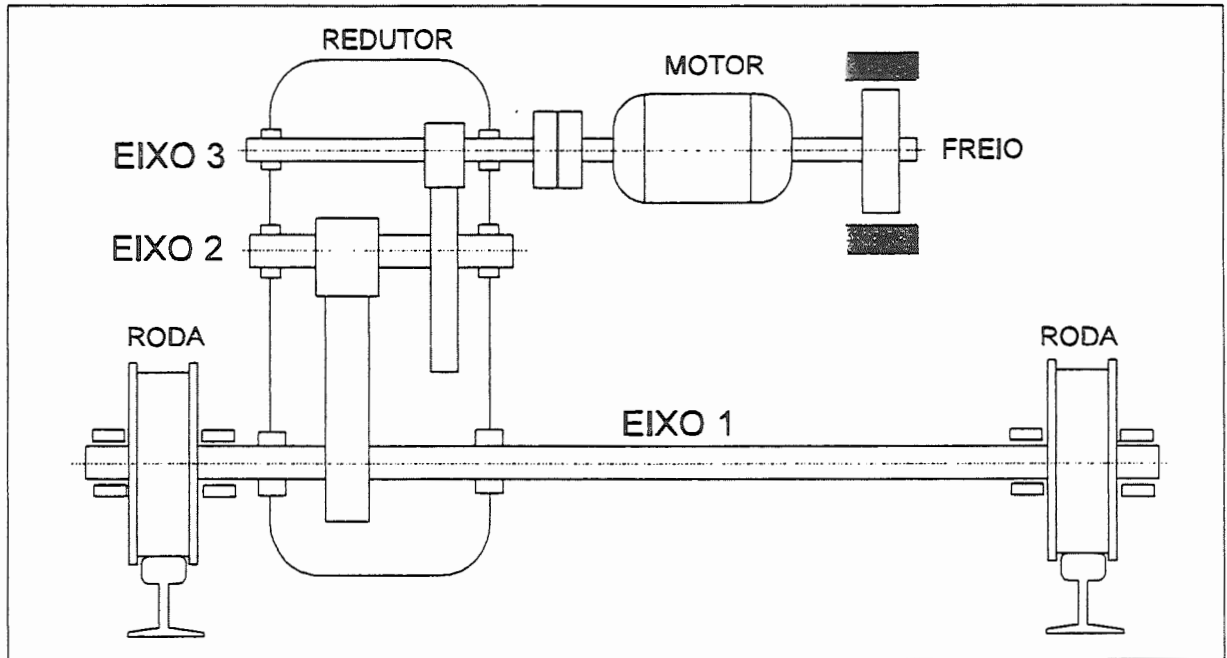


Figura 4.13 - Mecanismo de translação de carro de ponte rolante.

a) Momento de regime

$$M_R = (Q + G_0) w_t \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{n_1}{n_3}$$

$$M_R = (Q + G_0) w_t \cdot \frac{D}{2(\eta_e^2 \cdot \eta_m^2)} \cdot \frac{n_1}{n_3} \text{ [kgf} \cdot \text{cm]} \quad (4.22)$$

onde,

Q = capacidade da ponte [kgf],
 G₀ = peso próprio do carro [kgf],
 W_t = resistência específica ao deslocamento da roda (com duas abas),
 D = diâmetro da roda [cm].

b) Momento para acelerar as massas em translação

$$M_A = \frac{Q + G_0}{g} \cdot \gamma \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (4.23)$$

onde,

$\eta = \eta_e^2 \cdot \eta_m^4$,
 $\gamma = \text{cm/s}^2$,
 $g = \text{cm/s}^2$,
 D = cm,
 M_A = kgf.cm.

A aceleração linear γ pode ser expressa em função da aceleração angular e, substituindo na equação (4.22) fica,

$$\gamma = \frac{dv}{dt} \cdot \frac{dw_1}{dt} \cdot \frac{D}{2}$$

onde,

$$w_1 = w_3 \cdot \frac{n_1}{n_3}$$

Portanto,

$$\gamma = \frac{dw_3}{dt} \cdot \frac{n_1}{n_3} \cdot \frac{D}{2}$$

Substituindo na equação (4.22), fica,

$$M_A = \frac{Q + G_0}{g} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2 \frac{1}{\eta_e^2 \cdot \eta_m^4} \cdot \frac{dw_3}{dt} \text{ [kgf} \cdot \text{cm]} \quad (4.23)$$

c) Momento para acelerar as massas em rotação

$$M'_A = I_1 \cdot \frac{dw_1}{dt} \cdot \frac{n_1}{n_3} \cdot \frac{1}{\eta_e^2 \cdot \eta_m^4} + I_2 \cdot \frac{dw_2}{dt} \cdot \frac{n_1}{n_3} \cdot \frac{1}{\eta_e \cdot \eta_m^2} + I_3 \cdot \frac{dw_3}{dt} \cdot \frac{1}{\eta_m} \quad (4.24)$$

onde, I_1 , I_2 e I_3 [kgf / cm.s²], são os momentos de inércia dos três eixos do mecanismo de translação do carro.

Sendo,

$$w_1 = w_3 \cdot \frac{n_1}{n_3} \quad \text{resulta,} \quad \frac{dw_1}{dt} = \frac{dw_3}{dt} \cdot \frac{n_1}{n_3}$$

e,

$$w_2 = w_3 \cdot \frac{n_2}{n_3} \quad \text{resulta,} \quad \frac{dw_2}{dt} = \frac{dw_3}{dt} \cdot \frac{n_2}{n_3}$$

Substituindo na equação (4.24), fica,

$$M'_A = [I_1 \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_e^2 \cdot \eta_m^3} + I_2 \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_e \cdot \eta_m^2} + I_3 \cdot \frac{1}{\eta_m}] \frac{dw_3}{dt}$$

ou,

$$M'_A = I \cdot \frac{dw_3}{dt} \text{ [kgf.cm]} \quad (4.25)$$

onde,

$$I = I_1 \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2 \frac{1}{\eta_e^2 \cdot \eta_m^3} + I_2 \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \frac{1}{\eta_e \cdot \eta_m^2} + I_3 \cdot \frac{1}{\eta_m}$$

d) Momento de partida

O momento de partida é dado por

$$M_p = M_R + M_A + M'_A$$

onde, M_R é o momento de regime ou resistente.

$$M_p = M_R + \left[\frac{Q + G_0}{g} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_e^2 \cdot \eta_m^4} + I \right] \frac{dw_3}{t}$$

$$M_p = M_R + I_e \frac{dw_3}{dt} \quad (4.26)$$

onde,

$$I_e = \frac{Q + G_0}{g} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_e^2 \cdot \eta_m^4} + I \quad (4.27)$$

Na expressão de I_e , o valor de I é da ordem de 0,1 a 0,3 de I_e . A influência das massas em rotação (na falta de melhores dados) pode ser considerado por meio do coeficiente β . Portanto, a equação (4.27) resulta,

$$I_e = \frac{Q + G_0}{g} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_e^2 \cdot \eta_m^4} \cdot \beta$$

onde $\beta=0,1$ a $0,3$.

4.5.2 - Cálculo do tempo de aceleração

Da equação (4.26) tem-se,

$$\frac{dw_3}{dt} = \frac{M_p - M_R}{I_e} \quad \Rightarrow \quad dw_3 = \frac{M_p - M_R}{I_e} dt$$

Portanto,

$$W_3 = \frac{1}{I_e} \int_0^{t_A} (M_p - M_R) dt$$

Sendo,

$$w = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

Resulta,

$$n_3 = \frac{30}{\pi \cdot I_e} \int_0^{t_A} (M_p - M_R) dt \quad (4.28)$$

A solução da equação (4.28) só é possível conhecendo-se o momento de partida M em função do tempo, conforme ilustra a Figura 4.14.

Para resolver a equação (4.28) divide - se a função $(M_p - M_R) = f(t)$, Figura (4.14), em n trechos iguais tal que,

$$\frac{I_e \cdot \pi}{30} \cdot \Delta_n = (M_p - M_R) \Delta t$$

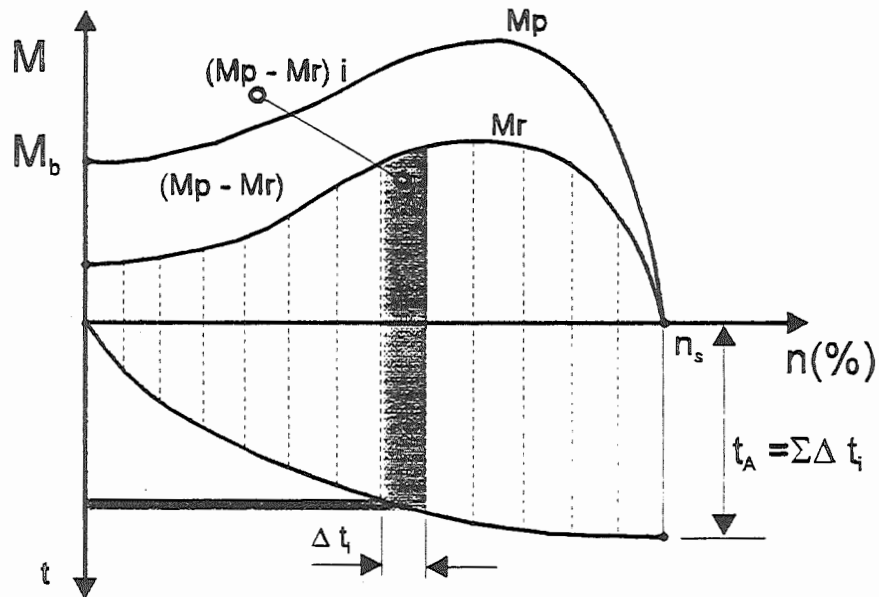


Figura 4.14 - Momento de partida de motores de gaiola.

