

PROJETO DO ACIONAMENTO

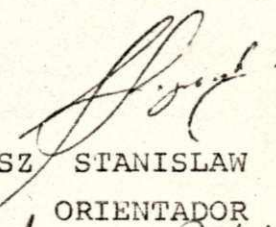
E L É T R I C O D E U M A

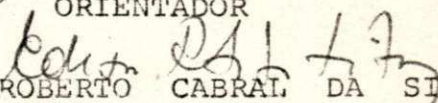
P O N T E - R O L A N T E

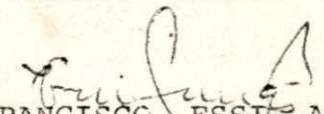
L U C I A N A A L T I N O Q U E R E T T E

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVER
SIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁ
RIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

APROVADA POR :


(JANUSZ STANISLAW LIPOWSKI)
ORIENTADOR


EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA


FRANCISCO ESSI AMIGO

CAMPINA GRANDE - PB
1973



Q4p

Querette, Luciana Altino.

Projeto do acionamento elétrico de uma ponte-rolante /
Luciana Altino Querette. - Campina Grande, 1973.
Ca.200 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica
da Universidade Federal da Paraíba, 1973.

"Orientação : Prof. Janusz Stanislaw Lipowski".

Referências.

1. Acionamento de Motores Elétricos. 2. Ponte-Rolante.
3. Circuitos de Acionamento. 4. Dissertação - Ciências. I.
Lipowski, Janusz Stanislaw. II. Universidade Federal da
Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.313.13(043)

AGRADECIMENTOS

Quero expressar os meus agradecimentos em especial ao Professor Janusz S. Lipowski , pela sua excepcional orientação e contribuição neste trabalho e na minha vida profissional . Agradeço também aos Professores Edison Roberto Cabral da Silva e Francisco Essi Amigo pelas críticas construtivas com que contribuíram . Finalmente agradeço à Escola Politécnica de Campina Grande, por ter possibilitado a realização deste trabalho .

S I N O P S E

Este trabalho consiste de um projeto dos circuitos de acionamento de uma clássica ponte-rolante para cargas leves, de aplicação industrial típica e de simples operação padronizada.

Os motores de acionamento de cada um destes movimentos requeridos no projeto, são:

- ponte - motor série DC
- trolley - motor de indução trifásico de gaiola
- guindaste - motor de indução trifásico de anéis

O movimento de descida de carga se subdivide em dois movimentos de diferentes velocidades, obtidos pela atuação do motor de indução de anéis em regime permanente de freio regenerativo e de freio por inversão.

Todos os movimentos são acionados por controle remoto através de botões de comando. Os circuitos de acionamento são puramente de malha aberta, constituídos por dispositivos clássicos e padronizados.

Em qualquer movimento cabe ao operador encontrar uma requerida posição. Os únicos limites de operação são dados pelo sistema de proteção mecânica de fine-de-cen

so, e pelo sistema de proteção elétrica.

É dada especial atenção na investigação da existência de normas e instrução que regulamentou o projeto, cujo desenvolvimento deve ser em concordância com esses documentos

In this project, therefore, three driving motors are specified as follows: the following:

- 1. For the main movement - series DC motor
- 2. For the hoist, a general purpose, squirrel cage induction motor
- 3. For the third movement - three-phase slip-ring induction motor

The electrical network is made of one phase and automatic control system of standard type. All movements are achieved by gear-driven electric connections and operated under the necessary procedures.

The electrical system is designed to insure that, in case of emergency, there is no interruption of power, and that the system is able to operate under the most adverse conditions.

The system is designed to protect the electrical system against short circuits and other electrical faults.

discussed and their data are also given.

Finally, special remarks are emphasized that investigation of existing norms and instruction for regulating the system should be in accordance with this paper.

Í N D I C E

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1-1

CAPÍTULO 2

ACIONAMENTO DA PONTE

Símbolos e Unidades 2-1

2-1 Introdução 2-6

2-2 Requisitos do Projeto 2-7

2-3 Escolha do Motor M_1 2-9

2-4 Redução de Velocidade 2-12

2-5 Torque de Carga Nominal do Sistema 2-13

2-6 Torque Nominal Elétrico 2-13

2-7 Velocidade de Vazio do Motor 2-13

2-8 Inércia do Sistema 2-14

2-9 Partida e Aceleração 2-16

2-10 Freio 2-29

2-11 Proteção de Fim de Curso 2-32

2-12 Circuito de Acionamento da Ponte 2-35

CAPÍTULO 3

ACIONAMENTO DO TROLLEY

Símbolos e Unidades 3-1

3-1 Introdução 3-5

3-2 Requisitos do Projeto 3-7

3-3 Escolha do Motor M_3 3-8

3-4 Redução de Velocidade 3-11

VIII

3-5	Torque de Carga Nominal do Sistema	3-12
3-6	Torque Nominal Elétrico	3-12
3-7	Inércia do Sistema	3-13
3-8	Partida e Aceleração	3-13
3-9	Freio	3-18
3-10	Proteção de Fim de Curso	3-22
3-11	Circuito de Acionamento do Trolley	3-28

CAPÍTULO 4

ACIONAMENTO DO GUINDASTE

	Símbolos e Unidades	4-1
4-1	Introdução	4-7
4-2	Requisitos do Projeto	4-9
4-3	Escolha do Motor M_3	4-12
4-4	Redução de Velocidade	4-16
4-5	Torque de Carga Nominal do Sistema	4-17
4-6	Torque Nominal Elétrico	4-17
4-7	Inércia do Sistema	4-17
4-8	Movimento de elevação	4-18
4-9	Movimento de Descida com Velocidade V_1	4-35
4-10	Movimento de Descida com Velocidade V_2	4-54
4-11	Cálculo do Tempo de Atuação do Freio Eletromagnético nos Movimentos de Descida	4-67
4-12	Cálculo da Localização do Relé de Fim de Curso nos Movimentos de Descida	4-71
4-13	Variação de Velocidade Durante os Movimentos de Descida	4-77
4-14	Circuito de Acionamento do Guindaste	4-82

CAPÍTULO 5

INSTRUÇÕES DE OPERAÇÃO

Símbolos e Unidades	5-1
5-1 Introdução	5-2
5-2 Disposição dos Botões e Lâmpadas de Sinalização no Quadro de Comando	5-2
5-3 Indicações das Lâmpadas de Sinalização	5-4
5-4 Limite de Carga Mínima nos Movimentos	5-8
5-5 Distâncias Mínimas dos Fins de Cursos nos Movimentos	5-11

CAPÍTULO 6

ESPECIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS USADOS
NOS CIRCUITOS DE ACIONAMENTO

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

APÊNDICE A

MOTOR SÉRIE DC

Símbolos e Unidades	A-1
A-1 Características Torque-Velocidade	A-5
A-2 Partida e Aceleração por Meio de Reostatos	A-8

APÊNDICE B

MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Símbolos e Unidades	B-1
B-1 Características Torque-Velocidade	B-5

B-2 Dinâmica do Sistema	B-7
B-3 Partida e Aceleração do Motor Gaiola	B-9
B-4 Partida e Aceleração do Motor de Aneis por Meio de Resistências Adicionadas ao Circuito do Rotor	B-15
B-5 Freio Regenerativo no Motor de Aneis	B-20
B-6 Freio por Inversão com Carga Ativa no Motor de Aneis	B-29

APÊNDICE C

PROTEÇÃO ELÉTRICA

C-1 Proteção contra Sobre-Carga	C-1
C-2 Proteção contra Sub-Tensão	C-3
C-3 Chave Separadora	C-4

APÊNDICE D

CÁLCULO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELAS RESISTÊNCIAS ADICIONAIS

APÊNDICE E

DIAGRAMAS DOS CIRCUITOS ELÉTRICOS E SÍMBOLOS GRÁFICOS

E-1 Diagramas dos Circuitos de Instalações Elétricas	E-1
E-2 Símbolos Gráficos Usados nos Circuitos de Acionamento e nas Descrições do seu Funcionamento	E-4

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 1INTRODUÇÃO

Uma ponte-rolante é um equipamento industrial usado para o transporte de cargas . Este equipamento tem uma grande utilidade prática , sendo comumente empregado na maioria das indústrias de manuseio de cargas pesadas, e sempre que é necessário o contínuo transporte de cargas .

