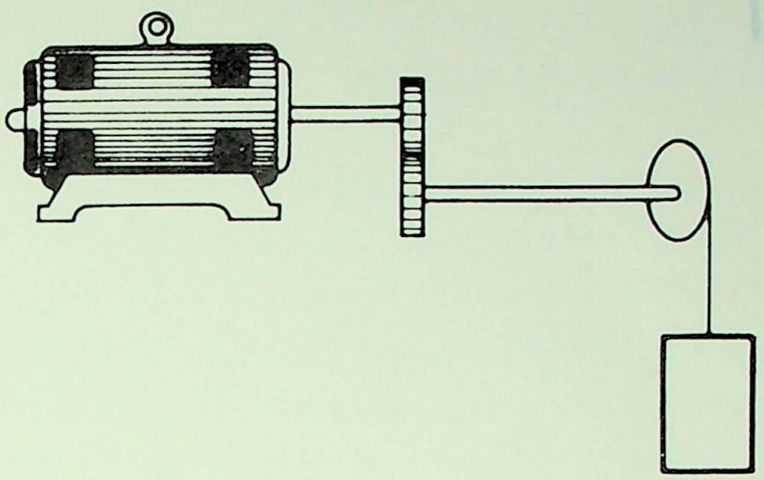
TESE
343

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Influência do tipo de Operação na especificação de Motores de Indução Trifásicos

Autor: Prof. Jocélio Souza de Sá



INFLUÊNCIA DO TIPO DE OPERAÇÃO NA ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Jocélio Souza de Sá

Escola Federal de Engenharia
25-10-82
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Dedico este Trabalho ao Grupo de Acionamentos da EFEI

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 165 de 02 / 08/ 82, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: Influencia do tipo de operação na especificação de Motores de Indução Trifásicos

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registros Acadêmicos) a expedição do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potencia satisfeitas as demais exigências regimentais à Jocélio Souza de Sá.

Itajubá, 31 de julho de 1981

1º Examinador
Prof. José Carlos de Oliveira
Universidade de Uberlândia

2º Examinador
Prof. Hector Arango - EFEI

3º Examinador
Prof. João Roberto Cogo - EFEI

4º Examinador
Prof. Czeslau Lubomiro Barczak
ORIENTADOR

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: Influência do tipo de operação na especificação de Motores de Indução Trifásicos.

Autor: Jocélio Souza de Sá

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	
2º	A+	
3º	A+	
4º	A	

Resultado médio: Conceito A, ou seja aprovado

Observações:

Itajubá, 31 de julho de 1981.

1º Examinador

2º Examinador

3º Examinador

4º Examinador

Campus Universitário - Prof. José Rodrigues Seabra
Tel. (035) 622-1700 — 622-1510 — Bairro Pinheirinho — 37.500 — ITAJUBÁ — M. G.

ÍNDICE

I - CONSIDERAÇÕES E EQUAÇÕES BÁSICAS DO ACIONAMENTO

II - ROTEIRO PARA ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR E DE SEUS COMPONENTES DE COMANDO E PROTEÇÃO

III - EXEMPLOS DE ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE COMANDO E PROTEÇÃO

IV - ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE ESPECIFICAÇÃO

V - CONCLUSÕES

VI - APÊNDICE

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

A definição de um acionamento elétrico consiste basicamente em:

- definir o tipo de motor a ser utilizado;
- definir as grandezas básicas do motor, necessárias à sua especificação;
- definir os componentes de comando, proteção e, quando for o caso, de controle do motor.

Na maioria dos acionamentos elétricos industriais, são usados motores de indução trifásicos com rotor em gaiola. Estes motores operam com velocidade constante, portanto não são controlados.

Este trabalho tem por objetivo, estabelecer os critérios básicos para escolha de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola, bem como analisar a interferência desta escolha nos componentes de comando e proteção destes motores.

A escolha do motor para um acionamento elétrico deve ser feita de tal modo que duas condições básicas sejam satisfeitas:

- o motor deve poder fornecer em qualquer situação considerada normal, o conjugado exigido pelo acionamento;
- durante a operação, a temperatura do motor não deve ultrapassar o valor máximo admissível definido pela sua classe de isolamento.

O atendimento destas condições pode ser con

seguido sem muitas dificuldades através da especificação do motor, feita a partir de uma análise teórica do acionamento , porém, de difícil elaboração por parte do responsável pela especificação, uma vez que inevitavelmente será baseada em dados não disponíveis nos catálogos mais usuais de escolha de motores e mesmo de difícil obtenção junto ao fabricante.

O problema resume-se então em estabelecer um roteiro para especificação do motor baseado em dados disponíveis e que ao mesmo tempo atenda às condições básicas mencionadas anteriormente.

É evidente, que toda análise simplificada e limitada a determinados dados, pode levar a erros com maior ou menor grau de influência nas duas condições básicas.

Quanto aos componentes de comando e proteção do motor, sua escolha é bastante influenciada pelo critério que norteia a especificação do motor, conforme será analisado.

× A sequência de abordagem do trabalho será:

- estabelecer os esforços mecânicos atuantes no acionamento elétrico;
- equacionar o comportamento térmico do motor;
- estabelecer os critérios básicos para escolha dos componentes de comando e proteção do motor;
- estabelecer o roteiro para especificação da potência do motor. Como na maioria dos acionamentos a potência é definida muito mais pelas condições térmicas, o roteiro será estabelecido em função destas condições, sendo então feita a verificação do atendimento das condi

ções mecânicas;

- estabelecer critérios para especificação de componentes de comando e proteção do motor em função do critério que definiu a escolha do motor;
- aplicar o roteiro estabelecido através de alguns exemplos numéricos;
- conclusões.

Os três primeiros ítens vão constituir o embasamento teórico para análise do problema.

Os dois ítens seguintes serão abordados simultaneamente, possibilitando desta forma a análise do acionamento como um todo.

É importante ainda, observar que em grande parte dos acionamentos, a definição do conjugado e da potência exigidos pela carga, é feita experimentalmente.

Finalmente, convêm salientar, que este trabalho se propõe a dar ênfase ao tratamento teórico dos critérios de especificação, tendo sido desenvolvidas as expressões e tabelas que levam ao atendimento das condições básicas que definem as solicitações a serem suportadas pelo motor, sem contudo fugir às grandezas acessíveis em catálogos. Desta forma, estaremos colocando a disposição de engenheiros e técnicos ligados ao assunto, uma técnica para escolha de motores que atenderá tanto o aspecto econômico quanto a garantia da elevação da vida útil do motor.

1 CONSIDERAÇÕES E EQUAÇÕES BÁSICAS DO ACIONAMENTO

1. CONSIDERAÇÕES E EQUAÇÕES BÁSICAS DO ACIONAMENTO

1.1 Os esforços atuantes no acionamento

Uma das condições a ser satisfeita está baseada nos esforços mecânicos atuantes em um acionamento. Conforme mostra a figura 1, o acionamento pode ser representado por 3 componentes básicos.

Figura 1 - Os componentes do acionamento

O motor é representado pelo conjugado motor M, a carga pelo conjugado resistente M_C e a inércia do conjunto pelo conjugado acelerador M_A. Em qualquer estado operacional, tem-se:

$$M - M_C - M_A = 0 \qquad (1)$$

onde:

M - conjugado motor em N.m

M_C - conjugado resistente em N.m

M_A - conjugado acelerador em N.m

1.1.1 O conjugado motor

Para motores de indução trifásicos, pode-se obter a partir do circuito equivalente, a equação (2) indicada a seguir, que define o conjugado motor em função do escorregamento, para valores definidos de tensão e frequência do esta

tor e de resistência do rotor |1|. Esta equação é válida para motores com gaiola simples e indutância de dispersão rotórica constante. A obtenção desta equação está indicada no capítulo VI.

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \qquad (2)$$

onde:

M - conjugado motor

M_K - conjugado motor máximo

s - escorregamento correspondente ao conjugado M

s_K - escorregamento correspondente ao conjugado M_K

A figura (2) mostra as grandezas indicadas na equação (2).

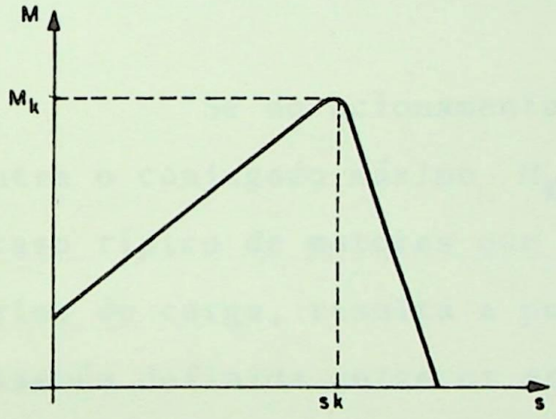


Figura 2 - Representação da equação (2)

A obtenção da curva da fig.2 a partir de dados de catálogos mais comuns é feita conforme o seguinte roteiro:

- as tabelas de especificação fornecem geralmente o conjugado nominal, a relação entre os conjugados máximo e nominal e o escorregamento nominal;
- com estes dados, a partir da equação (2), pode-se determinar o escorregamento s_K, correspondente ao conju

gado máximo M_K

$$\frac{M_N}{M_K} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_K} + \frac{s_K}{s_N}} \qquad (3)$$

- definido o valor de s_K e conhecido o valor de M_K, obtem-se então o comportamento do conjugado M em função do escorregamento s.

É importante observar que para obter-se o conjugado realmente disponível no eixo do motor, deve ser subtraido de M na equação (2), o conjugado de atrito próprio do motor. (M_{AV})

Se no acionamento é exigida uma relação definida entre o conjugado máximo M_K e o conjugado nominal M_N, que é o caso típico de motores que operam sujeitos a picos transitórios de carga, resulta a partir da equação (3), uma relação também definida entre os escorregamentos nominal s_N e o correspondente ao conjugado máximo s_K.

$$\frac{s_N}{s_K} = \frac{M_K}{M_N} - \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_N}\right)^2 - 1} \qquad (4)$$

Com a definição da relação s_N/s_K, obtem-se para o conjugado de partida em relação ao conjugado nominal a expressão (5).

$$\frac{M_p}{M_N} = s_N \frac{1 + \left(\frac{s_K}{s_N}\right)^2}{1 + s^2_N \left(\frac{s_K}{s_N}\right)^2} \qquad (5)$$

A expressão (5) permite concluir que a relação entre os conjugados de partida e nominal é definida pelo escorregamento nominal. A equação (5) mostra também que quanto maior o escorregamento nominal, maior será o conjugado de partida considerando a resistência e a indutância do rotor constantes.

Pode-se concluir que para motores com baixo escorregamento nominal, característica que ocorre para altas potências, o conjugado de partida torna-se menor.

Convém salientar que o interesse no comportamento do conjugado de partida desenvolvido pelo motor, justifica-se principalmente por dois aspectos:

- o comportamento do conjugado necessário à aceleração do motor;
- definição do tempo de partida do acionamento, que é fundamental para verificação da solicitação térmica em motores que operam em regime intermitente.

Conforme já afirmado anteriormente, para motores de indução trifásicos com rotor em gaiola, a validade da equação (2) na faixa $1 \leq s < s_K$ é limitada, pois em vários tipos de motores a resistência e a indutância de dispersão do rotor variam nesta faixa. Neste caso, a equação do conjugado motor pode ser representada pela equação (6), cujo desenvolvimento e análise está no anexo.

$$\frac{M}{M_K} = \frac{K_1}{\frac{s_{K1}}{s} + \frac{s}{s_{K1}}} + \frac{K_2}{\frac{s_{K2}}{s} + \frac{s}{s_{K2}}} \qquad (6)$$

A diferença entre os resultados obtidos por exemplo para o tempo de partida, utilizando-se a expressão (2)

ou levando-se em conta o comportamento real do conjugado, deve ser analisada caso a caso.

1.1.2 O conjugado resistente

A figura 3 representa um acionamento.

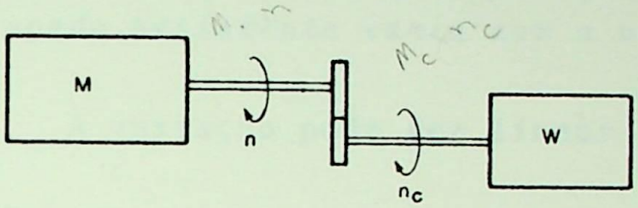


Figura 3 - Representação de um acionamento

n_c - *velocidade da carga*

n - *velocidade do motor*

O comportamento da carga pode depender de grandezas como a velocidade, o deslocamento e mesmo o tempo. A seguir, serão analisados alguns casos mais comuns.

1.1.2.a O conjugado resistente é constante

O conjugado resistente pode ser representado pela equação:

$$M_C = K$$

Em relação ao eixo do motor, o conjugado resistente vale :

$$M_{C(M)} = K.y \qquad (7)$$

onde:

$$y = \frac{n_C}{n}$$

onde: n - velocidade do motor em rpm

n_c - velocidade da carga em rpm

Este tipo de carga, característico de esforços de atrito e de deformação, é o mais comum industrialmente.

I.1.2.b O conjugado resistente varia com a velocidade

A variação pode ser linear

$$M_c = K.n_c$$

$$M_{c(M)} = K.n_c.y \qquad (8)$$

ou pode ser com o quadrado da velocidade

$$M_c = K.n_c^2$$

$$M_{c(M)} = K.n_c^2.y \qquad (9)$$

ou ainda, num caso mais geral e que ocorre com maior frequência pode ser do tipo

$$M_c = K_1 + K_2.n_c^2$$

$$M_{c(M)} = (K_1 + K_2.n_c^2).y \qquad (10)$$

I.1.3 O conjugado acelerador

O conjugado acelerador é definido pela equação

$$M_A = \frac{2\Pi J}{60} \cdot \frac{dn}{dt} \qquad (11)$$

onde:

M_A - conjugado acelerador em N.m

J - momento de inércia do acionamento (motor, acoplamento e carga), referido ao eixo do motor, em Kg.m²

n - velocidade do motor em rpm

t - tempo em s

Para definição do momento de inércia, deve ser observado

$$J = J_M + J_{AC} + J_C \cdot y^2 \qquad (12)$$

onde:

J_M - momento de inércia do motor em Kg.m²

J_{AC} - momento de inércia do acoplamento entre o motor e a carga em relação a velocidade do motor em Kg.m²

J_C - momento de inércia da carga em relação a velocidade da carga em Kg.m²

Alguns autores sugerem para o momento de inércia do acoplamento:

$$J_{AC} = 0,1 \text{ a } 0,3\ J_M$$

1.1.4 Considerações sobre o tempo de partida

Para uma velocidade definida da carga, vários motores podem satisfazer o acionamento variando-se o número de polos e a relação de velocidades, quando o acoplamento motor-carga não for direto.

A escolha do motor com a velocidade adequada, torna-se bastante importante, principalmente se o motor opera em regime intermitente, ou seja, com frequentes partidas, pois

conforme mostram as equações (11) e (12), a relação de velocidades interfere no conjugado acelerador e consequentemente no tempo de partida do acionamento.

Durante a partida a equação (1) pode ser escrita

$$M_P - M_{C(M)} = M_A$$

onde:

M_P - conjugado motor durante a partida

$M_{C(M)}$ - conjugado resistente referido ao eixo do motor

M_A - conjugado acelerador

Tomando-se:

$$M_p = C_1 \cdot M_N$$

$$M_{C(M)} = C_2 \cdot M_N$$

ou seja, admitindo-se os conjugados motor e resistente constantes durante a partida e levando-se em conta a equação (11), obtem-se

$$C_1 \cdot M_N - C_2 \cdot M_N = \frac{2\Pi J}{60} \cdot \frac{dn}{dt}$$

ou ainda:

$$\int_0^{t_p} M_N(C_1 - C_2)dt = \int_0^n \frac{2\Pi J}{60} dn$$

como: $$t_p \cdot M_N(C_1 - C_2) = \frac{2\Pi J}{60} n \qquad (13)$$

$$y = \frac{n_C}{n}$$

$$J = J_M + J_{AC} + J_C \cdot y^2$$

a equação (13) poderá ser escrita

$$t_p = \frac{2\Pi}{60M_N} \cdot \frac{n_C}{y(C_1 - C_2)} (C_3 . J_M + y^2 J_C) \qquad (14)$$

onde:

$$C_3 = \frac{J_{AC}}{J_M}$$

Deve-se contudo observar que o momento de inércia do motor varia com o tipo de motor escolhido. A forma de variação é definida a seguir.

A força magnética resultante entre o estator e o rotor de um motor é dada por

$$F = B.I.n.\ell.d \qquad (15)$$

onde:

F - força magnética em N

I - corrente em cada condutor do rotor em A

d - comprimento da circunferência do rotor em m

n - número de condutores por unidade de comprimento da circunferência do rotor

ℓ - comprimento longitudinal do rotor em m

B - indução no entreferro em Wb/m^2

O produto $\ell.d$ fornece a área A da superfície do rotor no entreferro

$$F = B.I.n.A$$

Para um diâmetro D do rotor, resulta o conjugado motor

$$M = \frac{D}{2}.F = B.I.n.A. \frac{D}{2}$$

O produto B.I.n. é definido pelo aquecimento má

ximo admissível pelo motor.

Tomando

$$\sigma = B.I.n$$

resulta

$$M_N = \sigma.A.\frac{D}{2}$$

como

$$A = \Pi.D.\ell$$

obtem-se

$$M_N = \sigma.\Pi.\ell.\frac{D^2}{2} \qquad (16)$$

Desta expressão pode-se concluir que é possível obter-se o mesmo conjugado motor para uma máquina com pequeno diâmetro e comprimento grande ou vice-versa.

Para máquinas de determinado tipo, existe uma relação

$$\lambda = \frac{\ell}{D}$$

característica. Desta forma, a equação (16) pode ser escrita

$$M_N = \sigma.\Pi.\lambda.\frac{D^3}{2}$$

ou seja

$$D = K_1 M^{1/3} \qquad (17)$$

Admitindo-se o rotor um cilindro cheio e homogêneo, o seu momento de inércia será

$$J_M = \frac{1}{2}\Pi.\frac{\gamma}{g}.\ell.\frac{D^4}{16}$$

como

$$\lambda = \frac{\ell}{D}$$

resulta

$$J_M = K_2 . D^5 \qquad (18)$$

Se as grandezas K_1 e K_2 são constantes para um tipo de motor, pode-se então concluir uma relação entre o conjugado motor e o momento de inércia do motor.

$$J_M = K\ M_N^{5/3} \qquad (19)$$

Na prática tem-se:

$$J_M = K . M_N^{\lambda} \qquad (20)$$

onde

$\lambda = 1,05$ a $1,5$

Substituindo na equação (14) o valor obtido para o momento de inércia J_M em (19) obtem-se

$$t_p = \frac{2\Pi}{60 M_N} \cdot \frac{n_C}{y(C_1 - C_2)} (C_3 . K . M_N^{5/3} + y^2 J_C)$$

Tomando-se o conjugado motor nominal em função da potência nominal, que é definida e independente da velocidade obtem-se:

$$t_p = \frac{4\Pi^2}{3600 P_N (C_1 - C_2)} \cdot \frac{n . n_C}{y} . K \left(\frac{60 . P_N}{2\Pi n}\right)^{5/3} +$$

$$+ \frac{4\Pi^2}{3600 P_N (C_1 - C_2)} n . n_C . y . J_C$$

Lembrando que

$$y = \frac{n_C}{n}$$

obtem-se:

$$t_p = \frac{4\Pi^2}{3600P_N(C_1-C_2)} \cdot \frac{n^2}{n^{5/3}} \cdot K\left(\frac{60P_N}{2\Pi}\right)^{5/3} + \frac{4\Pi^2}{3600P_N(C_1-C_2)} \cdot n_C^2 \cdot J_C$$

$$t_p = \frac{4\Pi^2}{3600P_N(C_1-C_2)} \cdot \frac{n_C^{1/3}}{y^{1/3}} \cdot K\left(\frac{60P_N}{2\Pi}\right)^{5/3} + \frac{4\Pi^2}{3600P_N(C_1-C_2)} \cdot n_C^2 \cdot J_C$$

ou ainda

$$t_p = \frac{K_1}{y^{1/3}} + K_2 \qquad (21)$$

onde

$$K_1 = \frac{4\Pi^2}{3600P_N(C_1-C_2)} \cdot n_C^{1/3} \cdot K\left(\frac{60P_N}{2\Pi}\right)^{5/3}$$

$$K_2 = \frac{4\Pi^2 \cdot n_C^2 \quad J_C}{3600P_N(C_1-C_2)} \qquad (22)$$

Observando-se a equação (21) conclui-se que o tempo de partida mínimo é obtido quando $y \to \infty$ e não é menor que K_2. Logo, levando-se em conta a expressão (22), o tempo de partida mínimo de um acionamento é definido pela relação

$$t_{p_{min}} = \frac{4\Pi^2 \cdot n_C^2 \cdot J_C}{3600P_N(C_1-C_2)} \qquad (23)$$

I.2 *O Comportamento Térmico do Motor*

I.2.1 *A equação básica do aquecimento do motor*

Em máquinas elétricas em operação ocorrem perdas que conduzem ao aquecimento. Este aquecimento provoca uma sobretemperatura em relação a temperatura ambiente, que deve ser admissível pelo material definido pela classe de isolamento da máquina. Se uma máquina está corretamente dimensionada, ela atingirá nas condições nominais de operação, uma sobretemperatura admissível pela classe de isolamento.

Máquinas elétricas são constituidas de diversos materiais e contem partes fixas e móveis, de forma que o aquecimento ocorre obedecendo equações bastante complicadas.

O responsável pelo projeto e construção da máquina é obrigado a analisar estas equações determinando na medida do possível, o comportamento da temperatura no interior da máquina. Para o responsável pela especificação da máquina, para o qual o problema resume-se em analisar o comportamento térmico para diversos estados operacionais, o problema pode ser bastante simplificado a partir de considerações experimentais. Estas simplificações, contudo, devem ser analisadas e verificadas e os resultados eventualmente corrigidos.

A simplificação do problema pode ser obtida considerando-se a máquina como um corpo homogêneo no qual a energia é absorvida e fornecida ao ambiente uniformemente.

Sob a ação das perdas, a máquina elétrica sofre uma elevação de temperatura.

Para elevar a temperatura de uma parcela $\Delta\tau$ é necessária uma quantidade de energia ΔQ, conforme a equação

$$\Delta Q_1 = C\ \Delta\tau \tag{24}$$

onde:

C - calor específico do material

Estando a máquina com uma temperatura τ, a quantidade de calor transferida para o ambiente num intervalo de tempo Δt será

$$\Delta Q_2 = A\ \tau\Delta t \tag{25}$$

onde:

A - fator característico de transmissão de calor

No caso da máquina elétrica com uma potência de perdas V tem-se, no intervalo de tempo Δt,

$$V\Delta t = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 \tag{26}$$

ou ainda

$$V\Delta t = C\Delta\tau + A\tau\Delta t \tag{27}$$

ou considerando-se variações infinitezimais de temperatura e tempo

$$Vdt = Cd\tau + A\tau dt \tag{28}$$

que resulta

$$\frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{V}{A} \tag{29}$$

cuja solução é

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
M. Á.
B. M.

$$\tau = \tau_f - (\tau_f - \tau_o) e^{-\frac{t}{T_A}} \qquad (30)$$

onde:

τ - temperatura da máquina no instante t

τ_f - temperatura da máquina para um tempo bastante grande ($t=\infty$)

τ_o - temperatura do ambiente

T_A - constante de tempo de aquecimento da máquina

Nesta expressão tem-se ainda:

$$\tau_f = \frac{V}{A} \qquad (31)$$

$$T_A = \frac{C}{A} \qquad (32)$$

O comportamento da temperatura está indicado na figura 4.

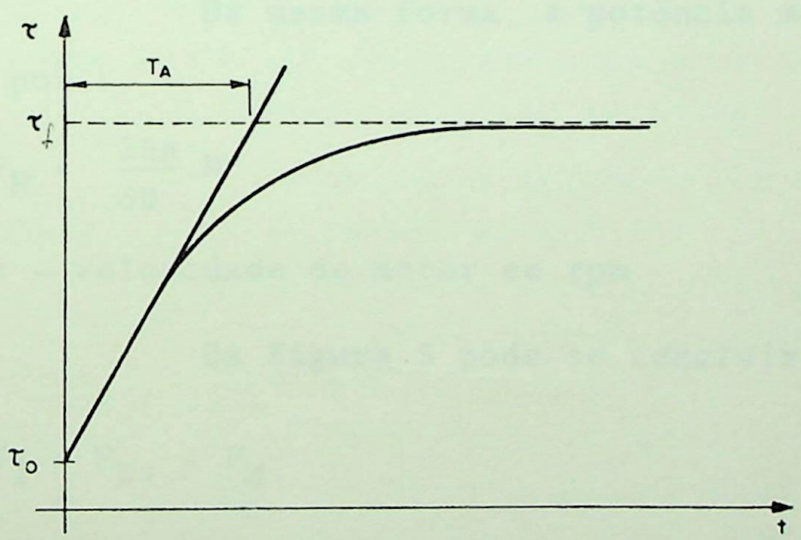


Figura 4 - Comportamento da temperatura da máquina

A equação (30) mostra que a temperatura alcançada por uma máquina vai depender basicamente:

- da potência de perdas
- do tempo de funcionamento

- das condições ambientes.

1.2.2 O comportamento das perdas no motor

A figura 5 mostra o fluxo de potência e perdas no motor de indução trifásico.

Esta figura permite a obtenção de algumas equações importantes na definição do comportamento das perdas no motor.

A potência P_{D1} transferida do estator para o rotor, pode ser representada pelo produto do conjugado motor pela velocidade do campo girante.

$$P_{D1} = \frac{2\Pi}{60} n'.M \qquad (33)$$

n' - velocidade do campo girante em rpm

Da mesma forma, a potência mecânica pode ser dada por :

$$P_M = \frac{2\Pi n}{60}.M \qquad (34)$$

n - velocidade do motor em rpm

Da figura 5 pode-se concluir :

$$V_2 = P_{D1} - P_M \qquad (35)$$

Levando-se em conta as equações (33) e (34), obtem-se para as perdas no circuito do rotor, que são tipicamente perdas no cobre:

$$V_2 = \frac{2\Pi n''}{60}.M \qquad (36)$$

n'' - velocidade relativa entre o campo girante e o rotor

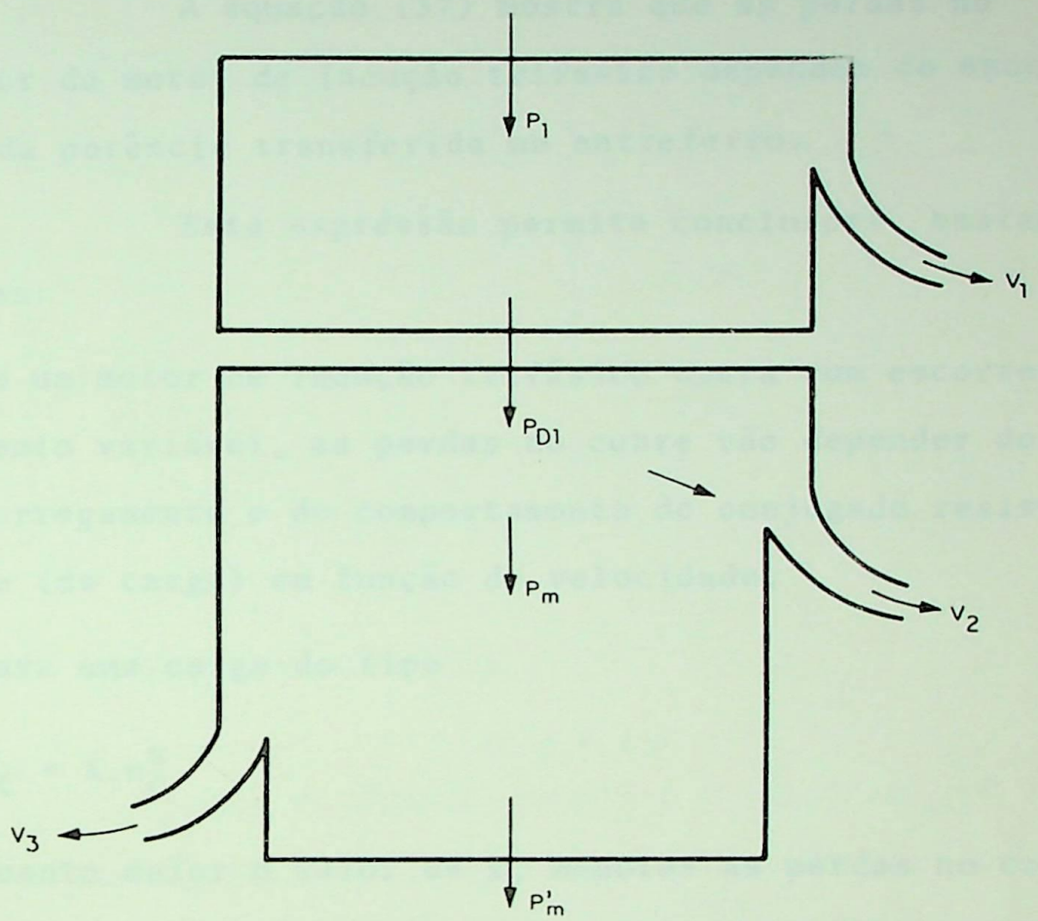


Figura 5 - Fluxo de potência no motor de indução trifásico com rotor em gaiola

P_1 - *potência elétrica absorvida da rede*
V_1 - *perdas no estator*
P_{D1} - *potência transferida do estator para o rotor através do entreferro*
V_2 - *perdas no rotor*
P_m - *potência mecânica*
V_3 - *perdas por atrito e ventilação*
P'_m - *potência mecânica disponível no eixo do motor.*

Dividindo-se a equação (36) pela equação(33) obtem-se

$$\frac{V_2}{P_{D1}} = \frac{n''}{n'} = s$$

$$V_2 = s.P_{D1} \qquad (37)$$

A equação (37) mostra que as perdas no cobre do rotor do motor de indução trifásico dependem do escorregamento e da potência transferida no entreferro.

Esta expressão permite conclusões bastante importantes:

- se um motor de indução trifásico opera com escorregamento variável, as perdas no cobre vão depender do escorregamento e do comportamento do conjugado resistente (da carga) em função da velocidade;
- para uma carga do tipo

  $$M_C = K.n_C^x$$

  quanto maior o valor de x, menores as perdas no cobre para um mesmo valor de escorregamento maior que o nominal.

Definindo-se por perdas a vazio as perdas no ferro e por atrito e ventilação, ou seja, as perdas que praticamente não dependem da carga (desprezando-se a variação do esforço de atrito resultante da variação da velocidade), a tabela 1 indicada a seguir, fornece a relação entre estas perdas e as perdas totais do motor em função da potência nominal, para as condições nominais de operação.

TABELA 1

K_o

POTÊNCIA [KW]	RELAÇÃO ENTRE AS PERDAS A VAZIO E AS PERDAS TOTAIS			
	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0,06- 1,5	0,35	0,45	0,50	0,50
2,2 -15	0,25	0,25	0,30	0,30
18,5 -22	0,25	0,30	0,35	0,30
30 -55	0,35	0,40	0,35	0,30
75 -160	0,40	0,40	0,35	0,30

1.2.3 O Ciclo de Operação do Motor

O tempo de funcionamento e o tempo em que o motor permanece desligado vão caracterizar o tipo de operação do motor. É obvio que os valores absolutos destes tempos são poucos significativos, pois dois motores com ciclos iguais de operação podem apresentar comportamentos térmicos diferentes. Estes comportamentos serão também definidos pelo material do motor (que define o calor específico) e pela forma de refrigeração (que define o fator de transmissão de calor). Em outras palavras, é importante conhecer-se as constantes de tempo de aquecimento e resfriamento do motor.