Para cada Δn , tem-se um

$$\Delta t = I_e \cdot \frac{\Delta n \cdot \pi}{30(M_p - M_R)}$$

e assim se constrói a curva $t = f(n)$, conforme a Figura 4.14.

Este processo para se achar $\sum \Delta t = t_A$, requer o conhecimento da curva característica do motor.

4.5.3 - Cálculo do momento médio de partida M_{mp}

a) Conjugados máximo, rotor bloqueado e nominal

Tem-se, o momento nominal dado pela relação,

$$M_n = 71620 \cdot \frac{N_n}{n_n} \text{ [kgf.cm]} \quad (4.29)$$

onde,

N_n = potência nominal [CV],
 n_n = rotação nominal [rpm].

O Momento básico é fornecido pela relação,

$$M_{\text{bas.}} = 71620 \cdot \frac{N}{n_s} [\text{kgf.cm}] \quad (4.30)$$

onde,

n_s = rotação síncrona do motor [rpm].

Caso não se conheça a curva $M = f(n)$, empregando-se o momento médio de partida M_{mp} do motor de gaiola, pode-se calcular o tempo de aceleração aproximadamente.

Por outro lado, o M_{mp} pode ser calculado através de 3 conjugados, a saber:

- Conjugado com rotor bloqueado M_b ,
- Conjugado máximo $M_{\text{máx}}$, e
- Conjugado nominal M_n (Equação 4.29).

Os valores de M_b e $M_{\text{máx}}$ são obtidos através das tabelas 4.5 e 4.6, onde esses momentos são dados em função do conjugado básico (Equação 4.30) e da categoria do motor.

Momento médio de partida M_{mp}

O processo aproximado para esse cálculo, consiste em tomar um momento médio de partida, segundo a Figura 4.15, ou seja, a área da curva característica daquela curva dada pela relação,

$$M_{\text{mp}} \cdot n = \int_0^n M \cdot dn$$

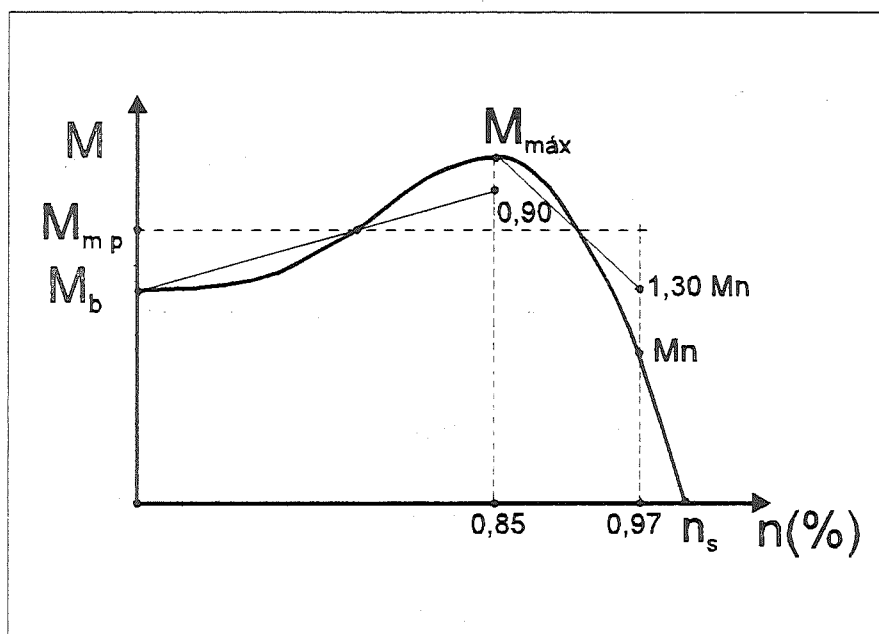


Figura 4.15 - Momento médio de partida.

Tabela 4.5 - Conjugado com rotor bloqueado em % do conjugado básico (EB-120)

| No. de Polos | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 4 | 6 | 8 |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|-----|-----|
| Potencia CV | Categorias A e B | | | | | | | | Categoria C | | |
| 0,5 | | | | 150 | 150 | 115 | 110 | 105 | | | |
| 0,75 | | | 175 | 150 | 150 | 115 | 110 | 105 | | | |
| 1,0 | | 275 | 175 | 150 | 150 | 115 | 110 | 105 | | | |
| 1,5 | 175 | 265 | 175 | 150 | 150 | 115 | 110 | 105 | | | |
| 2,0 | 175 | 250 | 175 | 150 | 145 | 115 | 110 | 105 | | | |
| 3,0 | 175 | 250 | 175 | 150 | 135 | 115 | 110 | 105 | | 250 | 225 |
| 5,0 | 150 | 185 | 160 | 130 | 130 | 115 | 110 | 105 | 250 | 250 | 225 |
| 7,5 | 150 | 175 | 150 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 250 | 225 | 200 |
| 10,0 | 150 | 175 | 150 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 250 | 225 | 200 |
| 15,0 | 150 | 165 | 135 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 225 | 200 | 200 |
| 20,0 | 150 | 150 | 135 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 25,0 | 150 | 150 | 135 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 30,0 | 150 | 150 | 135 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 40,0 | 135 | 150 | 135 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 50,0 | 125 | 150 | 135 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 60,0 | 125 | 150 | 135 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 75,0 | 110 | 150 | 135 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 100,0 | 110 | 125 | 125 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 125,0 | 110 | 110 | 125 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 150,0 | 100 | 110 | 125 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |
| 200,0 | 100 | 100 | 125 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 | 200 | 200 | 200 |

Nota 1: Para motores de pequena potência, de 4 polos, o conjugado com rotor bloqueado não deverá ser inferior a 150% do conjugado básico.

Nota 2: Para motores de pequena potência, de 6 polos, o conjugado com rotor bloqueado não deverá ser inferior a 135% do conjugado básico.

Tabela 4.6 - Conjugado máximo em % do conjugado básico (EB-120)

| No. de Polos | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
|--------------|------------------|-----|-----|-----|-------------|-----|-----|
| Potencia CV | Categorias A e B | | | | Categoria C | | |
| 0,5 | | | | 250 | | | |
| 0,75 | | | 275 | 250 | | | |
| 1 | | 300 | 275 | 250 | | | |
| 1,5 | 275 | 300 | 275 | 250 | | | |
| 2 | 250 | 275 | 250 | 225 | | | |
| 3 | 250 | 275 | 250 | 225 | | 225 | 200 |
| 5 | 225 | 225 | 225 | 215 | 200 | 200 | 200 |
| 7,5 | 215 | 215 | 215 | 215 | 195 | 190 | 190 |
| 10 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 15 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 20 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 25 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 30 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 40 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 50 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 60 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 75 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 100 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 125 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 150 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |
| 200 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 |

Considerando a área dos dois trapézios na Figura 4.15, tem - se,

$$\frac{M_b + 0,9 \cdot M_{\max}}{2} \cdot 0,85 + \frac{M_{\max} + 1,3 \cdot M_p}{2} \cdot 0,12 = 0,97 \cdot M_{mp}$$

$$0,97 \cdot M_{mp} = 0,425 \cdot M_b + 0,444 \cdot M_{\max} + 0,078 \cdot M_n$$

$$M_{mp} = 0,437 \cdot M_b + 0,457 \cdot M_{max} + 0,08 \cdot M_n$$

Na prática entretanto usa - se a seguinte aproximação

$$M_{mp} = 0,4 \cdot M_b + 0,4 \cdot M_{max} + 0,1 \cdot M_n \quad (4.31)$$

4.5.4 - Exemplo de cálculo

Achar o momento médio de partida de um motor de gaiola de 5 CV, 6 polos, categoria B, rotação síncrona 1200 rpm.