Normalmente uma ponte-rolante é um sistema com tres movimentos independentes . Dois destes movimentos são horizontais , enquanto que o terceiro é um movimento vertical . Os movimentos horizontais são perpendiculares entre si , e são respectivamente ditos movimentos da ponte e do trolley . O movimento da ponte é definido como o acionamento da estrutura total da ponte , que se desloca em dois sentidos , denominados para frente e para trás . O movimento do trolley é também realizado em dois sentidos , respectivamente para direita e para esquerda , numa direção perpendicular ao movimento da ponte . Normalmente o trolley é composto por uma cabine montada sobre rodas que , contendo o quadro de comando do sistema , as partes integrantes do guindaste e o sistema de acionamento do próprio trolley, se desloca sobre trilhos fixados na estrutura da ponte . O movimento vertical , definido como o acionamento do guindaste , é realizado nos sentidos de elevação e descida da carga . Cada um destes tres movimentos é obtido por meio de pe

lo menos um motor de acionamento .

Os circuitos de acionamento de uma ponte-rolante podem ser projetados utilizando-se diferentes métodos de controle . Um destes métodos , o mais tradicional , é a construção dos circuitos com elementos clássicos , tais como reles e resistências padronizadas , empregando controle para o comando da aceleração e freio dos movimentos . Modernamente , esta solução dos circuitos com elementos clássicos é empregada utilizando-se controle automático de malha aberta . Nesta situação os movimentos são acionados apenas por botões de comando . Circuitos de acionamento mais sofisticados empregam controle automático de malha aberta , obtido por componentes eletrônicos , e controle automático de malha fechada , envolvendo controle numérico , para programar e encontrar com precisão uma dada posição . A escolha da solução para a construção dos circuitos de acionamento depende dos requisitos do projeto , bem como do próprio projetista .

O presente trabalho consiste do projeto dos circuitos de acionamento de uma clássica ponte-rolante para cargas leves , de aplicação industrial típica e de simples operação padronizada . Os principais objetivos deste trabalho são :

- realização de um projeto-modelo industrial para exemplificação dos procedimentos corretos a serem usados na solução de projetos correlatos ;

- comparação entre resultados obtidos por meio de procedimentos diferentes para a solução de um mesmo problema ;
- pesquisa da existência de documentações e recomendações técnicas oficiais nacionais que devam ser utilizadas como uma base para o projeto ;
- verificação de regulamentações oficiais nacionais relacionadas com a segurança e desempenho de sistemas de pontes-rolantes que , obrigatoriamente , devam ser consideradas pelo projetista durante o desenvolvimento do projeto .

Para a realização de um projeto , são fornecidos ao projetista uma série de dados e requisitos , baseado nos quais o engenheiro soluciona os diversos problemas encontrados . No caso particular do projeto apresentado neste trabalho os dados gerais fornecidos ao autor são ;

- carga nominal acionada pela ponte ;

$$G_P = 200 \text{ kN} = 20,4 \text{ ton}$$

- peso da estrutura total da ponte ;

$$G_S = 1 \text{ MN} = 102 \text{ ton}$$

- tempo relativo de trabalho efetivo do sistema ;

60%

Além dos dados fornecidos ,alguns requisitos são exigidos do autor para a solução do projeto . Estes requisitos são apresentados a seguir :

- num dado intervalo de tempo só deve ser possível apenas um movimento do sistema ;
- os motores de acionamento para cada movimento devem ser :
 - ponte - motor série DC (M_1)
 - trolley - motor de indução trifásico (M_2)
 - guindaste - motor de indução trifásico (M_3)
- os circuitos de acionamento dos motores não devem ser dotados de automatizações especiais ,para programar e encontrar com precisão uma posição , ou quaisquer outras automatizações de malha fechada , ou automatizações de malha aberta obtidas através de componentes eletrônicos ; portanto os circuitos de acionamento devem ser dotados apenas de automatizações de malha aberta obtidas através de dispositivos clássicos , tais como relés e resistências padronizadas ; assim , em cada movimento , a escolha de uma posição depende arbitrariamente do operador , e os limites de operação devem ser dados apenas pelos sistemas de proteção elétrica e mecânica ;
- todas as operações devem ser acionadas pelo uso

de botões de comando ;

- todos os circuitos elétricos do sistema devem ser dotados de sistemas de proteção adequados ; deve ser usada proteção mecânica especial para o movimento do guindaste , e dispositivos elétricos ou mecânicos especiais , que limitem os movimentos da ponte , do trolley e do guindaste ; também devem ser usadas as proteções referentes ao sistema exigidas pelas autoridades competentes do país ;
- todas as soluções do projeto devem ser encontradas em concordância com as normas e recomendações existentes no país ; no caso da não existência de documentos nacionais específicos para solucionar um problema particular , devem ser utilizadas normas ou recomendações particulares estrangeiras ;
- é suficiente apenas a apresentação do diagrama ideal dos circuitos elétricos de acionamento , (apend.E, art.(E-1)) .

Outros dados e requisitos detalhados , relativos a cada movimento em separado e fornecidos ao autor , são apresentados nos capítulos 2 , 3 e 4 .

A escolha da forma de organização e apresentação do trabalho é baseada na decisão de que o desenvolvimento prático do projeto deve ser separado das considerações e

discursões teóricas . Esta apresentação torna mais fácil para o leitor seguir o desenvolvimento do projeto . Portanto os cálculos práticos de solucionamento do projeto são agrupados nos capítulos 2 a 6 , e o suporte teórico necessário é agrupado nos apêndices A a D . Estes apêndices são baseados nas referências bibliográficas indicadas em seus textos e em trabalhos desenvolvidos pelo autor .

CAPÍTULO 2ACIONAMENTO DA PONTESÍMBOLOS E UNIDADES

<u>SÍMBOLO</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
$a = \frac{B_1 - B_n}{I_1 - I_n}$	constante	$\text{Wb/m}^2 \text{ A}$
B	densidade de fluxo no eixo <u>di</u> reto	Wb/m^2
B_1	densidade de fluxo no eixo <u>di</u> reto correspondente à corren <u>te</u> I_1	Wb/m^2
B_2	densidade de fluxo no eixo <u>di</u> reto correspondente à corren <u>te</u> I_2	Wb/m^2
B_n	densidade de fluxo no eixo <u>di</u> reto correspondente à corren <u>te</u> I_n	Wb/m^2
$b = \frac{I_1 B_n - I_n B_1}{I_1 - I_n}$	constante	Wb/m^2
$c = \frac{I_1 - I_2}{n_i - n_{i-1}}$	constante	A/rpm
$d = \frac{I_1 n_i - I_2 n_{i-1}}{n_i - n_{i-1}}$	constante	A
D_e	diâmetro do eixo	m
D_r	diâmetro da roda	m
E	força eletromotriz gerada na	

<u>SÍMBOLO</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
	armadura	V
$e = ac^2k_2$	constante	Nm/rpm ²
F	coeficiente de atrito de rola <u>mento</u>	m
$f = c(2ad+b)k_2$	constante	Nm/rpm
g	aceleração da gravidade	m/s ²
G _c	força resistente total	N
G _{M₁}	peso do motor	N, kg
G _o	força resistente em vazio	N
G _p	peso da carga nominal	N
G _s	peso da ponte	N
$h = d(ad+b)k_2$	constante	Nm
i	razão de redução de velocidade	-
I ₁	corrente máxima de armadura du <u>ra</u> nte a aceleração	A
I ₂	corrente mínima de armdura du <u>ra</u> nte a aceleração	A
I _a	corrente de armadura	A
I' _{eq}	corrente média quadrática de armadura	A
I _{eq}	corrente equivalente para o esquentamento	A
I _n	corrente nominal de armadura	A