As tabelas indicadas a seguir fornecem a constante de tempo de aquecimento de motores de indução trifásicos de baixa tensão em função de sua potência e do número de polos.

TABELA 2

- motores com 2 polos

POTÊNCIA [KW]	T_A [minutos]	POTÊNCIA [KW]	T_A [minutos]
0,18	7,5	15,0	15,0
0,25	7,5	18,5	15,0
0,37	8,0	22,0	25,0
0,55	8,0	30,0	30,0
0,75	7,5	37,0	30,0
1,10	10,0	45,0	35,0
3,0	6,0	55,0	40,0
4,0	14,5	75,0	40,0
5,5	10,9	90,0	40,0
7,5	10,9	110,0	45,0
11,0	15,0		

TABELA 3

- motores de 4 polos

POTÊNCIA [KW]	T_A [minutos]	POTÊNCIA [KW]	T_A [minutos]
0,12	12,5	11,0	8,0
0,18	12,5	15,0	8,0
0,25	10,0	18,5	30,0
0,37	10,0	22,0	30,0
0,55	10,0	30,0	35,0
0,75	10,0	37,0	40,0
2,2	12,0	45,0	40,0
3,0	12,0	55,0	45,0
4,0	11,0	75,0	50,0
5,5	10,0	90,0	50,0
7,5	7,0	110,0	55,0
		132,0	55,0

TABELA 4

- motores de 6 polos

POTÊNCIA [KW]	T_A [minutos]	POTÊNCIA [KW]	T_A [minutos]
0,18	12,0	18,5	45,0
0,25	12,0	22,0	45,0
0,37	12,0	30,0	50,0
0,55	12,0	37,0	50,0
1,5	12,0	45,0	55,0
2,2	13,0	55,0	55,0
3,0	13,0	75,0	60,0
4,0	14,0	90,0	60,0
5,5	16,0		
7,5	20,0		
11,0	20,0		
15,0	40,0		

TABELA 5

- motores de 8 polos

POTÊNCIA [KW]	T_A [minutos]	POTÊNCIA [KW]	T_A [minutos]
0,75	16,0	15,0	50,0
1,1	16,0	18,5	55,0
1,5	12,0	22,0	55,0
2,2	10,0	30,0	60,0
3,0	10,0	37,0	65,0
4,0	12,0	45,0	65,0
7,5	14,0	55,0	75,0
11,0	45,0	75,0	75,0

A constante de tempo de resfriamento conforme |2| pode ser definida em função da constante de tempo de aquecimento.

T_R = 1,4 a 1,5 T_A

T_R - constante de tempo de aquecimento.

1.3 Os Componentes de Comando e Proteção

1.3.1 Os componentes mais usuais

A escolha dos equipamentos de comando e proteção de motores de indução trifásicos de baixa tensão é feita a partir da definição da configuração básica do ramo de alimentação do motor.

Atualmente quatro configurações são mais usadas.

a) *Contator, fusível e relé térmico*

Nesta configuração o contator é responsável pelo estado operacional do motor, ou seja, liga e desliga em condições normais e desliga em condições de sobrecargas inadmissíveis sob o comando do relé térmico. O relé térmico é responsável pela proteção contra sobrecargas inadmissíveis e o fusível assume a proteção do circuito de alimentação do motor contra curto-circuitos.

b) *Disjuntor e contator*

O disjuntor nesta configuração assume a proteção contra sobrecarga (através do relé térmico) e contra curto-circuito (através do relé eletromagnético).

O contator é responsável pela comutação do estado operacional.

c) *Contator, fusível e termistor*

Contator e fusível têm as mesmas funções indicadas anteriormente. O termistor assume a proteção do motor contra sobretemperaturas inadmissíveis.

d) *Contator, fusível, relé térmico e termistor*

Contator e fusível tem as mesmas funções indicadas anteriormente. O termistor e o relé térmico assumem a proteção contra sobretemperaturas inadmissíveis.

Os critérios para escolha de uma das configurações podem ser definidos, comparando-se os componentes de mesma finalidade.

Em qualquer dos casos, a utilização do contator é necessária, partindo-se da condição de que é exigido comando automático e frequentes manobras, com vida útil elevada. Para proteção contra curto-circuito, tanto pode-se optar pelo disjuntor (possibilidade de frequentes ocorrências de curto-circuito), quanto pelo fusível (limitação de correntes elevadas de curto-circuito).

Quando o nível de curto-circuito do sistema é muito elevado, o fusível torna-se a escolha mais indicada, pois disjuntores convencionais podem não garantir a proteção dos outros componentes do circuito contra os efeitos térmicos e mecânicos da corrente de curto-circuito.

Com relação a proteção contra sobrecargas, ou mais corretamente contra sobretemperaturas inadmissíveis pelo motor, pode-se fazer a seguinte análise.

A utilização do relé térmico é bastante difundida e muito mais frequente. Este equipamento, contudo, limita-se a proteger o motor contra sobretemperaturas provocadas por aumento de corrente, ou seja, provocadas por sobrecargas. Já a utilização de termistores, garante a proteção do motor contra sobretemperaturas de qualquer origem, pois este componente avalia diretamente a temperatura do motor, além de oferecer a possibilidade de proteção de mancais. O termistor, contudo, apresenta além da dificuldade de manutenção e da necessidade de utilização de cabos blindados entre o motor e o disparador no quadro, a possibilidade de não proteger o rotor do motor para sobrecargas intensas. Isto se deve ao fato dos termistores serem instalados no estator e da possibilidade de um crescimento mais rápido da temperatura do rotor para este tipo de defeito. Desta forma é crescente a utilização da combinação termistor e relé térmico, resultando então uma proteção mais completa.

1.3.2 *As grandezas básicas para especificação dos componentes de comando e proteção*

1.3.2.a *Contator*

A escolha do contator é feita basicamente de modo que as seguintes condições sejam satisfeitas:

- suportar a corrente de regime do motor;
- suportar, quando fechado, as solicitações térmicas e mecânicas provocadas pela passagem da corrente de curto-circuito;
- apresentar uma capacidade de interrupção (desligamen-

to) adequada às exigências do circuito.

A primeira condição define a corrente nominal do contator. Se o motor opera nas condições nominais, a corrente nominal do contator é igual a corrente nominal do motor.

Conforme será analisado posteriormente, existem acionamentos onde o motor opera fora das condições nominais. Nestes casos a definição da corrente nominal do contator estará intimamente ligada com as condições que estabelecem a escolha da potência do motor. Cada caso será analisado isoladamente.

O contator é um dispositivo relativamente frágil no que se refere a suportar solicitações térmicas e mecânicas provocadas pela passagem da corrente de curto-circuito. A limitação destes esforços é feita por fusíveis ou disjuntores encarregados da proteção do circuito contra curto-circuitos. Isto significa que a escolha do contator, para atender estas solicitações, é feita em função do dispositivo de proteção.

A capacidade de interrupção (ou desligamento) do contator é definida por três grandezas:

- corrente de desligamento;
- tensão de operação do circuito;
- fator de potência do circuito no desligamento.

A corrente de desligamento do contator deve ser igual a corrente de rotor travado do motor. Como esta corrente é geralmente igual a corrente de partida do motor, a escolha do motor também interfere nesta grandeza. O mesmo acontece com o fator de potência do circuito no desligamento, que é

definido pelo fator de potência do motor com o rotor travado.A tensão de operação do contator é a tensão nominal do motor,que é definida tanto pelo motor (faixa de potência), porém muito mais pela disponibilidade da rede.

I.3.2.b Fusível

A escolha do fusível para proteção do circuito de alimentação do motor é feita de modo que:

- para corrente de regime do motor,não ocorra atuação do fusível ou danos nos pontos de contato do fusível com o circuito;
- para correntes de curto-circuito, ocorra atuação segura do fusível, ou seja, sua capacidade de interrupção seja adequada às exigências do circuito;
- para sobrecargas admissíveis pelo motor, (por exemplo durante a partida), não ocorra atuação do fusível.

Da mesma forma que para o contator, a primeira condição define a corrente nominal do fusível. Valem aqui as mesmas considerações feitas para o contator.

Com relação à capacidade de interrupção do fusível, a definição é função apenas do circuito, independendo do motor.

A não atuação do fusível durante a partida é garantida através de verificação do fusível escolhido, em função das duas primeiras condições, ou seja, a corrente de partida deve resultar num tempo de atuação maior que o tempo de partida do motor.

I.3.2.c Disjuntor

A escolha do disjuntor é feita obedecendo-se as mesmas condições e critérios estabelecidos para o contator. Como o disjuntor é mais robusto que o contator, algumas das grandezas diferem entre si, quanto a forma de obtenção.

Para corrente nominal do disjuntor, valem as mesmas considerações.

Quanto à capacidade de suportar ligado às solicitações térmicas e mecânicas resultantes da corrente de curto-circuito, é uma característica própria do disjuntor, sendo definida em função do circuito e independendo do motor. A mesma análise é válida para capacidade de interrupção.

Tanto a corrente de desligamento, quanto o fator de potência de desligamento e a tensão nominal, dependem do circuito.

I.3.2.d Relé Térmico

A escolha do relé térmico é feita a partir da definição de sua faixa de ajuste. A faixa de ajuste é escolhida de modo a conter a corrente de regime do motor.

Em seguida é feita a verificação da capacidade do relé suportar os efeitos térmico e dinâmico,provocados pela passagem da corrente de curto-circuito. Se a proteção do circuito é feita por fusíveis, esta capacidade é definida em termos do fusível escolhido, da mesma forma que para o contator. Caso a proteção seja feita por disjuntor, o relé térmico é geralmente parte componente do disjuntor, havendo,portanto, com

patibilidade entre os dois componentes.

A definição da corrente de ajuste é feita em função da corrente de regime do motor e também levando-se em conta que a solicitação resultante durante a partida, não deve provocar a atuação do relé.

Finalmente deve ser verificada a influência do regime de operação, pois, por exemplo, partidas frequentes podem provocar a atuação indevida do relé.

I.3.2.e Termistor

A definição do termistor é feita basicamente em função da temperatura máxima admissível pelo motor, que é função de sua classe de isolamento.

I.3.2.f Quadro geral para especificação

A seguir estão indicadas tabelas que fornecem as grandezas básicas para escolha dos componentes. As grandezas indicadas tem como base, as configurações mostradas na figura 6.

Nas tabelas a seguir, tem-se:

I_N - corrente nominal

I_{CCTH} - valor eficaz da corrente de curto-circuito que provoca a solicitação térmica de curta duração

I_S - valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito, que provoca a solicitação mecânica

U_N - tensão nominal

I_d - corrente de desligamento

$Cos\varphi_d$ - fator de potência de desligamento.

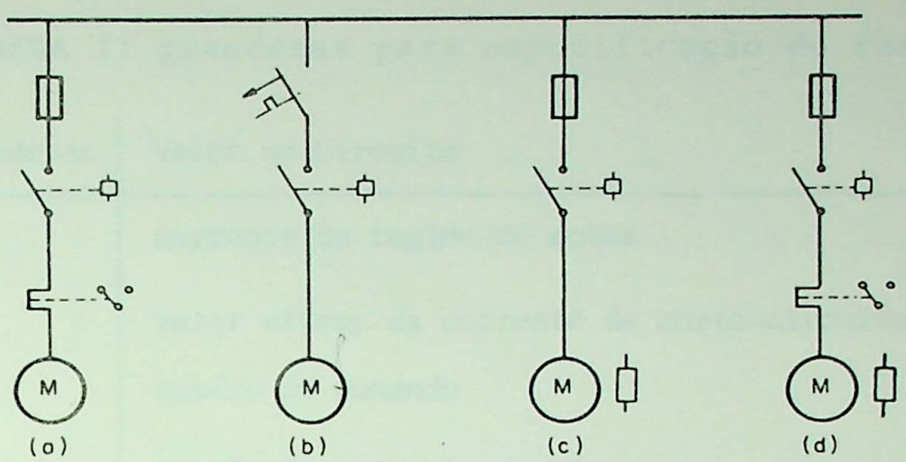


Figura 6 - Configurações mais usuais para o circuito de comando e proteção de motores de indução trifásicos.
a - fusível, contator e relé térmico.
b - disjuntor e contator .
c - fusível, contator e termistor.
d - fusível, contator, relé térmico e termistor.

TABELA 6: grandezas para especificação do contator.

Grandezas	Valor no Circuito
I_N	corrente de regime do motor
I_{CCTH}	definido em função do dispositivo de proteção contra curto-circuito
I_S	definido em função do dispositivo de proteção contra curto-circuito
I_d	corrente de rotor travado do motor
U_N	tensão de operação do circuito
$\cos\varphi_d$	fator de potência do motor com rotor travado

TABELA 7: grandezas para especificação do fusível

Grandezas	Valor no Circuito
I_N	corrente de regime do motor
I_d	valor eficaz da corrente de curto-circuito no quadro de comando
U_N	tensão de operação do circuito

Adicionalmente deve ser verificada a não atuação do fusível durante a partida do motor.

TABELA 8: grandezas para especificação do disjuntor

Grandezas	Valor no Circuito
I_N	corrente de regime do motor
I_{CCTH}	valor eficaz da corrente de curto-circuito no quadro de comando
I_s	valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito no quadro de comando, sendo $I_s = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot x$ I_{cc} - valor eficaz da corrente de curto-circuito x - fator de impulso $x = 1{,}02 + 0{,}98\ e^{-3{,}03 \frac{R}{X}}$ R - resistência do circuito até o quadro de comando X - reatância do circuito até o quadro de comando

I_d	valor eficaz da corrente de curto-circuito
U_N	tensão de operação do circuito
$\cos\varphi_d$	fator de potência do circuito até o quadro de comando

Deve-se observar que o valor eficaz da corrente de curto-circuito no quadro de comando, refere-se ao valor eficaz da componente alternada da corrente de curto-circuito.

TABELA 9: grandezas para especificação do relé térmico

Grandezas	Valor no Circuito
Faixa de ajuste	deve conter a corrente de regime do motor
I_{CCTH}	definido em função do dispositivo de proteção contra curto-circuito
I_s	definido em função do dispositivo de proteção contra curto-circuito
I_{Aj}	corrente de regime do motor, porém levando-se em conta as solicitações de partida

Feita a especificação conforme a tabela, deve-se verificar a influência do regime de operação do motor na atuação do relé.

II. ROTEIRO PARA ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR E DOS SEUS COMPONENTES DE COMANDO E PROTEÇÃO

II. ROTEIRO PARA ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR E DOS SEUS COMPONENTES DE COMANDO E PROTEÇÃO

Introdução

Conforme indicado anteriormente, duas condições básicas definem a potência de um motor para o acionamento elétrico:

- o motor deve fornecer o conjugado exigido pela carga;
- a temperatura do motor não deve ultrapassar o valor admissível pela sua classe de isolamento.

Na grande maioria dos acionamentos, a potência do motor é definida em função da segunda condição, ou seja, da solicitação térmica.

A solicitação térmica, conforme a equação (30), vai depender basicamente do tipo de operação do acionamento e de características próprias do motor, como o comportamento das perdas e as constantes de tempo de aquecimento e de resfriamento.

A norma técnica brasileira define basicamente oito tipos de operação. Ao se analisar o acionamento, deve se procurar encaixá-lo no tipo que mais traduza o seu comportamento, procurando-se o maior rigor possível.

O roteiro para especificação do motor será feito em função destes oito tipos de operação, sendo que, quando necessário, será observado o aspecto mecânico.

Ao final de cada ítem serão feitas considerações com relação a especificação dos componentes de comando

e proteção.

II.1 Operação Contínua S1

II.1.1 Especificação do motor

O acionamento opera com carga constante e o tempo de funcionamento é suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido, ou seja, a temperatura final τ_f seja alcançada.

A figura 7 mostra os comportamentos da potência (mecânica) P, das perdas V e da temperatura τ do motor em função do tempo de funcionamento.

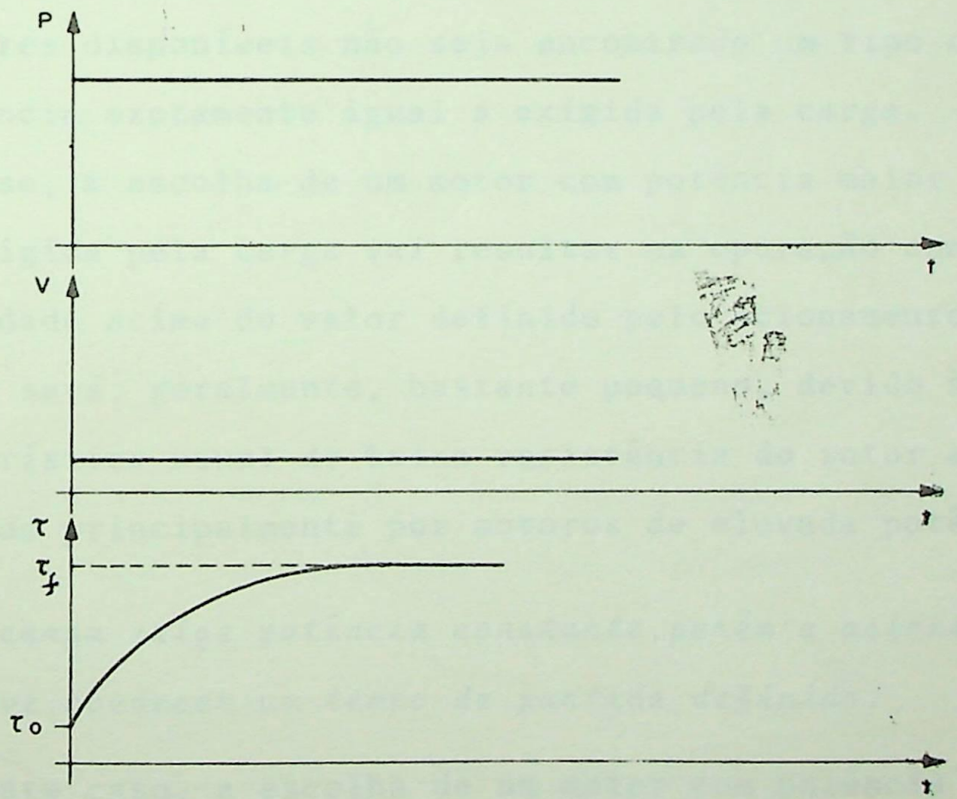


Fig.7 - Comportamento da potência, das perdas e da temperatura do motor em função do tempo, para operação contínua.

P - potência mecânica

V - perdas

τ - temperatura

A operação de um acionamento é considerada contínua quando

$$t_f \geq 3 \text{ a } 4T_A$$

Para este tipo de acionamento, podem ocorrer duas situações distintas, que serão analisadas a seguir:

1. *A carga exige potência constante não sendo feita qualquer exigência com relação ao tempo de partida.*

   Neste caso deve-se escolher um motor cuja potência seja igual a potência da carga. Tanto mecânica quanto termicamente, o motor estará corretamente dimensionado. No caso específico de motores de indução com rotor em gaiola, pode ocorrer que na lista normal de motores disponíveis não seja encontrado um tipo com potência exatamente igual a exigida pela carga. Neste caso, a escolha de um motor com potência maior que a exigida pela carga vai resultar na operação com velocidade acima do valor definido pelo acionamento. O erro será, geralmente, bastante pequeno, devido à característica usual de baixa resistência do rotor apresentada principalmente por motores de elevada potência.

2. *A carga exige potência constante, porém o acionamento deve obedecer um tempo de partida definido.*

   Neste caso, a escolha de um motor com potência nominal igual a da carga resulta no atendimento da condição térmica de operação do motor. Deve-se em seguida escolher o motor adequado para que a exigência com relação ao tempo de partida seja atendida.

Em acionamentos com motores de indução trifásicos com rotor em gaiola, onde existe um redutor de velocidade entre o motor e a carga, a equação (23) já permite verificar se com este tipo de motor é possível obter-se o tempo de partida exigido. A escolha do motor, com a potência já definida pela carga, será em termos do número de polos.

O roteiro neste caso será o seguinte:

- para velocidade nominal da carga e conhecido o conjugado resistente nominal, determina-se a potência nominal da carga, que será tomada para escolha da potência nominal do motor;
- conhecida a exigência com relação ao tempo de partida, verifica-se através da expressão (23) se este tempo pode ser atendido com um motor de indução trifásico com rotor em gaiola.

$$t_p = \frac{4.\Pi^2.n_C^2.J_C}{3600.P_N(C_1-C_2)}$$

Nesta expressão C_1 é a relação entre o conjugado de partida e o conjugado nominal do motor. Para efeito de verificação o conjugado de partida pode ser admitido constante durante o processo de partida. O valor de C_1 pode ser obtido de uma tabela para especificação de motores ou da norma brasileira EB-120.

Através desta expressão já é possível definir inicialmente o número de polos do motor. Uma verificação mais completa do tempo de partida, levando-se em

conta a variação do conjugado motor durante a partida, pode ser feita conforme mostra o exemplo 1 do Capítulo III.

Caso o tempo de partida mínimo não seja satisfeito, o aumento da potência do motor pode não resolver o problema, pois o momento de inércia do motor tem um crescimento maior que o conjugado, conforme mostra a expressão (19). Neste caso, a solução poderá ser a utilização de um motor de indução de anéis (rotor bobinado) com partida através de resistências inseridas no circuito do rotor, ou mesmo a utilização de um motor de corrente contínua.

II.1.2 Especificação dos componentes de comando e proteção

Para este regime de operação, as grandezas indicadas nas tabelas de especificação e que dependem do regime de operação do acionamento, são calculadas conforme indicado a seguir.

- A corrente nominal do equipamento deve ser igual ou maior que a corrente nominal do motor escolhido. Para o caso de fusíveis deve ser feita a verificação com relação as condições de partida. Caso tratar-se de um acionamento com elevado tempo de partida, a consequência poderá ser a necessidade de utilização de fusíveis com corrente nominal bem maior que a do motor, Deve-se então observar se a escolha de um fusível maior não vai interferir na especificação dos componentes por ele protegidos, no que se refere às solicitações

causadas pela corrente de curto-circuito.

- A corrente de partida está automaticamente definida com a escolha do motor.
- O tempo de partida é obtido a partir do equacionamento dos esforços atuantes no acionamento durante a partida, conforme mostra o primeiro exemplo do capítulo III.
- O fator de potência no desligamento para especificação de contatores é o fator de potência do motor com rotor travado. Este dado não é comum nas listas técnicas para escolha de motores. Sugere-se adotar um valor entre 0,3 e 0,4.

II.2 Operação de Curta Duração S2

II.2.1 Especificação do motor

A operação de curta duração S2 ocorre quando o motor opera com carga constante e nominal, porém com tempo de funcionamento insuficiente para que a temperatura admissível pela classe de isolamento seja atingida. Quando o motor é desligado, sua temperatura volta praticamente ao valor da temperatura ambiente. Isto significa que

$$t_f < 3\ T_A$$

$$t_d > 3\ T_R$$

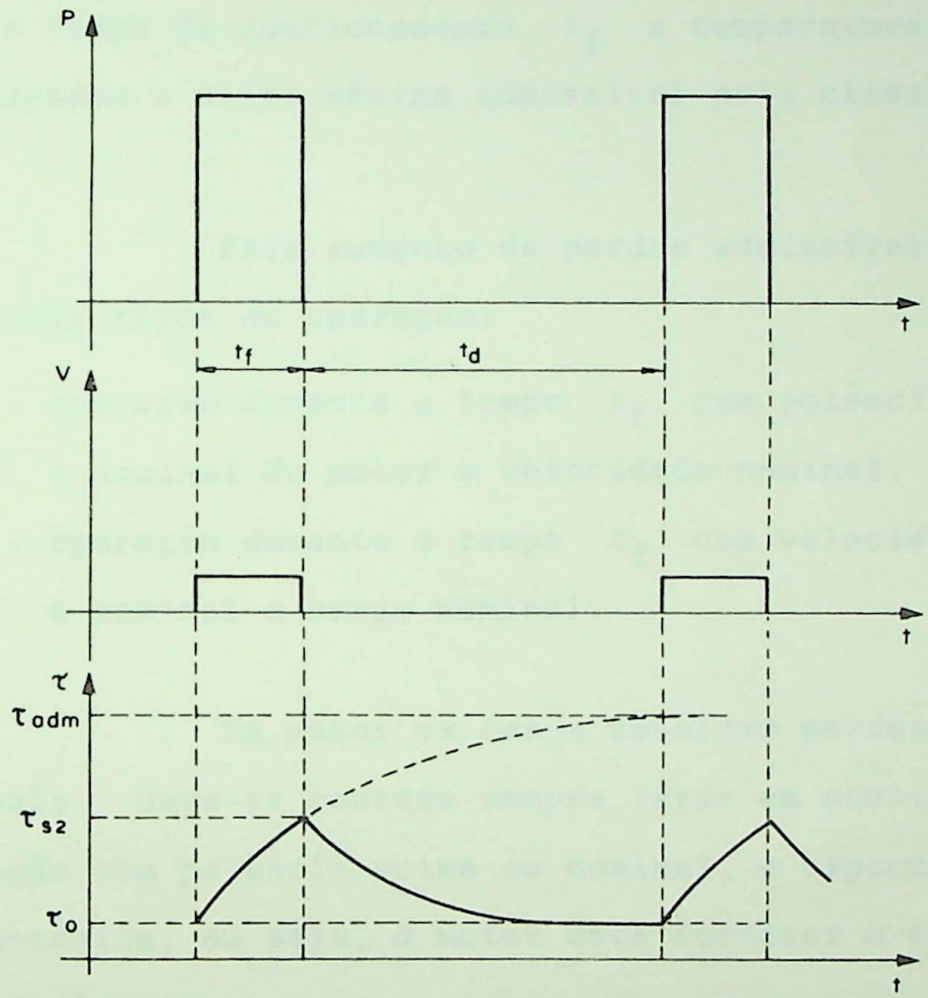
t_f - tempo de funcionamento

t_d - tempo que o motor permanece desligado

T_A - constante de tempo de aquecimento

T_R - constante de tempo de resfriamento

O comportamento da potência, das perdas e da temperatura do motor, para operação nas condições nominais é mostrado na figura 8.



Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
B M

Fig.8 - Operação de curta duração S2

Conforme pode-se observar, durante o funcionamento nas condições nominais, o motor atinge a temperatura τ_{s2} e quando desligado volta a temperatura ambiente τ_o.

A temperatura τ_{adm} indicada, corresponde a temperatura que o motor atingiria se a operação fosse contínua,

portanto é a temperatura máxima admissível pela classe de isolamento.

Da figura 8 pode-se então concluir que, se o motor opera em regime de curta duração, admite perdas maiores que as nominais durante o tempo de funcionamento. A relação entre as perdas admissíveis e as perdas nominais deve ser tal que durante o tempo de funcionamento t_f a temperatura do motor não ultrapasse o valor máximo admissível pela classe de isolamento.

Este aumento de perdas admissível no motor permite dois tipos de operação:

- operação durante o tempo t_f com potência maior que a nominal do motor e velocidade nominal.
- operação durante o tempo t_f com velocidade menor que a nominal e carga nominal.

Em ambos os casos resultam perdas maiores que as nominais. Deve-se contudo sempre levar em consideração, para operação com potência acima da nominal, o aspecto da solicitação mecânica, ou seja, o motor deve fornecer o conjugado solicitado pela carga.

A seguir será feita uma análise que define os dois tipos de operação possíveis.

Da figura 8, tem-se:

$$\tau_{s2} = \tau_{adm} - (\tau_{adm} - \tau_o) e^{-\frac{t_f}{T_A}} \qquad (38)$$

$$\tau_{s2} = \tau_{adm} \left(1 - e^{-\frac{t_f}{T_A}}\right) + \tau_o \, e^{-\frac{t_f}{T_A}}$$

$$\frac{\tau_{adm}}{\tau_{s2}} = \frac{1}{1 - e^{-t_f/T_A} + \frac{\tau_o}{\tau_{adm}} e^{-t_f/T_A}} \qquad (39)$$

Se o motor opera com perdas maiores que as nominais, porém sem ultrapassar a temperatura máxima admissível durante o tempo de funcionamento, tem-se:

$$\tau_{adm} = \frac{V_{adm}}{A} (1 - e^{-t_f/T_A}) + \tau_o e^{-t_f/T_A} \qquad (40)$$

V_{adm} - perdas máximas admissíveis pelo motor no tempo de funcionamento t_f.

Para as condições nominais vale:

$$\tau_{s2} = \frac{V_N}{A} (1 - e^{-t_f/T_A}) + \tau_o e^{-t_f/T_A} \qquad (41)$$

Dividindo a equação (40) pela (41)

$$\frac{\tau_{adm}}{\tau_{s2}} = \frac{\frac{V_{adm}}{A} (1 - e^{-t_f/T_A}) + \tau_o e^{-t_f/T_A}}{\frac{V_N}{A} (1 - e^{-t_f/T_A}) + \tau_o e^{-t_f/T_A}} \qquad (42)$$

Comparando-se as expressões (39) e (42), obtem-se:

$$\frac{1}{1 - e^{-t_f/T_A} + \frac{\tau_o}{\tau_{adm}} e^{-t_f/T_A}} = \frac{\frac{V_{adm}}{A}(1 - e^{-t_f/T_A}) + \tau_o e^{-t_f/T_A}}{\frac{V_N}{A}(1 - e^{-t_f/T_A}) + \tau_o e^{-t_f/T_A}}$$

$$\frac{\tau_{adm}(1 - e^{-t_f/T_A}) + \tau_o e^{-t_f/T_A}}{1 - e^{-t_f/T_A} + \frac{\tau_o}{\tau_{adm}} e^{-t_f/T_A}} = \frac{V_{adm}}{\frac{V_N}{\tau_{adm}}}(1 - e^{-t_f/T_A}) + \tau_o e^{-t_f/T_A}$$

que resulta:

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \frac{1 - \frac{\tau_o}{\tau_{adm}} e^{-t_f/T_A}}{1 - e^{-t_f/T_A}} \qquad (43)$$

As tabelas a seguir fornecem, para diversos valores da relação t_f/T_A, as perdas admissíveis do motor em relação às perdas nominais, para diversas classes de isolamento.

Tabela 10 - perdas admissíveis em relação às perdas nominais no motor com classe de isolamento E

$\tau_o = 40^oC$

$\tau_{adm} = 110^oC$

t_f/T_A	V_{adm}/V_N
0,5	1,98
0,75	1,57
1,00	1,37
1,5	1,18
2,0	1,10

TABELA 11 - perdas admissíveis em relação às perdas nominais no motor com classe de isolamento B

$\tau_o = 40^oC$
$\tau_{adm} = 120^oC$

t_f/T_A	V_{adm}/V_N
0,50	2,03
0,75	1,60
1,00	1,39
1,50	1,19
2,00	1,10

TABELA 12 - perdas admissíveis em relação às perdas nominais no motor com classe de isolamento F

$\tau_o = 40^oC$
$\tau_{adm} = 140^oC$

t_f/T_A	V_{adm}/V_N
0,50	2,1
0,75	1,64
1,00	1,42
1,50	1,21
2,00	1,10

TABELA 13 - perdas admissíveis em relação às perdas nominais no motor com classe de isolamento F

$\tau_o = 40^oC$
$\tau_{adm} = 165^oC$

t_f/T_A	V_{adm}/V_N
0,50	2,17
0,75	1,68
1,00	1,44
1,50	1,22
2,00	1,12

Conforme afirmado anteriormente, este aumento admissível de perdas em função do regime de operação, poderá ser usado para:

- permitir o funcionamento do motor com potência acima da nominal;
- permitir a operação do motor com velocidade abaixo da nominal e carga nominal.

II.2.1.1 *Funcionamento do motor com potência acima da nominal.*

Se o motor de indução trifásico opera com tensão e frequência constantes, as perdas a vazio (perdas no ferro e perdas por atrito e ventilação) se mantêm praticamente constantes. O aumento de carga no eixo do motor vai provocar um aumento das perdas no cobre. Logo, a relação V_{adm}/V_N deverá caracterizar o aumento admissível de perdas no cobre em relação às perdas deste tipo que ocorrem na condição nominal.