Solução:

a) Conjugado básico (Equação 4.30)

$$M_{bás} = 71620 \frac{5}{1200} = 300 \text{kgf.cm}$$

b) Conjugado bloqueado (Tabela 4.5)

$$M_b = 1,6 \cdot 300 = 480 \text{kgf.cm}$$

c) Conjugado máximo (Tabela 4.6)

$$M_{máx} = 2,25 \cdot 300 = 675 \text{kgf.cm}$$

d) Conjugado nominal (Equação 4.29)

$$M_n = 71620 \frac{5}{1150} = 310 \text{kgf.cm}$$

e) Momento médio de partida (Equação 4.31)

$$M_{mp} = 0,4 \cdot 480 + 0,4 \cdot 675 + 0,1 \cdot 310$$

$$M_{mp} = 493 \text{kgf.cm}$$

4.5.5 - Tempo de aceleração t_A

Conhecendo-se momento médio de partida, o tempo de aceleração t_A resulta,

$$t_A = l_e \frac{\pi \cdot n_m}{(M_{mp} - M_R)} [s] \quad (4.32)$$

onde,

$$t_A [s], l_e [kgf \cdot cm \cdot s^2], n_m [rpm], M_{mp} \text{ e } M_R [kgf \cdot cm].$$

Para que o motor não se aqueça excessivamente na fase de partida é preciso que o tempo de partida t_A não exceda um valor limite dado pela Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Tempo de aceleração limite

| Valores limites do tempo de aceleração dos motores de gaiola serviços intermitentes | | | |
|---|--------|-------|-----------|
| N (CV) | ED (%) | M_r | t_A (s) |
| até 5 | 25 | < 0,7 | 6,0 |
| | 40 | | 5,0 |
| | 25 | > 0,7 | 5,5 |
| | 40 | | 4,5 |
| 5 a 10 | 25 | < 0,7 | 10,0 |
| | 40 | | 8,0 |
| | 25 | > 0,7 | 9,0 |
| | 40 | | 7,0 |
| 10 a 20 | 25 | < 0,7 | 14,0 |
| | 40 | | 11,0 |
| | 25 | > 0,7 | 13,0 |
| | 40 | | 10,0 |

4.5.6 - Aceleração

Uma potência muito maior do que a de plena carga provoca um arranque violento do motor podendo danificar os elementos mecânicos do sistema.

Para evitar esse problema, a aceleração de partida ou frenagem não deverá ultrapassar os valores seguintes:

- a) para sistemas de elevação, $0,6 \text{ m/s}^2$,
- b) para sistemas de translação, $0,3 \text{ m/s}^2$.

5 - MOTORES ELÉTRICOS UTILIZADOS NAS MÁQUINAS FERRAMENTAS

O funcionamento de um motor que aciona uma máquina ferramenta é definido por um equilíbrio dinâmico, isto é, a igualdade entre o conjugado motor e o conjugado resistente oferecido pela máquina ferramenta, como mostra a Figura 5.1.

C_m = conjugado motor em função da rotação N .

C_r = conjugado resistente em função da rotação N .

M = ponto de funcionamento.

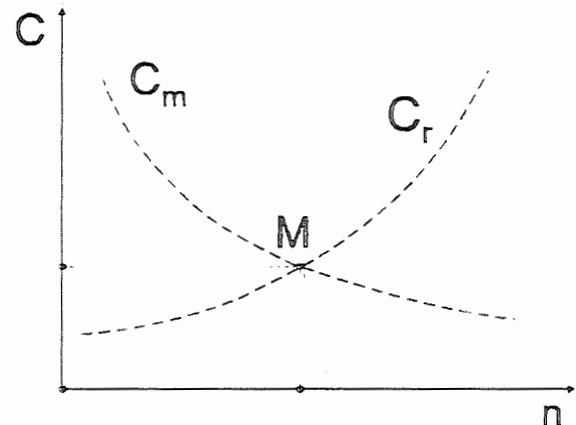


Figura 5.1 - Equilíbrio entre conjugado motor e conjugado resistente.

Diz-se que um sistema motor-máquina tem funcionamento estável a uma dada rotação, quando as curvas $C_m \times N$ e $C_r \times N$ são tais que um aumento ΔN na rotação corresponda um aumento no conjugado resistente C_r , tendendo a levar novamente a rotação àquela de equilíbrio e, a diminuição ΔN na rotação corresponda um aumento no conjugado motor C_m , tendendo a restabelecer a rotação de equilíbrio.

A condição de estabilidade é dada por,

$$\frac{d(C_m - C_r)}{d_n} < 0$$

Isto é, conhecidas as curvas $C_m \times N$ e $C_r \times N$, o ponto de funcionamento

estável deverá ser tal que o coeficiente angular da tangente à curva $C_m \times N$ no ponto considerado seja menor (algebricamente) que o coeficiente angular da tangente à curva $C_r \times N$ no mesmo ponto (Figura 5.2).

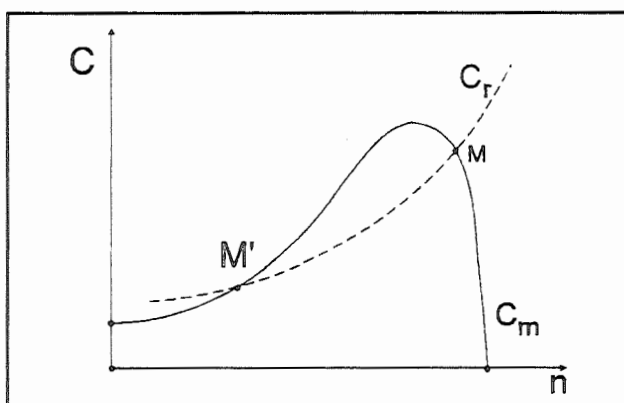


Figura 5.2 - Condições de estabilidade de funcionamento.

Os motores utilizados nas máquinas ferramentas devem ter funcionamento estável.

5.1 - Potência Necessária para Acionamento de uma Máquina Ferramenta.

Em geral, para uma máquina ferramenta tem-se:

M_t = momento de torção (C_r , conjugado resistente) [kgf.cm],
 N = potência consumida [C.V.],
 n = rotação [rpm].

Graficamente, isto é representado pela Figura 5.3; na prática este valor é limitado por economia.

Conhecida a curva $C_r \times N$ para as máquinas ferramentas, pode-se compará-la com as curvas características $C_m \times N$ fornecida pelos motores, tendo-se assim um critério para escolha do motor.

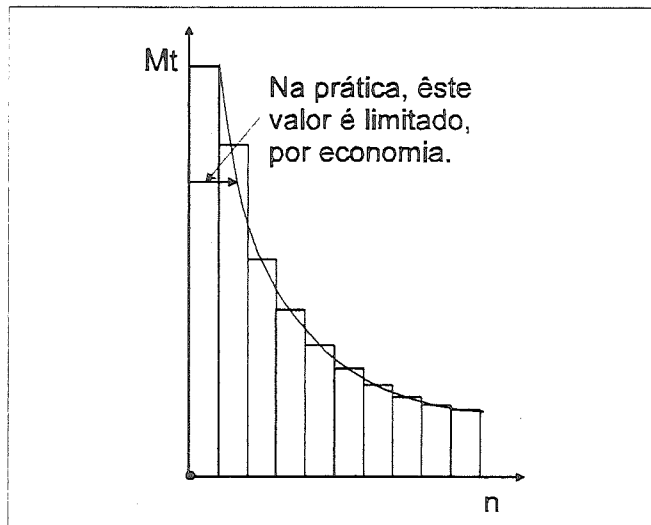


Figura 5.3 - Curva conjugado resistente versus rotação de máquinas ferramentas.

5.2 - Motores Utilizados em Máquinas Ferramentas

Para as máquinas ferramentas, existem três tipos de características de motores elétricos.

- Caraterística *shunt* ou de velocidade sensivelmente constante e potência sensivelmente proporcional ao conjugado ($P = C.n$). Esta caraterística é conveniente para a maioria das máquinas ferramentas em geral.
- Caraterística *série* ou de potência sensivelmente constante ($C.n = cte$). Motores com esta caraterística são mais convenientes para as máquinas de tração. A velocidade diminui rapidamente com o aumento do conjugado.
- Caraterística *compound*, intermediária entre os de caraterística *shunt* e *série*. É de utilização conveniente nas máquinas ferramentas que exigem conjugado de partida elevado.

Em resumo, os motores mais adequados para o acionamento das máquinas ferramentas são os de caraterística *shunt* ou *compound*. Podem ser de corrente contínua ou alternada, nos seguintes tipos:

a) motores de corrente contínua - *shunt* ou *compound*,

b) motores de corrente alternada - motores de indução em gaiola e motores de anéis com característica *shunt*.

Os motores síncronos têm muito pouca aplicação nas máquinas ferramentas.

5.3 - Motores de Corrente Contínua

5.3.1 - Generalidades sobre tensão e corrente

Considere-se o circuito elétrico equivalente de um motor de corrente contínua, esquematizado na Figura 5.4

Nessa figura,

V_t = tensão externa aplicada,
 I = corrente de armadura,
 I_f = corrente de campo,
 F_1, F_2 = enrolamento de campo,
 R_f = resistência de campo,
 R_a = resistência de armadura;
 E_a = f.c.e.m. gerada,
 A_1, A_2 = enrolamento da armadura, e
 n = rotação.

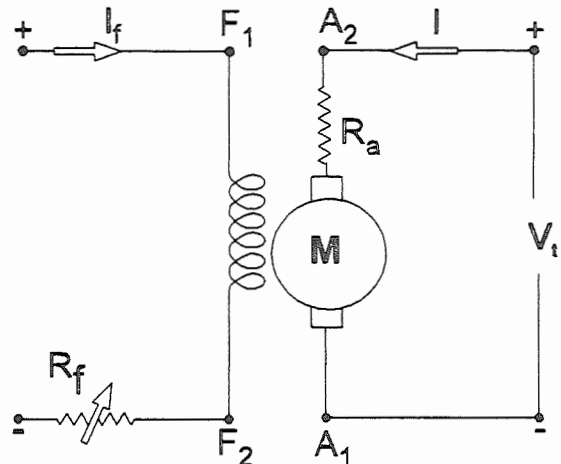


Figura 5.4 - Circuito de motor de corrente contínua.