<u>SÍMBOLO</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
J_1	momento de inércia do sistema ponte	Nms^2
J'_C	momento de inércia da carga referido ao eixo do motor	Nms^2
J_{M_1}	momento de inércia do motor M_1	Nms^2
k	coeficiente de atrito adicional	-
$K_1 = \frac{PZ}{2\pi q}$	constante	$\frac{Vs}{Wb \times Id} = \frac{Nm}{Wb \times A}$
$K_2 = K_1 S$	constante	$\frac{Vs m^2}{Wb \times Id} = \frac{Nm^3}{Wb \times A}$
$K_3 = \frac{\pi}{30} K_2$	constante	$\frac{V m^2}{Wb \times rpm}$
m_C	massa da carga	Ns/m^2
n	velocidade de rotação do rotor	rpm
n_i	velocidade de rotação do rotor correspondente ao corte de <u>de</u> graus de aceleração	rpm
n_n	velocidade nominal de rotação do rotor	rpm
n_o	velocidade de vazio de rotação do rotor	rpm
n_r	velocidade nominal de rotação das rodas	rpm
P	número de polos	-
P_C	potência da carga	W
P_i	potência da resistência R_i	W

<u>SÍMBOLO</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
P_n	potência nominal do motor	W
q	número de caminhos paralelos no enrolamento de armadura	-
$r = r_a + r_f$	resistência combinada de armadura e campo	Ω
r_a	resistência de armadura	Ω
r_f	resistência de campo	Ω
R_i	resistência adicional do circuito de armadura	Ω
r_i	resistência total do circuito de armadura	Ω
s	área do entre-ferro	m^2
t	tempo	s
t_a	tempo total de aceleração	s
T_c	torque de carga	Nm, WS
T_d	torque dinâmico	Nm, WS
T_e	torque elétrico	Nm, WS
T_{fe_1}	torque fornecido pelo freio eletromagnético	Nm, WS
t_f	tempo de freio	s
t_i	tempo de aceleração ou freio para um degrau	s
T_n	torque nominal elétrico	Nm, WS
t_{pi}	tempo relativo de inatividade do sistema	s
t_{ti}	tempo relativo de atividade do sistema	s

<u>SÍMBOLO</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
V_n	tensão nominal de alimentação	V
v_n	velocidade nominal de translação da ponte	m/s
v_o	velocidade de vazio de translação da ponte	m/s
x	distância	m
x_{M_1}	distância de colocação dos relés de fim de curso	m
Z	número de condutores ativos no enrolamento de armadura	-
η_{M_1}	eficiência do motor M_1	-
η_r	eficiência de cada estágio de engrenagens	-
ϵ_R	constante de tempo térmica de uma resistência	s
w	velocidade angular do motor	rd/s
w_n	velocidade angular nominal do motor	rd/s

2 - 1. INTRODUÇÃO

É requerido neste projeto que a estrutura da ponte seja acionada por um motor série DC . Um motor deste tipo é escolhido porque o acionamento da ponte exige um substancialmente alto torque de partida para vencer a inércia da massa , e a característica mecânica do motor série se adapta muito bem a esta condição de carga .

A fig.(2-1) mostra o diagrama cinemático simplificado do acionamento da ponte . Movida pelo motor M_1 , a ponte se desloca sobre rodas as quais se apoiam em trilhos paralelos fixos .

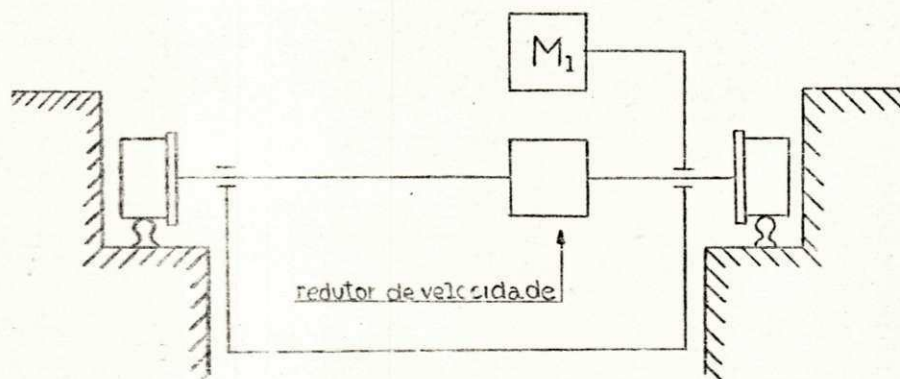


diagrama cinemático simplificado do
acionamento da ponte

fig.(2-1)

Seus movimentos são acionados por botões de comando, que, por sua vez, acionam os circuitos de controle do motor, dando origem aos movimentos para frente e para trás e ao acionamento do freio do sistema. Para uma dada carga, a ponte se desloca com a mesma velocidade constante em ambas as direções.

Cabe ao operador escolher e encontrar uma posição requerida durante os movimentos da ponte. No entanto, um limite de operação nos terminais do seu curso deve ser fornecido por dispositivos especiais de proteção mecânica.

2 - 2. REQUISITOS DO PROJETO

2 - 2.1 DADOS FORNECIDOS AO AUTOR

Para o projeto do acionamento da ponte, os dados e requisitos fornecidos ao autor são :

motor de acionamento da		
ponte	-	motor série DC
mancais de suporte	-	mancais de deslizamento
peso da ponte	-	$G_s = 1 \text{ MN} = 102 \text{ ton}$
peso da carga nominal	-	$G_p = 200 \text{ kN} = 20,4 \text{ ton}$
diâmetro do eixo	-	$D_e = 0,16 \text{ m}$
diâmetro das rodas	-	$D_r = 0,8 \text{ m}$

coeficiente de atrito de rolamento	-	$F = 0,0005 \text{ m}$
coeficiente de atrito nos mancais de deslizamento	-	$\mu = 0,08$
velocidade nominal de trans_ lação da ponte	-	$v_n = 0,5 \text{ m/s}$
eficiência de cada estágio de engrenagens	-	$\eta_r = 0,97$

Outros parâmetros necessários e as soluções espe_ cíficas do projeto são livre escolha do autor . Este procu_ ra o ponto de otimização , para que se obtenha melhores re_ sultados técnicos com maior economia na construção e atua_ ção do sistema .

2 - 2.2 ESQUEMA DE SOLUÇÃO DO PROJETO DE ACIONAMENTO DA PONTE

Para projetar o acionamento da ponte o engenheiro projetista deve seguir o esquema abaixo , solucionando cada item :

- escolha do motor
 - potência
 - características técnicas
 - velocidade nominal
 - velocidade de vazio
- escolha do redutor de velocidade
 - razão de redução

- eficiência
- potência nominal
- diagrama operacional
 - regime permanente
 - aceleração
 - freio
 - inversão de velocidade
 - proteção
 - descrição da operação
- escolha dos equipamentos elétricos auxiliares

2 - 3. ESCOLHA DO MOTOR M_1

Pelo sistema apresentado na fig.(2-1) , o motor M_1 deve ter uma potência , em regime permanente , suficiente para vencer o atrito nos mancais e o momento resistente ao rolamento das rodas sobre o trilho . A força total resistente é dada por , (1, pag.20) :

$$G_c = K \frac{G_s + G_p}{D_r} (2F + \mu D_e) =$$

$$= 1,5 \times \frac{1000 + 200}{0,8} (2 \times 0,0005 + 0,08 \times 0,16) \text{KN} = 31,05 \text{KN}$$

Considerando inicialmente que o redutor de velocidade é formado por tres estágios de engrenagens , a potência de acionamento do sistema mecânico é :

$$P_c = \frac{G_c \times v_n}{(\eta_r)^3} = \frac{31,05 \times 0,5}{(0,97)^3} \text{ kW} = 17 \text{ kW}$$

Baseado no cálculo acima , o motor escolhido , em catálogo , tem as seguintes características :

potência nominal	-	$P_n = 18 \text{ kW}$
velocidade nominal	-	$n_n = 900 \text{ rpm}$
tensão nominal	-	$V_n = 600 \text{ V}$
rendimento	-	$\eta_{M_1} = 0,88$
peso do motor	-	$G_{M_1} = 100 \text{ kg}$
tempo relativo de funcionamento	-	$\epsilon = 40\%$

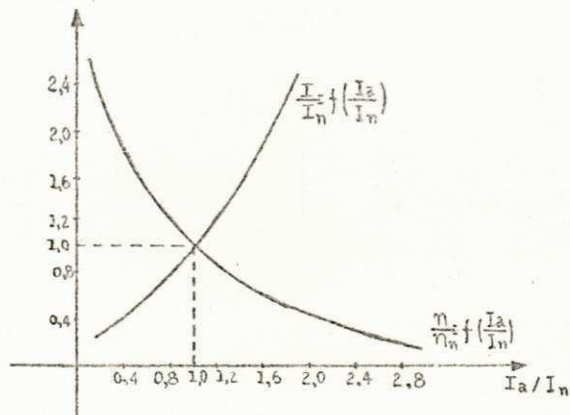
A fig.(2-2) apresenta as características torque-corrente e velocidade-corrente em valores por unidade dos valores nominais . E a fig.(2-3) apresenta a curva de magnetização da máquina . Estas características , bem como os outros dados do motor , são fornecidas pelo fabricante .