As perdas no motor podem ser representadas em termos da potência nominal. Desta forma, para operação nominal tem-se:

$$V_N = m.P_N + q.P_N \qquad (44)$$

m - porcentagem da potência nominal que representa as perdas a vazio

q - porcentagem da potência nominal que representa as perdas no cobre.

Quando o motor opera com carga maior que a

nominal, conforme analisado anteriormente, as perdas no cobre crescem com o quadrado da corrente. Admitindo-se que a tensão, o fator de potência e o rendimento permanecem praticamente constantes, este crescimento poderá ser representado por:

$$V_{adm} = m.P_N + q.P_N \left(\frac{P_{adm}}{P_N}\right)^2 \qquad (45)$$

Comparando as expressões (45) e (44) tem-se:

$$\left(\frac{V_{adm}}{V_N}\right) = \frac{m + q \left(\frac{P_{adm}}{P_N}\right)^2}{m + q}$$

Desta forma obtem-se:

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{m+q}{q} \cdot \frac{V_{adm}}{V_N} - \frac{m}{q}}$$

ou ainda :

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{1}{\frac{q}{m+q}} \cdot \frac{V_{adm}}{V_N} - \left(\frac{m+q}{q} - 1\right)}$$

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{1}{1-\frac{m}{m+q}} \cdot \frac{V_{adm}}{V_N} - \frac{1}{1-\frac{m}{m+q}} + 1}$$

Tomando-se:

$$K_o = \frac{m}{m+q} \qquad (46)$$

K_o - relação entre as perdas a vazio e as perdas nominais do motor

resulta :

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{1}{1-K_o} \cdot \frac{V_{adm}}{V_N} - \frac{1}{1-K_o} + 1}$$

ou ainda:

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{\frac{V_{adm}}{V_N} - K_o}{1 - K_o}} \qquad (47)$$

Levando-se em conta a equação (43), obtem-se:

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{1 - \frac{\tau_o}{\tau_{adm}} e^{-t_f/T_A}}{1 - e^{-t_f/T_A}} - K_o}{1 - K_o}} \qquad (48)$$

Desta forma, para cada classe de isolamento pode-se definir a relação entre a potência admissível e a potência nominal do motor em função da relação entre o tempo de funcionamento e a constante de tempo de aquecimento e da relação entre as perdas a vazio e as perdas nominais do motor.

TABELA 14: Relação entre a potência admissível e a nominal para o motor com classe de isolamento E.

	P_{adm}/P_N					
t_f/T_A	K_o=0,25	K_o=0,30	K_o=0,35	K_o=0,40	K_o=0,45	K_o=0,50
0,50	1,52	1,55	1,58	1,62	1,67	1,72
0,75	1,33	1,35	1,37	1,40	1,43	1,46
1,00	1,22	1,24	1,25	1,27	1,29	1,32
1,50	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,17
2,00	1,06	1,07	1,07	1,08	1,09	1,10

TABELA 15: relação entre a potência admissível a nominal para com o motor com classe de isolamento B.

	P_{adm}/P_N					
t_f/T_A	K_o=0,25	K_o=0,30	K_o=0,35	K_o=0,40	K_o=0,45	K_o=0,50
0,5	1,54	1,57	1,61	1,65	1,69	1,75
0,75	1,34	1,36	1,38	1,41	1,44	1,48
1,00	1,23	1,25	1,26	1,28	1,31	1,33
1,50	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,18
2,0	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,10

TABELA 16: relação entre a potência admissível e a nominal para o motor com classe de isolamento F.

	P_{adm}/P_N					
t_f/T_A	K_o=0,25	K_o=0,30	K_o=0,35	K_o=0,40	K_o=0,45	K_o=0,50
0,50	1,57	1,60	1,64	1,68	1,73	1,79
0,75	1,36	1,38	1,41	1,44	1,47	1,51
1,00	1,25	1,26	1,28	1,30	1,33	1,35
1,50	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19
2,00	1,07	1,08	1,08	1,09	1,10	1,11

TABELA 17: relação entre a potência admissível e a nominal para o motor com classe de isolamento H.

	P_{adm}/P_N					
t_f/T_A	K_o=0,25	K_o=0,30	K_o=0,35	K_o=0,40	K_o=0,45	K_o=0,50
0,50	1,60	1,63	1,67	1,72	1,77	1,83
0,75	1,38	1,40	1,43	1,46	1,49	1,54
1,00	1,26	1,28	1,30	1,32	1,34	1,37
1,50	1,14	1,14	1,16	1,17	1,18	1,20
2,00	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11

Verificada a sobrecarga admissível pelo motor em termos de aquecimento, deve-se analisar o comportamento do motor em função da solicitação mecânica, ou seja, se o motor fornece o conjugado exigido pela carga. Como o conjugado com que o motor vai operar é maior que o seu conjugado nominal, deve-se garantir uma reserva entre este conjugado e o conjugado máximo M_K.

A norma técnica sugere:

$$\frac{M_K}{M_{adm}} \geq 1,8 \qquad (49)$$

que em termos de potência significa:

$$P_{adm} \leq \frac{M_K}{M_N} \cdot \frac{P_N}{1,8} \qquad (50)$$

onde:

P_{adm} - potência admissível definida termicamente através da expressão (48).

M_K - conjugado máximo do motor.

M_N - conjugado nominal do motor.

P_N - potência nominal do motor.

Deve-se também verificar se o motor satisfaz quanto ao tempo de partida, caso haja exigência neste sentido.

O segundo exemplo do capítulo III mostra o roteiro para especificação de um motor que opera em regime de

curta duração.

II.2.1.2 *Funcionamento do motor com escorregamento maior que o nominal.*

Em acionamentos com motores de indução trifásicos com rotor em curto-circuito controlados através de variação do escorregamento, ocorre um aumento de perdas no cobre.

Sendo P_{D1} a potência transferida do estator para o rotor e sendo q a porcentagem da potência nominal que representa as perdas no cobre tem-se, com base na equação (37):

$$V_2 = qP_N = s.P_{D1}$$

onde:

s - escorregamento do motor

Levando-se em conta o valor de P_{D1} fornecido pela equação (33), resulta:

$$q \cdot \frac{2\Pi n_N}{60} \cdot M_N = s. \frac{2\Pi n'}{60} \cdot M$$

n' - velocidade do campo girante

n_N - velocidade nominal

ou ainda

$$q = \frac{M}{M_N} \cdot \frac{n'}{n_N} \cdot s \qquad (51)$$

Isto significa que o comportamento das perdas no rotor (perdas

no cobre) também depende do comportamento da carga.

Das expressões (44), (45) e (47), conclui-se que para a operação de curta duração o aumento admissível de perdas no cobre é dado por

$$\frac{q'}{q} = \frac{\frac{V_{adm}}{V_N} - K_o}{1 - K_o} \qquad (52)$$

Se a carga é constante e nominal, independendo da velocidade, a expressão (51) para velocidade nominal será:

$$q = \frac{n'}{n_N} \left(1 - \frac{n_N}{n'}\right)$$

$$q = \frac{n'}{n_N} - 1 \qquad (53)$$

Para uma velocidade menor que a nominal, tem se:

$$q' = \frac{n'}{n_N} \left(1 - \frac{n}{n'}\right)$$

Levando-se em conta a expressão (52):

$$\frac{n'}{n_N} \left(1 - \frac{n}{n'}\right) = \left(\frac{n'}{n_N} - 1\right) \frac{\frac{V_{adm}}{V_N} - K_o}{1 - K_o}$$

Biblioteca MAUÁ B M de Itajubá - EFEI

$$\frac{n'}{n_N} - \frac{n}{n_N} = \left(\frac{n'}{n_N} - 1\right) \frac{\frac{V_{adm}}{V_n} - K_o}{1 - K_o}$$

$$n = n' - (n' - n_N) \frac{\frac{V_{adm}}{V_N} - K_o}{1 - K_o}$$

É importante lembrar que com a ~~relação~~ redução da velocidade, a ventilação do motor ficará prejudicada e a relação V_{adm}/V_N deverá ser menor que o valor fornecido pela expressão (43). O fator f_v que leva em consideração a redução da ventilação depende do tipo de motor e da velocidade. Este fator deve ser fornecido pelo fabricante do motor. Desta forma obtem-se:

$$n = n' - (n'-n_N) \frac{\left(\frac{1 - \frac{\tau_o}{\tau_{adm}} e^{-t_f/T_A}}{1 - e^{-t_f/T_A}} \right) \frac{1}{f_v} - K_o}{1 - K_o} \qquad (54)$$

A determinação de n é feita da seguinte forma:

- toma-se inicialmente $f_v=1$ e determina-se n a partir dos dados do acionamento
- para a velocidade n calculada, determina-se a partir de uma tabela fornecida pelo fabricante do motor, o valor de f_v, calculando-se em seguida o novo valor de n e assim sucessivamente.

II.2.2 *Especificação dos componentes de comando e proteção do motor.*

O fato do acionamento operar em regime de curta duração afeta a escolha dos componentes de comando e proteção no que se refere a definição da corrente de regime.

Como o tempo de funcionamento é pequeno e a constante de tempo de aquecimento destes componentes é relativamente baixa, a solicitação térmica provocada na partida poderá influir na corrente de regime do componente, que contudo poderá ser menor que a corrente nominal do motor, devido ao longo intervalo de tempo no qual o motor permanece desligado.

A primeira providência para definição da corrente de regime do componente é a definição do valor eficaz da corrente durante o tempo de carga, conforme a equação(55).

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_p^2 . t_p + I_1^2 . t_1}{t_f}} \qquad (55)$$

onde:

t_1 - corrente de operação do motor durante t_f

t_1 - tempo de carga constante

I_p - corrente de partida do motor

t_p - tempo de partida do motor

A definição da corrente de regime ou nominal do componente será função de seu comportamento térmico, que somente é possível de ser definido a partir de informações do fabricante, por ser dependente do aspecto construtivo. Sugere

se então as seguintes considerações:

Contator

Calculado o valor eficaz da corrente, representativo do tipo de operação, a corrente nominal do contator será:

$$I_N = \frac{I_{ef}}{R}$$

onde R é um fator definido pelo fabricante do componente, que vai depender da constante de tempo de aquecimento do equipamento e dos tempos de funcionamento e desligamento. Tal procedimento pode levar a uma redução sensível no tamanho do contator.

Deve-se, contudo, ainda verificar se o contator escolhido em termos de corrente de regime, satisfaz as outras grandezas como corrente de desligamento e coerência com o fusível escolhido para proteção contra curto-circuito.

Fusível

O fusível deve ser escolhido de modo que não ocorra atuação para as condições de partida. A figura 9 mostra a posição da curva de atuação do fusível em relação ao ponto definido pela partida.

A corrente nominal do fusível deve ainda ser maior ou igual ao valor eficaz de corrente definido pela equação (55).

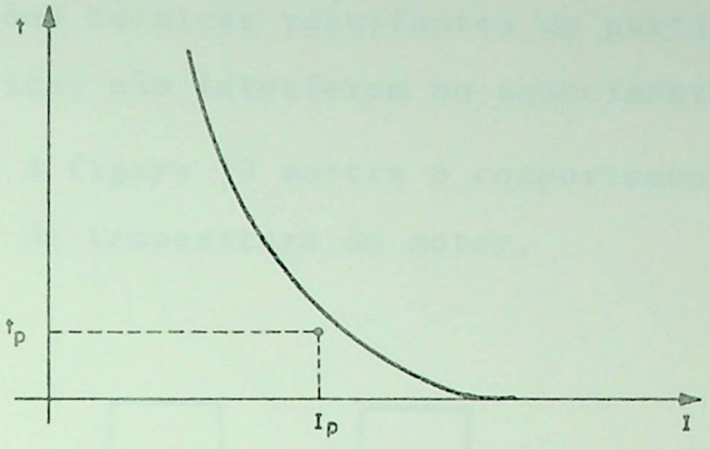


Figura 9 - Escolha do fusível para operação de curta duração.

Relé Térmico

A escolha do relé térmico é semelhante a do fusível, ou seja, sua corrente de ajuste deve ser tal que não haja atuação para corrente de carga I_1 no tempo t_1 e para corrente de partida I_p no tempo de partida t_p.

Disjuntor

Valem as mesmas observações feitas para o contator.

II.3 *Operação Intermitente S3.*

II.3.1 *Especificação do motor .*

Esta operação é composta de uma série de períodos iguais, cada um contendo um tempo com carga constante, seguido de um desligamento durante o qual a temperatura do mo

tor não cai para o valor correspondente à temperatura ambiente. As solicitações térmicas resultantes da partida e frenagem, quando elétrica, não interferem no aquecimento.

A figura 10 mostra o comportamento da potência, das perdas e da temperatura do motor.

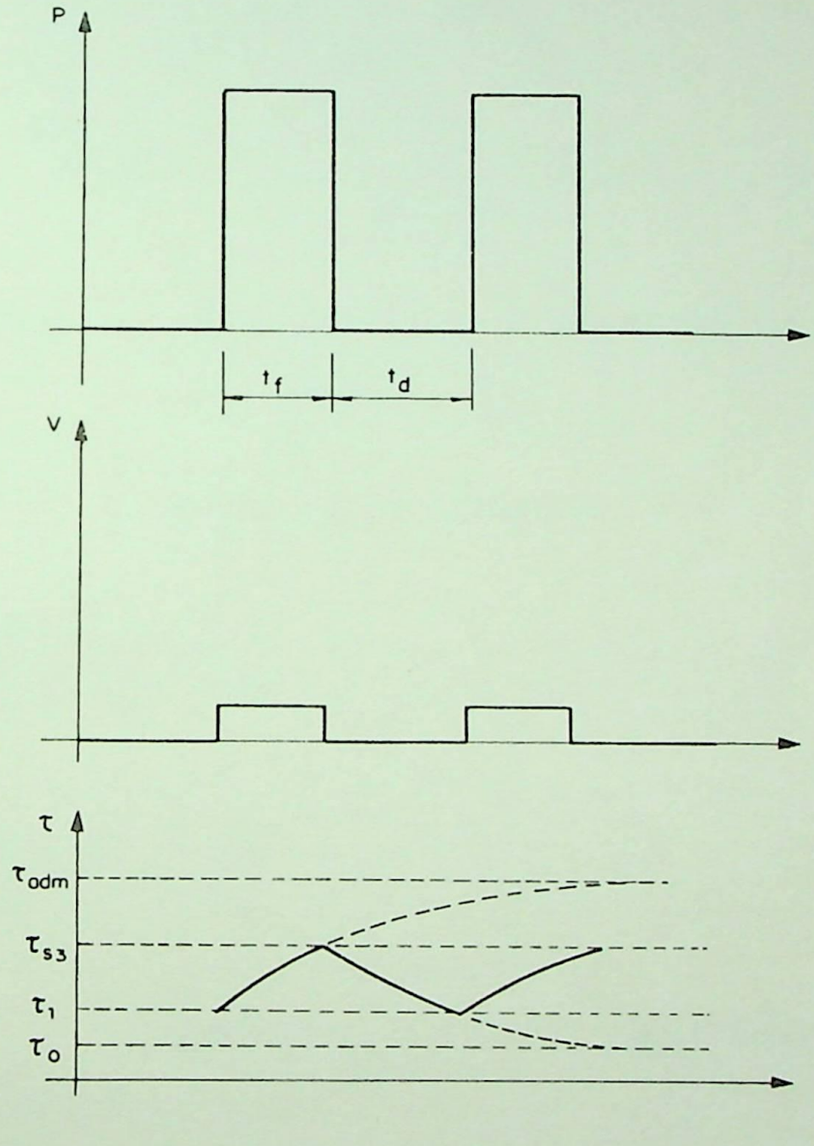


Figura 10 - Operação Intermitente S3

Este tipo de operação é caracterizado por:

$t_f < 3T_A$

$t_d < 3T_R$

Como este tipo de operação se caracteriza por tempos de funcionamento e desligamento pequenos, o comportamento da temperatura pode ser representado conforme a figura 11.

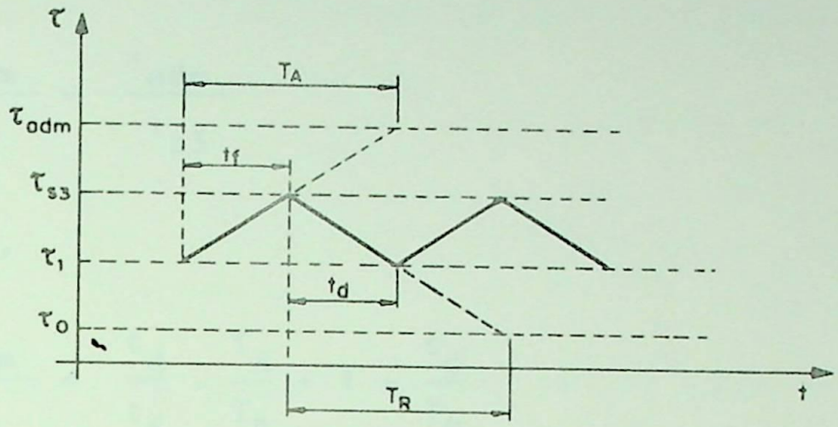


Figura 11 - Comportamento da temperatura do motor para operação S3.

Da figura 11 obtem-se:

$$\frac{\tau_{adm} - \tau_1}{\tau_{s3} - \tau_1} = \frac{T_A}{t_f}$$

$$\frac{\tau_{s3} - \tau_o}{\tau_{s3} - \tau_1} = \frac{T_R}{t_d}$$

Tomando-se $\tau_o = 0$ e comparando-se as duas equações, tem-se:

$$\frac{\tau_{adm}}{\tau_{s3}} = \frac{t_d}{T_R} \cdot \frac{T_A}{t_f} + 1 - \frac{t_d}{T_R} \qquad (56)$$

A linearização das equações permite concluir que as temperaturas são proporcionais às perdas, ou seja τ_{s3}

é proporcional às perdas nominais e τ_{adm} é proporcional às perdas máximas admissíveis que podem ocorrer no tempo de operação t_f.

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \frac{\tau_{adm}}{\tau_{s3}}$$

Desta forma,

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \frac{t_d}{t_f} \cdot \frac{T_A}{T_R} + 1 - \frac{t_d}{T_R} \qquad (57)$$

Para o regime intermitente S3 é comum definir-se o tipo de funcionamento do motor em termos de uma grandeza denominada intermitência.

$$G = \frac{t_f}{t_f + t_d} \qquad (58)$$

G - intermitência ou grau de intermitência

A expressão (57) também pode ser escrita

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \frac{t_d}{t_f} \cdot \frac{T_A}{T_R} + 1 - \frac{t_d}{T_R} \cdot \frac{T_A}{T_A} \cdot \frac{t_f}{t_f}$$

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \frac{t_d}{t_f} \cdot \frac{T_A}{T_R} + 1 - \frac{T_A}{T_R} \cdot \frac{t_d}{t_f} \cdot \frac{t_f}{T_A}$$

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \left(\frac{1}{G} - 1\right) \frac{T_A}{T_R} + 1 - \left(\frac{1}{G} - 1\right) \frac{T_A}{T_R} \cdot \frac{t_f}{T_A}$$

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \left(\frac{1}{G} - 1\right) \frac{T_A}{T_R} \left(1 - \frac{t_f}{T_A}\right) + 1 \qquad (59)$$

Deve-se observar que para conclusão da expressão (59), foi considerado

$$t_f < T_A$$

$$t_d < T_R$$

portanto, esta expressão somente é válida para estas condições.

A seguir está indicada uma tabela que fornece a relação V_{adm}/V_N em função da intermitência G e da relação t_f/T_A. Para elaboração da tabela foi tomado:

$$\frac{T_R}{T_A} = 1,5$$

TABELA 18 - Relação entre as perdas admissíveis e as nominais para operação S3.

	V_{adm}/V_N			
t_f/T_A	G=0,25	G=0,40	G=0,60	G=0,80
0,2	2,60	1,80	1,36	1,13
0,4	2,20	1,60	1,27	1,10
0,5	2,00	1,50	1,22	1,08
0,6	1,80	1,40	1,18	1,07
0,8	1,40	1,20	1,09	1,03

Da mesma forma que para operação S2 o aumento admissível das perdas poderá ser usado para:

- permitir o funcionamento do motor com potência aci

ma da nominal;

- permitir a operação do motor com velocidade abaixo da nominal e carga nominal.

II.3.1.1 Funcionamento do motor com potência acima da nominal.

Neste caso, a condição de operação permite uma análise semelhante àquela feita para a operação S2.

Levando-se então em conta as equações (44), (45), (46) e (47), obtem-se:

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{(\frac{V_{adm}}{V_N}) - K_o}{1 - K_o}}$$

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{(\frac{1}{G} - 1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1 - \frac{t_f}{T_A}) + 1 - K_o}{1 - K_o}} \qquad (60)$$

A expressão (60) fornece a potência admissível de operação do motor para as condições do regime S3.

A tabela a seguir fornece a relação entre a potência admissível e a potência nominal do motor em função da intermitência G, da relação entre as perdas a vazio e as perdas nominais K_o e da relação entre o tempo de funcionamento e a constante de tempo de aquecimento.

Da mesma forma que para operação de curta duração, verificada a sobrecarga admissível, deve-se analisar o comportamento do motor em função da solicitação mecânica. Esta análise é feita conforme a equação (50).

TABELA 19 : Relação entre a potência admissível e a nominal para operação S3

P_{adm}/P_N

t_f/T_A \ K_o	G = 0,25						G = 0,4						G = 0,6						G = 0,8					
	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
0,2	1,77	1,81	1,86	1,91	1,98	2,05	1,44	1,46	1,49	1,53	1,57	1,61	1,22	1,23	1,25	1,26	1,29	1,31	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12
0,4	1,61	1,65	1,69	1,73	1,78	1,84	1,34	1,36	1,39	1,41	1,45	1,48	1,17	1,18	1,19	1,20	1,22	1,24	1,06	1,07	1,07	1,08	1,09	1,10
0,5	1,53	1,56	1,59	1,63	1,68	1,73	1,29	1,31	1,33	1,35	1,38	1,41	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,20	1,05	1,06	1,06	1,06	1,07	1,08
0,6	1,44	1,46	1,49	1,53	1,57	1,61	1,24	1,25	1,27	1,29	1,31	1,34	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,17	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
0,8	1,24	1,25	1,27	1,29	1,31	1,34	1,13	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,09	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03

II.3.1.2 Funcionamento do motor com velocidade menor que a nominal.

A análise para este caso é semelhante àquela feita para operação de curta duração S2. Valem aqui as equações (52) e (53).

A velocidade mínima de operação do motor é dada por:

$$n = n' - (n'-n_N) \quad \frac{\frac{V_{adm}}{V_N} \cdot \frac{1}{f_v} - K_o}{1 - K_o}$$

$$n = n' - (n'-n_N) \quad \frac{\left[\left(\frac{1}{G} - 1\right)\frac{T_A}{T_R}\left(1 - \frac{t_f}{T_A}\right) + 1\right] \cdot \frac{1}{f_v} - K_o}{1 - K_o}$$

(61)

II.3.2 Especificação dos componentes de comando e proteção.

A diferença básica na especificação dos componentes como contator, relé térmico e disjuntor, em relação a operação de curta duração, está no tempo de desligamento que para operação intermitente S3 é pequeno.

Contator

Em termos de corrente nominal, o contator poderá ter uma corrente menor que a corrente de carga do motor.O procedimento para definição do contator é o seguinte:

- determina-se o valor eficaz da corrente durante o tempo de carga

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_1^2 . t_p + I_1^2 . t_1}{t_f}}$$

I_1 - corrente de operação do motor durante t_1

t_1 - tempo de carga constante = $t_f - t_p$

- a determinação da corrente nominal do contator a partir deste valor eficaz é feita em função da intermitência G da operação. O fabricante deverá fornecer tabelas que definam a corrente de regime do contator em função da intermitência G;
- escolhido o contator, que poderá ser menor que o contator correspondente para mesma corrente de regime, porém para operação contínua, deve-se verificar se o mesmo satisfaz a capacidade de interrupção exigida pelo circuito e é coerente com o fusível escolhido para proteção contra curto-circuito.

Fusível

Para qualquer tipo de operação deve-se procurar escolher o menor fusível possível para garantir também a escolha mais econômica dos componentes por eles protegidos. Principalmente para operações que resultem na possibilidade de redução do tamanho do contator, este critério de escolha do fusível torna-se mais importante.

Recomenda-se para este tipo de operação o mesmo critério adotado para a operação S2.

Relé Térmico

O relé térmico é um equipamento bastante sensível à operação intermitente. Sucessivas partidas podem provocar atuação do relé sem que haja ocorrido qualquer sobrecarga.

O relé térmico deve ser escolhido inicialmente como se a operação fosse contínua.

É definida uma faixa de ajuste, uma corrente de ajuste e verificado tanto o fusível máximo admissível quanto a condição de partida (I_p, t_p).

Em seguida deve ser verificado se o relé escolhido pode operar sem que ocorra atuação indevida. Esta verificação é feita em função do comportamento térmico do relé, definido pelo fabricante. Para este tipo de operação também podem ser usados termistores.

Disjuntor

Valem as mesmas considerações feitas para contatores.

II.4 Operação Intermitente S4

II.4.1 Especificação do motor

Esta operação é composta de uma série de períodos iguais, cada um contendo um tempo de partida sensível ,

um tempo de operação com carga constante, seguido de um intervalo de tempo onde o motor permanece desligado. A figura 12 mostra o comportamento da potência, das perdas e da temperatura do motor.

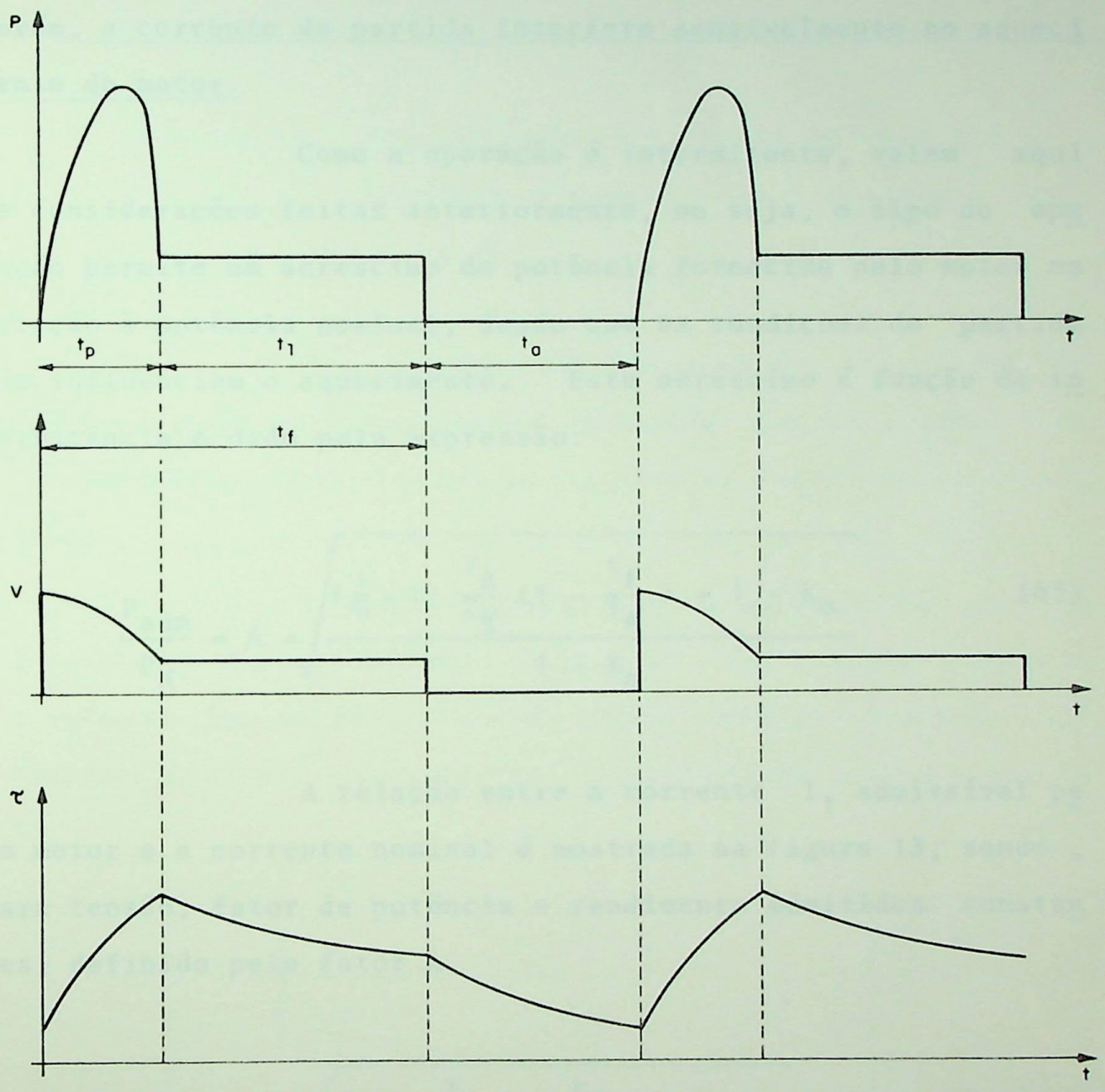


Figura 12 - Operação Intermitente S 4

O comportamento do acionamento neste caso é semelhante ao da operação S 3 , ou seja:

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Biblioteca
MAUÁ
B M
de Itajubá - EFEI

$$t_f < 3\ T_A \qquad (62.a)$$

$$t_d < 3\ T_R$$

porém, a corrente de partida interfere sensivelmente no aquecimento do motor.

Como a operação é intermitente, valem aqui as considerações feitas anteriormente, ou seja, o tipo de operação permite um acréscimo de potência fornecida pelo motor em relação à potência nominal, desde que as condições de partida não influenciem o aquecimento. Este acréscimo é função da intermitência e dado pela expressão:

$$\frac{P_{adm}}{P_N} = A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{G} - 1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1 - \frac{t_f}{T_A}) + 1 - K_o}{1 - K_o}} \qquad (63)$$

A relação entre a corrente I_1 admissível pelo motor e a corrente nominal é mostrada na figura 13, sendo , para tensão, fator de potência e rendimento admitidos constantes, definida pelo fator A.

$$\frac{I_1}{I_N} = A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{G} - 1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1 - \frac{t_f}{T_A}) + 1 - K_o}{1 - K_o}} \qquad (64)$$

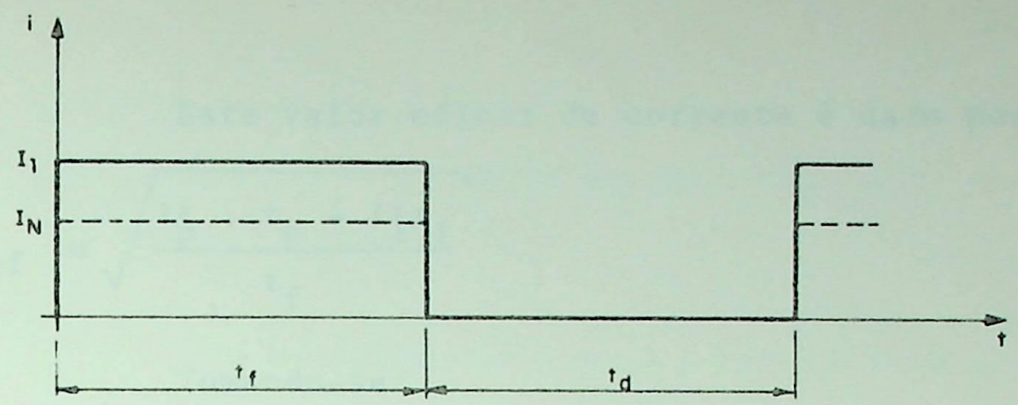


Figura 13 - Relação entre a corrente de operação e a corrente nominal do motor definida pelo fator A.