Aplicando-se uma tensão externa contínua V_t aos terminais do motor, este será percorrido por uma corrente I . Tem - se, portanto, a tensão,

$$V_t = E_a + R_a \cdot I$$

Sendo $E_o = k \phi \cdot n$, resulta,

$$I = \frac{V_t - k \cdot \phi \cdot n}{R_a} \quad (5.1)$$

A corrente de carga I variará com a rotação N e com o fluxo por polo ϕ . Fixado o fluxo por intermédio de uma corrente $I_f = \text{cte}$ no campo de excitação, a rotação será tal que satisfará a equação (5.1), isto é, caindo a rotação N (aumento do conjugado resistente), a corrente I aumentará, e aumentando N , a corrente diminuirá.

5.3.2 - Motor *Shunt* ou de excitação em paralelo

Segundo o esquema da Figura 5.5 pode-se escrever,

$$V_t = E_a + R_a \cdot I_a$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad (I_f < 0,05 \cdot I_a)$$

$$I_a = I - I_f \cong I$$

$$\therefore V_t = E_a = k \cdot f \cdot n$$

$$k = \text{cte}$$

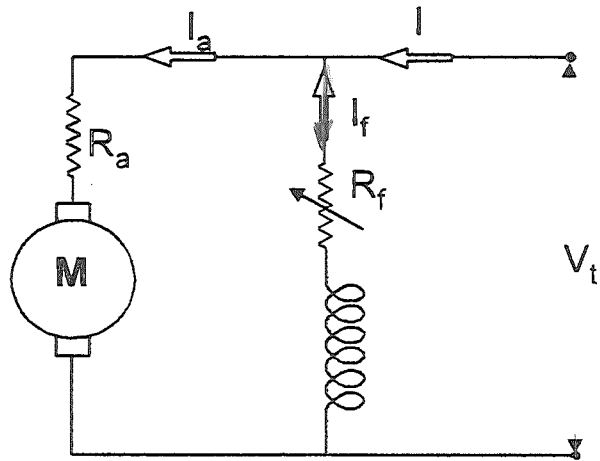


Figura 5.5 - Circuito do motor *shunt*.

$$\therefore n = \frac{V_t - R_a \cdot I}{k \cdot \phi}$$

(5.2)

Como R_a é muito pequeno tem - se, $V_t \gg R_a$, ou seja $V_t = R_a \cdot I \approx V_t$.

Se $V_t = \text{cte}$ e $I_f = \text{cte}$, tem-se:

$$n \cong \frac{V_t}{k \cdot \phi} = \text{cte}$$

Isto é, a rotação praticamente não varia com a carga. O que justifica o fato desses motores serem chamados de "motores de velocidade constante" (Figura 5.6).

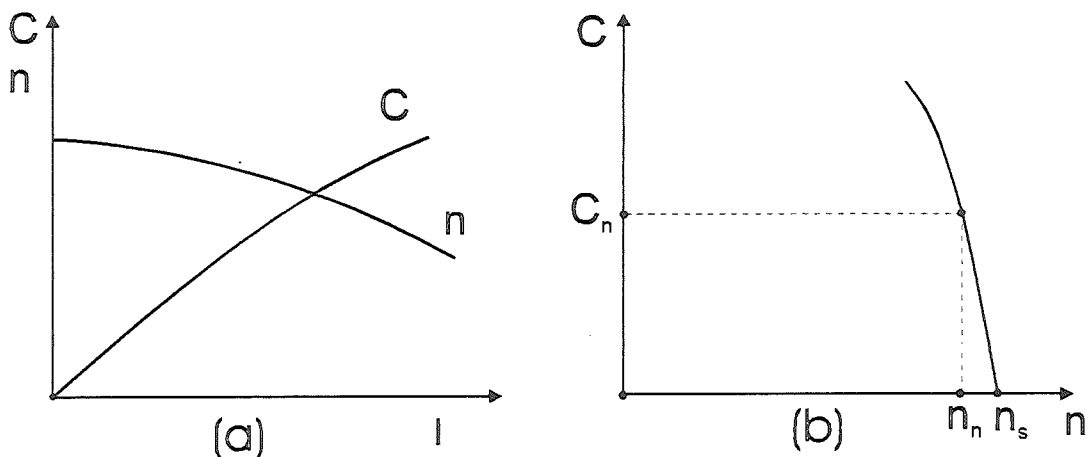


Figura 5.6 - Características do motor *shunt*.

Quanto ao conjugado, tem-se,

$$C_n = k_1 \cdot \phi \cdot I_a \approx k \cdot \phi \cdot I$$

Esta equação $C_n = k \cdot \phi \cdot I$ representa no plano $C \times I$, uma reta passando pela origem, conforme a Figura 5.6(a).

5.3.3 - Motor Série ou de excitação em série

No motor **série**, cujo circuito é ilustrado na Figura 5.7, a corrente de carga I será a mesma corrente de excitação, portanto, a expressão do fluxo será $\phi = a \cdot I$ onde $a = \text{cte}$.

Sendo o conjugado,

$$C_n = k_1 \cdot \phi \cdot I, \text{ tem-se,}$$

$$C_n = k \cdot a \cdot I^2,$$

isto é, a curva será uma parábola passando pela origem, conforme ilustra Figura 5.8.

Quanto à curva $n \times I$, tem-se,

$$V_t = E_a + (R_a + R_s)I \text{ ou } V_t = E_a + R \cdot I \text{ e,}$$

sendo $E_a = k \cdot \phi \cdot n$,

então tem - se

$$n = \frac{V_t}{k \cdot \phi} - \frac{R}{k \cdot \phi} \cdot I$$

e, por ser $\phi = a \cdot I$, segue - se que:

$$n = \frac{V_t}{k \cdot a \cdot I} - \frac{R}{k \cdot a}$$

Fazendo-se,

$$\frac{V_t}{k \cdot a} = b$$

e

$$\frac{R}{k \cdot a} = c$$

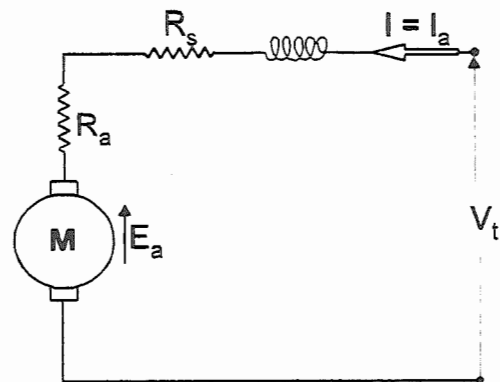


Figura 5.7 - Circuito do motor série.

resulta,

$$n' = \frac{b}{I} - c$$

e, pelo fato de $R = (R_a + R_s)$ ser pequeno, $c = R/R_a$ será também pequeno ou $c \approx 0$, então, $n \approx b/I$, que é a equação de uma hipérbole equilátera, conforme mostra a Figura 5.8.

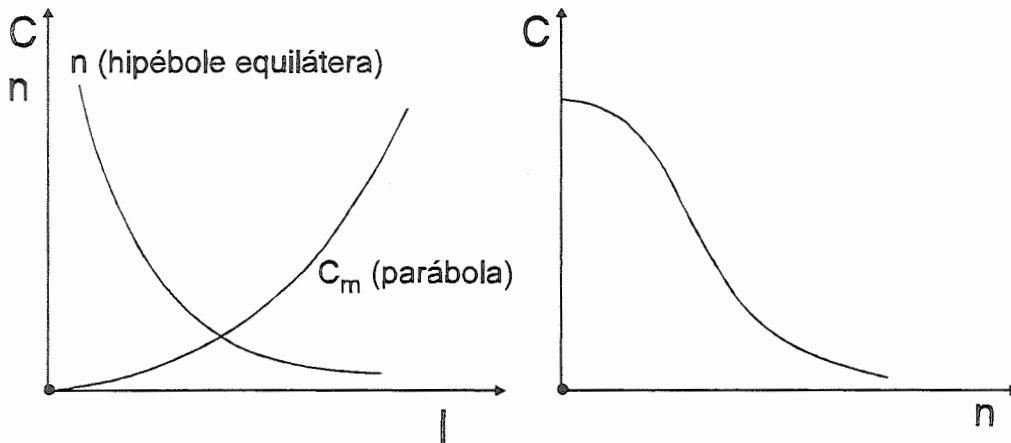


Figura 5.8 - Características do motor série.

5.3.4 - Motor *compound* ou combinado

Como este tipo de motor é uma associação de motores *shunt* e *série*, apresentará características intermediárias entre os mesmos aproximando-se de um ou de outro, conforme o campo *shunt* seja mais ou menos predominante (vide item 2.4).

A Figura 5.9 ilustra o circuito desse motor e a Figura 5.10, a sua curva característica. A zona hachuriada entre as duas curvas, na Figura 5.10, representa a região onde pode-se obter curvas características do motor *compound*.