Ainda é fornecido pelo fabricante que a queda de tensão na resistência combinada de armadura e campo série é 10% da tensão de alimentação . Portanto como

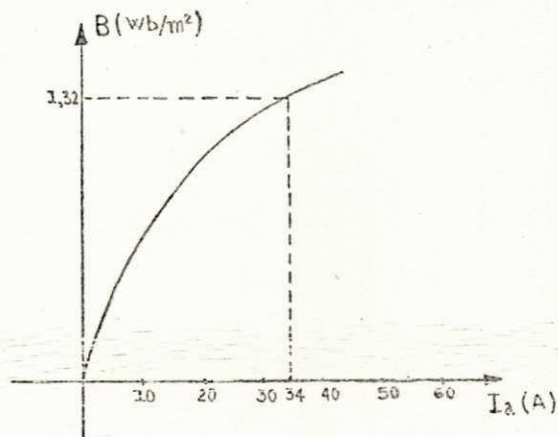
$$I_n = \frac{P_n}{\eta_{M_1} \times V_n} = \frac{18 \times 10^3}{0,88 \times 600} \text{ A} = 34 \text{ A}$$

tem-se que ::

$$r = r_a + r_f = \frac{0,10 V_n}{I_n} = \frac{0,10 \times 600}{34} \Omega = 1,77 \Omega$$



característica torque-corrente e
de carga do motor M_1
fig.(2-2)



curva de magnetização do motor M_1
fig.(2-3)

É necessário também calcular a constante k_3 da má

quina , para sua aplicação no desenvolvimento do projeto .
Então , pela equação (A-3) , tem-se :

$$K_2 = \frac{I_n}{B_n I_n} = \frac{191}{1,32 \times 34} \frac{N \cdot m^3}{W_b \cdot A} = 4,25 \frac{N \cdot m^3}{W_b \cdot A}$$

E pela equação (A-2) obtem-se :

$$K_3 = \frac{\pi}{30} K_2 = \frac{\pi}{30} \times 4,25 \frac{V \cdot m^2}{W_b \cdot rpm} = 0,45 \frac{V \cdot m^2}{W_b \cdot rpm}$$

2 - 4. REDUÇÃO DE VELOCIDADE

Conhecendo-se o diâmetro das rodas e a velocidade de translação da ponte , a velocidade de rotação das rodas é :

$$n_r = \frac{30}{\pi} \times \frac{2 V_n}{D_r} = \frac{30 \times 2 \times 0,5}{\pi \times 0,8} \text{ rpm} = 12 \text{ rpm}$$

Conseqüentemente , a razão de redução é :

$$i = \frac{n_n}{n_r} = \frac{900}{12} = 75$$

Portanto os dados do redutor são :

razão de redução	-	$i = 75$
potência	-	$P_n = 18 \text{ kW}$
entrada de velocidade	-	$n_n = 900 \text{ rpm}$
eficiência mínima	-	$\eta = (\eta_r)^3 = (0,97)^3 = 0,91$

2 - 5. TORQUE DE CARGA NOMINAL DO SISTEMA

O torque de carga nominal do sistema é dado pela expressão :

$$T_c = \frac{P_c}{\omega_n} = \frac{30 \times P_c}{\pi \times n_m} = \frac{30 \times 17 \times 10^3}{\pi \times 900} \text{ Nm} = 181 \text{ Nm}$$

2 - 6. TORQUE NOMINAL ELÉTRICO

Conhecida a potência nominal do motor , o torque nominal elétrico é :

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30 P_n}{\pi n_m} = \frac{30 \times 18 \times 10^3}{\pi \times 900} \text{ Nm} = 191 \text{ Nm}$$

2 - 7. VELOCIDADE DE VAZIO DO MOTOR

No caso do uso do motor série DC , a velocidade de vazio deve ser calculada para prevenção de velocidade excessiva . A velocidade excessiva é uma característica do motor série atuando com pequenas cargas em relação à sua carga nominal . No caso do acionamento da ponte , o vazio representa o acionamento da ponte sem a carga externa dada pelo peso G_p . Nesta situação a força resistente é :

$$G_o = K \frac{G_s}{D_r} (2F + \mu D_e) = 1,5 \times \frac{1000}{0,8} (2 \times 0,0005 + 0,08 \times 0,16) \text{ Nm} =$$

$$= 25,87 \text{ Nm}$$

A esta força resistente corresponde um torque fornecido pelo motor de valor :

$$T_o = \frac{G_o \times D_r}{2 \times (\eta_r)^3 \times i} = \frac{25,87 \times 0,8 \times 10^3}{2 \times (0,97)^3 \times 75} \text{ Nm} = 151 \text{ Nm}$$

Na curva característica da fig.(2-2) a relação $T_o/T_n = 151/191 = 0,79$ corresponde à relação $n_o/n_n = 1,1$. E portanto tem-se :

$$V_o = 1,1 V_n = 1,1 \times 0,5 \text{ m/s} = 0,55 \text{ m/s}$$

O aumento de 10% da velocidade é perfeitamente admissível . Consequentemente não é necessário fazer correção de velocidade para o acionamento da ponte em vazio .

2 - 8. INÉRCIA DO SISTEMA

A inércia do sistema é composta por duas parcelas ; a inércia do próprio rotor e a inércia da carga referida ao eixo do rotor . Quando a inércia do rotor não é dada pelo fabricante , o seu valor pode ser calculado pela re

lação empírica , (3, pag.243) :

$$J_{M_1} = [(6 \div 10) 10^{-3} T_n] \text{ Nms}^2$$

Tomando-se o valor máximo obtem-se :

$$J_{M_1} = 10^{-2} T_n = 10^{-2} \times 191 \text{ Nms}^2 = 1,91 \text{ Nms}^2$$

A inércia da ponte com carga referida ao eixo do rotor , pode ser calculada lembrando que a energia cinética de um sistema sob ação de translação é igual à energia cinética de um sistema equivalente sob ação de rotação . Então .

$$J_c' \times \frac{\omega_n^2}{2} = \frac{m_c V_n^2}{2} = \frac{G_s + G_p}{g} \frac{V_n^2}{2}$$

e portanto :

$$J_c' = \frac{G_s + G_p}{g} \left(\frac{V_n}{\omega_n} \right)^2 \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 =$$

$$= \frac{(1000+200) 10^3}{9,81} \left(\frac{0,5}{900} \right)^2 \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \text{ Nms}^2 = 3,45 \text{ Nms}^2$$

A inércia total do sistema é então :

$$J_1 = J_{M_1} + J_c' = (1,91 + 3,45) \text{ Nms}^2 = 5,36 \text{ Nms}^2$$

2 - 9. PARTIDA E ACELERAÇÃO

Como os circuitos de acionamento do sistema não devem conter componentes eletrônicos para automatizações de malha aberta, nem automatizações de malha fechada, e estes circuitos devem ser compostos por dispositivos elétricos padronizados, o método de resistências em série com a armadura é escolhido para a aceleração do motor. Este artigo é então dedicado ao cálculo dos parâmetros de partida e aceleração do motor com resistências em série com a armadura.