Na operação intermitente S 4 a corrente de carga não pode ser considerada constante durante o tempo de funcionamento, pois a condição de partida interfere no aquecimento.

Como o valor eficaz da corrente de partida é constante durante o tempo de partida, vai resultar durante o tempo de funcionamento uma corrente variável, que pode ser representada pelo valor eficaz I_{ef}, conforme mostra a figura 14.

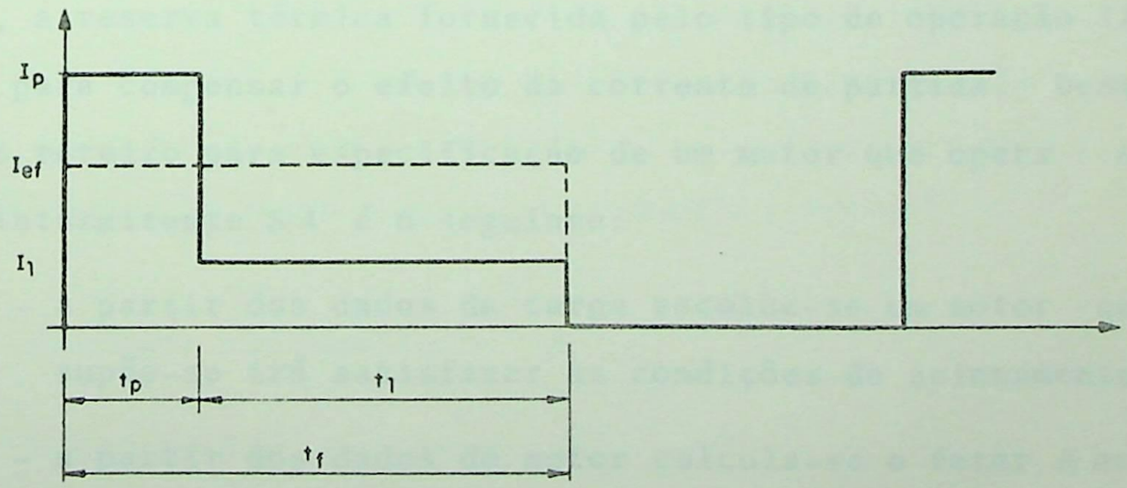


Figura 14 - Comportamento da corrente durante o tempo de funcionamento t_f.

Este valor eficaz de corrente é dado por:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_p^2 \cdot t_p + I_1^2 t_1}{t_f}} \qquad (65)$$

Tomando-se:

$$I_p = p\ I_N$$

$$I_1 = f.I_N$$

resulta

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{p^2 \cdot t_p + f^2 . t_1}{t_f}} \qquad (66)$$

É fácil concluir que um determinado motor será adequado à operação, se a equação (66) satisfizer a condição

$$\frac{I_{ef}}{I_N} \leq A \qquad (67)$$

ou seja, a reserva térmica fornecida pelo tipo de operação (A) é usada para compensar o efeito da corrente de partida. Desta forma, o roteiro para especificação de um motor que opera em regime intermitente S 4 é o seguinte:

- a partir dos dados da carga escolhe-se um motor que supõe-se irá satisfazer as condições do acionamento;
- a partir dos dados do motor calcula-se o fator A através da expressão (64);
- calculado o tempo de partida do motor, verifica-se se

a condição da equação (67) é satisfeita. Caso isto não ocorra, deve-se escolher um motor maior e refazer a verificação.

Do método estabelecido, verifica-se que a escolha de um motor que apresente o menor tempo de partida é muito importante, pois o tempo de partida influi diretamente na definição da potência do motor.

Se as equações (64) e (66) são combinadas, resulta a condição que o motor deve satisfazer para atender o acionamento

$$\frac{(\frac{1}{G} - 1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1 - \frac{t_f}{T_A}) + 1 - K_o}{1 - K_o} \geq \frac{p^2 t_p + f^2 t_1}{t_f} \qquad (68)$$

II.4.2 *Especificação dos componentes de comando e proteção*

A análise feita e os critérios estabelecidos para a operação S 3 também são válidos para operação S 4 , uma vez que em ambos os casos são consideradas as condições de partida para especificação dos componentes de comando e proteção.

II.5 *Operação Intermitente S5*

II.5.1 *Especificação do motor*

Esta operação é composta de uma série de períodos iguais, cada um contendo um tempo de partida sensível,

um tempo com carga constante, um tempo com frenagem elétrica seguido de um desligamento, conforme mostra a figura 15.

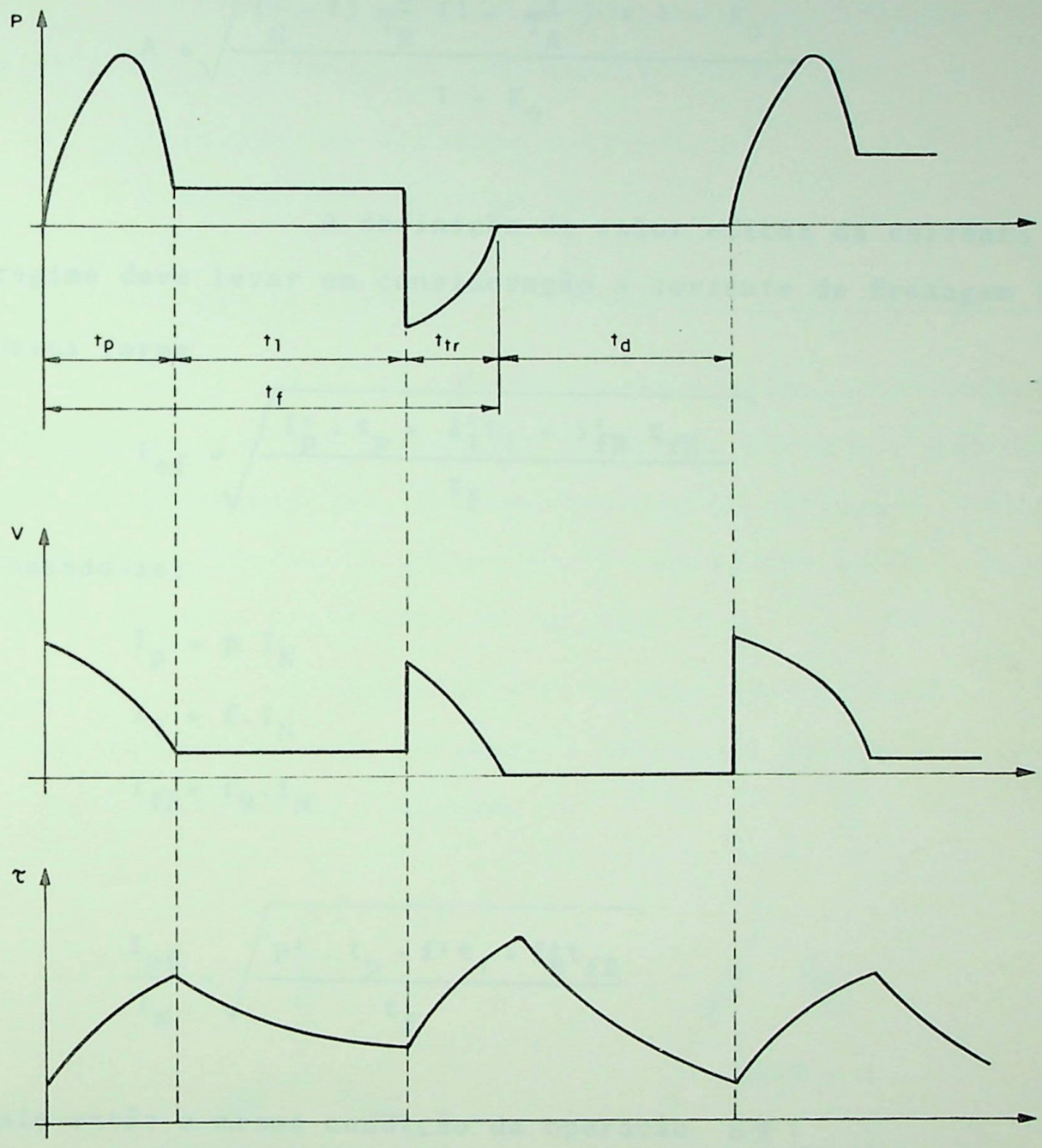


Figura 15 - Operação Intermitente S 5 .

Neste caso, vale a mesma análise feita para operação intermitente S 4, devendo-se apenas considerar adicionalmente a influência da frenagem no aquecimento do motor.

Desta forma, o fator A é o mesmo considerado

anteriormente para operação S 3.

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{G} - 1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1 - \frac{t_f}{T_A}) + 1 - K_o}{1 - K_o}}$$

A definição do valor eficaz da corrente de regime deve levar em consideração a corrente de frenagem I_{fR}. Desta forma,

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_p^2 \cdot t_p + I_1^2 t_1 + I_{fR}^2\ t_{fR}}{t_f}} \qquad (69)$$

Tomando-se:

$$I_p = p\ I_N$$

$$I_1 = f \cdot I_N$$

$$I_{fR} = f_R \cdot I_N$$

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{p^2 \cdot t_p + f^2 t_1 + f_R^2 t_{fR}}{t_f}} \qquad (70)$$

Vale então a mesma condição da operação S 4 :

$$\frac{I_{ef}}{I_N} \leq A$$

O roteiro para escolha é o mesmo indicado para operação S 4.

II.5.2 - Considerações sobre a frenagem elétrica:

Existem dois métodos mais usuais para frenagem elétrica de motores de indução trifásicos:

- frenagem com corrente contínua.
- frenagem por inversão de fases.

a) Frenagem com corrente contínua

A aplicação de tensão contínua constante nos enrolamentos do motor de indução trifásico, provoca um campo magnético estacionário. O comportamento do conjugado durante a frenagem em função da velocidade é semelhante ao do conjugado motor durante o processo de aceleração.

A figura 16 mostra para dois tipos de conexão dos enrolamentos do estator, a aplicação de tensão contínua para obtenção da frenagem.

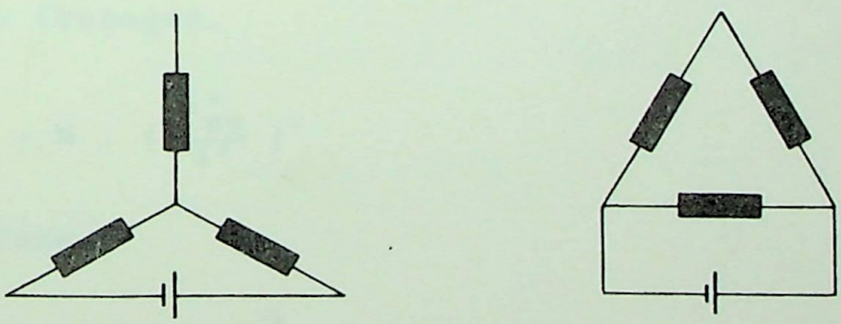


Figura 16 - Aplicação de tensão contínua no enrolamento do estator.

A aplicação da tensão contínua nos enrolamentos ligados em estrêla, resulta a circulação da corrente contínua de frenagem I_{fR}, que produz a força magneto-motriz:

$$F_{MM} = 2.I_{fR}.N.\cos 30^{o} = \sqrt{3} \cdot I_{fR}.N$$

onde:

N - número de espiras por fase do enrolamento.

A corrente alternada por fase que produz a mesma força magneto-motriz nos enrolamentos será:

$$F_{MM} = \frac{3}{2} \sqrt{2} \cdot I^{*}_{eq} \cdot N$$

Desta forma, a corrente alternada equivalente por fase é dada pela relação

$$I_{fR} = 1,23\ I^{*}_{eq}$$

Através da expressão da potência mecânica fornecida pelo motor, pode-se concluir que o conjugado motor M é proporcional ao quadrado da corrente do estator I'. Desta forma pode-se estabelecer uma relação entre a curva de aceleração e a curva de frenagem.

$$M_{fr} = M \cdot \left(\frac{I^{*}_{eq}}{I^{*}} \right)^{2}$$

* valor na fase

Como I^{*}_{eq} é constante, pode-se obter a curva $M_{fR} = f(n)$, conhecendo-se o comportamento de M e de I* em função de n. O processo é trabalhoso e pode ser simplificado calculando-se apenas o valor inicial do conjugado de frenagem. Desta forma, para:

$$M = M_p$$

$$I^* = I_p^*$$

tem-se

$$M_{fR} = M_p \left(\frac{I_{ef}}{I_p^*}\right)^2$$

Como o conjugado de frenagem é variável em função da velocidade, pode-se admitir um valor médio em função do valor inicial.

$$M_{fR(médio)} = b.M_{fR}$$

b - fator que depende do tipo do motor (vide Apêndice).

Se durante a frenagem o conjugado da carga contribui atuando contra o movimento, tem-se:

$$M_{fR(médio)} = b \cdot M_{fR} + M_{C(M)}$$

Considerando-se a inércia do conjunto,

$$M_{fR(médio)} = \frac{2\Pi J.n_N}{60 \cdot t_{fR}}$$

Desta forma, obtem-se:

$$I_{eq}^* = I_p^* \sqrt{\frac{\frac{2\Pi J n_N}{60 t_{fR}} - M_{C(M)}}{b.M_p}}$$

ou ainda:

$$I_{fR} = 1,23\ I_p^* \sqrt{\frac{\frac{2\pi J n_N}{60.t_{fR}} - M_{C(M)}}{b.M_p}} \qquad (71)$$

I_p^* - valor na fase da corrente de partida

Observação:

- Para os enrolamentos ligados em triângulo, vale

$$I_{fR} = 2,12\ I_p^* \sqrt{\frac{\frac{2\pi J n_N}{60.t_{fR}} - M_{C(M)}}{b.M_p}} \qquad (72)$$

b) *Frenagem por inversão de fases*

Na frenagem por inversão de fases, o conjugado motor produzido em relação ao conjugado de partida, pode ser obtido através das expressões

$$\frac{M_p}{M_K} = \frac{2}{\frac{1}{s_k} + s_k} \qquad \frac{M_{fR}}{M_p} = \frac{\frac{1}{s_k} + s_k}{\frac{2}{s_k} + \frac{s_k}{2}}$$

$$\frac{M_{fR}}{M_K} = \frac{2}{\frac{2}{s_k} + \frac{s_k}{2}} \qquad \frac{M_{fR}}{M_p} = \frac{2(1 + s_k^2)}{4 + s_k^2} \qquad (73)$$

Com relação a corrente de frenagem, desprezando-se a corrente de magnetização, pode-se escrever a partir do circuito equivalente, para os instantes iniciais de partida e frenagem:

$$I_p = \frac{\bar{E}''_o}{\sqrt{\bar{R}''^2 + \bar{X}''^2_o}}$$

$$I_{fR} = \frac{\bar{E}''_o}{\sqrt{\left(\frac{\bar{R}''}{2}\right)^2 + \bar{X}''^2_o}}$$

onde:

$\bar{R}''$ - resistência por fase do rotor referida ao estator

$\bar{X}''_o$ - reatância de partida por fase do rotor referida ao estator

$\bar{E}''_o$ - tensão de partida do rotor referida ao estator

ou ainda,

$$\frac{I_p}{I_{fR}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\bar{R}''^2 + 4\bar{X}''^2_o}{\bar{R}''^2 + \bar{X}''^2_o}} \qquad (74.a)$$

A partir da expressão (74a) conclui-se que a relação entre as correntes de frenagem e de partida vai depender dos valores de $\bar{R}''$ e de $\bar{X}''_o$. Considerando-se que o comportamento das correntes ao longo do processo é semelhantes e que para motor normais:

$$\bar{X}''_o \sim 1{,}5\ \bar{R}''$$

tem-se, para os valores eficazes:

$$I_{fR} \sim 1{,}3\ I_p$$

O tempo de frenagem pode ser determinado a

partir da expressão (11), considerando-se:

$$M_A = M_{fR} + M_{C(M)}$$

$$t_{fR} = \frac{2\Pi J n_N}{60 (M_{fR} + M_{C(M)})} \qquad (74.b)$$

11.5.3 Especificação dos Componentes de Comando e Proteção

Para contatores, fusíveis e disjuntores, valem os mesmos critérios de especificação adotados para operação S 4, sendo que deve-se levar em consideração ao determinar - se a corrente eficaz I_{ef}, a corrente e o tempo de frenagem.

Relé Térmico

Para escolha do relé térmico o critério é o mesmo que para a operação S 3.

11.6 Operação Contínua com Carga Intermitente S6

11.6.1 Especificação do motor

Esta operação é composta de uma série de períodos iguais, cada um contendo um tempo de carga constante e um tempo de funcionamento a vazio, sem desligamento, conforme mostra a figura 17.

Trata-se aqui de um tipo de operação semelhante a operação S3, porém sem desligamento do motor.

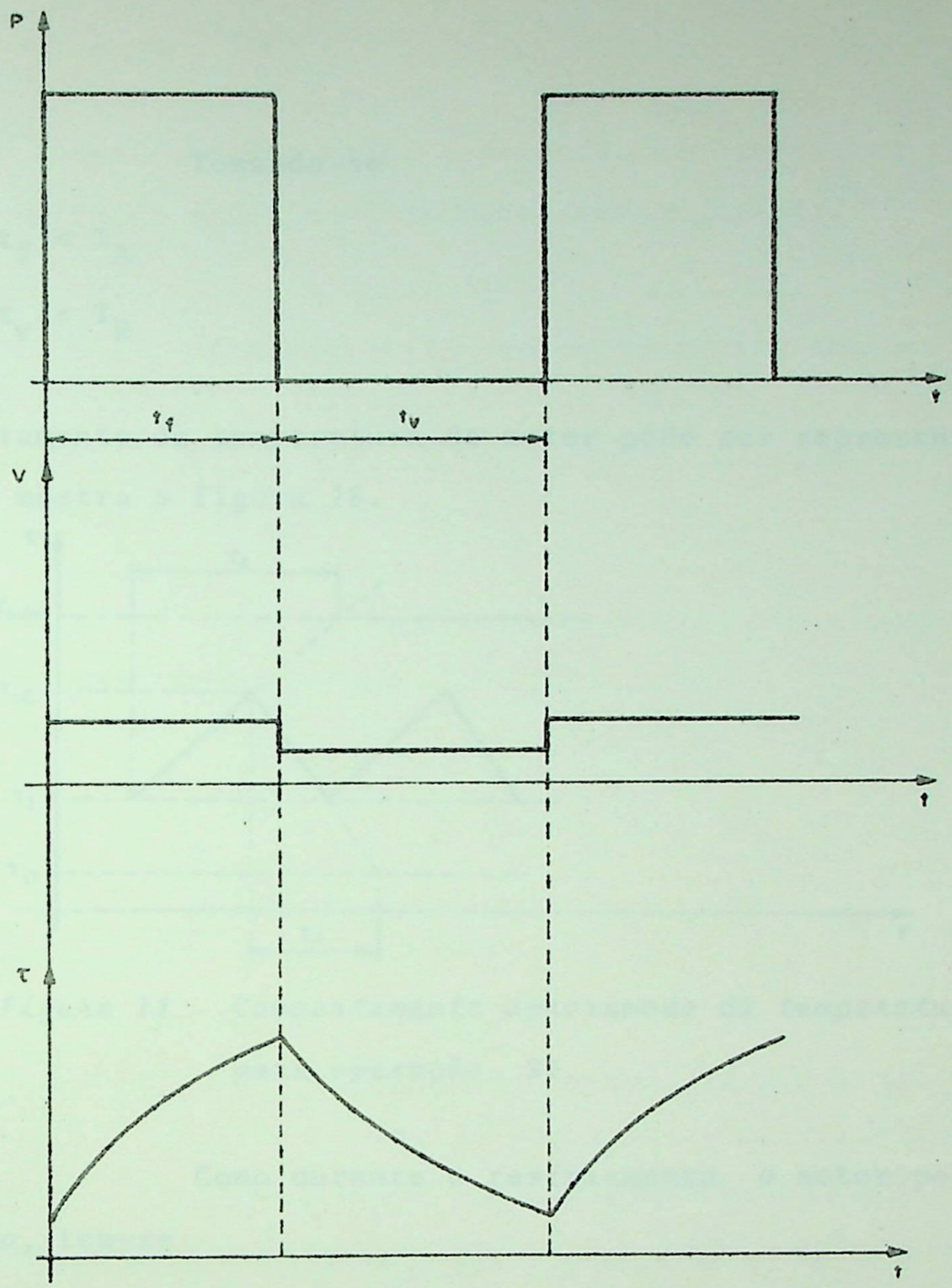


Figura 17 - Operação Contínua com Carga Intermitente S6

O resultado é a possibilidade de utilização em alguns casos, de um motor com potência menor que a exigida pela carga, como nas operações S2 e S3, conforme mostra a análise a seguir.

Tomando-se

$$t_f < T_A$$

$$t_v < T_R$$

o comportamento da temperatura do motor pode ser representado conforme mostra a figura 18.

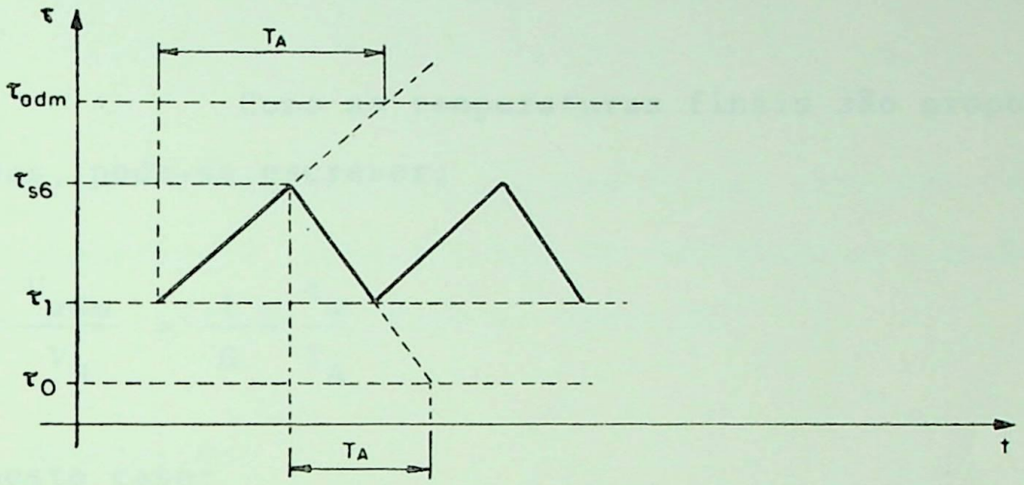


Figura 18 - Comportamento aproximado da temperatura para operação S6.

Como durante o resfriamento o motor permanece ligado, tem-se

$$T_R = T_A$$

Da figura 18 podem ser obtidas as equações

$$\tau_1 = \tau_{s6} - (\tau_{s6} - \tau_o) \frac{t_v}{T_A}$$

$$\tau_{s6} = \tau_1 + (\tau_{adm} - \tau_1) \frac{t_f}{T_A}$$

ou ainda

$$\tau_{s6} = \tau_{s6} - (\tau s_6 - \tau_o) \frac{t_v}{T_A} + (\tau_{adm} - \tau_1) \frac{t_f}{T_A}$$

$$\tau_{s6} = \tau_{s6} - (\tau_{s6}-\tau_o)\frac{t_v}{T_A} + [\tau_{adm}-\tau_{s6}+(\tau_{s6}-\tau_o)\frac{t_v}{T_A}]\frac{t_f}{T_A}$$

Tomando-se τ_o como referência, tem-se:

$$\frac{\tau_{adm}}{\tau_{s6}} = 1 + \frac{t_v}{t_f} - \frac{t_v}{T_A}$$

Como as temperaturas finais são proporcionais às perdas, pode-se escrever:

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \frac{1}{G} - \frac{t_v}{T_A} \qquad (75)$$

onde, neste caso:

$$G = \frac{t_f}{t_v + t_f}$$

Como o motor funciona permanentemente, o aquecimento provocado pelas perdas a vazio pode ser tomado como referência e o acréscimo admissível de perdas é proporcional apenas às perdas no cobre.

Desta forma;

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{1}{G} - \frac{t_v}{T_A}} \qquad (76)$$

A tabela 20 a seguir, indica para diversos valores de intermitência e valores da relação t_v/T_A a relação entre a potência admissível e a potência nominal do motor.

$\frac{t_v}{T_A}$	P_{adm}/P_N			
	G=0,25	G=0,40	G=0,60	G=0,80
0,2	1,95	1,51	1,21	1,02
0,4	1,89	1,45	1,13	-
0,5	1,87	1,41	1,08	-
0,6	1,84	1,38	1,03	-
0,8	1,78	1,30	-	-

Os valores não indicados, correspondem a situações impossíveis, pois o tempo de funcionamento resultante não atende à condição do tipo de operação.

Observação:

Apesar de não ter sido feita a análise, este tipo de operação permite que o motor possa funcionar com velocidade menor que a nominal, como nas operações S2 e S3. A análise é semelhante a feita para estes casos, resultando como velocidade mínima:

$$n = n' - (n'-n_N) \frac{(\frac{1}{G} - \frac{t_v}{T_A}) \frac{1}{f_v} - K_o}{1 - K_o} \qquad (77)$$

11.6.2 Especificação dos componentes de comando e proteção

Os critérios para especificação dos componentes de comando e proteção são semelhantes aos estabelecidos anteriormente, levando-se em conta que neste caso não ocorre so

licitação térmica resultante de partidas sucessivas.

Contator

A corrente no circuito é variável assumindo o valor correspondente a carga no eixo durante o tempo de funcionamento t_f e o valor correspondente a operação a vazio do motor durante o tempo t_v. A figura 19 mostra o comportamento da corrente do motor.

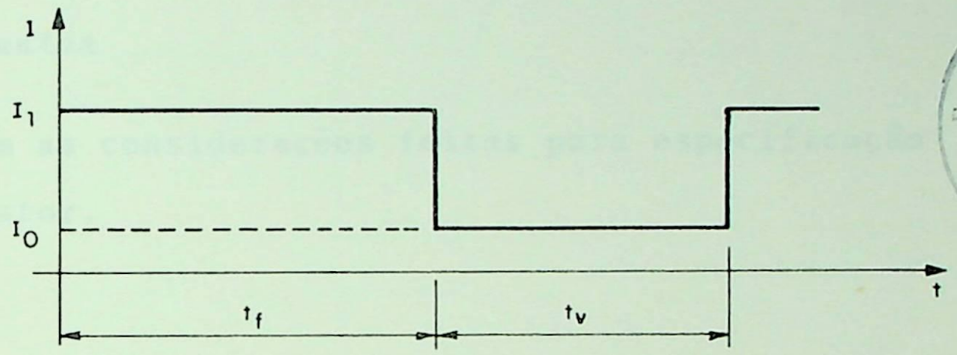


Figura 19 - Comportamento da corrente no motor para operação S6.

I_1 - corrente de operação do motor

I_o - corrente a vazio do motor

A influência da corrente a vazio I_o na definição da corrente nominal do contator vai depender da relação entre o tempo de funcionamento t_f e a constante de tempo de aquecimento do equipamento.

Como a constante de tempo de aquecimento destes componentes é muito pequena, na maioria dos acionamentos a corrente nominal do contator é a própria corrente de operação do motor. Deve-se ainda levar em consideração a capacidade de interrupção e a coerência com o fusível do circuito.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá Biblioteca

Fusível

Valem aqui as mesmas considerações feitas para operação S2.

Relé Térmico

Também neste caso são válidas as considerações feitas para operação S2.

Disjuntor

Valem as considerações feitas para especificação do contator.

II.7 *Operação Ininterrupta S7*

II.7.1 *Especificação do motor*

Esta operação é composta de uma série de períodos iguais, cada um contendo um tempo de partida sensível, um tempo de operação com carga constante e um tempo de frenagem elétrica, sem desligamento.

A figura 20 mostra o comportamento da potência, das perdas e da temperatura para este tipo de operação.

Comparando-se com a operação S5, verifica-se que para esta operação,

$$A = 1$$

Portanto, a corrente nominal do motor é definida pelo valor eficaz calculado a partir da expressão (70),ou

seja, o motor deve ser escolhido de tal modo que

$$\sqrt{\frac{p^2 t_p + f^2 t_1 + f^2 R t_{fR}}{t_f}} \leq 1 \qquad (79)$$

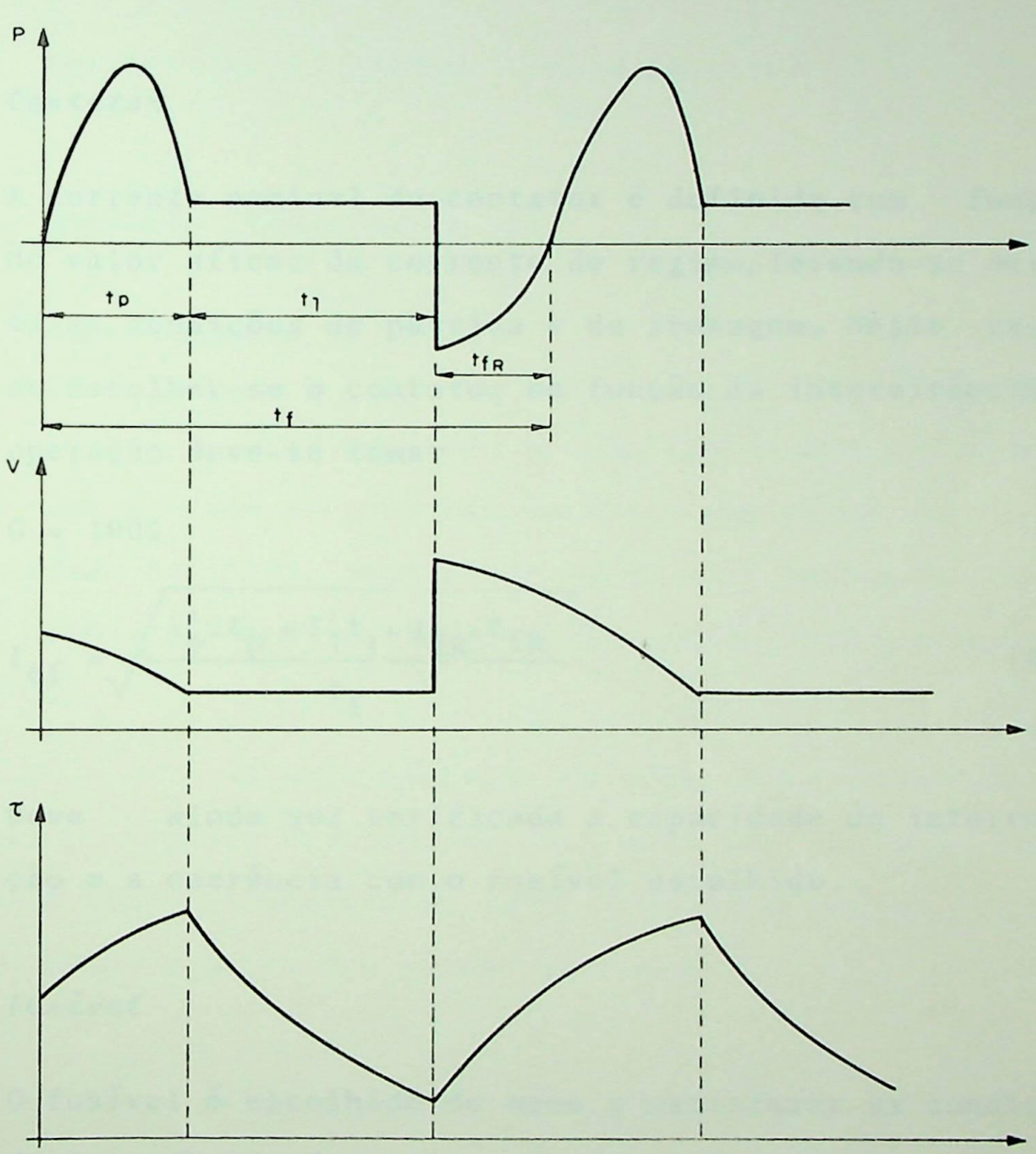


Figura 20 - Operação Ininterrupta S1

II.7.2 *Especificação dos componentes de comando e proteção*

Os critérios para especificação dos componentes de comando e proteção são semelhantes aos adotados para operação S5.