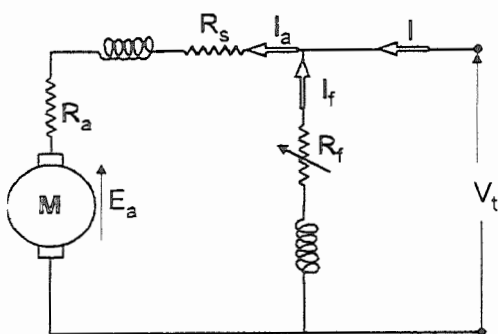


Figura 5.9 - Circuito do motor *compound*.

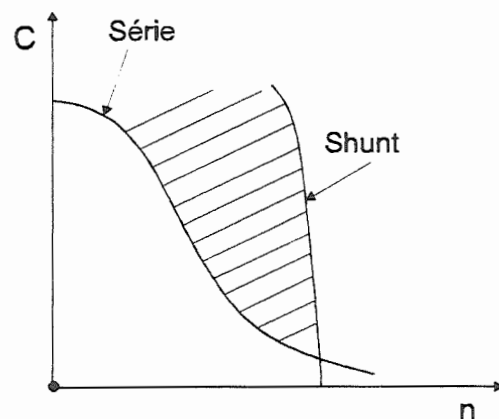


Figura 5.10 - Características do motor *compound*.

5.3.5 - Partidas dos motores de corrente contínua

Considerando a equação (5.1), que rege o funcionamento dos motores de corrente contínua, observa-se que na partida, para $n = 0$, tem-se, $E_a = k \cdot \phi \cdot n = 0$, e essa equação resulta

$$I = \frac{V_t}{R_a}$$

Sabe-se que R_a é muito pequena. Se a tensão V_t aplicada for a tensão nominal, tem-se uma corrente de partida, I_p , excessivamente alta, o que implicaria em danos para o motor. Por esta razão, é necessário intercalar um reostato de partida em série com a armadura, para que o mesmo funcione como limitador da corrente de partida.

Para cada posição do reostato de partida tem-se uma curva característica do motor, conforme ilustra a Figura 5.11.

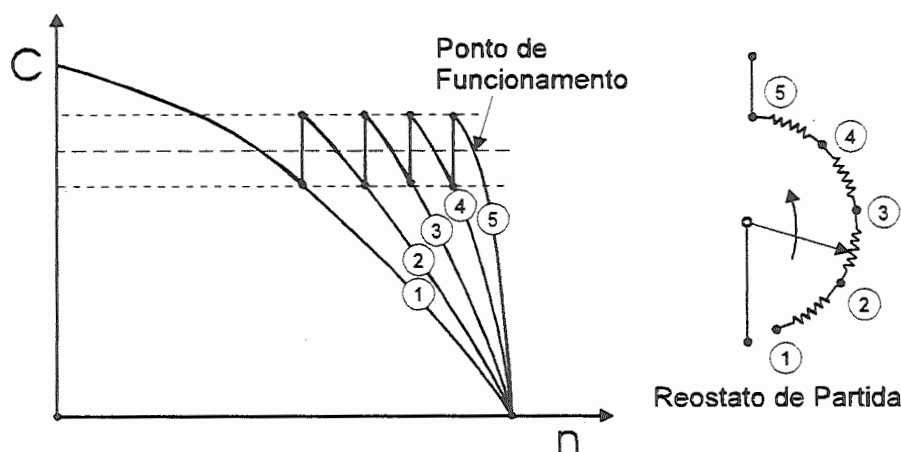


Figura 5.11 - Partida do motor de corrente contínua.

O motor parte com todas as resistências incluídas segundo a curva 1. Retirando-se, sucessivamente, as resistências com o motor se acelerando em zig-zag, obtém-se a curva da Figura 5.11.

5.3.5 - Variação da velocidade de motores de corrente contínua

Considerando a equação (5.2)

$$n = \frac{V_t - R_a \cdot I}{k \cdot \phi}$$

nota-se que se V_t e ϕ forem constantes, tem-se $n = \text{cte}$, podendo-se então variar a rotação n variando-se a tensão de alimentação V_t ou o fluxo ϕ .

A variação da tensão V_t pode ser conseguida intercalando-se uma resistência variável R em série com a armadura, a qual pode ser o próprio reostato de partida, que provoca uma queda de tensão na resistência e implica numa diminuição da rotação. Isto porém acarreta uma grande perda por efeito Joule, uma vez que a corrente da armadura é elevada.

Por sua vez, a variação do fluxo ϕ pode ser feita se uma resistência variável R_f em série com a bobina do campo de excitação, variando-se dessa maneira a corrente de campo I_f e, conseqüentemente, o fluxo ϕ . Este é o processo mais empregado, pois apresenta a vantagem de se ter pequena perda por efeito Joule, uma vez que I_f é pequena, ($I_f \ll I_a$). A Figura 5.12 ilustra essa possibilidade.

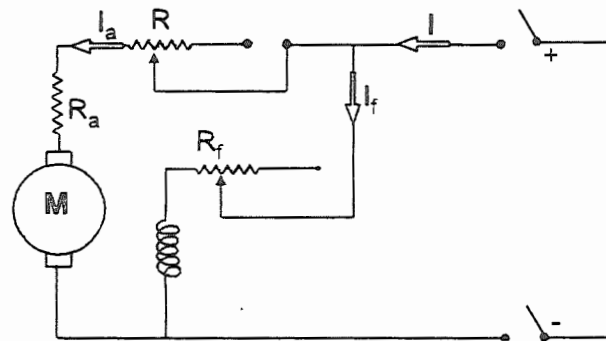


Figura 5.12 - Variação de velocidades de motores CC.

Supondo que os reostatos intercalados tenham variação contínua, obtém-se as curvas de potência e conjugado motor fornecidos pelo motor *shunt*, conforme mostra a Figura 5.13.

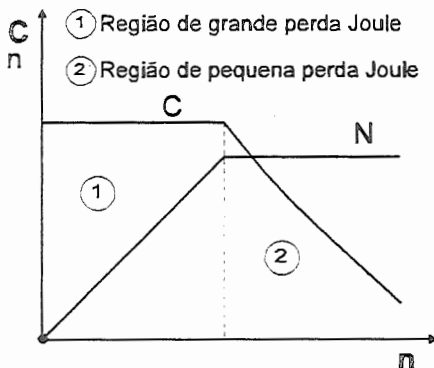


Figura 5.13 - Curvas de potência e conjugado de moteres CC.

Observa-se que a curva $C_m \times n$ assim obtida para os motores *shunt* é semelhante à curva $C \times n$ das máquinas ferramentas, Figura 5.3, justificando assim a sua utilização.

Este sistema, apesar de simples, possui o inconveniente da região 1, principalmente quando se trata de motores de alta potência.

5.3.6 - Sistema Ward - Leonard.

Um método eficiente para se obter a variação da velocidade em uma larga faixa, com respostas imediatas, mesmo em altas potências, é o da utilização do sistema Ward-Leonard.

Esse sistema consiste de um motor M_1 cuja velocidade se quer controlar e um conjunto motor-gerador constituído das três unidades M, G e E, acoplados a um mesmo

eixo. M é um motor trifásico ligado diretamente à rede que irá acionar G e E . G é um gerador de corrente contínua independentemente excitado por E (gerador de corrente contínua auto-excitado), o qual irá excitar também o motor M_1 (Figura 5.14).

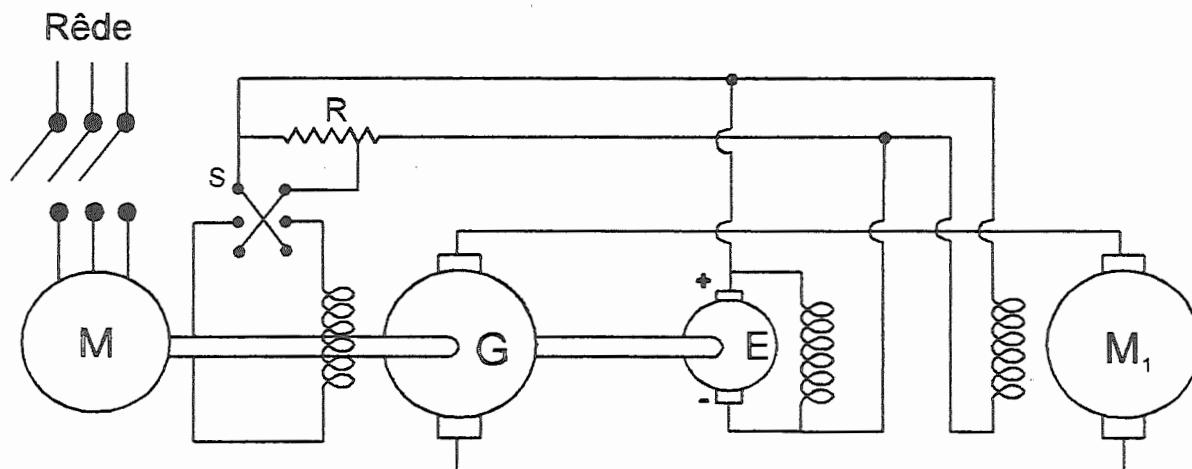


Figura 5.14 - Sistema Ward-Leonard (auto-excitado).