2 - 9.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE ACELERAÇÃO

O método escolhido para o cálculo dos degraus de aceleração é o método analítico (apend. A, art. (A-2.2)). Esta escolha é baseada no fato de que o método gráfico, (apend. A, art. (A-2.1)), exige uma boa precisão da característica de carga, $n = f(I_a)$, o que não é possível obter com a curva da fig. (2-2), fornecida pelo fabricante.

Os valores escolhidos para as correntes máxima e mínima de aceleração, respectivamente I_1 e I_2 , dados abaixo, devem satisfazer as condições seguintes:

- corrente máxima inferior ao limite de corrente máxima, ($I_a = 2,5 I_n$), indicado pelo fabricante;
- bom tempo de aceleração;
- número mínimo de degraus de aceleração.

$$I_1 = 2 I_n = 2 \times 34 \text{ A} = 68 \text{ A}$$

$$I_2 = 1,12 \quad I_n = 1,12 \times 34 \text{ A} = 38 \text{ A}$$

Com as equações (A-10) , (A-11) , (A-12) e (A-13),
(apend.A, art.(A-3.2)) , obtem-se :

$$r_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{600}{68} \Omega = 8,83 \Omega$$

$$n_1 = \frac{V - I_2 r_1}{K_2 B_2} = \frac{600 - 38 \times 8,83}{0,45 \times 1,36} \text{ rpm} = 433 \text{ rpm}$$

$$r_2 = \frac{V - K_2 B_1 n_1}{I_1} = \frac{600 - 0,45 \times 1,48 \times 433}{68} \Omega = 4,6 \Omega$$

$$n_2 = \frac{V - I_2 r_2}{K_2 B_2} = \frac{600 - 38 \times 4,6}{0,45 \times 1,36} \text{ rpm} = 695 \text{ rpm}$$

$$r_3 = \frac{V - K_2 B_1 n_2}{I_1} = \frac{600 - 0,45 \times 1,48 \times 695}{68} \Omega = 2,0 \Omega$$

A última resistência , r_3 , tem um valor maior do que a resistência natural da máquina . É necessário então calcular o valor da corrente atingida se , no ponto de velocidade n_2 , a resistência adicional é cortada restando no circuito apenas a resistência natural . Então :

$$I_1' = \frac{V - K_2 B_1 n_2}{r} = \frac{600 - 0,45 \times 1,48 \times 695}{1,78} \text{ A} = 75,5 \text{ A}$$

Como

$$\Delta = I_1' - I = (75,5 - 68) \text{ A} = 7,5 \text{ A}$$

ou

$$\Delta = I_1' - I_1 = \frac{7,5}{34} I_n = 0,22 I_n$$

o projeto é aceitável .

As resistências dos degraus de aceleração têm os seguintes valores :

$$R_2 = r_2 - r = (4,6 - 1,77) \Omega = 2,83 \Omega$$

$$R_1 = r_1 - r_2 = (8,83 - 4,6) \Omega = 4,23 \Omega$$

A relação entre os valores das resistências R_1 e R_2 e as resistências r_1 , r_2 e r é ilustrada na fig.(2-4) .

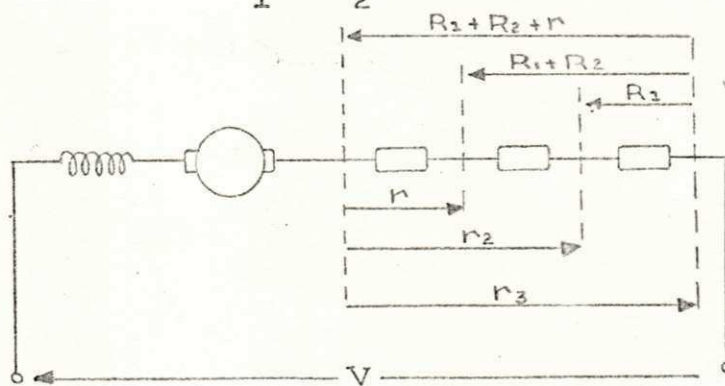
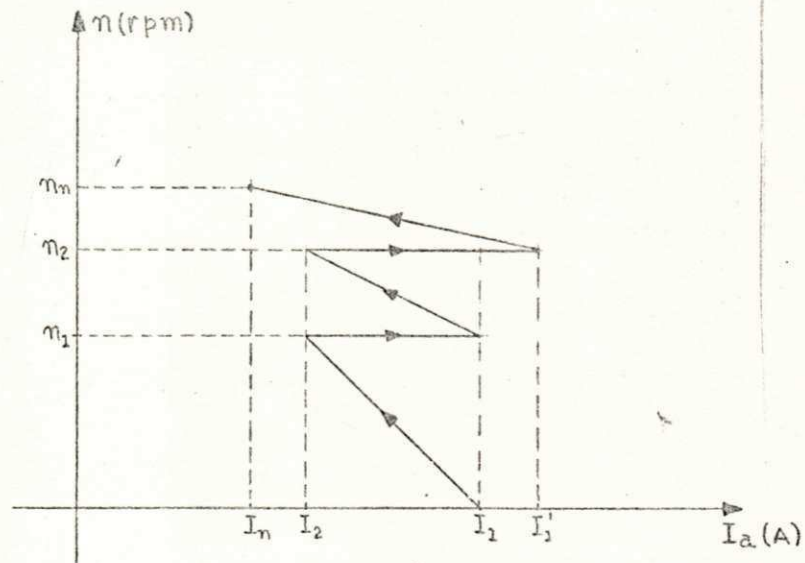


diagrama do motor série DC com re-
sistências adicionais

fig.(2-4)

2 - 9.2.2 CÁLCULO DA FUNÇÃO $I_a = f(n)$ LINEARIZADA

A função $I_a = f(n)$ linearizada é obtida através da equação (A-17), (apend.A, art.(A-2.3.2)), para cada estágio de aceleração. A fig.(2-6) mostra esta linearização para os tres estágios de aceleração.



linearização da característica de
carga durante a aceleração
fig.(2-6)

1º Estágio

$$I_a = -c_1 n + d_1 = (-0,0695 n + 68) A$$

onde

$$c_1 = \frac{I_{a1} - I_{a2}}{n_1} = \frac{68 - 38}{433} \frac{A}{rpm} = 0,0695 \text{ A/rpm}$$

e

$$d_1 = I_1 = 68 \text{ A}$$

2º Estágio

$$I_a = -C_2 n + d_2 = (-0,1148 n + 118) \text{ A}$$

onde

$$C_2 = \frac{I_1 - I_2}{n_2 - n_1} = \frac{68 - 38}{695 - 433} \text{ A/rpm} = 0,1148 \text{ A/rpm}$$

e

$$d_2 = \frac{I_1 n_2 - I_2 n_1}{n_2 - n_1} = \frac{68 \times 695 - 38 \times 433}{695 - 433} \text{ A} = 118 \text{ A}$$

3º Estágio

$$I_a = -C_3 n + d_3 = (-0,183 n + 216,2) \text{ A}$$

onde

$$C_3 = \frac{I_1' - I_n}{n_n - n_2} = \frac{75,5 - 34}{900 - 695} \text{ A/rpm} = 0,183 \text{ A/rpm}$$

e

$$d_3 = \frac{I_1' n_n - I_n n_2}{n_n - n_2} = \frac{75,5 \times 900 - 34 \times 695}{900 - 695} \text{ A} = 216,2 \text{ A}$$

2 - 9.2.3 CÁLCULO DA FUNÇÃO $T_e = f(n)$

A equação (A-18), (apend.A, art.(A-2.3.3)), permite calcular a função $T_e = f(n)$ para cada estágio.