Contator

A corrente nominal do contator é definida com função do valor eficaz da corrente de regime, levando-se em conta as condições de partida e de frenagem. Neste caso, ao escolher-se o contator em função da intermitência da operação deve-se tomar

$G = 100\%$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_p^2 . t_p + I_1^2 t_1 + I_{fR}^2 . t_{fR}}{t_f}} \qquad (80)$$

Deve ainda ser verificada a capacidade de interrupção e a coerência com o fusível escolhido.

Fusível

O fusível é escolhido de modo a satisfazer as condições de partida, de frenagem e de operação com carga constante.

A corrente nominal do fusível não deve ser menor que I_{ef}.

Relé Térmico

A escolha do relé térmico é semelhante a sugerida para operação S5.

Disjuntor

Mesmo critério adotado para o Contator.

II.8 *Operação Ininterrupta S8*

II.8.1 *Especificação do motor*

Esta operação é composta de uma série de períodos iguais, cada um contendo um tempo com carga constante e velocidade definida, seguido de um ou mais intervalos de tempo com outros valores de carga e velocidade, conforme mostra a figura 21.

A especificação do motor para este tipo de operação é bastante trabalhosa, pois deve ser levado em consideração o tipo de controle de velocidade do motor, que vai definir o comportamento das perdas no motor.

II.8.1.1 *Tipos de controle de velocidade de motores de indução trifásicos com rotor em curto-circuito*

Existem basicamente duas possibilidades de controle de velocidade de motores de indução trifásicos com rotor em curto-circuito:

- variação da tensão aplicada no estator, (frequência mantida constante);
- variação de tensão e frequência.

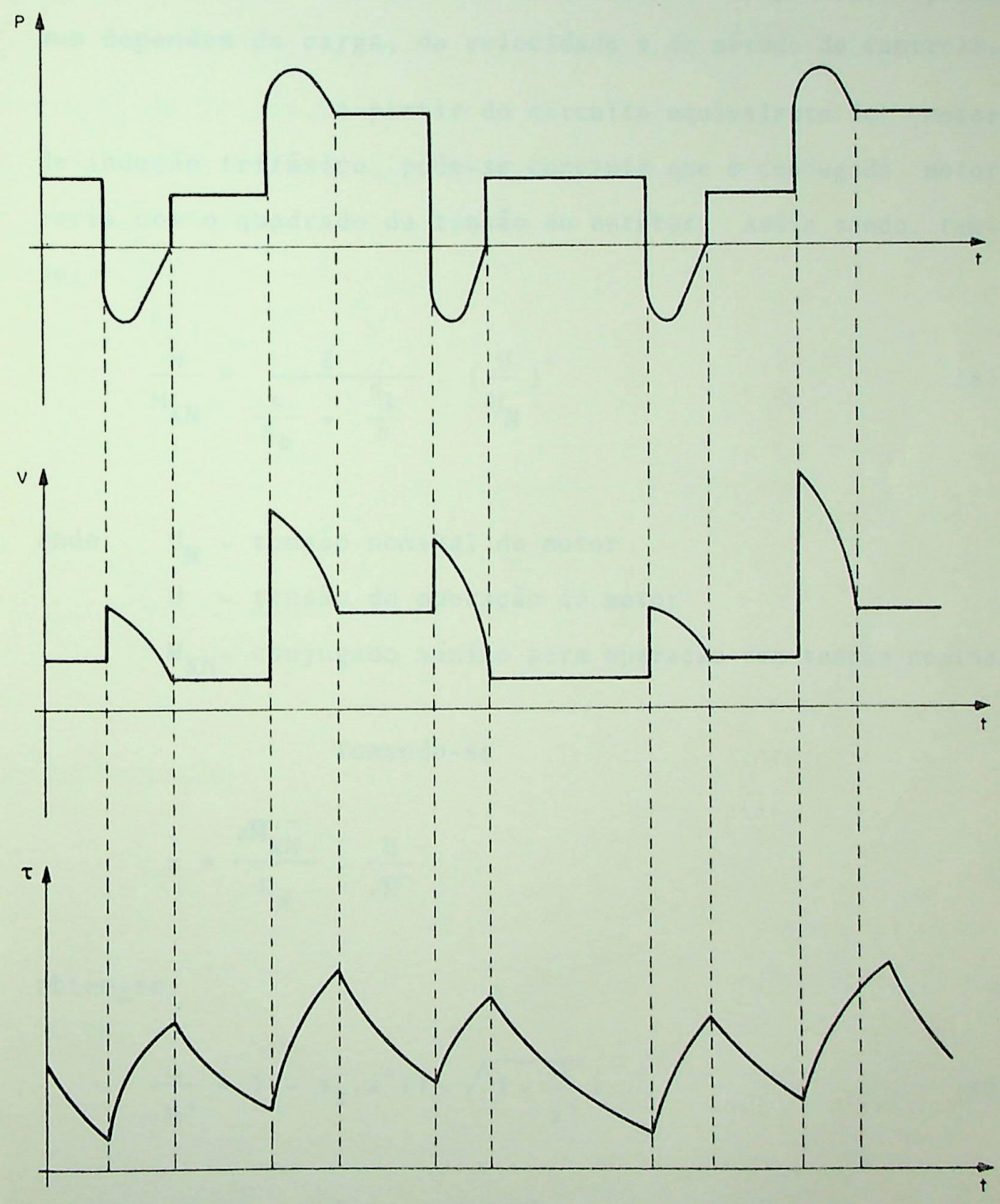


Figura 21 - Operação Ininterrupta S8

a) *Especificação do motor de indução trifásico controlado através de variação da tensão do estator*

A variação de velocidade do motor através de variação do valor eficaz da tensão do estator provoca perdas que dependem da carga, da velocidade e do método de controle.

A partir do circuito equivalente do motor de indução trifásico, pode-se concluir que o conjugado motor varia com o quadrado da tensão do estator. Assim sendo, tem-se:

$$\frac{M}{M_{KN}} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \cdot \left(\frac{U}{U_N}\right)^2 \qquad (81)$$

onde U_N - tensão nominal do motor

U - tensão de operação do motor

M_{KN} - conjugado máximo para operação com tensão nominal

Tomando-se

$$x = \frac{\sqrt{M_{KN}}}{U_N} \cdot \frac{U}{\sqrt{M}}$$

obtem-se:

$$\frac{n}{n'} = 1 - s_k \cdot x^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{x^4}}\right) \qquad (82)$$

Esta expressão permite concluir que, para mesma variação de tensão e mesma carga, quanto maior a resistên

cia do circuito do rotor (que corresponde a um s_k maior), menor a velocidade obtida. Desta forma, recomenda-se que os motores com controle de tensão do estator tenham resistência do rotor elevada, para obter-se uma faixa maior de variação de velocidade.

A expressão (81) permite ainda o cálculo da variação de tensão do estator para obtenção de uma certa velocidade. Para as condições nominais, tem-se:

$$\frac{M_N}{M_{KN}} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_k} + \frac{s_k}{s_N}}$$

Para o escorregamento s desejado,

$$\frac{M}{M_{KN}} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \cdot \left(\frac{U}{U_N}\right)^2$$

obtem-se então:

$$\frac{M_N}{M} = \frac{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}{\frac{s_N}{s_k} + \frac{s_k}{s_N}} \cdot \left(\frac{U_N}{U}\right)^2$$

ou ainda:

$$\frac{U}{U_N} = \sqrt{\frac{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}{\frac{s_N}{s_k} + \frac{s_k}{s_N}} \cdot \left(\frac{M}{M_N}\right)} \qquad (83)$$

Conforme afirmado anteriormente, o comportamento das perdas no motor depende da carga, da velocidade e do método de controle. A seguir, é sugerido um roteiro para definição da potência do motor, necessária a cada trecho de operação do regime S8, a partir do tipo de carga e da faixa de variação de velocidade.

Inicialmente deve ser calculado o comportamento das perdas no circuito do rotor em função do tipo de carga e da velocidade.

O diagrama de fluxo de potência do motor de indução trifásico mostrado na figura 5 e as equações dele resultantes, permitem a obtenção das tabelas indicadas a seguir, que fornecem a potência transferida no entreferro P^*_{D1}, a potência mecânica P^*_M e as perdas V^*_2 no rotor em valores referidos à potência máxima transferida no entreferro para aquele tipo de carga.

$$P_{D1_b} = \frac{2\Pi n'}{60}.M \qquad (84)$$

P_{d1_b} - potência máxima transferida no entreferro, tomada como valor base.

n' - velocidade do campo girante.

M - conjugado motor desenvolvido para velocidade do campo girante.

$M = K \rightarrow$ carga constante

$M = Kn' \rightarrow$ carga varia linearmente com a velocidade

$M = Kn'^2 \rightarrow$ carga varia com o quadrado da velocidade

TABELA 21 - P^*_{D1} , P^*_M e V^*_2 para carga constante.

$$P_{D1_b} = \frac{2\Pi n'}{60} . K$$

$\frac{n}{n'}$	P^*_{D1}	P^*_M	$V^*_2 = P^*_{D1} - P^*_M$
0,9	1	0,9	0,1
0,8	1	0,8	0,2
0,7	1	0,7	0,3
0,6	1	0,6	0,4
0,5	1	0,5	0,5
0,4	1	0,4	0,6
0,3	1	0,3	0,7
0,2	1	0,2	0,8
0,1	1	0,1	0,9
0	1	0	1,0

TABELA 22 - P^*_{D1} , P^*_M e V^*_2 para carga que varia linearmente com a velocidade.

$$P_{D1_b} = \frac{2\Pi n'^2}{60} . K$$

$\frac{n}{n'}$	P^*_{D1}	P^*_M	$V^*_2 = P^*_{D1} - P^*_M$
0,9	0,9	0,81	0,09
0,8	0,8	0,64	0,16
0,7	0,7	0,49	0,21
0,6	0,6	0,36	0,24
0,5	0,5	0,25	0,25
0,4	0,4	0,16	0,24
0,3	0,3	0,09	0,21
0,2	0,2	0,04	0,16
0,1	0,1	0,01	0,09
0	0	0	0

TABELA 23 - P^*_{D1} , P^*_M e V^*_2 para carga que varia com o quadrado da velocidade.

$$P_{D1_b} = \frac{2\Pi n'^3}{60} \cdot K$$

$\frac{n}{n'}$	P^*_{D1}	P^*_M	$V^*_2 = P^*_{D1} - P^*_M$
0,9	0,81	0,730	0,08
0,8	0,64	0,510	0,13
0,7	0,49	0,340	0,15
0,6	0,36	0,216	0,144
0,5	0,25	0,125	0,125
0,4	0,16	0,064	0,096
0,3	0,09	0,027	0,063
0,2	0,04	0,008	0,032
0,1	0,01	0,001	0,009
0	0	0	0

A partir das tabelas 21, 22 e 23 obtem-se para uma determinada faixa de variação de velocidade e determinado tipo de carga, o valor máximo das perdas V^*_2 no cobre do rotor. Como estas perdas estão referidas à potência base P_{D1_b}, seu valor absoluto será

$$V_2 = V^*_2 \cdot P_{D1_b} \tag{85}$$

Definido o valor absoluto das perdas no circuito do rotor, pode-se calcular as perdas no cobre do estator. Desprezando-se a corrente de magnetização, tem-se:

$$V_{est} = V_2 \cdot \frac{R'}{R''} \tag{86}$$

R' - resistência do enrolamento do estator

$\overline{R}''$ - resistência do enrolamento do rotor, referida ao estator.

As perdas totais no cobre do motor serão:

$$\sum V = (1 + \frac{R'}{\overline{R}''}) \cdot V_2 \qquad (87)$$

A definição das perdas admissíveis pelo motor é feita levando-se em conta as perdas a vazio e o efeito da redução da refrigeração do motor devido a redução de velocidade.

$$V_{adm} = (\sum V + V_{vazio}) \cdot f_v \qquad (88)$$

onde: f_v - fator que leva em conta a redução de ventilação do motor devido a redução de velocidade.

V_{vazio} - perdas a vazio do motor a ser escolhido.

O fator f_v é função da velocidade de operação do motor, sendo definido pelo fabricante do motor em função do sistema de refrigeração e da classe de isolamento do motor.

As perdas a vazio do motor, podem ser definidas a partir da relação K_o entre as perdas nominais típicas para cada motor.

$$V_{vazio} = \sum V \frac{K_o}{1-K_o} \qquad (89)$$

Desta forma, a perda admissível pelo motor será:

$$V_{adm} = \sum V(1 + \frac{K_o}{1-K_o}) . f_v$$

$$V_{adm} = (1 + \frac{R'}{R''}) \; V_2 . (\frac{1}{1-K_o}) . f_v \qquad (90)$$

A potência do motor é definida pela relação:

$$P_N = V_{adm} \; \frac{\eta}{1-\eta}$$

onde

η - rendimento do motor

Do roteiro apresentado conclui-se que o processo é interativo, pois K_o e η dependem da potência nominal do motor.

A definição da potência do motor para atender o ciclo de carga e velocidade da operação S8, é feita conforme o seguinte roteiro:

- determina-se inicialmente a potência do motor necessária para cada valor de velocidade e de carga correspondente;
- a partir dos valores de potência encontrados P_{N1}, P_{N2}, ..., P_{Nn}, determina-se o valor eficaz da potência considerando-se os respectivos intervalos de tempo.

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{P_{N1}^2 . t_1 + P_{N2}^2 t_2 + \ldots + P_{Nn}^2 t_n}{\sum_{i=1}^{i=n} t_1}} \qquad (92)$$

- como o acionamento tem frequentes processos de frenagem e aceleração, deve-se verificar se o aquecimento daí resultante é admissível pelo motor. Para tal, determina-se inicialmente a corrente de carga do motor para cada valor de velocidade e carga através da expressão

$$I_i = \frac{P_i}{\sqrt{3} \cdot U_i \cdot \cos\psi_i \cdot \eta_i} \cdot f_v \qquad (93)$$

onde P_i - potência exigida pela carga

U_i - tensão de operação definida pela expressão (83) em função da velocidade do motor

η_i - rendimento do motor para a potência P_i

$\cos\psi_i$ - fator de potência do motor para a potência P_i

A corrente eficaz do motor durante o periodo de operação será:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 t_i + \sum_{i=1}^{i=n} I_{Ai}^2 t_{Ai} + \sum_{i=1}^{i=n} I_{fR_i}^2 t_{fR_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i + \sum_{i=1}^{i=n} t_{Ai} + \sum_{i=1}^{i=n} t_{fRi}}} \qquad (94)$$

onde I_i - corrente de carga do motor para cada valor de carga e velocidade;

I_{Ai} - corrente do motor no processo de aceleração;

I_{fRi} - corrente do motor no processo de frenagem.

O valor de corrente encontrado na expressão

(94), deverá ser menor ou igual a corrente nominal do motor definido pela potência P_{ef}.

Observações:

1. Atualmente, um dos métodos de controle de velocidade, através de variação da tensão do estator, é feito com tiristores em anti-paralelo ligados ao circuito do estator, conforme mostra a figura 22.

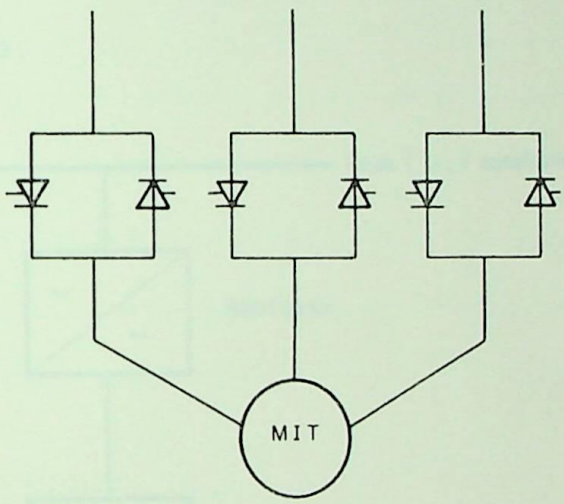


Figura 22 - Controle de velocidade do motor através de variação da tensão do estator com auxílio de tiristores em anti-paralelo.

Este tipo de controle tem como resultado, a aplicação de uma tensão não senoidal no motor, e consequentemente, a geração de harmônicos de tensão.

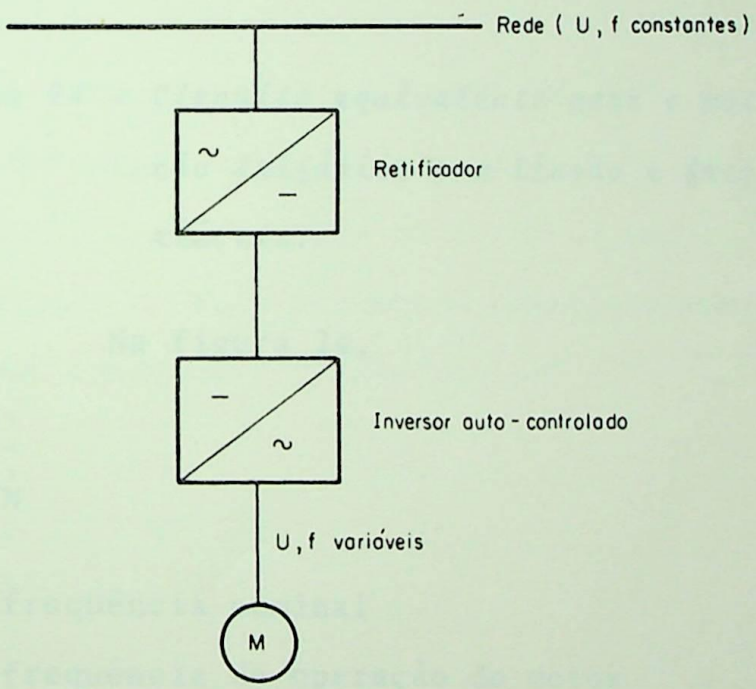
Os harmônicos de tensão influem diretamente nas perdas do motor, podendo provocar um sobreaquecimento adicional.

Conforme [1], no cálculo das perdas admissí

veis do motor, este acréscimo de perdas pode ser desprezado uma vez que o motor opera com fluxo menor que o nominal.

b) *Motor de indução trifásico controlado através de variação de tensão e frequência.*

O controle de velocidade através de variação da tensão e frequência do estator, é feito através de conjuntos "retificador-inversor auto-controlado", conectados à rede de tensão e frequência constantes. A figura 23 exemplifica o tipo de ligação.



Escola Federal de Engenharia de Icajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
B.M

Figura 23 - Alimentação do motor de indução trifásico com tensão e frequência variáveis.

O método de variação de velocidade, analisado anteriormente, resulta elevadas perdas no motor, provocando o seu sobredimensionamento. A análise a seguir, mostra o comportamento das perdas para o controle de tensão e

frequência.

O circuito equivalente do motor de indução trifásico, para tensão e frequência variáveis, conforme |1|, não levando-se em conta o efeito pelicular, é indicado na figura 24.

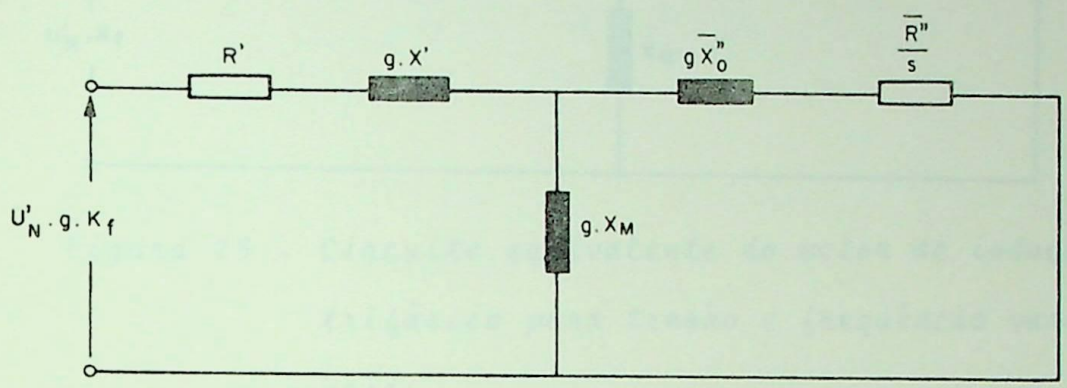


Figura 24 - Circuito equivalente para o motor de indução trifásico com tensão e frequência variáveis.

Na figura 24,

$$g = \frac{f'}{f'_N} \tag{95}$$

onde

f'_N - frequência nominal

f - frequência de operação do motor

Para que o fluxo do motor seja mantido constante no valor nominal, a tensão aplicada no estator será:

$$U' = U'_N \cdot g \cdot K_f \tag{96}$$

onde

U'_N - tensão nominal

K_f - fator de correção que leva em conta a queda de tensão no estator

Se no circuito da figura 24 todos os termos são divididos por g, obtem-se o circuito da figura 25.

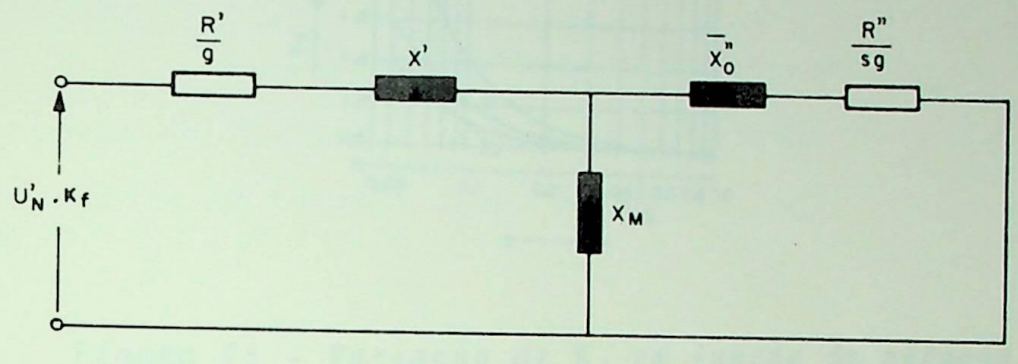


Figura 25 - Circuito equivalente do motor de indução trifásico para tensão e frequência variáveis.

No circuito da figura 25, para $g<1$, a resistência do estator passa a ter grande influência no comportamento do motor. Daí, a necessidade do fator de correção K_f para tensão, de modo que o fluxo permaneça constante para frequências baixas. Esta condição é satisfeita se:

$$K_f = \left| \frac{\frac{R'}{g} + j(X_M + X')}{R' + j(X_M + X')} \right| \qquad (97)$$

A figura 26 mostra os valores de K_f em função da relação de frequências g, para diversas relações entre a reatância e a resistência do estator.

Da figura 26 conclui-se, que para acionamentos que devem operar com frequência muito baixas, a influência da queda de tensão no estator é muito grande. Recomenda-se então, neste caso, a utilização de motores com pequeno entre-ferro (X_M grande) e bitola elevada para o enrolamento do estator.

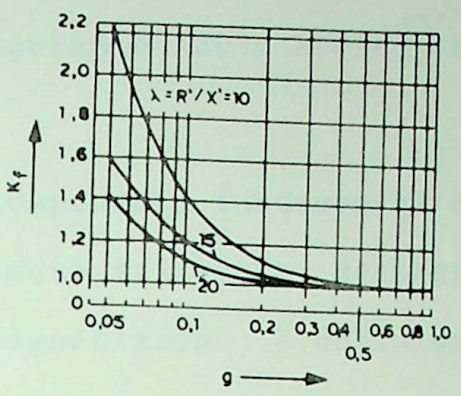


Figura 26 - Variação de K_f em função da relação de frequências g.

A partir do circuito equivalente, pode-se ainda concluir para $s < s_k$, conforme |13|.

$$M \sim \frac{1}{n'_o} \cdot \frac{U'^2_N}{R''} \cdot s.g \qquad (98)$$

ou ainda,

$$M \sim sf' \qquad (99)$$

A expressão (99) permite concluir que a frequência da f.e.m. induzida no rotor, vai depender apenas do comportamento da carga, em função da velocidade. Como o fluxo no entre-ferro é mantido constante, verifica-se que para o controle de velocidade através de variação de tensão e frequência, não ocorrem perdas adicionais devido à variação de escorregamento, como no controle de tensão.

Desta forma, o aquecimento adicional, devido ao método de controle, limita-se a:

- redução da ventilação para baixas velocidades;
- perdas devido à forma de onda não senoidal da tensão do estator.

A forma de onda não senoidal da tensão, resulta harmônicos de corrente, cujo efeito sobre o motor é analisado a seguir.

A componente fundamental da corrente do estator do motor de indução trifásico, desprezando-se inicialmente a corrente de magnetização, é definida por

$$I'_1 = \frac{U'_1}{\sqrt{(R' + \frac{\overline{R}''}{s})^2 + \omega^2 (L' + \overline{L}'')^2}}$$

L' - indutância do enrolamento do estator;

$\overline{L}''$ - indutância do enrolamento do rotor (valor referido).

Como o motor opera com baixo escorregamento a componente fundamental da corrente do estator é definida praticamente pela resistência $\frac{\overline{R}''}{s}$, ou seja, pela carga.

Para os harmônicos de ordem v, o escorregamento é praticamente 1 e desta forma, para $v > 1$.

$$I'_v = \frac{U_v}{\sqrt{(R' + \overline{R}'')^2 + (v\omega)^2 (L' + \overline{L}'')^2}}$$

Como R' e R'' são pequenos comparados com L' e $\overline{L}''$, os harmônicos de corrente são praticamente definidos pelas reatâncias dos enrolamentos do motor.

A corrente de magnetização do motor contém praticamente apenas a componente fundamental, de modo que o campo girante não sofre deformação sensível, devido aos harmônicos de corrente. Apenas para frequências muito baixas, poderá ocor

rer deformação, pois o período de pulsação do conversor pode ultrapassar a constante de tempo do circuito magnético (daí a sugestão anterior, de adotar-se X_M elevado para operação com baixas frequências).

Quanto ao conjugado motor, este depende do fluxo (constante), da corrente do rotor (que contém harmônicos) e do defasamento φ entre ambos. Isto significa a ocorrência de um conjugado motor não uniforme, influenciado pelos harmônicos de corrente. A consequência é um sobredimensionamento do motor, além da necessidade de utilização de inversores com elevada pulsação da tensão de saída, para minimizar os efeitos dos harmônicos de ordem mais baixa.

Neste caso, não é possível estabelecer-se uma expressão simplificada para determinação da potência do motor, pois vários fatores devem ser levados em consideração:

- faixa de variação da frequência;
- tipo do conversor usado;
- necessidade ou não de motores especiais;
- influência do sistema de ventilação.

11.8.2 Especificação dos componentes de comando e proteção

Neste caso, geralmente não são usados componentes convencionais, uma vez que os sistemas atuais para variação de velocidade são eletrônicos.

III. EXEMPLOS DE ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE COMANDO E PROTEÇÃO

III. EXEMPLOS DE ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES E DOS RESPECTIVOS COMPONENTES DE COMANDO E PROTEÇÃO

A seguir estão indicados alguns exemplos de especificação de motores de indução trifásicos e respectivos componentes de comando e proteção, com base no roteiro estabelecido no capítulo II.

Serão usadas para o motor as grandezas

P_N - potência nominal em KW

n_N - velocidade nominal em r.p.m.

I_N - corrente nominal em A

I_1 - corrente de carga do motor em A

U_N - tensão nominal em V

I_p - corrente de partida em A

M_N - conjugado nominal em N.m

M_p - conjugado de partida em N.m

M_K - conjugado máximo em N.m

η - rendimento

$\cos\psi$ - fator de potência

J_M - momento de inércia em $kg.m^2$

Para carga serão usadas

P_C - potência da carga em KW

M_C - conjugado resistente em N.m

$M_{C(M)}$ - conjugado resistente referido ao eixo em N.m do motor

n_C - velocidade da carga em r.p.m.

J_C - momento de inércia em kg.m²

t_p - tempo de partida em s

M_A - conjugado acelerador em N.m

III.1 Exemplo de operação contínua S_1

Um motor de indução trifásico opera em regime contínuo S_1 e aciona uma carga cujo conjugado resistente é constante.

A carga apresenta os seguintes dados

M_C = 18000 N.m

n_C = 25 rpm

J_C = 20000 kg.m²

a. Especificação do motor

Como o acionamento opera em regime contínuo, a potência do motor deve ser igual ou maior que a potência exigida pela carga. Desprezando-se o rendimento do acoplamento obtém-se:

$$P_C = \frac{M_C \cdot 2 \cdot \Pi \cdot n_C}{60} = \frac{18000 \cdot 2 \cdot \Pi \cdot 25}{60}$$

P_C = 47,12 KW

De uma tabela para especificação de motores verifica-se que o motor com potência nominal 55 KW deve satisfazer o acionamento.

A escolha do número de polos do motor deverá ser feita de modo a obter-se o menor tempo de partida.

A definição do tempo de partida do motor pode ser feita através de um método gráfico ou com auxílio de uma minicalculadora programável.

Neste exemplo serão verificados os tempos de partida para motores de 2, 4, 6 e 8 polos.

Para o motor de 2 polos esta verificação será feita tanto pelo método gráfico quanto pelo método com auxílio da minicalculadora. Ambos os métodos serão detalhados. Para os motores de 4, 6 e 8 polos será usada apenas a minicalculadora.

a.1 Motor de 55 KW com 2 polos

Os dados de catálogo para o motor de 2 polos são os seguintes:

$P_N = 55$ KW

$n_N = 3570$ rpm

$M_N = 147{,}12$ N.m

$\frac{M_p}{M_N} = 3{,}0$

$\frac{M_K}{M_N} = 3{,}0$

$I_N = 105\ A$

$U_N = 380\ V,\ 60\ Hz$

$\eta = 88\%$

$\cos\psi = 0,9$

$I_p = 7,0\ I_N$

$J_M = 0,48\ kg.m^2$

Inicialmente deverá ser definida a equação do conjugado motor que melhor representa este motor durante a partida.

A equação simplificada

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

para a condição nominal

$$\frac{M_N}{M_K} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_K} + \frac{s_K}{s_N}}$$

permite determinar o valor de s_K

$$\frac{1}{3} = \frac{2}{\frac{0,0083}{s_K} + \frac{s_K}{0,0083}}$$

$$s_K = 0,049$$

Desta forma obtém-se:

$$M = \frac{2\ M_K}{\frac{s}{0,049} + \frac{0,049}{s}} = \frac{6\ M_N}{\frac{s}{0,049} + \frac{0,049}{s}}$$

A verificação se a equação é representativa para as condições de partida poderá ser feita tomando-se:

$$M = M_p$$

$$s = 1$$

obtendo-se então:

$$M_p = \frac{6\ M_N}{\frac{1}{0,049} + 0,049}$$

$$M_p = 0,293\ M_N$$

o que torna a equação inadequada para representar o motor durante a partida, pois conforme os dados de catálogo

$$M_p = 3\ M_N$$

Isto significa que é necessária a introdução de um termo na equação que a corrija para $1 \leq s \leq s_K$, sem que o erro introduzido para $s_K \leq s \leq s_N$ seja grande. conforme considerações no capítulo VI, será tomado:

$$M = \frac{6\ M_N}{\frac{s}{0,049} + \frac{0,049}{s}} + \frac{K}{\frac{s}{s_{K1}} + \frac{s_{K1}}{s}}$$

Para as considerações:

$$M = M_p = 3\ M_N = 3 \times 147,12 = 882,72\ N.m$$

$$s_{K1} = 1$$

$$s = 1$$

Obtem-se:

$$441,36 = \frac{882,72}{\frac{1}{0,049} + 0,049} + \frac{K}{1+1}$$

que resulta:

$$K = 796,12$$

A equação do conjugado motor será então:

$$M = \frac{882,72}{\frac{s}{0,049} + \frac{0,049}{s}} + \frac{796,12}{s + \frac{1}{s}}$$

Determinação do tempo de partida pelo método gráfico

O conjugado acelerador em função do escorregamento será:

$$M_A = \frac{882,72}{\frac{s}{0,049} + \frac{0,049}{s}} + \frac{796,42}{s + \frac{1}{s}} - M_{C(M)}$$

onde

$$M_{C(M)} = 18000 \frac{25}{3570} = 126,05 \text{ N.m}$$

desta forma

$$M_A = \frac{882,72}{\frac{s}{0,049} + \frac{0,049}{s}} + \frac{796,42}{s + \frac{1}{s}} - 126,05$$

A tabela a seguir fornece os valores de M_A em função de s.