Nessa figura, M_1 será então acionado por G e E , obtendo-se a variação de velocidade pela variação da tensão aplicada E_t . A variação da tensão E_t é conseguida atuando-se com o reostato R e a chave reversora S . Variando R , obtém-se uma variação na corrente de excitação do gerador E e uma conseqüente variação na tensão gerada E_t . Mudando S , tem-se uma inversão na corrente de excitação, invertendo-se, portanto, o sentido de E_t , e a rotação de M_1 .

Dessa forma, aumenta-se a velocidade do motor M_1 à medida que retira-se do circuito de excitação de G , a resistência R .

Para inversão de rotação, deve-se diminuir a velocidade de M_1 , incluindo toda resistência R no circuito, e em seguida inverte-se a chave S . Pode-se então variar a rotação neste novo sentido pela variação da resistência R .

Pode-se substituir a excitatriz E por um retificador, obtendo-se um sistema equivalente, conforme ilustra a Figura 5.15.

O sistema Ward-Leonard apresenta a grande vantagem de possibilitar uma gama muito grande de variação da velocidade e inversão rápida e fácil no sentido da rotação, sem as inconvenientes perdas por aquecimento (o circuito que inclui R é de baixa potência). Seu principal inconveniente é o custo elevado, sendo utilizado somente em máquinas de grande porte onde seu custo relativo é compensador, como por exemplo, plainas de mesa de grande capacidade, laminadores, etc.

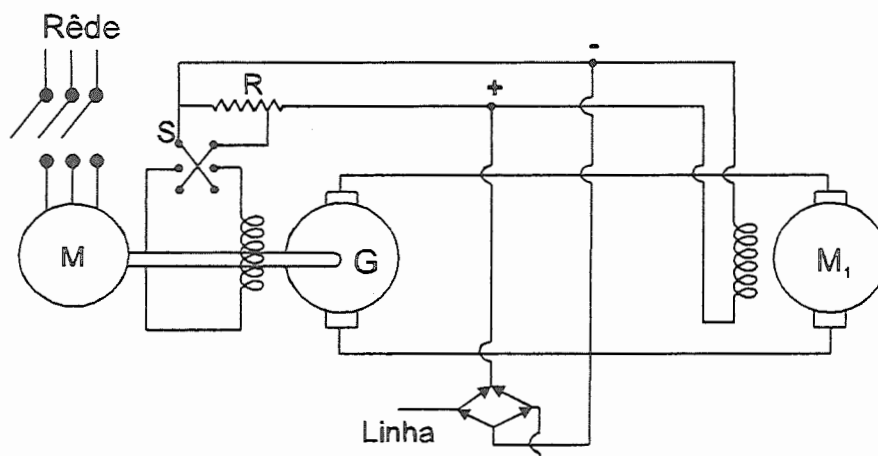


Figura 5.15 - Sistema Ward-Leonard retificador.

5.3.7 - Aplicações de motores de corrente contínua.

Os motores de corrente contínua podem ser utilizadas em :

- a) máquinas para pesquisa, quando se deseja trabalhar a uma determinada rotação independente da carga;
- b) quando se tem necessidade de variação contínua da velocidade em larga faixa;
- c) plainas de mesa onde ocorre inversão do sentido de rotação;
- d) laminadores, que necessitam da variação do sentido e da rotação.

Como desvantagens, os motores de corrente contínua apresentam os seguintes inconvenientes:

- a) necessidade de fonte de alimentação de corrente contínua de difícil obtenção e alto custo;
- b) as escovas e coletores necessitarem de manutenção regular;
- c) grande perda por efeito Joule na região 1 (Figura 5.13), no caso dos motores *shunt*.

5.4 - Motores de Corrente Alternada Trifásicos

5.4.1 - Motores síncronos

Os motores síncronos possuem como característica fundamental a rotação constante, independente da carga no eixo. Esta rotação síncrona n_s , é dada pela expressão (2.1), já vista, ou seja

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

onde,

f = frequência da rede de alimentação,

p = número de pares de polos.

As rotações síncronas para as frequências usuais de 50 Hz e 60 Hz são as já mostradas na Tabela 2.1.

O estator do motor síncrono é idêntico ao do motor de indução, mas o motor é uma combinação dos rotores do gerador e do motor de indução. Consiste de um rotor de polos salientes com uma gaiola de esquilo e um enrolamento de campo nos polos.

Inicialmente, na partida, tudo funciona como no motor de indução. O campo girante criado no estator age sobre as barras da gaiola de esquilo gerando uma f.e.m. e uma corrente rotatória que irá produzir um campo magnético no rotor que será arrastado pelo campo girante do estator, acelerando o motor até a rotação de regime dos motores de indução, isto é, com 2 a 5% de escorregamento. Aí então, alimenta-se as bobinas de campo com corrente contínua por meio de anéis no eixo, criando-se no rotor um campo fixo, que será arrastado pelo campo girante, sem escorregamento, isto é, na rotação n_s .

A utilização de motores síncronos nas máquinas ferramentas é restrita apenas aos tornos em condições especiais (pesquisa), quando se necessita de velocidade constante. Esta limitação é de origem econômica, uma vez que esses motores, além do custo inicial elevado, ainda necessitam de uma fonte de corrente contínua para seu funcionamento.

5.4.2 - Motores de indução assíncronos

Os motores assíncronos são assim chamados por terem rotação de funcionamento diferente da rotação síncrona n_s . O escorregamento s entre a rotação n do motor e a rotação síncrona n_s foi definido pela relação (2.2) ou seja,

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s}$$

Os motores de indução assíncronos são de construção bem mais simples que os motores síncronos e o escorregamento s varia em torno de 3%.

Nos motores assíncronos, a alimentação geralmente é feita pelo estator que é ligado à rede trifásica, enquanto que o rotor ou é ligado em curto circuito (gaiola de esquilo) ou é rotor bobinado ligado através de anéis a resistências variáveis. Em alguns casos a alimentação poderá ser feita pelo rotor não sendo porém muito comum.

5.4.1.1 - Motores de indução em curto circuito ou em gaiola de esquilo.

Esse tipo de motor possui o esquema de ligação do rotor e estator conforme já ilustrado na Figura 3.1.

Os motores de indução de gaiola como já comentados, são classificados segundo a norma brasileira EB - 120 da ABNT em categorias:

- a) Categoria A, ou motor de baixa resistência rotórica, conjugado de partida normal, corrente de partida alta, baixo escorregamento (Figura 3.3);
- b) Categoria B, ou motor de conjugado de partida normal, corrente de partida normal, baixo escorregamento (Figura 3.4);
- c) Categoria C, (rotor de dupla gaiola), ou motor de conjugado de partida alto, corrente de partida normal, baixo escorregamento (Figura 3.5);
- d) Categoria D ou motor de alta resistência rotórica, conjugado de partida alto, corrente de partida nominal, alto escorregamento (Figura 3.6).

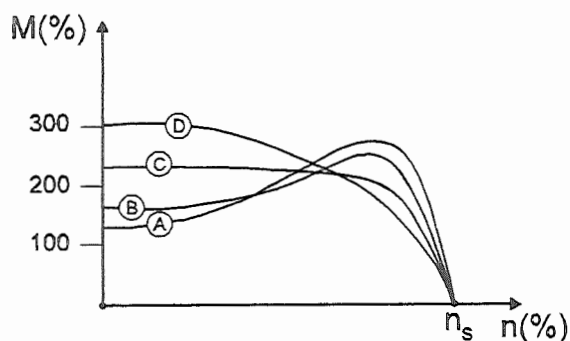


Figura 5.16 Características do motor de gaiola - Conjugado

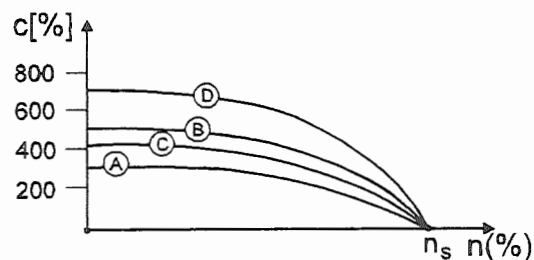


Figura 5.17 - Características do motor de gaiola - Corrente de Partida.

As curvas características $C \times n$ e $I \times n$ de todas as categorias podem ser comparadas pelas Figuras 5.16 e 5.17.

Normalmente são fabricados os motores de categorias A e B. Os de categorias C e D podem ser obtidos por encomenda às fábricas.

5.4.1.2 - Aplicações dos motores de gaiola

As máquinas ferramentas de um modo geral utilizam os motores da categoria B que são os mais baratos e satisfazem as condições de funcionamento. Nas máquinas ferramentas, o conjugado de partida não é muito alto e, em funcionamento, os motores da categoria B são os que melhor respondem às variações da rotação com o conjugado resistente, dando estabilidade ao funcionamento, uma vez que sua curva característica $C_m \times n$, próximo ao ponto de funcionamento, tem uma inclinação bastante acentuada (Figuras 5.16 e 5.17).