1º Estágio

$$T_e = e_1 n^2 - f_1 n + n_1 = (1,085 \times 10^{-4} n^2 - 0,55 n + 434) \text{ Nm}$$

onde

$$e_1 = a c_1^2 K_2 = 0,0053 \times (0,0695)^2 \times 4,25 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}^2} = 1,085 \times 10^{-4} \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}^2}$$

$$f_1 = C_1 (2 a d_1 + b) K_2 = 0,0695 (2 \times 0,0053 \times 68 + 1,14) 4,25 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}} = 0,55 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}}$$

e

$$h_1 = d_1 (a d_1 + b) K_2 = 68 (0,0053 \times 68 + 1,14) \times 4,25 \text{ Nm} = 434 \text{ Nm}$$

2º Estágio

$$T_e = e_2 n^2 - f_2 n + h_2 = (2,97 \times 10^{-4} n^2 - 1,17 n + 879,2) \text{ Nm}$$

onde

$$e_2 = a c_2^2 K_2 = 0,0053 \times (0,1148)^2 \times 4,25 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}^2} = 2,97 \times 10^{-4} \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}^2}$$

$$f_2 = C_2 (2 a d_2 + b) K_2 = 0,1148 (2 \times 0,0053 \times 118 + 1,14) 4,25 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}} = 1,17 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}}$$

e

$$h_2 = d_2 (a d_2 + b) K_2 = 118 (0,0053 \times 118 + 1,14) 4,25 \text{ Nm} = 879,2 \text{ Nm}$$

3º Estágio

$$T_e = e_3 n^2 - f_3 n + h_3 = (7,54 \times 10^{-4} n^2 - 2,66 n + 2.111,4) \text{ Nm}$$

onde

$$e_3 = a c_3^2 K_2 = 0,0053 (0,183)^2 \times 4,25 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}^2} = 7,54 \times 10^{-4} \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}^2}$$

$$f_3 = C_3 (2 a d_3 + b) K_2 = 0,183 (2 \times 0,0053 \times 216,2 + 1,14) 4,25 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}} = 2,66 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}}$$

e

$$h_3 = d_3(ad_3 + b)K_2 = 216,2 (0,0053 \times 216,2 + 1,14) 4,25 \text{ Nm} = 2.111,4 \text{ Nm}$$

2 - 9.2.4 CÁLCULO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

Aplicando-se agora a equação (A-20), (apend. A, art.(A-2.3.4)), obtém-se o tempo de aceleração para cada estágio. Pode-se considerar que a carga T_c , no eixo do motor, é a própria carga nominal.

1º Estágio

$$t_1 = \frac{\pi}{30} J_1 \int_{n=0}^{n=n_1} \frac{dn}{e_1 n^2 - f_1 n + h_1 - T_n} = \frac{\pi}{30} \times 5,36 \int_{n=0}^{433} \frac{dn}{1,085 \times 10^{-4} n^2 - 0,55n + 434 - 191} \text{ s}$$

Como $f_1^2 > 4e_1(h_1 - T_c)$ a solução da integral é :

$$t_1 = \frac{\pi}{30} \times \frac{5,36}{\sqrt{\Delta}} \left[\ln \frac{2 \times 1,085 \times 10^{-4} \times 433 - 0,55 - \sqrt{\Delta}}{2 \times 1,085 \times 10^{-4} \times 433 - 0,55 + \sqrt{\Delta}} - \ln \frac{-0,55 - \sqrt{\Delta}}{-0,55 + \sqrt{\Delta}} \right] \text{ s} =$$

$$= 2,72 \text{ s}$$

onde

$$\Delta = (0,55)^2 - 4 \times 1,085 \times 10^{-4} (434 - 191)$$

2º Estágio

$$t_2 = \frac{\pi}{30} J_1 \int_{n=n_2}^{n=n_2} \frac{dn}{e_2 n^2 - f_2 n + h_2 - T_n} = \frac{\pi}{30} \times 5,36 \int_{n=433}^{n=695} \frac{dn}{2,97 \times 10^{-4} n^2 - 1,17n + 879,2 - 191} \text{ s}$$

Como $f_2^2 > 4e_2(h_2 - T_c)$ a solução da integral é :

$$t_2 = \frac{\pi}{30} \frac{5,36}{\sqrt{\Delta}} \left[\ln \frac{2 \times 2,79 \times 10^{-4} \times 695 - 1,17 - \sqrt{\Delta}}{2 \times 2,79 \times 10^{-4} \times 695 - 1,17 + \sqrt{\Delta}} - \ln \frac{2 \times 2,79 \times 10^{-4} \times 433 - 1,17 - \sqrt{\Delta}}{2 \times 2,79 \times 10^{-4} \times 433 - 1,17 + \sqrt{\Delta}} \right] \text{ s} =$$

$$= 1,56 \text{ s}$$

onde

$$\Delta = (1,17)^2 - 4 \times 2,97 \times 10^{-4} (879,2 - 191)$$

3º Estágio

Como neste estágio o motor se acelerará até o ponto de velocidade nominal, onde encontra o regime permanente, para se obter um tempo finito é necessário fazer o limite superior da integral um pouco menor do que o valor da velocidade nominal real. Pode-se fazer $n_n^* = 0,95 n_n$, considerando-se que o motor entra em regime permanente com 95% da sua velocidade nominal.

$$t_3 = \frac{\pi}{30} J_1 \int_{n=n_2}^{n=0,95 n_n} \frac{dn}{e_3 n^2 - f_3 n + h_3 - T_n} = \frac{\pi}{30} \times 5,36 \int_{n=695}^{n=0,95 \times 900} \frac{dn}{7,54 \times 10^{-4} n^2 - 2,66n + 2111,4 - 191} \text{ s}$$

Como $f_3^2 > 4e_3(h_3 - T_c)$ a solução da integral é :

$$t_3 = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{5,36}{\sqrt{\Delta}} \left[\ln \frac{2 \times 7,54 \times 10^{-4} \times 0,95 \times 900 - 2,66 - \sqrt{\Delta}}{2 \times 7,54 \times 10^{-4} \times 0,95 \times 900 - 2,66 + \sqrt{\Delta}} - \ln \frac{2 \times 7,54 \times 10^{-4} \times 695 - 2,66 - \sqrt{\Delta}}{2 \times 7,54 \times 10^{-4} \times 695 - 2,66 + \sqrt{\Delta}} \right] s =$$

$$= 0,28 s$$

onde

$$\Delta = (2,66)^2 - 4 \times 7,54 \times 10^{-4} (2.111,4 - 191)$$

O tempo total de aceleração é dado pela soma dos tempos de cada estágio, ou :

$$t_a = t_1 + t_2 + t_3 = (2,72 + 1,56 + 0,28) s = 4,56 s$$

Para a aceitação final do projeto da aceleração é necessário ainda calcular a aceleração média, a qual deve ser limitada, para evitar deslizamento das rodas sobre os trilhos. Para os movimentos horizontais usa-se o valor limite, (8, pag, 1017) :

$$\left(\frac{dv}{dt} \right)_{\max} = 1,4 \text{ m/s}$$

A aceleração média durante os tres estágios de aceleração pode ser calculada pela equação :

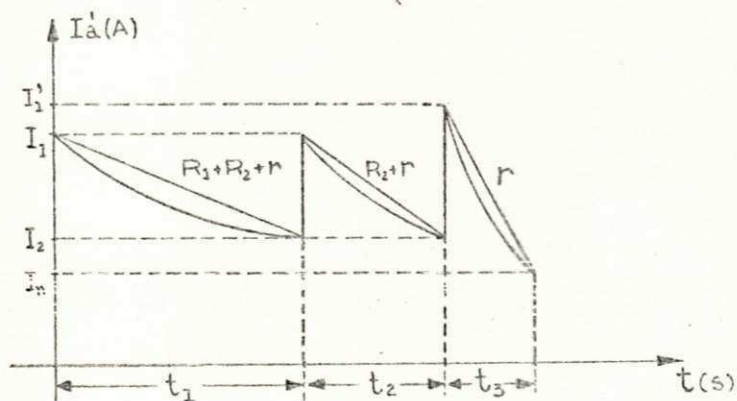
$$\begin{aligned} \left(\frac{dv}{dt} \right) &= \frac{1}{t_a} \left[\int_0^{t_1} \frac{dv(t)}{dt} dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{dv(t)}{dt} dt + \int_{t_2}^{t_3} \frac{dv(t)}{dt} dt \right] = \\ &= \frac{1}{t_a} \left[v_1 + (v_2 - v_1) + (v_n' - v_2) \right] = \frac{v_n'}{t_a} = \\ &= \frac{0,95 v_n}{t_a} = \frac{0,95 \times 0,5}{4,56} \text{ m/s}^2 = 0,103 \text{ m/s}^2 < \left(\frac{dv}{dt} \right)_{\max} \end{aligned}$$

Portanto os degraus de aceleração calculados satisfazem plenamente as condições exigidas, as quais são :

- tempo de aceleração relativamente curto ;
- pequeno número de degraus ;
- aceleração média inferior ao limite máximo recomendado .