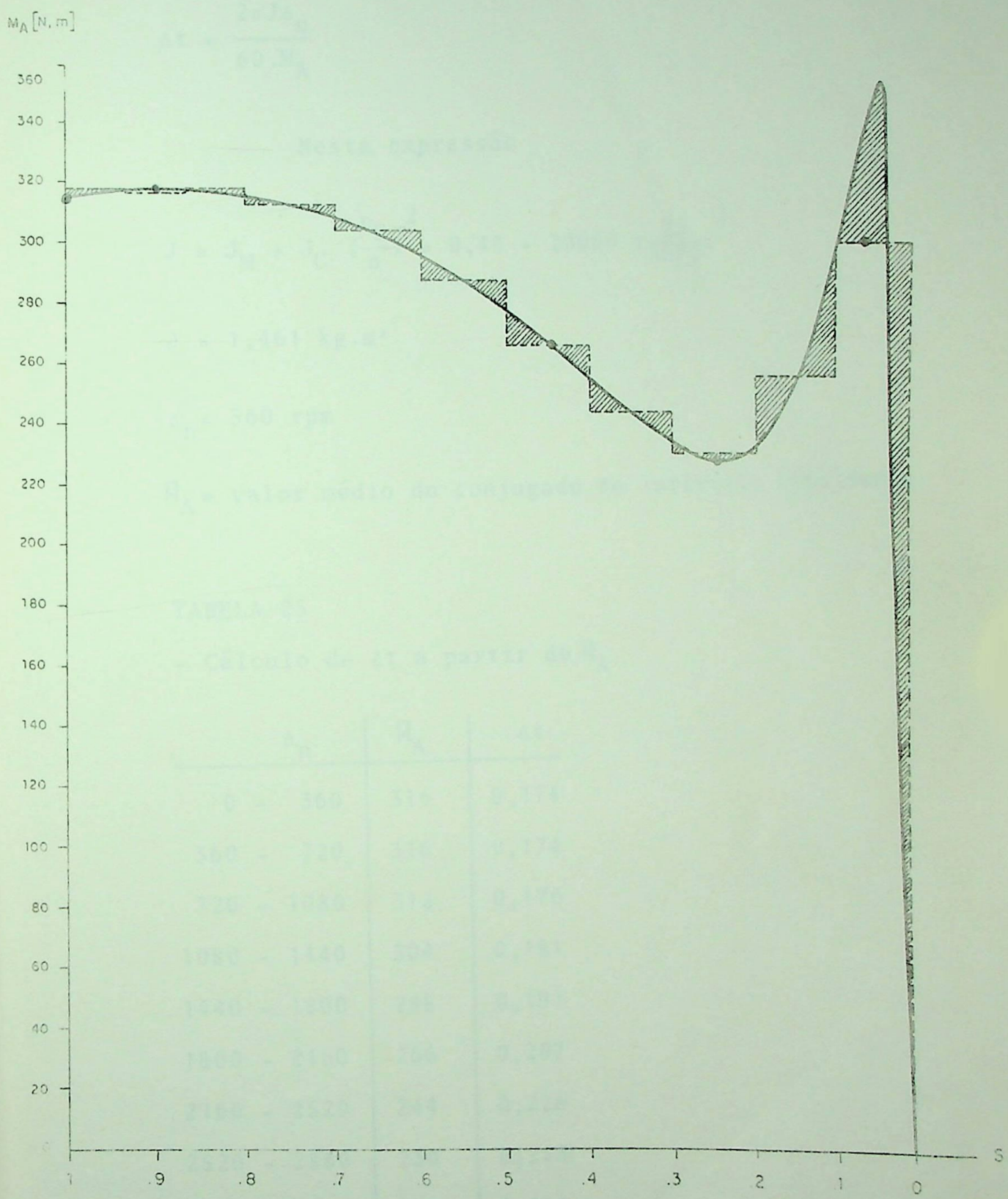
TABELA 24

- Conjugado acelerador em função do escorregamento

s	M_A[N.m]
1,00	315,31
0,90	317,88
0,80	316,31
0,70	309,60
0,60	296,92
0,50	278,20
0,45	266,98
0,40	255,11
0,35	243,48
0,30	233,58
0,25	227,96
0,20	231,12
0,15	251,34
0,10	301,60
0,05	354,94
0,01	54,86
0,008	20,70
0,007	~ 0

A partir destes valores obtém-se a curva indicada na figura 27.

Com base na figura 27, onde estão definidos os valores médios do conjugado acelerador para cada intervalo de velocidade de 360 rpm, pode-se obter os respectivos intervalos de tempo de aceleração para cada intervalo de velo



Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MACÁ
B M

cidade considerado, a partir da expressão:

$$\Delta t = \frac{2\pi J \Delta_n}{60.M_A}$$

Nesta expressão

$$J = J_M + J_C \left(\frac{n_C}{n}\right)^2 = 0,48 + 20000 \left(\frac{25}{3570}\right)^2$$

$J = 1,461 \text{ kg.m}^2$

$\Delta_n = 360$ rpm

$\overline{M}_A$ = valor médio do conjugado no intervalo considerado

TABELA 25

- Cálculo de Δt a partir de $\overline{M}_A$

Δ_n	$\overline{M}_A$	Δt
0 - 360	316	0,174
360 - 720	316	0,174
720 - 1080	312	0,176
1080 - 1440	304	0,181
1440 - 1800	288	0,191
1800 - 2160	266	0,207
2160 - 2520	244	0,226
2520 - 2880	230	0,240
2880 - 3240	255	0,216
3240 - 3600	300	0,184

O somatório dos intervalos de tempo Δt for

nece o tempo de partida

$$tp = 2s$$

Determinação do tempo de partida com auxílio da mini calculadora

O programa é dividido em quatro etapas:

1. *Determinação do escorregamento* s_K :

$$s_K = s_N \left(y + \sqrt{y^2 - 1}\right) \qquad (100)$$

onde

$$y_M = \frac{M_K}{M_N}$$

2. *Determinação da constante K da equação do conjugado motor:*

$$K = 2\, M_N (x - 2y s_K) \qquad (101)$$

onde

$$x_M = \frac{M_p}{M_N}$$

$$y_M = \frac{M_K}{M_N}$$

3. *Determinação do conjugado acelerador:*

$$M_A = \frac{2 y_M M_N}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} + \frac{K}{s + \frac{I}{s}} - M_C\left(\frac{n_C}{n}\right) \qquad (102)$$

4. *Determinação do tempo de partida:*

$$tp = \Sigma \Delta t \qquad (103)$$

$$\Delta t = \frac{2\pi J \Delta n}{60\ M_A} \qquad (104)$$

Na determinação do tempo de partida para este exemplo, foi usada a calculadora HP-29C, cuja sequência de programação está indicada no capítulo VI.

Para os dados:

$s_N = 0,0083$

$y_M = 3$

$x_M = 3$

$M_C = 18000$ N.m

$n_C = 25$ rpm

$n = 3570$ rpm

$M_N = 147,12$ N.m

$J = 0,48 + 20000 \left(\frac{25}{3570}\right)^2 = 1,461$ Kg.m²

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ

obtém-se para o tempo de partida:

$tp = 2,12$ [s]

a.2 Motor de 55 KW com 4 polos

Os dados do catálogo:

$P_N = 55$ KW

$n_N = 1780$ rpm

$M_N = 295,06$ N.m

$\frac{M_p}{M_N} = 2,6$

$\frac{M_K}{M_N} = 2,7$

$I_N = 100$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$n = 92\%$

$\cos\psi = 0,9$

$I_p = 7,0$

$J_M = 0,90$

Utilizando-se o mesmo programa anterior porém com

$s_N = 0,011$

$y_M = 2,7$

$x_M = 2,6$

$M_C = 18000$ N.m

$n_C = 25$ rpm

$n = 1780$ rpm

$M_N = 295,06$ N.m

$$J = 0,9 + 20000 \left(\frac{25}{1780}\right)^2 = 4,845 \text{ Kg.m}^2$$

Obtém-se então para o tempo de partida

$tp = 2,62$ [s] .

a.3 Motor de 55 KW com 6 polos

Os dados do catálogo:

P_N = 55 KW

n_N = 1180 rpm

M_N = 445,09 N.m

$\frac{M_p}{M_N}$ = 2,6

$\frac{M_K}{M_N}$ = 2,3

I_N = 105 A

U_N = 380 V, 60 Hz

η = 92%

$\cos\psi$ = 0,86

I_p = 5,6 I_N

J_M = 1,30 Kg.m²

Utilizando-se o programa anterior, porém com

s_N = 0,01695

y_M = 2,3

x_M = 2,6

M_C = 18000 N.m

n_C = 25 rpm

n = 1180 rpm

M_N = 445,09

$$J = 1,30 + 20000 \left(\frac{25}{1180}\right)^2 = 10,277 \text{ Kg.m}^2$$

Obtém-se para o tempo de partida

$$t_p = 1,89 \text{ s}$$

a.4 *Motor de 55 KW com 8 polos*

Os dados do catálogo

$P_N = 55$ KW

$n_N = 885$ rpm

$M_N = 593,46$ N.m

$\frac{M_p}{M_N} = 1,5$

$\frac{M_K}{M_N} = 2,2$

$I_N = 115$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$n = 90\%$

$\cos\psi = 0,80$

$I_p = 5,3\ I_N$

$J_M = 2,78$ Kg.m²

Utilizando-se o programa anterior, porém com

$s_N = 0,01667$

$y_M = 2,2$

$x_M = 1,5$

$M_C = 18000$ N.m

$n_C = 25$ rpm

$n = 885$ rpm

$M_N = 593,46$ N.m

$$J = 2,78 + 20000 \left(\frac{25}{885}\right)^2 = 18,74 \text{ Kg.m}^2$$

Obtendo-se para o tempo de partida

$t_p = 3,95$ s

a.5 Conclusão

Dos resultados obtidos verifica-se que para obter-se o menor tempo de partida deve ser escolhido o motor de 6 polos. Lembre-se que não foi feita qualquer consideração sobre o rendimento do acoplamento.

b. Especificação dos componentes de comando e proteção

As grandezas elétricas para o motor escolhido são:

$P_N = 55$ KW

$I_N = 105$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$I_p = 5,6\ I_N$

$t_p = 1,9$ s

$\eta_N = 92\%$

$\cos\psi_N = 0,86$

Com base nestas grandezas, a escolha dos componentes de comando e proteção é feita com base no diagrama unifilar da figura 28 e conforme as tabelas indicadas a seguir

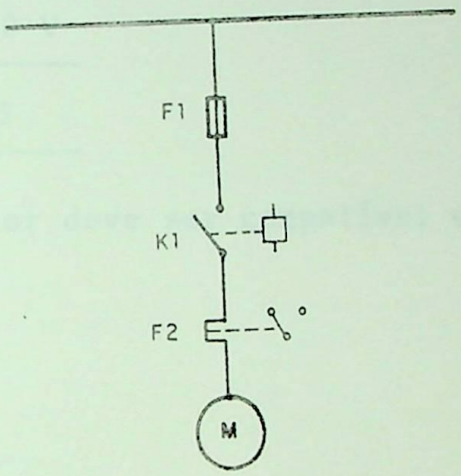


Figura 28 - Diagrama unifilar da alimentação do motor

TABELA 26

- Fusíveis

I_N	105 A
U_N	380 V
I_p	588 A
t_p	1,9 s
I_d	I_{cc} 1)

1) I_{cc} - corrente de curto-circuito no quadro de comando

TABELA 27

- Contator

I_N	105 A
Fusível	1)
I_d	588 A
U_N	380 V
$\cos\psi_d$	0,3

1) O contator deve ser compatível com o fusível escolhido

TABELA 28

- Relé térmico

Faixa de ajuste	deve conter 105 A
fusível	1)
I_{Aj}	105 A 2)
I_p	588 A
t_p	1,9 s

1) O relé deve ser compatível com o fusível escolhido

2) Deve-se verificar se o ajuste é compatível com as condições de partida

Observações:

1. No circuito poderia ter sido incluido um secionador

sob carga para permitir a manutenção do circuito com segurança. A sua especificação deve ser feita conforme a tabela a seguir.

TABELA 29

- Secionador sob carga

I_N	105 A
I_{ccTH}	1)
I_s	1)
I_d	588 A
U_N	380 V
$\cos\psi_d$	0,3

1) Valores calculados no quadro de comando

2. Deve-se observar que as grandezas indicadas para especificação dos componentes são as básicas e que sofrem influência do regime de operação.

III.2 Exemplos de operação de Curta Duração S2.

III.2.1-1º Exemplo

Para o acionamento de uma draga são necessários 8 motores de indução trifásicos que operam em regime de curta duração.

A potência exigida pela carga é de 7,0 KW du

rante 7,5 minutos de operação.

Pretende-se utilizar motores de 4 polos com isolamento classe B (usual em motores disponíveis no mercado).

a) *Especificação do motor.*

Com auxílio de uma tabela de especificação de motores será verificada a possibilidade de utilização de um motor de potência nominal 5,5 KW com os seguintes dados :

$P_N = 5,5$ KW

$n_N = 1745$ rpm

$M_N = 30,09$ N.m

$I_N = 12$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$I_p = 5,5\ I_N$

$\frac{M_p}{M_N} = 2,5$

$\frac{M_K}{M_N} = 2,7$

$\eta = 82\%$

$\cos\psi = 0,84$

$J_M = 0,0285$ Kg.m²

Da tabela 3 obtém-se a constante de tempo de aquecimento deste motor:

T_A = 10 minutos

A tabela 1 fornece a relação entre as perdas a vazio e as perdas nominais para este motor.

K_o = 0,25

Com estes dados e com auxílio da tabela 15 verifica-se que para :

$$\frac{t_f}{T_A} = \frac{7,5}{10} = 0,75$$

a relação entre a potência admissível e a potência nominal do motor é:

$$\frac{P_{adm}}{P_N} = 1,34$$

Portanto o motor de 5,5 KW nestas condições de operação pode fornecer:

$$P_{adm} = 1,34 \times 5,5$$

$$P_{adm} = 7,37 \text{ KW}$$

Isto significa que termicamente o motor de 5,5 KW poderá ser utilizado.

Quanto a solicitação mecânica, a verificação é feita com base na expressão (50).

$$P_{adm} \leq \frac{M_K}{M_N} \cdot \frac{P_N}{1,8}$$

$$7,37 \text{ KW} < 2,7 . \frac{5,5}{1,8}$$

$$7,37 \text{ KW} < 8,25 \text{ KW}$$

Portanto o motor também mecanicamente satisfaz o acionamento.

b) *Especificação dos componentes de comando e proteção.*

Para especificação dos componentes de comando e proteção é necessária a definição do tempo de partida do motor, além dos dados já fornecidos pelo fabricante do motor.

Com auxílio do método definido anteriormente e conhecido o momento de inércia da carga, o tempo de partida do motor é determinado.

Admita-se que o tempo de partida calculado desta forma seja de

$$t_p = 5 \text{ s}$$

O passo seguinte é a definição do valor eficaz da corrente, que é função do regime de operação e calculado a partir da equação (55).

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_p^2 . t_p + I_1 . t_1}{tf}}$$

Nesta expressão I_1 é a corrente de operação do motor, calculada a partir da expressão :

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}.U_N.\eta_1.\cos\psi_1}$$

onde

P_1 = potência de operação do motor

U_N = tensão nominal

η_1 = rendimento do motor para potência P_1

$\cos\psi_1$ = fator de potência do motor para potência P_1

Neste exemplo tem-se:

P_1 = 7,5 KW

U_N = 380 V

η_1 = 0,81 (obtido do catálogo de especificação)

$\cos\psi_1$ = 0,86 (obtido do catálogo de especificação)

$$I_1 = \frac{7,5 \times 10^3}{\sqrt{3}.380.0,81.0,86}$$

I_1 = 16,36 A

O valor eficaz da corrente no tempo t_f será:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{(5,5 \times 12)^2.5 + 16,36^2.(7,5.60-5)}{7,5 \times 60}} = 17,69 \text{ A}$$

Tomando como base o circuito da figura 28, a especificação dos componentes de comando e proteção é feita conforme as tabelas indicadas a seguir.

TABELA 30

- Fusíveis

I_N	17,69 A
U_N	380 V
I_p	66 A
t_p	5 s
I_d	I_{cc} 1)

1) I_{cc} - corrente de curto-circuito no quadro de comando

TABELA 31

- Contator

I_N	17,69/R
Fusível	1)
I_d	66 A
U_N	380 V
$\cos\psi_d$	0,3

1) Deve ser compatível com o fusível escolhido

TABELA 32

- Relé térmico

Faixa de ajuste	1)
Fusível	2)
I_{Aj}	3)
I_p	66 A
t_p	5 S

1) A faixa de ajuste do relé térmico é definida em função do valor que pretende-se ajustar o relé, portanto deve conter a corrente de ajuste.

2) O relé deve ser compatível com o fusível escolhido.

3) A corrente de ajuste e consequentemente a faixa de ajuste é definida de modo que não haja atuação para corrente de operação I_1 durante o tempo t_1 e para corrente de partida I_p durante o tempo de partida t_p.

A figura 29 mostra a definição da corrente de ajuste.

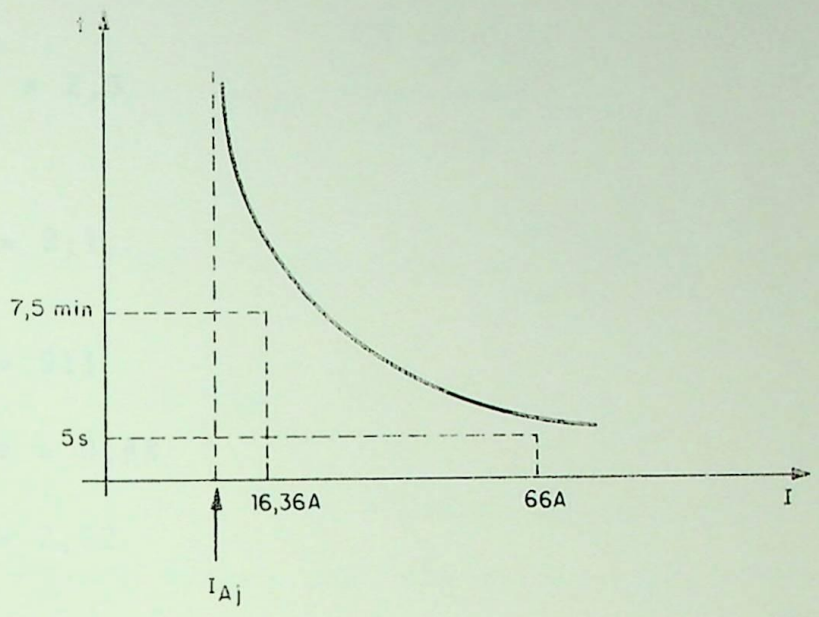


Figura 29 - Definição da corrente de ajuste do relê térmico

Observação:

Vale aqui a mesma observação feita no exemplo anterior com relação ao secionador sob carga.

III.2.2-2º Exemplo

Verificar a menor velocidade de operação de um motor de indução trifásico, cujos dados são indicados a seguir, que opera em regime de curta duração S2, com um tempo de funcionamento de 30 minutos. O motor opera com carga constante.

P_N = 75 KW

n_N = 1180 rpm

I_N = 140 A

I_p = 6 I_N

$$\frac{M_P}{M_N} = 2,3$$

$$\frac{M_K}{M_N} = 2,1$$

$$\eta = 91\%$$

$$\cos\psi = 0,88$$

$$J_M = 2,52$$

Da tabela 4 verifica-se que a constante de tempo de aquecimento do motor é

$$T_A = 60 \text{ minutos}$$

Da tabela 1 obtém-se a relação entre as perdas a vazio e as perdas nominais do motor.

$$K_o = 0,35$$

Como a classe de isolamento do motor é B, obtém-se da tabela 11 a relação entre as perdas máximas admissíveis e as perdas nominais do motor para a relação

$$\frac{t_f}{T_A} = \frac{30}{60} = 0,5$$

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = 2,03$$

A menor velocidade de operação do motor será, conforme a equação (54), para fv = 1 :

$$n = n' - (n' - n_V) \frac{\frac{V_{adm}}{V_N} \cdot \frac{1}{fv} - K_o}{1 - K_o}$$

$$n = 1200 - (1200 - 1180) \frac{2,03 - 0,35}{1 - 0,35}$$

$$n = 1148 \text{ rpm}$$

Como a redução de velocidade é pequena, o motor poderá operar com esta velocidade e carga nominal, sem que sua temperatura ultrapasse o valor máximo admissível, tomando-se fv = 1.

III.3 *Exemplo de operação intermitente S3.*

Um motor de indução trifásico bipolar opera em regime intermitente S3 com

t_f = 5 minutos

G = 40%

A potência da carga é de 30 KW.

a) *Especificação do motor.*

Como o acionamento opera em regime intermitente S3, o motor poderá ter uma potência nominal menor que 30 KW.

De uma tabela para especificação de motores escolhe-se um motor de potência nominal 22 KW para verificação da possibilidade de utilização. Os dados do motor são

indicados a seguir:

$P_N = 22$ KW

$n_N = 3540$ rpm

$M_N = 59,35$ N.m

$\frac{M_p}{M_N} = 2,5$

$\frac{M_K}{M_N} = 2,5$

$I_N = 45$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$\eta_N = 84\%$

$\cos\psi_N = 0,88$

$I_p = 6,8\ I_N$

$J_M = 0,209$ Kg.m²

Da tabela 2, obtém-se a constante de tempo de aquecimento do motor:

$T_A = 25$ minutos

Da tabela 1 fornece a relação entre as perdas a vazio e as perdas nominais do motor

$K_o = 0,25$

A tabela 19 fornece, para alguns valores da relação t_f/T_A e da intermitência G, a relação entre a potência admissível e a potência nominal do motor, a partir da equação (60).

Para

$$\frac{t_f}{T_A} = \frac{5}{25} = 0,2$$

$$G = 40\%$$

$$K_o = 0,25$$

obtém-se

$$P_{adm} = 1,44\ P_N$$

Portanto o motor de 22 KW, neste acionamento pode operar com

$$P_{adm} = 1,44 \times 22$$

$$P_{adm} = 31,68\ KW$$

Portanto, termicamente o motor pode ser utilizado. A verificação quanto à solicitação mecânica é feita a partir da equação (50).

$$P_{adm} \leq \frac{M_K}{M_N} \cdot \frac{P_N}{1,8}$$

$$P_{adm} \leq 2,5 \cdot \frac{22}{1,8}$$

$$P_{adm} \leq 30,56\ KW$$

o que significa que também mecanicamente o motor de potência nominal 22 KW é adequado.

b) *Especificação dos componentes de comando e proteção.*

Da mesma forma que no exemplo anterior é necessária a definição do tempo de partida, que pode ser feito com auxílio do método usado no exemplo de operação contínuo S1. Admita-se

$$t_p = 3 \text{ s}$$

Com auxílio da equação (55) determina-se o valor eficaz da corrente durante o tempo de funcionamento.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_p^2 \cdot t_p + I_1^2 \cdot t_1}{t_f}}$$

onde I_1 é a corrente de operação do motor calculada a partir da equação:

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \eta_1 \cdot \cos\psi_1}$$

$P_1 = 30$ KW

$U_N = 380$ V

$\eta_1 = 82\%$ (obtido do catálogo de especificação)

$\cos\psi_1 = 0,86$ (obtido do catálogo de especificação)

$$I_1 = \frac{30 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,82 \cdot 0,86}$$

$$I_1 = 64,63 \text{ A}$$

O valor eficaz da corrente no tempo t_f se

rá:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{(6,8.45)^2 .3 + 64,63^2 (5 \times 60-3)}{5 \times 60}}$$

$$I_{ef} = 71,21 \text{ A}$$

Tomando como base o circuito da figura 28 a especificação dos componentes de comando e proteção é feita conforme as tabelas indicadas a seguir

TABELA 33

- Fusíveis

I_N	71,21 A
U_N	380 V
I_p	306 A
t_p	3 s
I_d	I_{cc} 1)

1) I_{cc} corrente de curto-circuito no quadro de comando

TABELA 34

- Contator

I_N	71,21 A
G	40%
fusível	1)
I_d	306 A
U_N	380 V
$\cos\psi_d$	0,3

1) O contator deve ser compatível com o fusível escolhido

TABELA 35
- Relé térmico

Faixa de ajuste	1)
Fusível	2)
I_{Aj}	3)
I_p	306 A
t_p	3 s

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
B M

1) 2) 3) Valem as mesmas considerações feitas para exemplo 2, ou seja, o relé deve ser compatível com o fusível escolhido e sua corrente e faixa de ajuste devem ser definidas para que não haja atuação para 64,63 A durante 5 min e 306 A durante 3 s.

4) O relé térmico deve ser escolhido para atender os valores indicados na tabela 35 e a seguir deve ser feita a verificação do comportamento do relé perante a intermitência de operação. Esta verificação é feita em função do comportamento térmico do relé quando sujeito a frequentes partidas. No capítulo VI é feita uma sugestão para este tipo de verificação. Se o relé não é adequado à operação deve-se escolher um outro que além de atender os dados da tabela 35 seja menos sensível à intermitência da operação. Uma outra opção é o uso de termistores, que são escolhidos em função da classe de isolamento do motor.

Observação

Vale aqui a mesma observação feita anteriormente com relação ao secionador sob carga.

III.4 *Exemplo de operação intermitente S4*

Para o acionamento de uma carga cujos dados são indicados a seguir, é previsto um motor de indução trifásico.

$M_C = 2500\ N_m$

$n_C = 100\ rpm$

$J_C = 100\ Kg.m^2$

A carga é constante durante toda operação e o tempo de funcionamento do acionamento é de 20[s], incluindo a partida. A frenagem é mecânica com uma duração de 1 [s] e o conjunto permanece desligado durante 29 s, sendo então reiniciado o ciclo de operação.

a) *Especificação do motor*

Inicialmente deve ser calculada a potência exigida pela carga em operação com velocidade constante.

$$P_C = \frac{2\pi}{60} n_C . M_C$$

$$P_C = \frac{2\pi}{60} . 100 . 2500$$

$$P_C = 26,18\ KW$$

Será verificada a possibilidade de utilização de um motor de potência nominal 30 KW.

A partir dos dados do acionamento conclui-se que a operação é do tipo intermitente S4 e desta forma a

solicitação térmica provocada pela corrente de partida deve ser levada em consideração. Isto significa que quanto menor o tempo de partida, menor a solicitação térmica durante a partida. A escolha correta do número de polos pode levar então a escolha do motor mais adequado ao acionamento.

a.1 Motor de 2 polos

$P_N = 30$ KW

$n_N = 3550$ rpm

$M_N = 80,70$ N.m

$\frac{M_P}{M_N} = 2,4$

$\frac{M_K}{M_N} = 2,1$

$I_N = 60$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$\eta_N = 84\%$

$\cos\psi = 0,88$

$I_p = 6,5\ I_N$

$J_M = 0,320$ Kg.m^2

Com auxílio de uma minicalculadora e a partir dos dados do acionamento obtém-se:

$t_p = 1,5$ [s]

A verificação do motor é feita a partir da

equação (63), que fornece o fator A.

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{G}-1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1-\frac{t_f}{T_A})+1-K_o}{1-K_o}}$$

onde:

$$G = \frac{t_f}{t_f + t_d}$$

$$G = \frac{20}{20 + 30} = \frac{20}{50}$$

$$G = 0,4$$

A constante de tempo de aquecimento é obtida a partir da tabela 2.

$$T_A = 30 \text{ minutos}$$

A relação entre as constantes de tempo de aquecimento e de resfriamento será tomada:

$$\frac{T_A}{T_R} = \frac{1}{1,5}$$

A tabela 1 fornece a relação entre as perdas a vazio e as perdas nominais do motor:

$$K_o = 0,35$$

Para

$$\frac{t_f}{T_A} = \frac{20}{30 \times 60} = \frac{1}{90}$$

obtém-se para o fator A:

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{0,4}-1)\frac{1}{1,5}\ (1-\frac{1}{90})+1-0,35}{1-0,35}}$$

$$A = 1,59$$

A equação (66) fornece a relação entre a corrente eficaz e a corrente nominal do motor.