Os motores de categoria D tem aplicação nas máquinas ferramentas que possuem volante, necessitando portanto, alto conjugado de partida e, por permitirem alto escorregamento, possibilitam a diminuição do volante.

5.4.2 - Motores de indução de anéis

Os motores de anéis, já discutidos no item 3.2, tem o esquema das ligações do rotor e estator como já mostrado na Figura 3.7.

Dependendo da posição do reostato, tem-se para o circuito do rotor, diferentes resistências e, conseqüentemente o motor apresentará uma família de curvas características $C_m \times n$, conforme a Figura 3.8 ou 5.18, onde,

$$R_5 > R_4 > R_3 > R_2 > R_1$$

e

$$n_5 < n_4 < n_3 < n_2 < n_1$$

Pode se observar pelas curvas $C_m \times n$ que, para cada resistência do motor tem-se no ponto de funcionamento ($C_m = C_r$) uma determinada rotação que varia com o inverso da resistência do rotor. Este fato, entretanto, não é utilizado como dispositivo de variação de velocidade, pois acarreta grande perda por efeito Joule.

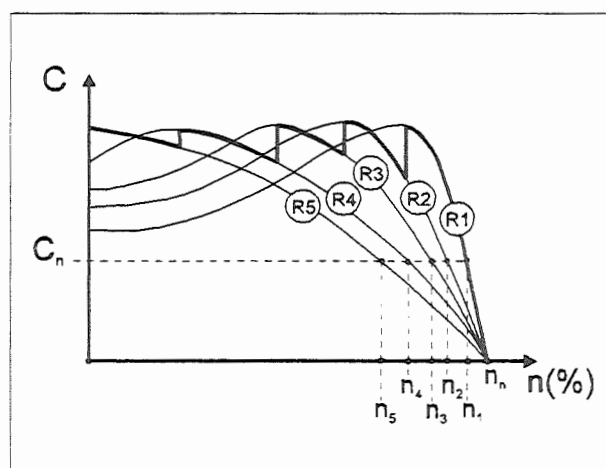


Figura 5.17 - Características do motor de anéis.

Além disso, obriga um dimensionamento oneroso do reostato. É utilizado apenas para a partida quando é necessário alto conjugado.

Para a variação da velocidade, ao invés das resistências, aplica-se ao enrolamento do rotor uma força contra eletromotriz, de mesma frequência que a do rotor. Esta força contra eletromotriz irá limitar a corrente do rotor, produzindo o mesmo efeito das resistências, sem o inconveniente da perda por efeito Joule.

5.4.2.1 - Motores de anéis com alimentação pelo rotor

O motor de alimentação pelo rotor difere dos motores assíncronos usuais nos seguintes pontos:

- a) o rotor funciona como indutor (primário) e o estator como induzido (secundário);
- b) é acrescentado ao rotor um enrolamento auxiliar, chamado enrolamento de regulagem.

O esquema dos enrolamentos desse motor é ilustrado na Figura 5.19.

Nesse motor a alimentação é feita através de um sistema coletor - escovas, criando o campo girante no motor que induz uma corrente no estator (enrolamento secundário). Esse enrolamento (estator) possui escovas nos seus terminais, que se ligam ao enrolamento de regulagem através de outro coletor. As escovas correspondentes nos enrolamentos de cada fase, são fixadas a um mesmo porta escovas. Tem-se então, 2 porta escovas que permitem posicionar as escovas terminais de cada fase, aproximando-as ou afastando-as.

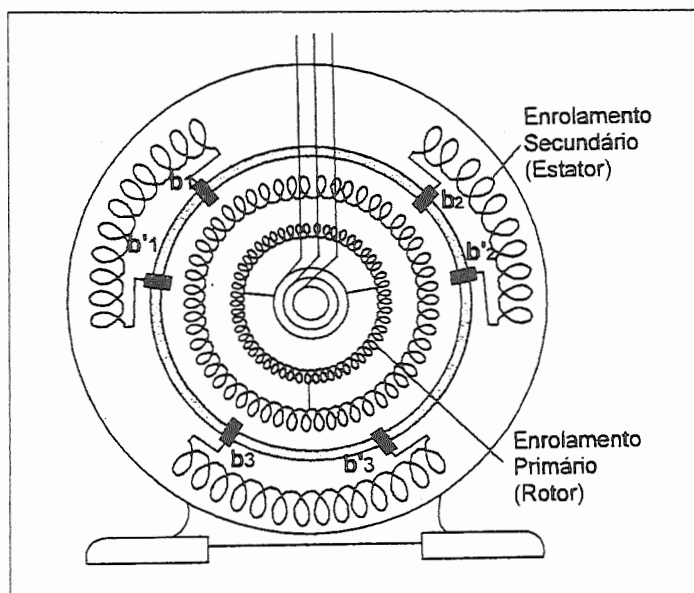


Figura 5.18 - Motor com alimentação pelo rotor.

Através desse mecanismo (coletor - escovas), a corrente induzida no estator circula no enrolamento de regulagem, nas espiras compreendidas entre as escovas, criando um fluxo que irá reforçar ou diminuir o campo girante, provocando, como consequência, uma variação contínua da rotação na faixa

$$n_s - \frac{1}{3}n_s < n < n_s + \frac{1}{3}n_s$$

A grande vantagem desse sistema é a facilidade e simplicidade do controle da velocidade, pois dispensa sistema auxiliar de controle.

Como desvantagem, pode ser citado o custo elevado e uma maior manutenção das escovas (dois sistemas coletor-escovas).

5.4.3 - Partida de motores de corrente alternada

Para exemplificar a partida de motores CA, será efetuado o estudo dinâmico de uma prensa conforme esquematizada na Figura 5.19, onde:

I_1 = inércia do rotor polia do motor,
 n_1 = rotação do motor em rpm,
 I_2 = inércia do volante da prensa,
 n_2 = rotação do volante em rpm.

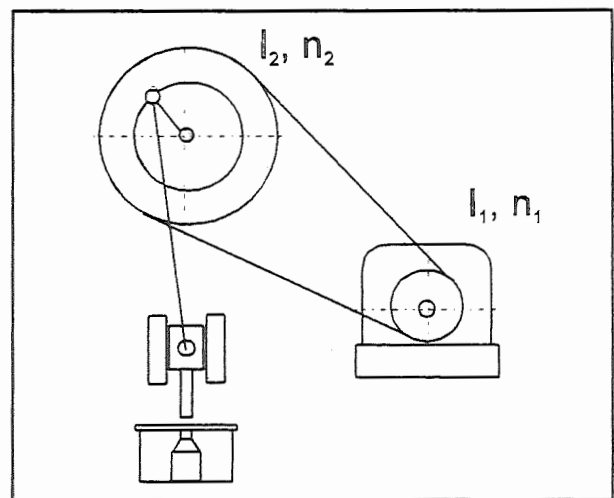


Figura 5.19 - Esquema de uma prensa.

5.4.3.1 - Momento de partida

O momento de partida é dado por

$$M_p = I_1 \frac{dw_1}{dt} + I_2 \frac{dw_2}{dt} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \frac{1}{\eta}$$

onde,

W_1 = velocidade angular do motor

$$w_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{60} [s^{-1}]$$

W_2 = velocidade angular do volante

$$w_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{60} [s^{-1}]$$

η = rendimento mecânico da transmissão

M_p = momento necessário para acelerar as massas em rotação.

Sendo,

$$\frac{dw_2}{dt} = \frac{dw_2}{dw_1} \cdot \frac{dw_1}{dt} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \frac{dw_1}{dt}$$

então,

$$M_p = \frac{dw_1}{dt} [I_1 + I_2 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \frac{1}{\eta}] = \frac{dw_1}{dt} \cdot I_e$$

onde, I_e é a inércia equivalente do sistema todo. Nesse caso, $M_{partida} = M_p$

No caso de haver ainda um momento resistente M_r , o momento de partida será

$$M_{Partida} = M_p + M_r = I_e \cdot \frac{dw_1}{dt} + M_r$$

E o momento motor deve satisfazer a relação,

$$M_m \geq I_e \cdot \frac{dw_1}{dt} + M_r$$

4.3.2 - Tempo de aceleração

$$M_m = I_e \cdot \frac{dw_1}{dt} + M_r$$

$$M_m - M_r = I_e \cdot \frac{dw_1}{dt} = \frac{\pi \cdot I_e}{30} \cdot \frac{dn}{dt} \quad e, \quad w_1 = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

Os momentos motor M_m e resistente M_r são função da rotação $(M_m - M_r) = f(n)$

portanto,

$$dt = \frac{\pi \cdot I_e}{30} \cdot \frac{dn}{M_m - M_r}$$

Integrando ambos os membros dessa equação, obtém - se o tempo de aceleração t_a ,

$$\int_0^{t_a} dt = \frac{\pi \cdot I_e}{30} \cdot \int_0^n \frac{dn}{(M_m - M_r)}$$

A parcela

$$\int_0^n \frac{dn}{(M_m - M_r)}$$

pode ser obtida de duas maneiras,

a) Conhecendo-se as curvas $M_m \times n$ e $M_r \times n$ (Figura 5.20).