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{p^2\ t_p + f^2 . t_1}{t_f}}$$

$$p = 6,5$$

$$t_f = 1,5$$

$$f = \frac{I_1}{I_N}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}.U_N.n_1.\cos\psi_1}$$

$$P_1 = 26,18\ KW$$

$$U_N = 380\ V$$

$$n_1 = 84\%\ \text{(obtido do catálogo)}$$

$$\cos\psi_1 = 0,85\ \text{(obtido do catálogo)}$$

$$I_1 = \frac{26,18 \times 10^3}{\sqrt{3}.380.0,84.0,88} = 53,81\ A$$

$$f = \frac{I_1}{I_N} = \frac{53,81}{60} = 0,90$$

$$t_1 = 20-1,5 = 18,5\ s$$

Desta forma

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{6,5^2 . 1,5 + 0,9^2 . 18,5}{20}}$$

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = 1,98$$

A partir da análise feita para operação S4 conclui-se que

$$A < \frac{I_{ef}}{I_N}$$

portanto o motor bipolar de 30 KW não pode ser usado.

a.2 Motor de 4 polos

$P_N = 30$ KW

$n_N = 1770$ rpm

$M_N = 161,85$ N.m

$\frac{M_P}{M_N} = 2,2$

$\frac{M_K}{M_N} = 2,4$

$I_N = 60$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$\eta_N = 86\%$

$\cos\psi_N = 0,86$

$I_p = 6,5\ I_N$

$J_M = 0,405 \text{ Kg.m}^2$

A partir dos dados do acionamento obtém-se

$t_p = 0,7 \text{ s}$

A verificação do motor é feita a partir da equação (63) que fornece o fator A

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{G}-1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1-\frac{t_f}{T_A})+1-K_o}{1-K_o}}$$

Para este motor tem-se, a partir das tabelas 1 e 3:

$T_A = 35 \text{ minutos}$

$K_o = 0,40$

A intermitência G é a mesma que no caso anterior

$G = 0,4$

A relação entre as constantes de tempo de aquecimento e de resfriamento é:

$$\frac{T_A}{T_R} = \frac{1}{1,5}$$

A relação entre o tempo de funcionamento e a constante de tempo de aquecimento é:

$$\frac{t_f}{T_A} = \frac{20}{35 \times 60} = \frac{1}{105}$$

O fator A será:

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{0,4}-1)\ \frac{1}{1,5}\ (1-\frac{1}{105})+1-0,40}{1-0,40}}$$

$$A = 1,63$$

Levando-se em conta a equação (66)

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{p^2 . t_p + f^2\ t_1}{t_f}}$$

onde

$p = 6,5$

$t_p = 0,7$ s

$f = \frac{I_1}{I_N}$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}.U_N.\eta_1.\cos\psi_1}$$

$P_1 = 26,18$ KW

$U_N = 380$ V

$\eta_1 = 86\%$ (obtido do catálogo)

$\cos\psi_1 = 0,83$ (obtido do catálogo)

$$I_1 = \frac{26,18 \times 10^3}{\sqrt{3}.380.0,86.0,83} = 55,72 \text{ A}$$

$$f = \frac{I_1}{I_N} = \frac{55,72}{60} = 0,93$$

$$t_p = 20-0,7 = 19,3 \text{ s}$$

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{6,5^2 \times 0,7 + 0,93^2 . 19,3}{20}}$$

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = 1,52$$

A partir da análise para operação S4 conclui-se que

$$A > \frac{I_{ef}}{I_N}$$

portanto o motor de 4 polos de 30 KW pode ser usado neste acionamento

a.3 Motor de 6 polos

$P_N = 30$ KW

$n_N = 1150$ rpm

$M_N = 249,11$ N.m

$\frac{M_p}{M_N} = 2,5$

$\frac{M_K}{M_N} = 2,1$

$I_N = 58$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$\eta_N = 90\%$

$\cos\psi_N = 0,86$

$I_p = 5,5\ I_N$

$J_M = 0,90\ Kg.m^2$

A partir dos dados do acionamento obtém-se

$t_p = 0,6\ s$

O fator A, neste caso será:

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{G}-1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1-\frac{t_f}{T_A}) + 1 - K_o}{1 - K_o}}$$

onde

$G = 0,40$

$\frac{T_A}{T_R} = \frac{1}{1,5}$

As tabelas 1 e 4 fornecem

$T_A = 50$ minutos

$K_o = 0,35$

A relação entre o tempo de funcionamento e a cosntante de tempo de aquecimento é:

$$\frac{t_f}{T_A} = \frac{20}{50 \times 60} = \frac{1}{150}$$

portanto:

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{0,4}-1)\ \frac{1}{1,5}\ (1-\frac{1}{150}) + 1 - 0,35}{1 - 0,35}}$$

$A = 1,59$

A equação (66) fornece:

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{p^2\ t_p + f^2\ t_1}{t_f}}$$

onde

$p = 5,5$

$t_p = 0,6\ s$

$f = \frac{I_1}{I_N}$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}.U_N.\eta_1\ \cos\psi_1}$$

$P_1 = 26,18\ KW$

$U_N = 380\ V$

$\eta_1 = 90\%$ (obtido do catálogo)

$\cos\psi_1 = 0,83$ (obtido do catálogo)

$$I_1 = \frac{26,18 \times 10^3}{\sqrt{3}.380.0,9.0,83} = 53,25$$

$$f = \frac{I_1}{I_N} = \frac{53,25}{58} = 0,92$$

$t_1 = 20-0,6 = 19,4s$

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{5,5^2.0,6 + 0,92^2 \times 19,4}{20}}$$

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = 1,32$$

como

$$A > \frac{I_{ef}}{I_N}$$

o motor de 30 KW e 6 polos pode ser usado neste acionamento.

a.4 Motor de 8 polos

$P_N = 30$ KW

$n_N = 880$ rpm

$M_N = 325,54$ N.m

$\frac{M_p}{M_N} = 1,8$

$\frac{M_K}{M_N} = 3,0$

$I_N = 60$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$\eta_N = 90\%$

$\cos\psi_N = 0,83$

$I_p = 7\ I_N$

$J_M = 1,01$ Kg.m^2

Os dados do acionamento resultam no tempo de partida:

$t_p = 0,53$ s

O fator A será:

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{G}-1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1-\frac{t_f}{T_A}) + 1 - K_o}{1 - K_o}}$$

onde:

$G = 0,40$

$\frac{T_A}{T_R} = \frac{1}{1,5}$

As tabelas 1 e 5 fornecem:

$T_A = 60$ minutos

$K_o = 0,30$

A relação entre o tempo de funcionamento e a constante de tempo de aquecimento será:

$$\frac{t_f}{T_A} = \frac{20}{60 \times 60} = \frac{1}{180}$$

logo o fator A será:

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{0,4}-1)\ \frac{1}{1,5}\ (1-\frac{1}{180}) + 1 - 0,30}{1 - 0,30}}$$

$A = 1,56$

A equação (66) fornece

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{p^2.t_p + f^2.t_1}{t_f}}$$

onde

$p = 7,0$

$t_p = 0,53$ s

$$f = \frac{I_1}{I_N}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}.380.\eta_1.\cos\psi_1}$$

$P_1 = 26,18$ KW

$U_N = 380$ V

$\eta_1 = 90\%$ (obtido do catálogo)

$\cos\psi_1 = 0,80$ (obtido do catálogo)

$$I_1 = \frac{26,18 \times 10^3}{\sqrt{3}.380.0,9.0,8} = 55,24 \text{ A}$$

$$f = \frac{I_1}{I_N} = \frac{55,24}{60} = 0,92$$

$t_1 = 20 - 0,53 = 19,47$ s

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{7^2.0,53 + 0,92^2.19,47}{20}}$$

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = 1,46$$

como

$$A > \frac{I_{ef}}{I_N}$$

o motor de 30 KW, 8 polos é adequado ao acionamento.

Conclusão

Os motores de 4, 6 e 8 polos satisfazem as condições do acionamento, portanto qualquer dos três pode ser especificado.

Sugere-se a utilização do motor de 4 polos.

b) *Especificação dos componentes de comando e proteção*

O critério para especificação dos componentes de comando e proteção é o mesmo que para a operação S3. As tabelas a seguir fornecem os valores a serem observados na especificação, com base na figura 28. Para o motor de 4 polos

$$I_{ef} = 1,52\ I_N = 1,52.60 = 91,2\ A$$

TABELA 36

- Fusíveis

I_N	91,2 A
U_N	380 V
I_p	390 A
t_p	0,7 s
I_d	I_{cc} 1)

1) I_{cc} - corrente de curto-circuito no quadro de comando.

TABELA 37

- Contator

I_N	91,2
G	40%
fusível	1)
I_d	390 A
U_N	380 V
$\cos\psi_d$	0,3

1) O contator deve ser compatível com o fusível escolhido.

TABELA 38

- Relé térmico

Faixa de ajuste	Deve conter 60 A
Fusível	1)
I_{Af}	60 A
I_p	390 A 2)
t_p	0,7 s

1) deve ser compatível com o fusível escolhido.

2) O relé não deve operar nas condições de partida.

Valè aqui a mesma observação feita no exemplo anterior para operação S3, com relação a verificação do comportamento do relé perante sucessivas partidas.

III.5 *Exemplo de operação intermitente S5*

Para o acionamento de uma serra circular com uma potência de 29 KW, um momento de inércia de 0,18 Kg.m² e uma velocidade de 5000 rpm, com um tempo de funcionamento à carga constante de 2 minutos, deve ser especificado um motor de indução trifásico. Em cada ciclo o motor permanece desligado durante 3 minutos. A partida e a frenagem ocorrem a vazio. A frenagem é feita com corrente contínua.

a) Especificação do motor

A partir dos dados da carga conclui-se que a operação é intermitente do tipo S5. A partir de uma tabela para especificação de motores verifica-se que a potência nominal mais próxima da potência exigida pela carga (P_C = 29 KW) é de 30 KW, que devido ao tipo de operação parece ser insuficiente. Será feita a verificação para o motor de potência nominal 37 KW. Como os tempos de partida e frenagem são importantes na definição da potência do motor, será feita a verificação para o motor de 2 polos. Caso este motor não atenda, será adotado o critério do exemplo anterior.

- *Motor de 2 polos*

P_N = 37 KW

n_N = 3550 rpm

M_N = 99,53 N.m

$$\frac{M_p}{M_N} = 2,4$$

$$\frac{M_K}{M_N} = 2,1$$

$I_N = 75\ A$

$U_N = 380\ V,\ 60\ Hz$

$\eta_N = 84\%$

$\cos\psi_N = 0,88$

$I_p = 6,5\ I_N$

$J_M = 0,333$

O tempo de partida, determinado com auxílio da minicalculadora conforme exemplo anterior é de :

$t_p = 1,15\ s$

O tempo e a corrente de frenagem são definidos a partir da expressão (71) (conexão triângulo)

$$I_{fr} = 2,12\ I_p^* \sqrt{\frac{\frac{2\pi J\ n_N}{60\ t_{fR}} - M_{C(M)}}{b.M_p}}$$

Para este acionamento tem-se

$$I_p^* = \frac{6,5 \times 75}{\sqrt{3}} = 281,46\ A$$

$$J = J_M + J_C\ (\frac{n_C}{n})^2 = 0,333 + 0,18\ (\frac{5000}{3550})^2$$

$J = 0,69\ Kg.m^2$

$n_N = 3550$ rpm

$M_{C(M)} = 0$ (frenagem a vazio)

$t_{fR} = 1,5$ S (valor adotado)

$M_p = 238,87$ N.m

$b = 1,6$ (dado do fabricante do motor)

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ

Desta forma

$$I_{fR} = 2,12 \cdot 281,46 \sqrt{\frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot 0,69 \cdot 3550}{60 \cdot 1,5}}{1,6 \cdot 238,87}}$$

$$I_{fR} = 399,13 \text{ A}$$

O fator A para este tipo de operação é:

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{G}-1)\ \frac{T_A}{T_R}\ (1-\frac{t_f}{T_A}) + 1 - K_o}{1 - K_o}}$$

onde

$$G = \frac{t_f}{t_f + t_d}$$

$t_f = 120 + 1,15 + 1,5 = 122,65$ s

$t_d = 180$ s

$$G = \frac{122,65}{122,65 + 180}$$

$$G = 0,41$$

A relação entre as constantes de tempo de

aquecimento e resfriamento será tomada

$$\frac{T_A}{T_R} = \frac{1}{1,5}$$

As tabelas 1 e 2 fornecem

$$T_A = 30 \text{ minutos}$$

$$K_o = 0,35$$

A relação entre o tempo de funcionamento e a constante de tempo de aquecimento é:

$$\frac{t_f}{T_A} = \frac{122,65}{30 \times 60} = 0,068$$

Desta forma, o fator A será

$$A = \sqrt{\frac{(\frac{1}{0,41} - 1)\ \frac{1}{1,5}\ (1-0,068) + 1-0,35}{1 - 0,35}}$$

$$A = 1,54$$

A equação (70) fornece a relação:

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{p^2 . t_p + f^2 . t_1 + f_R^2 . t_{fR}}{t_f}}$$

onde

$$p = 6,5$$

$$t_p = 1,15 \text{ s}$$

$$f = \frac{I_1}{I_N}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}.U_N.\eta_1.\cos\psi_1}$$

$P_1 = 29$ KW

$U_N = 380$ V

$\eta_1 = 84\%$ (obtido do catálogo)

$\cos\psi_1 = 0,85$ (obtido do catálogo)

$$I_1 = \frac{29 \times 10^3}{\sqrt{3}.380.0,81.0,85} = 61,71 \text{ A}$$

$$f = \frac{I_1}{I_N} = \frac{61,71}{75,0} = 0,82$$

$t_1 = 120$ s

$$f_R = \frac{399,13}{75} = 5,32$$

$t_{fR} = 1,5$ s

Desta forma:

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = \sqrt{\frac{6,5^2.1,15 + 0,82^2\ 120 + 5,32^2.1,5}{122,65}}$$

$$\frac{I_{ef}}{I_N} = 1,18$$

como

$$A > \frac{I_{ef}}{I_N}$$

O motor satisfaz as condições do acionamento.

b) *Especificação dos componentes de comando e proteção*

O critério para especificação dos componentes de comando e proteção é o mesmo que para operação S3.

As tabelas a seguir fornecem os valores a serem observados.

Para o motor de 2 polos:

$$I_{ef} = 1,18 . I_N = 1,18 . 75 = 88,8 \text{ A}$$

TABELA 39

- Fusíveis

I_N	88,8 A
U_N	380 V
I_p	487,5 A
t_p	1,15 s
I_{fr}	399,13 A
t_{fr}	1,5 s
I_d	I_{cc} [1]

1) I_{cc} - corrente de curto-circuito no quadro de comando

TABELA 40

- Contator

I_N	88,8 A
G	41%
Fusível	1)
I_d	487,5 A
U_N	380 V
$\cos\psi_d$	0,3

1) O contator deve ser compatível com o fusível escolhido

TABELA 41

- Relé térmico

Faixa de ajuste	deve conter 75
Fusível	1)
I_{Aj}	75 A
I_p	487,5 A 2)
t_p	1,15 s
I_{fr}	399,13 A
t_{fr}	1,5 s

1) Deve ser compatível com o fusível escolhido.

2) O relé não deve atuar para as condições de partida e de frenagem.

Vale aqui a mesma observação feita no exemplo anterior, com relação ao comportamento do relé perante partidas e frenagens sucessivas. No capítulo VI são feitas sugestões para análise do comportamento do relé perante partidas e frenagens sucessivas.

III.6 *Exemplo de Operação Contínua com carga Intermitente S6*

Para o acionamento de um torno mecânico é necessário um motor de indução trifásico, que para operação S6 com G = 60% e duração total de um período de 60 minutos, forneça 40 KW para uma velocidade de 1200 rpm.

a) Especificação do motor

A operação S6 permite a escolha de um motor com potência menor que a da carga.

Desta forma, termicamente a potência nominal do motor pode ser definida pela equação (76).

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{1}{G} - \frac{t_v}{T_A}}$$

onde

$$G = 60\%$$

O tempo de operação a vazio pode ser obtido a partir da expressão

$$G = \frac{t_f}{t_f + t_v}$$

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI Biblioteca M A B

$t_f + t_v = 60$ minutos

$t_f = 0,6 \times 50 = 36$ minutos

$t_v = 24$ minutos

O valor de T_A pode ser obtida da tabela 4:

$T_A = 50$ minutos

Desta forma tem-se

$$P_N = \frac{40}{\sqrt{\frac{1}{0,6} - \frac{24}{50}}}$$

$P_N = 36,72$ KW

De uma tabela de especificação de motores verifica-se que o motor de potência nominal 37 KW, 6 polos satisfaz termicamente o acionamento.

Dados do motor:

$P_N = 37$ KW

$n_N = 1180$ rpm

$M_N = 299,43$ N.m

$\frac{M_K}{M_N} = 2,1$

$\frac{M_p}{M_N} = 2,5$

$I_N = 72$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$\cos\varphi_N = 0,86$

$\eta_N = 90\%$

$I_P = 5,5\ I_N$

$J_M = 1,01\ Kg.m^2$

A verificação quanto a solicitação mecânica é feita através da equação (50).

$$P_{adm} = \frac{M_K}{M_N} \cdot \frac{P_N}{1,8}$$

Desta forma:

$$40 \leq 2,1 \cdot \frac{37}{1,8} \quad \therefore \quad 40 < 43,17$$

logo o motor satisfaz a solicitação mecânica.

b) *Especificação dos componentes de comando e proteção*

As tabelas a seguir fornecem os dados para especificação dos componentes de comando e proteção. Como o tempo de funcionamento é grande, a corrente eficaz para definição das correntes nominais do fusível e do contator e a corrente de ajuste do relé é a própria corrente de operação do motor.

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \eta_1 \cdot \cos\psi_1}$$

$P_1 = 40\ KW$

$\eta_1 = 90\%$

$\cos\psi_1 = 0,87$

$$I_1 = \frac{30 \times 10^3}{\sqrt{3}.380.0,9.0,87} = 77,16 \text{ A}$$

Também è necessária a definição do tempo de partida do motor, que pode ser feita conforme os exemplos anteriores. Admita-se

$t_p = 3$ s

TABELA 42

- Fusíveis

I_N	77,16 A
U_N	380 V
I_p	396 A
t_p	3 s
I_d	I_{cc} 1)

1) I_{cc} - corrente de curto-circuito no quadro de comando.

TABELA 43

- Contator

I_N	77,16 A
Fusível	1)
I_d	396 A
U_N	380 V
$\cos\psi_d$	0,3

1) O contator deve ser compatível com o fusível escolhido

TABELA 44

- Relé térmico

Faixa de ajuste	1)
Fusível	2)
I_{Aj}	3)
I_p	396 A
t_p	3 s

1) 2) 3) Valem as mesmas considerações feitas para o exemplo 2, ou seja o relé deve ser compatível com o fusível escolhido e sua corrente e faixa de ajuste devem ser definidas para que não haja atuação para 77,16 A durante 36 minutos e para 396 A durante 3s.

III.7 *Exemplo de Operação Ininterrupta S7*

Para o acionamento de um torno automático que opera continuamente nos dois sentidos de rotação é previsto um motor de indução trifásico bipolar.

Os dados da carga:

- Potência exigida nos dois sentidos = 3,0 KW
- Tempo de funcionamento à direita = 90 s
- Tempo de funcionamento à esquerda = 90 s
- Momento de inércia = 125 Kg.m²
- Velocidade de operação = 30 rpm

O processo de reversão é feito com inversão de fases de alimentação do motor.

a) Especificação do motor

Conforme a equação (79) o motor deve ser escolhido de modo que:

$$\sqrt{\frac{p^2 \cdot t_p + f_1^2 \; t_1 + f_R^2 \cdot t_{fR}}{t_f}} \leq 1$$

Será verificada a possibilidade de utilização de um motor de indução trifásico com potência nominal 3,7 KW.

- Dados do motor

P_N = 3,7 KW

$n_N = 3520$ rpm

$M_N = 10,04$ N.m

$\frac{M_K}{M_N} = 3,0$

$\frac{M_p}{M_N} = 3,0$

$I_N = 8,5$ A

$U_N = 380$ V

$\cos\psi_N = 0,82$

$\eta_N = 79\%$

$I_p = 7,4\ I_N$

$J_M = 0,0087$ Kg.m^2

Inicialmente devem ser determinados o tempo de partida e a corrente e o tempo de frenagem. Através do método indicado anteriormente, com auxílio de uma minicalculadora, obtém-se para o tempo de partida:

$t_p = 0,3$ s

O tempo de frenagem pode ser calculado a partir da expressão (74 b)

$$t_{fR} = \frac{2\pi J n_N}{60(M_{fR} + M_{C(M)})}$$

Nesta expressão

$$J = J_M + J_C \left(\frac{n_C}{n}\right)^2 = 0,0087 + 125 \left(\frac{30}{3520}\right)^2 = 0,01778 \text{ Kgm}^2$$

$$n_N = 3520 \text{ rpm}$$

O conjugado de frenagem é dado pela expressão (73):

$$\frac{M_{fR}}{M_p} = \frac{2(1 + s_K^2)}{4 + s_K^2}$$

O valor do escorregamento s_K correspondente ao conjugado máximo pode ser obtido a partir da expressão:

$$\frac{M_N}{M_K} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_K} + \frac{s_K}{s_N}}$$

$$\frac{1}{3} = \frac{2}{\frac{0,023}{s_K} + \frac{s_K}{0,023}}$$

$$s_K = 0,13$$

Desta forma o conjugado de frenagem será:

$$M_{fR} = 3 \times 10,04 \; \frac{2(1 + 0,13^2)}{4 + 0,13^2}$$

$$M_{fR} = 15,25 \text{ N.m}$$

O conjugado da carga referido ao eixo do motor será:

$$M_{C(M)} = \frac{60.P_C}{2\Pi n_C} \cdot \left(\frac{n_C}{n}\right) = \frac{60.P_C}{2\Pi n}$$

$$M_{C(M)} = \frac{60.3 \times 10^3}{2.\Pi.3520} = 8,14 \text{ N.m}$$

Desta forma, o tempo de frenagem será:

$$t_{fR} = \frac{2.\Pi.0,01778.3520}{60(15,25 + 8,14)}$$

$$t_{fR} = 0,28 \text{ s}$$

A corrente de frenagem vale:

$$I_{fR} = 1,3\ I_p$$

$$I_{fR} = 1,3 \times 7,4\ I_N$$

$$I_{fR} = 9,62\ I_N$$

Para verificação da condição estabelecida na equação (79) tem-se

$$p = 7,4$$

$$t_p = 0,3 \text{ s}$$

$$f_1 = \frac{I_1}{I_N}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}.U_N.\eta_1.\cos\psi_1}$$

$$P_1 = 3,0 \text{ PW}$$

$$U_N = 380 \text{ V}$$

$$\eta_1 = 79\% \text{ (obtido do catálogo)}$$

$$\cos\psi_1 = 0,78 \text{ (obtido do catálogo)}$$

$$I_1 = \frac{3 \times 10^3}{\sqrt{3}.380.0,79.0,78} = 7,40 \text{ A}$$

$$f_1 = \frac{7,4}{8,5} = 0,87$$

$$t_1 = 90 \text{ s}$$

$$f_R = \frac{I_{fR}}{I_N} = 9,62$$

$$t_{fR} = 0,28 \text{ s}$$

Desta forma

$$\sqrt{\frac{7,4^2 . 0,3 + 0,87^2 . 90 + 9,62^2 . 0,28}{90 + 0,3 + 0,28}} = 1,1$$

portanto, conforme a equação (79), este motor não pode ser utilizado.

Na tabela de especificação, o motor de potência mais próxima é de 5,5 KW.

Dados do motor

$P_N = 5,5$ KW

$n_N = 3520$ r.p.m

$M_N = 14,92$ N.m

$\frac{M_K}{M_N} = 3,2$

$\frac{M_p}{M_N} = 3,0$

$I_N = 12$ A

$U_N = 380$ V, 60 Hz

$\cos\psi_N = 0,86$

$\eta_N = 80\%$

$I_p = 8,7\ I_N$

$J_M = 0,0103\ Kg.m^2$

O tempo de partida para este motor, determinado conforme método descrito anteriormente:

$t_p = 0,19\ s$

O tempo de frenagem é calculado a partir da equação (74 b):

$$t_{fR} = \frac{2.\Pi.J.n_N}{60(M_{fR} + M_{C(M)})}$$

onde

$$J = J_M + J_C\left(\frac{n_C}{n}\right)^2 = 0,0103 + 125\ \left(\frac{30}{3520}\right)^2 = 0,01938\ Kgm^2$$

$n_N = 3520\ rpm$

O conjugado de frenagem é dado pela equação (73)

$$\frac{M_{fR}}{M_p} = \frac{2(1 + s_K^2)}{4 + s_K^2}$$

onde s_K é definido pela equação

$$\frac{M_N}{M_K} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_K} + \frac{s_K}{s_N}}$$

$$\frac{1}{3,2} = \frac{2}{\frac{0,023}{s_K} + \frac{s_K}{0,023}}$$

$$s_K = 0,14$$

O conjugado de frenagem será

$$M_{fR} = 3.14,92 \frac{2(1 + 0,14^2)}{4 + 0,14^2}$$

$$M_{fR} = 22,71 \text{ N.m}$$

O conjugado da carga referido ao eixo do motor é

$$M_{C(M)} = 8,14 \text{ N.m}$$

O tempo de frenagem será:

$$t_{fR} = \frac{2.\pi.0,01938.3520}{60(22,71 + 8,14)}$$

$$t_{fR} = 0,23 \text{ s}$$

A corrente de frenagem vale:

$$I_{fR} = 1,3 \; I_p$$

$$I_{fR} = 1,3 \times 8,7 \; I_N$$

$$I_{fR} = 11,31 \; I_N$$

Para verificação da condição estabelecida na equação (79) tem-se

$$p = 8,7$$

$$t_p = 0,19 \text{ s}$$

$$f_1 = \frac{I_1}{I_N}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}.U_N.\eta_1.\cos\psi_1}$$

$$P_1 = 3,0 \text{ KW}$$

$$U_N = 380 \text{ V}$$

$$\eta_1 = 80\%$$

$$\cos\psi_1 = 0,72$$

$$I_1 = \frac{3 \times 10^3}{\sqrt{3}.380 \times 0,8 \times 0,72} = 7,91 \text{ A}$$

$$f_1 = \frac{I_1}{I_N} = \frac{7,91}{12,0} = 0,66$$

$$t_1 = 90 \text{ s}$$

$$f_R = \frac{I_{fR}}{I_N} = 11,31$$

$$t_{fR} = 0,28 \text{ s}$$

Desta forma

$$\sqrt{\frac{8,7^2 \cdot 0,19 + 0,66^2 \cdot 90 + 11,31^2 \cdot 0,28}{90 + 0,19 + 0,28}} = 0,99$$

Este motor satisfaz a condição estabelecida pela equação (79), portanto pode ser especificado.

b) *Especificação dos componentes de comando e proteção*

As tabelas a seguir fornecem os valores a serem observados na especificação dos componentes de comando e proteção

TABELA 45
- Fusíveis

I_N	12 A
U_N	380 V
I_p	104,4 A
t_p	0,19 s
I_{fR}	135,72 A
t_{fR}	0,28 s
I_d	I_{cc} 1)

1) I_{cc} - corrente de curto-circuito no quadro de comando

TABELA 46
- Contator

I_N	12 A
Fusível	1)
I_d	104,4A
U_N	380 V
$\cos\psi_d$	0,3

1) O contator deve ser compatível com o fusível escolhido.

TABELA 47

Faixa de ajuste	deve conter 12 A
Fusível	1)
I_{Aj}	12 A
I_p	104,4 A 2)
t_p	0,19 s
I_{fR}	135,72 A
t_{fR}	0,28 s

1) O relé deve ser compatível com o fusível escolhido

2) O relé não deve atuar nas condições de partida e frenagem.

Com relação ao comportamento do relé perante sucessivas partidas e frenagens. vale a observação feita para operação S5.

III.8 Exemplo de operação ininterrupta S8

Uma bomba centrífuga de potência 2 KW acoplada diretamente a um motor de indução trifásico tetrapolar opera com velocidade variável obedecendo a seguinte lógica :

- velocidade nominal durante 10 minutos
- 70% da velocidade nominal durante 20 minutos
- 50% da velocidade nominal durante 15 minutos

- 40% da velocidade nominal durante 15 minutos

A operação é cíclica.

Os processos de aceleração e frenagem são controlados de modo que a corrente seja mantida num valor que não provoque solicitações mecânicas e térmicas consideráveis.

- *Especificação do motor*

Conforme o roteiro estabelecido no capítulo II para este tipo de operação, inicialmente deverá ser determinada a potência do motor necessária a cada velocidade de operação. Esta potência é definida a partir das expressões (90) e (91):

$$P = V_{adm} \frac{n}{1 - n}$$

$$V_{adm} = (1 + \frac{R'}{R''}) . V_2 . (\frac{1}{1 - K_o}) . f_v$$

onde

$\frac{R'}{R''}$ é a relação entre a resistência do estator e o valor referido ao estator da resistência do rotor. É um dado típico do motor, porém geralmente não é fornecido nas tabelas de especificação. Para motores normais vale aproximadamente 1,2. Para motores especiais com alta resistência do enrolamento do rotor vale aproximadamente 0,7. No presente caso trata-se de um motor normal.

V_2 é o valor das perdas no cobre do enrolamento do rotor, obtido através da expressão (85).

$$V_2 = V_2^* \cdot P_{D1_b}$$

V_2^* é o valor por unidade, referido a P_{D1_b} (potência máxima transferida no entreferro), fornecido pelas tabelas 21, 22 ou 23 (em função do tipo de carga). No presente caso vale a tabela 23, pois a carga varia com o quadrado da velocidade.

K_o é a relação entre as perdas a vazio e as perdas nominais do motor, fornecido pela tabela 1 em função da potência do motor. Neste caso deverá ser estimado, pois não se conhece a potência do motor.

f_v é o fator que leva em conta a redução da refrigeração do motor com a diminuição da velocidade. Deve ser fornecido pelo fabricante do motor, porém geralmente não consta das tabelas de especificação do motor.

A tabela 18 indicada a seguir, fornece todos os dados em função da velocidade.

TABELA 48

- Definição das potências para o ciclo de operação

$\frac{n}{n'}$	$\frac{R'}{R''}$	V_2^* [pu]	P_{D1_b} [KW] 1)	V_2 [KW]	K_o [pu] 2)	f_v [pu] 3)	V_{adm} [KW]	n [pu] 4)	P[KW]
0,70	1,2	0,15	2,22	0,33	0,25	1,67	1,62	0,82	7,36
0,50	1,2	0,125	2,22	0,28	0,25	2,78	2,28	0,82	10,4
0,4	1,2	0,032	2,22	0,07	0,25	4,0	0,82	0,76	4,46

1) O valor de P_{D1_b} é obtido da expressão 84

$$P_{D1_b} = \frac{2\pi n'}{60} \cdot M$$

onde P_{D1_b} é a potência máxima transferida no entre ferro. Para carga variando com o quadrado da velocidade tem-se

$$M = K\, n'^2$$

Para o motor de indução trifásico tetrapolar

$$n' = 1800 \text{ rpm}$$

O valor de K pode ser obtido a partir da operação nas condições nominais

$$M_N = K.n_N^2$$

Neste caso, é conhecida a potência mecânica (no eixo) nominal e a partir de uma tabela de especificação pode-se com bastante precisão estimar a velocida

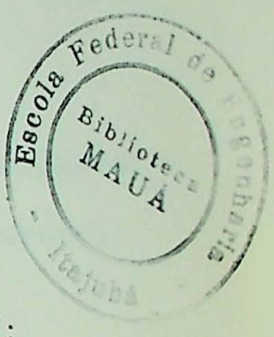
de nominal do acionamento. Neste caso

$n_N = 1740$ rpm

O conjugado nominal será

$$M_N = \frac{60\ P_N}{2\pi\ n_N}$$

$M_N = 10,98$ N.m


Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Portanto o fator K será

$$K = \frac{10,98}{1740^2} = 3,63.10^{-6}\ \left|\frac{N.m}{rpm^2}\right|$$

Logo o conjugado M para obter-se P_{D1_b} será:

$$M = 3,63.10^{-6}.1800^2$$

$M = 11,75$ N.m

Deve-se observar que o valor obtido para o conjugado M_N refere-se ao valor disponível no eixo enquanto que o conjugado M que define a potência P_{D1_b} refere-se ao conjugado do eletromagnético, portanto quando a igualdade foi estabelecida desprezou-se as perdas de conjugado por atrito e ventilação.

O valor de P_{D1_b} é:

$$P_{D1_b} = \frac{2.\pi.1800}{60} . 11,75$$

$P_{D1_b} = 2,22$ KW

2) O valor de K_o obtido da tabela 1 foi tomado 0,25, pois é válido para faixa de potência 2,2 a 15 KW, onde provavelmente estará situada a potência do motor.

3) Os fatores que levam em conta a redução da refrigeração do motor com a diminuição da velocidade foram tomados a partir de informações de um fabricante. (Veja apêndice no capítulo VI).

4) Os valores de rendimento também foram estimados a partir de uma tabela de especificação de motores.

Como os processos de aceleração e frenagem não interferem no aquecimento do motor, a potência do motor será definida a partir do valor eficaz das potências encontradas considerando-se também a operação para velocidade nominal.

$$P_N \geq \sqrt{\frac{7,36^2 . 20 + 10,4^2 . 15 + 4,46^2 . 15 + 2^2 . 10}{60}}$$

$$P_N \geq 7,12 \text{ KW}$$

Da tabela de especificação de motores conclui-se que o motor de potência nominal 7,5 KW é adequado ao acionamento.

IV. ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE ESPECIFICAÇÃO

IV. ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE ESPECIFICAÇÃO

Neste capítulo serão analisados os roteiros básicos estabelecidos para especificação dos motores, em função do regime de operação, sugerindo-se algumas simplificações e verificadas as respectivas consequências. Serão também abordados critérios de especificação para tipos de acionamento que não se adaptam diretamente aos oito casos analisados.

IV.1 *Simplificações nas expressões que definem a potência dos motores*

IV.1.1 *Operação de curta duração S2*

A expressão (48), que define a potência admissível de um motor que opera em regime de curta duração, pode ser bastante simplificada ao tomar-se

$$\tau_o = 0$$

o que significa matematicamente elevar-se o eixo de referência de $\tau=0$ para $\tau=\tau_o$. A expressão torna-se então:

$$P_{adm} = P_N = \sqrt{\frac{\left(1 - e^{-\frac{t_f}{T_A}}\right)^{-1} - k_o}{1 - k_o}} \qquad (105)$$

A expressão (105) permite calcular-se a potência admissível do motor sem levar em consideração a sua classe de isolamento.