A integral acima pode ser calculada aproximadamente, dividindo-se o intervalo $[0, n]$ em intervalos Δn e tornando-se em cada intervalo o valor médio $(M_m - M_r)$ constante.

$$\int_0^n \frac{dn}{(M_m - M_r)} \cong \sum \frac{\Delta n_i}{(M_m - M_r)}$$

Tem-se então:

$$t_a = \frac{\pi}{30} \cdot l \cdot e \cdot \sum \frac{\Delta n_i}{(M_m - M_r)}$$

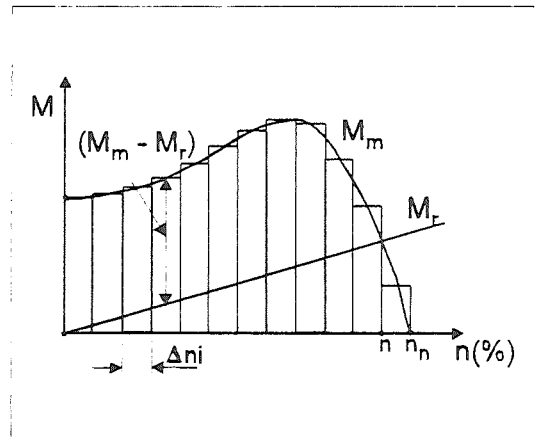


Figura 5.20 - Discretização da curva $M_n \times n$.

b) Conhecendo-se o momento médio de partida do motor. (Figura 5.21)

$$t_a = \frac{\pi}{30} \cdot l \cdot e \cdot \frac{n}{M_{\text{méd. part.}}}$$

O momento médio de partida para os motores de gaiola, característica B, é dado pela norma ABNT EB-120 (equação 4.31).

$$\frac{M_{\text{méd.p.}}}{M_{\text{bás}}} \cong 0,42 (M_a + M_{\text{máx}}) + 0,12$$

M_a , $M_{\text{máx}}$ e $M_{\text{bás}}$ também são fornecidos pela EB-120. (Tabelas 4.5 e 4.6), e pelas relações,

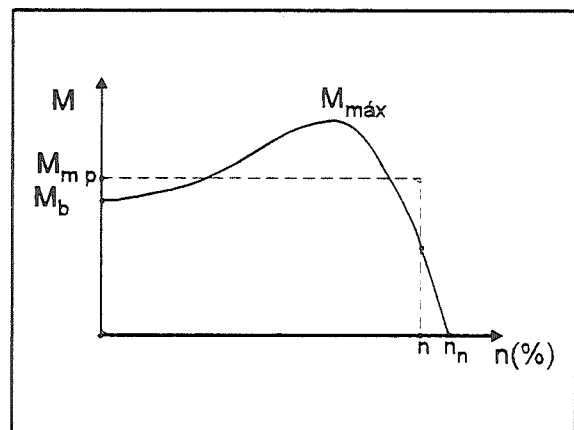


Figura 5.21 - Momento médio de partida.

$$M_{bás} = 71620 \cdot \frac{N}{n_s} [\text{kg} \cdot \text{cm}]$$

$$M_a = 1,85 M_{bás},$$

$$M_{méd.p.} = 2,25 M_{bás}.$$

Onde,

N = potência do motor [CV],
 n_s = rotação síncrona [rpm],

O tempo de aceleração t_a é limitado pela condição de aquecimento do motor, uma vez que na fase de aceleração a corrente rotórica é bem maior que a nominal.

Tem-se então: $t_a \leq t_{aadm}$.

A Tabela 4.7 fornece os tempos limites para aceleração na partida.

5.4.3 - Possíveis soluções quando a condição $t_a < t_{aadm}$ não for satisfeita.

5.4.3.1 - Soluções elétricas

- Usar motor com potência maior.
- Usar um motor com conjugado médio de partida maior.
- Usar uma chave estrela-triângulo.

A chave estrela-triângulo permite dois tipos de ligação dos enrolamentos do motor, estrela ou triângulo (Y ou Δ), conforme ilustra a Figura 5.22.

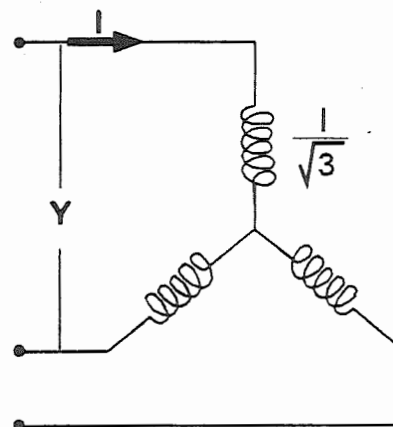
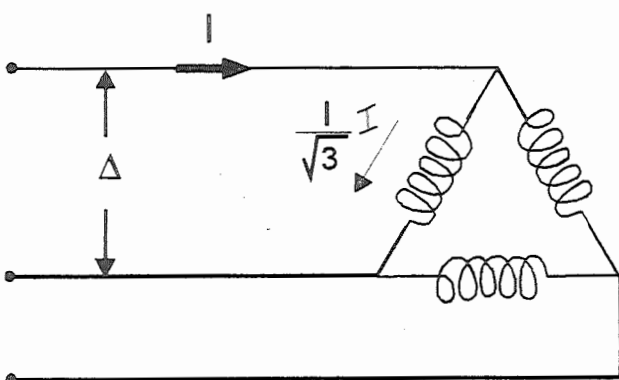


Figura 5.22 - Chave estrela-triângulo.

Quando o motor está ligado em estrêla, tem -se em cada um de seus enrolamentos uma tensão igual a $1/\sqrt{3}$ da tensão da linha, enquanto que na ligação em triângulo, a tensão será igual à tensão de linha. Isto fará com que a corrente induzida no rotor, seja,

$$I_Y = \frac{1}{3} I_{\Delta}$$

conforme mostra a Figura 5.23.

Deve ser observado que paralelamente à diminuição da corrente, tem-se também, uma diminuição do conjugado na mesma razão $1/3$, e um conseqüente aumento no tempo de aceleração. A perda por efeito Joule varia com o quadrado da corrente, sendo portanto 9 vêzes menor, de modo que o efeito total de aquecimento será menor com a ligação estrêla.

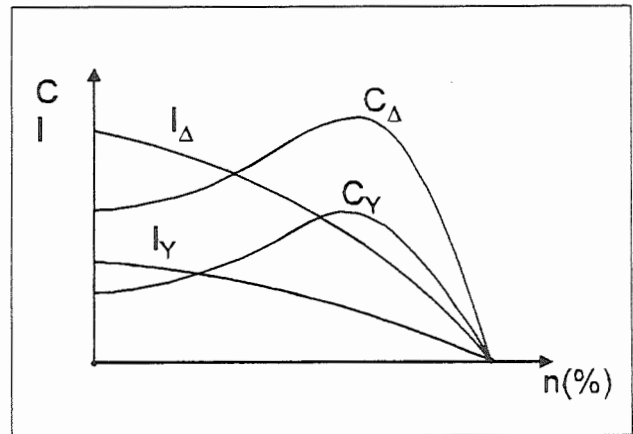


Figura 5.23 - Corrente na ligação estrêla-triângulo.

As desvantagens deste sistema são as seguintes:

- a) diminuição do conjugado, como comentado acima,
- b) interrupção na corrente de alimentação no momento de inversão da chave de partida.

Outra opção é a utilização de um auto-transformador, o qual tem a função de diminuir a tensão aplicada na partida do motor, obtendo-se resultados semelhantes aos obtidos com a chave estrêla-triângulo, porém com maior liberdade nessa redução e ainda sem o inconveniente da interrupção da corrente, quando é mudada a tensão reduzida para a tensão nominal.

Os auto-transformadores são usualmente encontrados com 2 "taps" de ligação: a 80% e 65% da tensão nominal. A Figura 5.24 esquematiza o auto-transformador.

O auto transformador funciona da seguinte maneira:

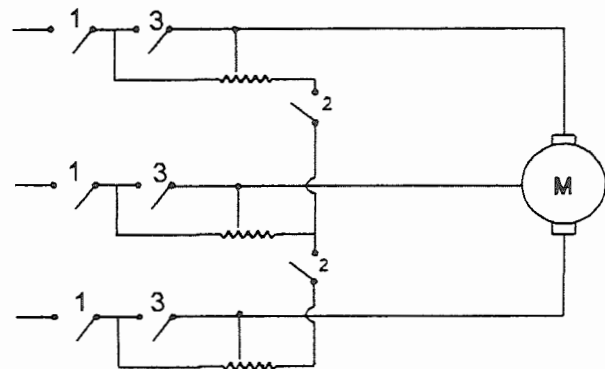


Figura 5.24 - Esquema de um auto-transformador.

- a) Abrindo -se as chaves 1 e 2, o motor parte com tensão reduzida (80% ou 65%),
- b) Abrindo -se a chave 2, o motor será alimentado através de uma indutância constituída por uma fração de enrolamentos do auto transformador;
- c) Fechando -se a chave 3, a indutância é curto circuitada e o motor é alimentado diretamente pela rêde.

5.4.3.2 - Soluções mecânicas

Mecanicamente, podem ser adotadas as seguintes soluções:

- a) Acoplamento centrífugo,
- b) Acoplamento hidráulico.

São Carlos, março de 1996

B.de M. Purquerio