O erro introduzido poderá ser analisado a

partir das tabelas (49) e (50), que comparam a relação entre a potência admissível e a potência nominal do motor em função da relação entre o tempo de funcionamento e a constante de tempo de aquecimento e da relação entre as perdas a vazio e as perdas nominais para as expressões que levam em conta as classes de isolamento B e F e para expressão simplificada.

TABELA 49 - Relação P_{adm}/P_N para $K_o=0,3$

t_f/T_A	P_{adm}/P_N		
	Classe B	Classe F	Simplificada
0,50	1,57	1,60	1,79
0,75	1,36	1,38	1,51
1,00	1,25	1,26	1,35
1,50	1,13	1,14	1,19
2,00	1,07	1,08	1,11

TABELA 50 - Relação P_{adm}/P_N para $K_o=0,4$

t_f/T_A	P_{adm}/P_N		
	Classe B	Classe F	Simplificada
0,50	1,65	1,68	1,89
0,75	1,41	1,44	1,58
1,00	1,28	1,30	1,40
1,50	1,15	1,16	1,22
2,00	1,08	1,09	1,12

Dos valores indicados nas tabelas, concluiu se que a expressão simplificada (105), resulta potências admissíveis maiores que aquelas obtidas a partir da equação(48). Verifica-se também que o erro introduzido pela expressão sim

plificada, será menor quanto maior o tempo de funcionamento do motor.

Um outro aspecto a ser analisado é o fato de que, geralmente, as tabelas de fabricantes de motores apresentam apenas os tipos com classe de isolamento B. O mesmo rotor com classe de isolamento F pode operar permanentemente com uma potência nominal maior que a indicada na tabela e consequentemente apresentará em operação de curta duração S2, uma potência admissível maior que a calculada a partir da expressão (48).

Conhecida a potência nominal do motor, para classe de isolamento B, é possível determinar-se o acréscimo em potência admissível, se o mesmo motor, operando em regime de curta duração, apresentar classe de isolamento F.

Um motor com classe de isolamento B, apresenta as perdas nominais dadas por:

$$V_N = \tau_{adm} \cdot A = 120.A \qquad (106)$$

O mesmo motor, porém com classe de isolamento F, apresenta:

$$V'_N = \tau'_{adm} . A = 140.A \qquad (107)$$

Logo, o acréscimo admissível de perdas para operação contínua será:

$$\frac{V'_N}{V_N} = \frac{140}{120} = 1,17 \qquad (108)$$

Para operação em curta duração S2, o motor com classe de isolamento B apresenta, conforme a equação (43):

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \frac{1 - \frac{40}{120} e^{-t_f/T_A}}{1 - e^{-t_f/T_A}} \qquad (109)$$

Para o mesmo motor com classe de isolamento F, tem-se:

$$\frac{V'_{adm}}{V'_N} = \frac{1 - \frac{40}{140} e^{-t_f/T_A}}{1 - e^{-t_f/T_A}} \qquad (110)$$

Comparando as equações (109) e (110), obtem-se:

$$\frac{V'_{adm}}{V_{adm}} = 1,17 \frac{1 - \frac{40}{140} e^{-t_f/T_A}}{1 - \frac{40}{140} e^{-t_f/T_A}}$$

Para diversos valores da relação t_f/T_A, verifica-se que o aumento de perdas admissível com a mudança de classe de isolamento, situa-se em torno de 20%.

$$V'_{adm} = 1,20\ V_{adm}$$

A potência admissível para classe de isolamento B será:

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{\frac{V_{adm}}{V_N} - K_o}{1 - K_o}}$$

Se a classe de isolamento é F

$$P'_{adm} = P_N \sqrt{\frac{1{,}20 \frac{V_{adm}}{V_N} - K_o}{1 - K_o}} \qquad (111)$$

Para diversos valores de V_{adm}/V_N, e de K_o, verifica-se que

$$P'_{adm} = 1{,}10 \text{ a } 1{,}15 \; P_{adm} \qquad (112)$$

ou seja, o mesmo motor ao ter sua classe de isolamento alterada de B para F, admite uma operação de curta duração,com uma potência de até 15% maior que a calculada a partir da equação (48).

IV.1.2 Operação Intermitente S3

A operação da equação (60) já contém simplificações que tornam a relação entre a potência admissível e a potência nominal do motor independente da classe de isolamento. Esta equação pode ainda ser mais simplificada, se na equação (57) forem feitas as seguintes considerações:

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \frac{t_d}{t_f} \cdot \frac{T_A}{T_R} + 1 - \frac{t_d}{T_R}$$

$$\frac{T_A}{T_R} = 1$$

$$t_d << T_R$$

Desta forma obtem-se

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = 1 + \frac{t_d}{t_f}$$

$$\frac{V_{adm}}{V_N} = \frac{1}{G} \qquad (113)$$

Assim, a relação entre a potência admissível e a potência nominal do motor será:

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{1 - K_o.G}{(1 - K_o)G}} \qquad (114)$$

A tabela (51) estabelece para K_o=0,3, t_f = 0,5 T_A e para alguns valores da intermitência G, uma comparação entre as equações (60) e (114).

TABELA 51 - Relação entre a potência admissível e a potência nominal para K_o=0,3 e t_f/T_A = 0,5

	P_{adm}/P_N	
G	equação (60)	equação (114)
0,25	1,59	2,3
0,4	1,31	1,77
0,6	1,15	1,40
0,8	1,06	1,16

Comparando-se as tabelas 19 e 51, verifica-se que o erro introduzido pela expressão simplificada torna-

se menor quanto maiores a relação t_f/T_A e a intermitência G.

Vale neste tipo de operação, a análise feita anteriormente para a mudança de classe de isolamento do motor.

Escola Federal de E... Biblioteca MA... B... de Itajubá - EFEI

IV.1.3 Operações intermitentes S4 e S5

As simplificações introduzidas na equação (60), que também define o fator A, importante na verificação da possibilidade de utilização de um motor para as operações intermitentes S4 e S5, não devem ser feitas para estes tipos de operação. A solicitação térmica do motor é bastante elevada devido a partidas e frenagens sucessivas, e qualquer erro adicional no cálculo do fator A, pode resultar numa redução sensível da vida útil do motor.

IV.1.4 Operação contínua com carga intermitente S6

A expressão (76) que define a relação entre a potência admissível e a potência nominal do motor, poderá ser simplificada para

$$t_v << T_A$$

Desta forma, obtem-se

$$P_{adm} = P_N \sqrt{\frac{1}{G}} \qquad (115)$$

Neste caso, é fácil concluir-se que a validade da simplifica

ção limita-se a valores pequenos da relação entre o tempo de operação a vazio e a constante de tempo de aquecimento do motor.

IV.1.5 Operação ininterrupta S1

A equação (79) que define a potência nominal do motor para este regime de operação, permite concluir que, para alguns acionamentos, não é possível a utilização de motores de indução trifásicos com rotor em curto-circuito.

$$\sqrt{\frac{p^2 t_p + f^2 . t_1 + f_R^2 . t_{fR}}{t_f}} \leq 1$$

Se o tempo t_f de duração do ciclo de operação é pequeno e os métodos de partida e frenagem são mantidos, um aumento de potência do motor provoca redução do fator f(relação entre a corrente de operação e a corrente nominal do motor), porém, pode também resultar num crescimento dos tempos de partida e frenagem do motor, uma vez que o momento de inércia do motor geralmente cresce mais que o conjugado motor nominal. Uma análise inicial da possibilidade de utilização de motores de indução trifásicos com rotor em curto-circuito, pode ser feita, para uma determinada potência, tornando-se na expressão (69):

$$f = 0$$

e verificando-se o valor do termo:

$$\sqrt{\frac{p^2 \cdot t_p + f_R^2 \cdot t_{fR}}{t_f}} = H \qquad (116)$$

Se

$$H \geq 1,$$

dificilmente será possível a utilização de motores de indução trifásicos com rotor em curto-circuito.

IV.1.6 Operação ininterrupta S8

O roteiro apresentado no capítulo II para especificação de motores que operam com carga e velocidade variáveis, é bastante trabalhoso, principalmente quando se exige interação para verificação dos valores de K_o e de η. O trabalho será ainda maior se as correntes de partida e frenagem interferirem sensivelmente no processo de aquecimento do motor.

Qualquer sugestão para simplificação no roteiro de definição da potência do motor, só poderá ser feita especificamente para cada tipo de acionamento, ou seja, em função dos dados do acionamento.

IV.2 Condições Especiais de Acionamentos

IV.2.1 Potência variável durante o tempo de operação

Frequentemente, alguns acionamentos operam com potência variável durante o tempo de carga, fugindo assim, das definições normalizadas para os tipos de operação.

Neste caso, pode-se representar a potência, o conjugado ou a corrente variável pelo valor médio quadrático.

$$P_M = \sqrt{\frac{P_1^2 . t_1 + P_2^2 . t_2 + \ldots + P_n^2 . t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}} \qquad (117)$$

Se a variação da carga não é muito grande durante o tempo de funcionamento, pode-se trabalhar com o valor eficaz de potência. Caso contrário, devido às variações de rendimento e fator de potência do motor, deve-se calcular o valor eficaz da corrente de operação.

Deve-se ainda, verificar se o conjugado máximo exigido pela carga durante o tempo de operação satisfaz a condição estabelecida pela equação (50).

IV.2.2 Motores com velocidade variável

O acionamento de cargas móveis com velocidade variável, é convencionalmente feito com motores de indução trifásicos de anéis com resistência do circuito do rotor variável.

Atualmente, apresenta-se como opção, a utilização de motores de indução de anéis com resistência externa constante no circuito do rotor e controle de velocidade através de variação da tensão do estator com auxílio de tiristores, conforme mostra a figura 22. Caracteriza-se, assim, o tipo de operação S8, definido anteriormente para motores com rotor em curto-circuito, porém com as seguintes vantagens:

- a resistência do circuito do rotor é maior que para motores normais;
- parte do calor gerado é dissipado fora do motor, resultando numa redução do sobredimensionamento do motor;
- para operação com velocidade nominal, a resistência externa ao rotor é curto-circuitada e o motor apresenta as características de um motor normal, com baixa resistência rotórica.

Neste caso, a potência do motor, definida pelas equações (90) e (91), será modificada para

$$P_N = V_{adm} \frac{\eta}{1-\eta}$$

$$V_{adm} = (1 + \frac{R'}{\overline{R}''}).V_2 \frac{R''}{\overline{R}''+\overline{R}_{ext}} \frac{1}{1-K_o}.f_v \qquad (118)$$

onde: $\overline{R}_{ext}$ - valor da resistência externa inserida no circuito do rotor, referida ao enrolamento do estator.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ

V. CONCLUSÕES

V. CONCLUSÕES

V.1 - Especificação do motor

Com relação a especificação de motores de indução trifásicos em função do tipo de operação tem-se:

- para as operações dos tipos S2, S3 e S6 o motor pode operar com potência maior que a nominal, fato este que usualmente não é observado nem levado em consideração nos métodos e roteiros adotados por fabricantes e fornecedores de acionamentos.
- para as operações dos tipos S4, S5 e S7 verificou-se que a definição dos tempos de partida e frenagem interferem sensivelmente na definição da potência do motor. A análise da melhor relação de acoplamento, ou seja, a definição do número de polos do motor feita de forma a obter-se o menor tempo de partida pode representar a escolha do motor de menor custo para o acionamento. A mesma consideração pode ser feita com relacão ao método de frenagem, levando-se em conta os custos dos equipamentos necessários, como ocorre na frenagem com corrente contínua. Este tipo de análise também não é usual nos roteiros usualmente adotados.
- para operação do tipo S8, o método sugerido abrange apenas os acionamentos com variação de tensão do estator, que devido ao grande acréscimo de perdas fica limitado a acionamentos de pequena potência. Para motores com controle de ten

são e frequência fica aberta a possibilidade de estabelecer se um critério que necessariamente deverá incluir além da definição de características especiais do motor, a escolha e a influência do conversor na definição da potência do motor.

- Finalmente, ficam ainda abertos caminhos para estabelecimento de critérios semelhantes para especificação de motores de corrente contínua.

V.2 - *Componentes de comando e proteção*

Com algumas excessões, os critérios sugeridos para escolha de componentes de comando e proteção não são atualmente observados por fornecedores de quadros de comando, pois como pode-se observar neste trabalho, estes critérios estão intimamente ligados com os critérios de definição de motores. Como o fabricante do quadro geralmente não é o fornecedor do motor, deixa de existir a interface.

VI. APÊNDICE

VI. APÊNDICE

Neste capítulo serão abordados alguns itens mencionados nos capítulos anteriores e sugeridas algumas expressões empíricas fornecidas por fabricante de motores e equipamentos de comando e proteção, que auxiliam nas soluções de problemas de especificação.

VI.1 *Programa para determinação do tempo de partida de motores de indução trifásicos com rotor em curto - circuito.*

No capítulo III foram determinados tempos de partida com auxílio de minicalculadora programáveis. A seguir é indicado o programa com base na minicalculadora do tipo HP-29 C.

Este programa é feito com base nas equações (100), (101), (102), (103) e (104), sendo válido para cargas constantes.

1) gLBLO A
2) RCL 3 Y_M
3) ENTER
4) g x^2
5) 1
6) -
7) f$\sqrt{\ }$
8) RCL 3
9) +
10) RCL 2 S_M
11) X
12) ST.1 Sk STO 10
13) R/S
14) RCL 3
15) ENTER
16) RCL.1
17) X
18) 2
19) X
20) CHS
21) RCL 4
22) +
23) RCL 8
24) X
25) 2
26) X
27) ST.2 K STO 11
28) R/S
29) gLBL 1 B
30) RCL 1
31) .001
.100
35) -
36) ST1 (11)
37) ENTER
38) g 1/x
39) +
40) g 1/x
41) ENTER
42) RCL.2 12
43) X
44) ST.3 D
45) RCL 1
46) RCL.1
47) ÷
48) ENTER
49) g 1/x
50) +
51) g 1/x
52) ENTER
53) 2
54) X
55) RCL 3
56) X
57) RCL 8
58) X
59) RCL.3
60) +
61) ST.3 (12)
62) RCL 5
63) ENTER
64) RCL 6
65) X
66) RCL 7
67) ÷
68) CHS
69) RCL.3
70) +
71) ST.4 MA
72) gx<0 PAUSE
73) GTO 2 C
74) 60
76) X
77) ENTER
78) g 1/x
79) RCL 7 D
80) X
81) 1000
10.0
85) ÷
86) 2
87) X
88) gΠ
89) X
90) RCL 9
91) X
92) RCL.5
93) +
94) ST.5
95) GTO 1 B
96) gLBL 2 K
97) RCL.5
98) gRTN

Observações: - O passo 13 fornece o valor de s_K
- O passo 28 fornece o valor de K

Os valores a serem armazenados nas memórias:

ST1 → 1,001

ST2 → s_N (escorregamento nominal)

ST3 → $y_M = \frac{M_K}{M_N}$

ST4 → $x_M = \frac{M_p}{M_N}$

ST5 → M_C (conjugado da carga referido ao eixo da carga)

ST6 → n_C (velocidade da carga)

ST7 → n (velocidade do motor)

ST8 → M_N

ST9 → $J = J_M + J_C (\frac{n_C}{n})^2$

VI.2 Verificação do comportamento de relês térmicos para operação intermitente

Especificado o relé térmico, conforme indicado para as operações do tipo intermitente, o comportamento térmico do relé perante sucessivas partidas, poderá ser verificado conforme a expressão:

$$Z = (\frac{I_p}{I_N})^2 (1 - e^{-t_p/T_A}) + e^{-(t_p/T'_A + t_d/T'_R)} + e^{-(t_p/T'_A + \frac{t_f + t_d}{T'_R})} . (1,05^2 - 1)$$

onde:

I_p corrente de partida do motor

I_N corrente nominal do motor

t_p tempo de partida do motor

t_f tempo de operação com carga constante

t_d tempo de desligamento

T'_A constante de tempo de aquecimento

T'_R constante de tempo de resfriamento do relé

O relé será adequado ao tipo de operação se:

$$Z < 1{,}05^2$$

VI.3 *Contatores operando em regime de curta duração*

Quando contatores operam em regime de curta duração, outros critérios devem ser observados na especificação do componente, conforme analisado nos capítulos II e III.

Se um contator opera com corrente nominal , sua temperatura máxima admissível é alcançada após um determinado tempo de funcionamento. Se o contator funciona durante um tempo menor que o necessário para atingir este valor máximo admissível e permanece, em seguida, desligado um intervalo de tempo suficiente para que a temperatura do componente volte ao valor do ambiente, o contator poderá operar com corrente maior que a nominal.

A figura 30, fornecida por fabricante de contatores, permite determinar a relação entre a corrente admissível para operação em curta duração e a corrente nominal do contator em função do tempo de funcionamento, admitindo-se

que o tempo de desligamento é suficiente para que a temperatura do componente volte ao valor da temperatura ambiente.

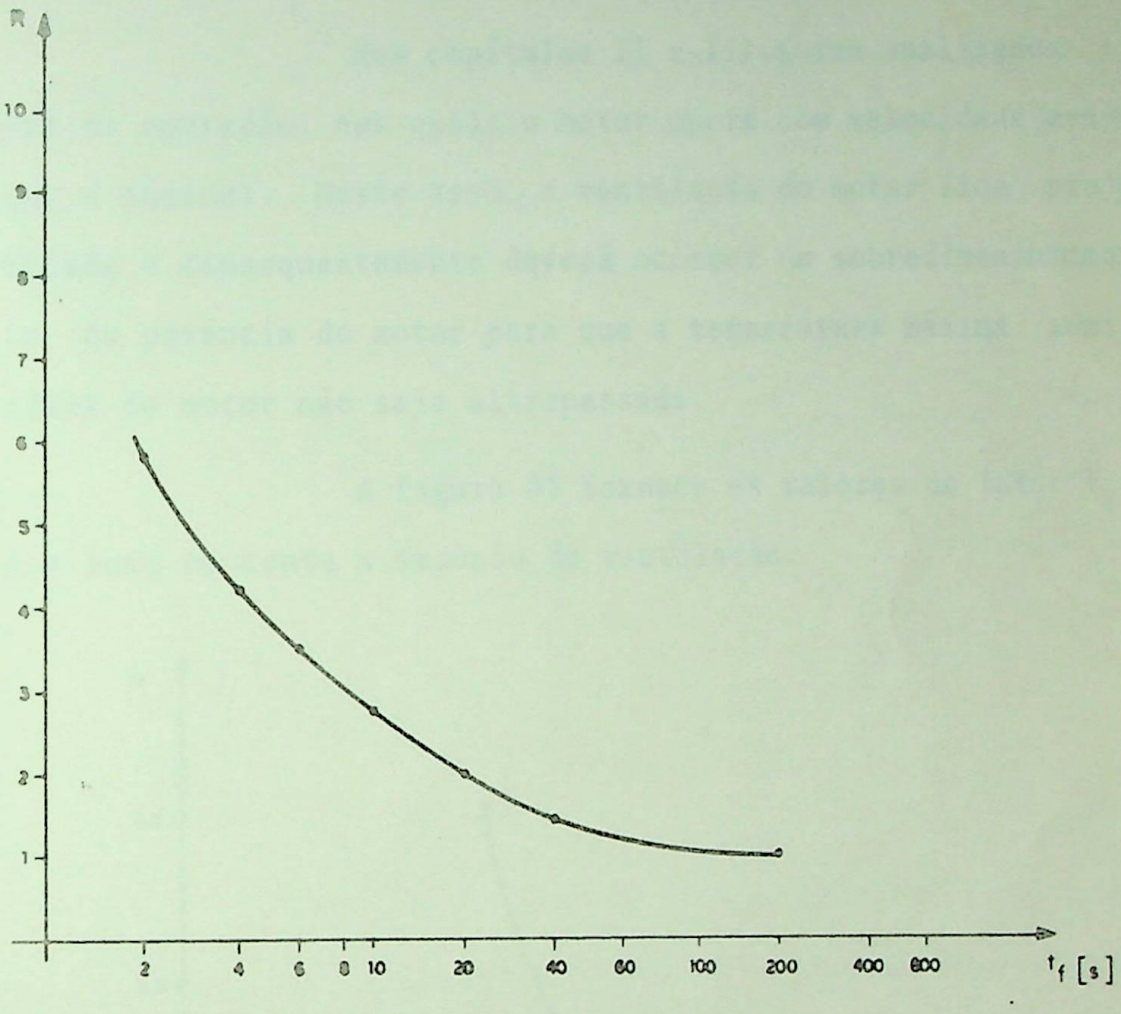


Figura 30 - Relação entre a corrente admissível para operação em curta-duração e a corrente nominal do contator em função do tempo de funcionamento

Conforme analisado nos capítulos II e III, a corrente nominal do contator será:

$$I_N = \frac{I_{ef}}{R}$$

VI.4 *Influência da redução de ventilação na definição da potência do motor*

Nos capítulos II e III foram analisados tipos de operação, nos quais o motor opera com velocidade menor que a nominal. Neste caso, a ventilação do motor fica prejudicada e consequentemente deverá ocorrer um sobredimensionamento da potência do motor para que a temperatura máxima admissível do motor não seja ultrapassada.

A figura 31 fornece os valores do fator f_v, que leva em conta a redução da ventilação.

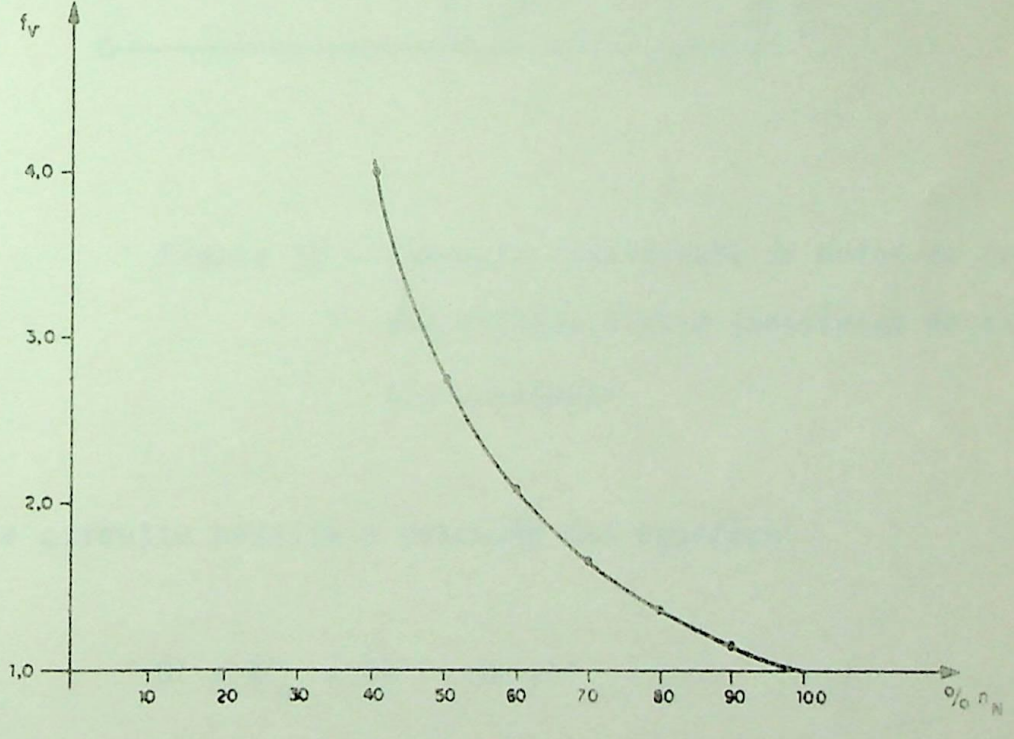


Figura 31 - Fator f_v que leva em conta a diminuição de ventilação do motor em função da redução de velocidade.

VI.5 Considerações sobre a equação que representa o conjugado motor em função do escorregamento.

A equação (2) que representa o conjugado motor em função do escorregamento, pode ser obtida a partir do circuito equivalente do motor de indução trifásico indicado na figura 32.

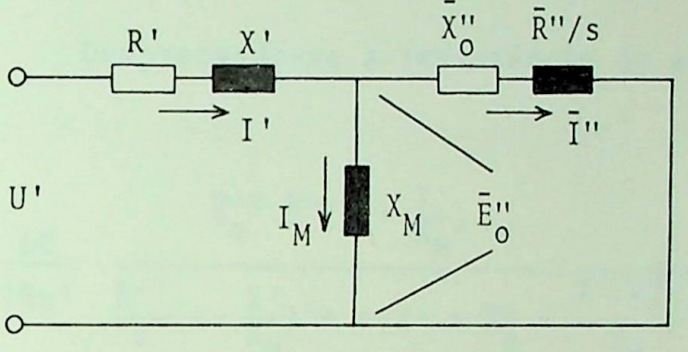


Figura 32 - Circuito equivalente do motor de indução trifásico para frequência do estator constante.

Este circuito permite a obtenção das equações:

$$\bar{U}' = \bar{E}''_o + (R' + jX')\bar{I}'$$

$$\bar{E}''_o = \left(\frac{\bar{R}''}{s} + j\bar{X}''_o\right)\bar{I}''$$

$$\bar{I}' = \bar{I}'' + I_M$$

$$I_M = \frac{E''_o}{jX_M}$$

A potência desenvolvida no rotor

$$P_M = \bar{R}''\left(\frac{1-s}{s}\right) I''^2 = M.\frac{2\Pi n}{60} = \frac{M.2\Pi n'(1-s)}{60}$$

$$M = \frac{\bar{R}''.I''^2}{s} . \frac{60}{2\Pi n'}$$

Desprezando-se a resistência do estator, obtem-se:

$$M = \frac{60}{2\Pi n'} \frac{\bar{E}''^2_o . \bar{R}''(1 + \frac{X'}{X_M})}{\frac{\bar{R}''^2}{s}(1+ \frac{X'}{X_M})^2 + s(X' + \bar{X}''_o + \frac{X'.X''_o}{X_M})^2}$$

O escorregamento s_K correspondente conjugado máximo M_K é obtido a partir de $\frac{dM}{ds} = 0$.

$$s_K = \frac{\bar{R}''(1 + \frac{X'}{X_M})}{X' + \bar{X}''_o + \frac{X'.X''_o}{X_M}}$$

O conjugado máximo M_K será:

$$M_K = \frac{60}{2\Pi n'} \frac{\bar{E}''^2_o}{2(X' + \bar{X}''_o + \frac{X'.X''_o}{X_M})}$$

Desta forma:

$$\frac{M}{M_K} = \frac{\frac{60}{2\Pi n'} \frac{E''^2_o . \bar{R}''(1 + \frac{X'}{X_M})}{\frac{\bar{R}''^2}{s}(1 + \frac{X'}{X_M})^2 + s(X' + \bar{X}''_o + \frac{X'.X''_o}{X_M})^2}}{\frac{60}{2\Pi n'} \frac{U'^2}{2(X' + X''_o + \frac{X'.X''_o}{X_M}}}$$

$$\frac{M}{M_K} = \frac{\dfrac{\overline{R}''(1 + \dfrac{X'}{X_M})}{\dfrac{R''^2}{s}(1 + \dfrac{X'}{X_M})^2 + s(X' + \overline{X}''_o + \dfrac{X' \cdot X''_o}{X_M})^2}}{\dfrac{1}{2(X' + \overline{X}''_o + \dfrac{X' \cdot X''_o}{X_M})}}$$

que resulta:

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\dfrac{s}{s_K} + \dfrac{s_K}{s}} \Rightarrow s_K = s_N \cdot \left[\frac{M_K}{M_N} + \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_N}\right)^2 - 1}\right]$$

OBS: $s_K > s_N$, por isso não se usou $s_N \left[\overline{M}_K - \sqrt{\overline{M}_K^2 - 1}\right]$

Esta equação contudo, não leva em conta a variação da resistência e da indutância de dispersão do rotor durante a partida como ocorre geralmente nos motores disponíveis no mercado. Neste caso, o comportamento do conjugado motor pode ser representado pela equação (6).

$$\frac{M}{M_K} = \frac{K_1}{\dfrac{s_{K_1}}{s} + \dfrac{s}{s_{K_1}}} + \frac{K_2}{\dfrac{s_{K_2}}{s} + \dfrac{s}{s_{K_2}}}$$

Esta equação é na realidade uma combinação de duas equações do conjugado motor em função do escorregamento, de modo que sejam atendidos os valores fornecidos para os conjugados de partida e máximo em relação ao nominal.

Para solução da equação são conhecidos:

$$\frac{M_P}{M_N}, \quad \frac{M_K}{M_N}, \quad sN$$

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Biblioteca

Devem ser determinados:

K_1, K_2, s_{K1} e s_{K2}.

A solução é obtida a partir do sistema de equações:

$$\frac{M_K}{M_K} = \frac{K_1}{\frac{s_N}{s_{K1}} + \frac{s_{K1}}{s_N}} + \frac{K_2}{\frac{s_N}{s_{K2}} + \frac{s_{K2}}{s_N}} \qquad (191)$$

$$\frac{M_P}{M_K} = \frac{K_1}{\frac{1}{s_{K1}} + s_{K1}} + \frac{K_2}{\frac{1}{s_{K2}} + s_{K2}} \qquad (120)$$

$$\frac{dM}{ds} = 0 = \frac{-K_1 M_K \left(\frac{1}{s_{K1}} - \frac{s_{K1}}{s_K^2}\right)}{\left(\frac{s_K}{s_{K1}} + \frac{s_{K1}}{s_K}\right)^2} - \frac{K_2 M_K \left(\frac{1}{s_{K2}} - \frac{s_{K2}}{s_K^2}\right)}{\left(\frac{s_K}{s_{K2}} + \frac{s_{K2}}{s_K}\right)^2} \qquad (121)$$

$$\frac{M_K}{M_K} = 1 = \frac{K_1}{\frac{s_K}{s_{K1}} + \frac{s_{K1}}{s_K}} + \frac{K_2}{\frac{s_K}{s_{K2}} + \frac{s_{K2}}{s_K}} \qquad (122)$$

A nova incógnita s_K pose ser definida pela equação (2)

$$\frac{M_N}{M_K} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_K} + \frac{s_K}{s_N}}$$

A solução deste sistema de equações é bastante trabalhosa. Desta forma, para fins de cálculo de tempo de partida pode-se substituir a equação (6) por:

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} + \frac{K}{\frac{1}{s_K} + s_K} \qquad (123)$$

ou seja, lançar-se mão da equação (2) e corrigí-la apenas no que se refere as condições de partida, com a introdução do segundo termo e cálculo de K, de modo que para:

$$s = 1$$

$$M = M_P$$

onde o conjugado de partida M_P é fornecido pelo catálogo do fabricante do motor.

$$\begin{cases} s_K = s_N \cdot \left[\frac{M_K}{M_N} + \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_N}\right)^2 - 1} \right] \\ K = \frac{M_P}{M_K} \cdot \left(\frac{1}{s_K} + s_K \right) - 2 \\ \frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} + \frac{K}{\frac{1}{s_K} + s_K} \end{cases}$$

BIBLIOGRAFIA

1 - Kümmel, Fritz - Elektrische Antriebstechnik

2 - Leonhard, Adolf - Elektrische Antriebe

3 - Lehmann, Wilhelm - Die Elektrotechnik und die Elektrische Antriebe

4 - Schmelcher, Theodor - Überstromschutz in Nieder - Spannungsanlagen

5 - Lipkin, B.Y. - Electrical Equipment for Industey

6 - Richter, R - Elektriche Machinen

7 - Kostenko, M and L.Piotrovsky - Electrical Machines

8 - Rentzsch, H - Handbuch fuer Elektromotoren

9 - Veshenevski, S - Caracteristicas de los Motores en el Accionamento Electrico.

10 - Catálogo para especificação de motores de indução trifásicos da firma WEG S/A

11 - Catálogo para especificação de motores de indução trifásicos da firma Siemens S/A

12 - Catálogo para especificação de equipamentos elétricos da firma Siemens S/A

13 - Apostila de Controle de Velocidade de Máquinas de Corrente alternada