2 - 9.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA DAS RESISTÊNCIAS DE ACELERAÇÃO

Durante a aceleração a corrente de armadura do motor varia com o tempo como mostra a fig.(2-7) . Esta função pode ser linearizada para cada estágio, o que também é mostrado na fig.(2-7) .



variação da corrente com o tempo
durante a aceleração

fig.(2-7)

A função $I_a = f(t)$ linearizada, para o primeiro e segundo degraus, é dada pela equação

$$I_a = -\frac{I_1 - I_2}{t_1} t + I_1$$

se no instante inicial de cada degrau se faz $t = 0$.

Para o primeiro degrau a corrente média quadrática, elevada ao quadrado, é, (apend. D, eq. (D-1)) :

$$\begin{aligned} [I'_{eq}]^2 &= \frac{1}{t_1} \int_{t=0}^{t=t_1} [I_a(t)]^2 dt = \frac{1}{t_1} \int_{t=0}^{t=t_1} \left[-\frac{I_1 - I_2}{t_1} t + I_1 \right]^2 dt = \\ &= \frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3} = \frac{68^2 + 68 \times 38 + 38^2}{3} A^2 = 2.884 A^2 \end{aligned}$$

Como a expressão final de I_{eq}^2 é independente do tempo, a corrente média quadrática, para o primeiro e segundo degraus, ou para os dois degraus consecutivos, elevada ao quadrado, tem o mesmo valor $I_{eq}^2 = 2,884 A^2$.

No entanto a potência calculada para esta corrente equivalente corresponde à potência consumida pelas resistências de aceleração se estas fossem percorridas continuamente pela corrente I'_{eq} . Mas as resistências só são percorridas por esta corrente durante um intervalo de tempo curto em relação ao intervalo de tempo total do ciclo de trabalho. É necessário então calcular uma outra corrente equivalente, a qual, percorrendo continuamente as resistências de aceleração, produza o mesmo esquentamento produzido pela corren

te I'_{eq} , quando esta percorre as resistências durante o intervalo de tempo de aceleração do motor .

O tempo médio de funcionamento do sistema é 8 min ou 480 s , (cap.1) . Considerando que o tempo relativo de aceleração não é maior do que 1% do ciclo total de trabalho do sistema , pode-se calcular , maximizando-se , a potência das resistências de aceleração .

Sendo o tempo gasto no 1º degrau cerca de 60% do tempo total de aceleração , tem-se para a resistência R_1 , (apend.D) :

$$t_{t_1} = 0,6 \times 4,8 \text{ s} \cong 3 \text{ s}$$

$$t_{t_1} + t_{p_1} = 480 \text{ s}$$

Assumindo que a constante de tempo térmica da resistência é $\tau_{R_1} = 600 \text{ s}$, que é um valor médio escolhido pelo autor , (14, tab.(6-7)) , a corrente equivalente para o esquentamento é , (apend.D, eq.(D-8)) :

$$I_{eq_1} = I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-t_{t_1}/\tau_{R_1}}}{1 - e^{-(t_{t_1} + t_{p_1})/\tau_{R_1}}}} = I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-3/600}}{1 - e^{-480/600}}} = I'_{eq} \sqrt{0,010}$$

A potência consumida pela resistência R_1 é então:

$$\begin{aligned} P_1 &= R_1 (I_{eq_1})^2 = R_1 \times 0,010 \times I'_{eq}{}^2 = \\ &= 4,23 \times 0,0010 \times 2.884 \text{ w} \cong 122 \text{ w} \end{aligned}$$

Para o segundo degrau tem-se :

$$t_{t2} = 0,95 \times 4,8 \text{ s} \cong 4,6 \text{ s}$$

$$t_{t2} + t_{p2} = 480 \text{ s}$$

E portanto resulta :

$$I_{eq2} = I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-t_{t2}/\tau_n}}{1 - e^{-(t_{t2} + t_{p2})/\tau_n}}} =$$

$$= I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-4,6/600}}{1 - e^{-480/600}}} = I'_{eq} \sqrt{0,014}$$

A potência consumida pela resistência R_2 é :

$$P_2 = R_2 (I_{eq2})^2 = R_2 \times 0,014 I'_{eq}{}^2 = 2,83 \times 0,014 \times 2.884 \text{ W} \cong 120 \text{ W}$$

Escolhendo-se finalmente valores comerciais para as potências das resistências de aceleração , obtém-se:

$$P_1 = P_2 = 200 \text{ W}$$

2 - 10. FREIO

O freio do motor pode ser conseguido por meio de ligações especiais para produção de um torque elétrico de freio . No entanto , o projeto torna-se mais econômico e simples , se o freio é obtido desligando-se o motor de sua fonte de alimentação , e fazendo-se atuar um freio eletromagnético um certo intervalo de tempo depois .

Desligando-se o motor da rede, a equação mecânica que rege o movimento de desaceleração é :

$$T_d = -T_n = J_1 \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{30} J_1 \frac{dn}{dt}$$

O tempo de freiagem é então :

$$t_f' = -\frac{\pi}{30} J_1 \frac{1}{I_n} \int_{n=n_n}^{n=0} dn = \frac{\pi}{30} J_1 \frac{1}{I_n} n_n = \frac{\pi \times 5,36 \times 900}{30 \times 191} \text{ s} =$$

$$= 2,64 \text{ s}$$

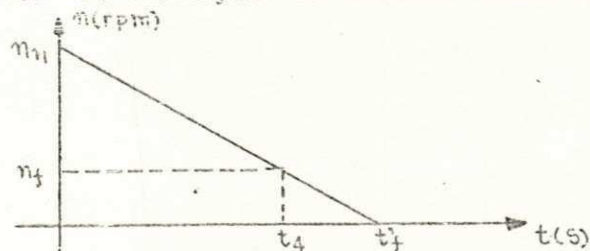
A variação da velocidade no tempo durante o freio é :

$$n = n_n - \frac{30}{\pi} \frac{I_n}{J_1} t \quad (2-1)$$

Fazendo-se atuar o freio eletromagnético no tempo $t_4 = 2 \text{ s}$, escolhido arbitrariamente, a velocidade do motor neste instante é :

$$n_f = n_n - \frac{30}{\pi} \frac{I_n}{J_1} t_4 = 900 - \frac{30 \times 191 \times 2}{\pi \times 5,36} \text{ rpm} = 220 \text{ rpm}$$

A fig.(2-8) ilustra a desaceleração do motor, sendo indicado o ponto de atuação do freio eletromagnético.



variação de velocidade durante o freio

fig.(2-8)

2 - 10.1 FREIO ELETROMAGNÉTICO

O torque fornecido pelo freio eletromagnético é dado pela expressão

$$T_{fe1} = \frac{\pi}{30} J_1 \frac{n_t}{t_5} - T_n$$

onde t_5 é o tempo de freio do motor, contado a partir do a cionamento do freio eletromagnético, (9, pag.74). Sendo o movimento da ponte um movimento horizontal, o torque do freio eletromagnético pode ser feito, (8, pag.1024),

$$T_{fe1} = 1,5 T_n = 1,5 \times 191 \text{ Nm} = 286,5 \text{ Nm}$$

desde que nos movimentos horizontais não há ação de cargas ativas. Portanto, após a atuação do freio eletromagnético, o tempo de freiagem é:

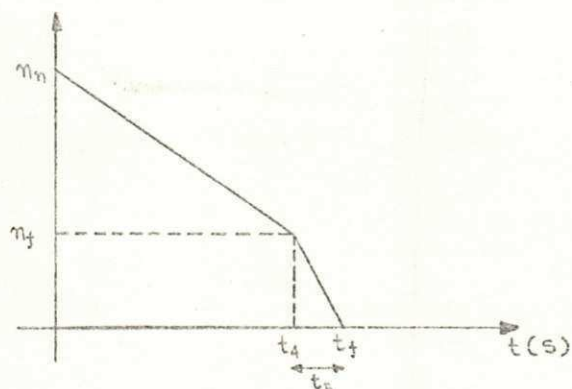
$$t_5 = -\frac{\pi}{30} J_1 \frac{1}{T_n + T_{fe1}} \int_{n=n_t}^{n=0} dn = \frac{\pi}{30} J_1 \frac{n_t}{T_n + T_{fe1}} =$$

$$= \frac{\pi \times 5,36 \times 220}{30(191 + 1,5 \times 191)} = 0,26 \text{ s}$$

Consequentemente, usando-se o freio eletromagnético, o tempo total de freio é:

$$t_f = t_4 + t_5 = (2 + 0,26) \text{ s} = 2,26 \text{ s}$$

A fig.(2-9) mostra a variação da velocidade do motor durante o freio, usando-se o freio eletromagnético.



variação da velocidade durante o freio usando-se o freio eletromagnético

fig.(2-9)

2 - 11. PROTEÇÃO DE FIM DE CURSO

A proteção de fim de curso deve ser utilizada nas duas extremidades do curso da ponte, com a finalidade de proteger uma possível distração do operador que provoque um choque entre a estrutura da ponte e a construção. Os relés de fim de curso são projetados para, quando acionados, atuarem comandando o circuito de freio, por escolha do autor. Deste modo sabe-se que após o acionamento dos relés, a ponte ainda se desloca durante o tempo $t_f = 2,26$ s. Este deslocamento equivale a uma distância de percurso que limita a posição dos relés.

A distância dx de deslocamento da ponte é dada por :

$$dx = \pi D_r \frac{n_r}{60} dt = \pi D_r \frac{n}{60i} dt \quad (2-2)$$

Depois deacionado o circuito de freio , a distância percorrida pela ponte pode ser calculada em duas etapas. A primeira corresponde ao tempo t_4 quando o motor é apenas desligado da rede . A segunda etapa corresponde ao tempo t_5 de atuação do freio eletromagnético .

Substituindo-se o valor de n , dado pela equação (2-1) , na equação (2-2) obtem-se

$$dx = \frac{\pi D_r}{60i} \left[n_m - \frac{30 T}{\pi J_1} t \right] dt$$

onde T é o torque atuando no eixo do motor .

Na 1ª etapa tem-se :

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{\pi D_r}{60i} \int_{t=0}^{t=t_4} \left[n_m - \frac{30 T_n t}{\pi J_1} \right] dt = \frac{\pi D_r}{60i} \left[n_m t_4 - \frac{30 T_n t_4^2}{2 \times \pi \times J_1} \right] = \\ &= \frac{\pi \times 0,8}{60 \times 75} \left[900 \times 2 - \frac{30 \times 191 \times 2^2}{2 \times \pi \times 5,36} \right] m = 0,55 m \end{aligned}$$

Na 2ª etapa pode-se usar a mesma equação da distância , considerando-se que para $t = 0$ a velocidade inicial é $n_f = 220$ rpm , e que o torque T é dado por :

$$T = T_n + T_{fe_1}$$

Portanto , obtem-se :

$$\begin{aligned}
 X_2 &= \frac{\pi D_r}{60 i} \left[n_f t_5 - \frac{30 (T_n + T_{4e1}) t_5^2}{2 \times \pi \times J_1} \right] = \\
 &= \frac{\pi \times 0,8}{60 \times 75} \left[220 \times 0,26 - \frac{30 (191 \times 1,5 \times 191)}{2 \times \pi \times 5,36} 0,26^2 \right] m = \\
 &= 0,016 m
 \end{aligned}$$

A distância total percorrida é :

$$X = X_1 + X_2 = (0,55 + 0,016) m = 0,566 m$$

No entanto , para escolha definitiva do ponto de colocação do relé de fim de curso , é necessário conhecer a distância percorrida pela ponte quando esta atua em vazio . Novamente pode-se calcular esta distância em duas etapas, ou seja :

na 1ª etapa tem-se :

$$\begin{aligned}
 X_1' &= \frac{\pi D_r}{60 i} \left[n_0 t_4 - \frac{30 \times T_0 \times t_4^2}{2 \times \pi \times J_1} \right] = \\
 &= \frac{\pi \times 0,8}{60 \times 75} \left[990 \times 2 - \frac{30 \times 151 \times 2^2}{2 \times \pi \times 5,36} \right] m = 0,81 m
 \end{aligned}$$

na 2ª etapa tem-se :

$$n_f' = n_0 - \frac{30 \times T_0 \times t_4}{\pi \times J_1} = \left[990 - \frac{30 \times 151 \times 2}{\pi \times 5,36} \right] \text{rpm} = 452 \text{rpm}$$

$$t_5' = \frac{\pi J_1}{30} \frac{n_f'}{T_0 + T_{4e1}} = \frac{\pi \times 5,36 \times 452}{30 (151 + 1,5 \times 191)} s = 0,58 s$$

e

$$\begin{aligned}
 x_2' &= \frac{\pi D_r}{60 i} \left[n_j t_s' - \frac{30(T_0 + T_{jez}) t_s'}{2 \times \pi \times J_1} \right] = \\
 &= \frac{\pi \times 0,8}{60 \times 75} \left[452 \times 0,58 - \frac{30(151 + 1,5 \times 191)(0,58)^2}{2 \times \pi \times 5,36} \right] m = \\
 &= 0,074 m
 \end{aligned}$$

A distância total percorrida pela ponte em vazio depois do acionamento do relé de fim de curso é :

$$x = x_1' + x_2' = (0,81 + 0,074) m = 0,884 m$$

Finalmente , a distância escolhida pelo autor para a colocação do relé de fim de curso , dando uma margem de segurança , é :

$$x_{M_1} = 1,00 m$$

sendo x_{M_1} a distância medida a partir do terminal do curso da ponte .

2 - 12. CIRCUITO DE ACIONAMENTO DA PONTE

A ponte é acionada por controle remoto através de tres botões de comando . Dois destes botões acionam respectivamente os movimentos para frente e para trás , e o terceiro botão aciona o circuito de freio . Os reostatos de aceleração são controlados por relés de corrente . Esta es-

colha é consequente das linearizações utilizadas nos cálculos dos tempos . Praticamente os relés de tempo também podem ser usados , desde que a imprecisão encontrada nos cálculos dos tempos de aceleração não acarreta uma grande distorção nos valores de corrente atingidos durante a aceleração . Em relação aos relés de tempo , os relés de corrente são economicamente mais vantajosos , e garantem os valores de corrente desejados durante a aceleração .

2 - 12.1 DIAGRAMA DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO

A fig.(2-10) mostra um diagrama ideal, (apend.E, art.(E-1)) , de um circuito simplificado de aceleração, (17, pag.63) , controlada por relés de corrente . De acordo com a solução de aceleração encontrada pelo autor para o acionamento do motor M_1 , quando este é alimentado na partida , é necessário que os contactores C_3 e C_4 estejam abertos , incluindo no circuito as resistências de aceleração R_1 e R_2 . O contactor C_3 deve fechar-se com um intervalo de tempo de atraso , determinado pelo relé de corrente B_1 . Em seguida o contactor C_4 curto-circuita a resistência R_2 , quando recebe ordem do relé de corrente B_2 . Somente obedecendo a esta ordem de acionamento o projeto é satisfatório . O funcionamento ideal do circuito é explicado em seguida , através da preparação e ação do circuito .

Os símbolos gráficos usados no diagrama e os usados na descrição do funcionamento do circuito são dados no apêndice E , artigo (E-2) .

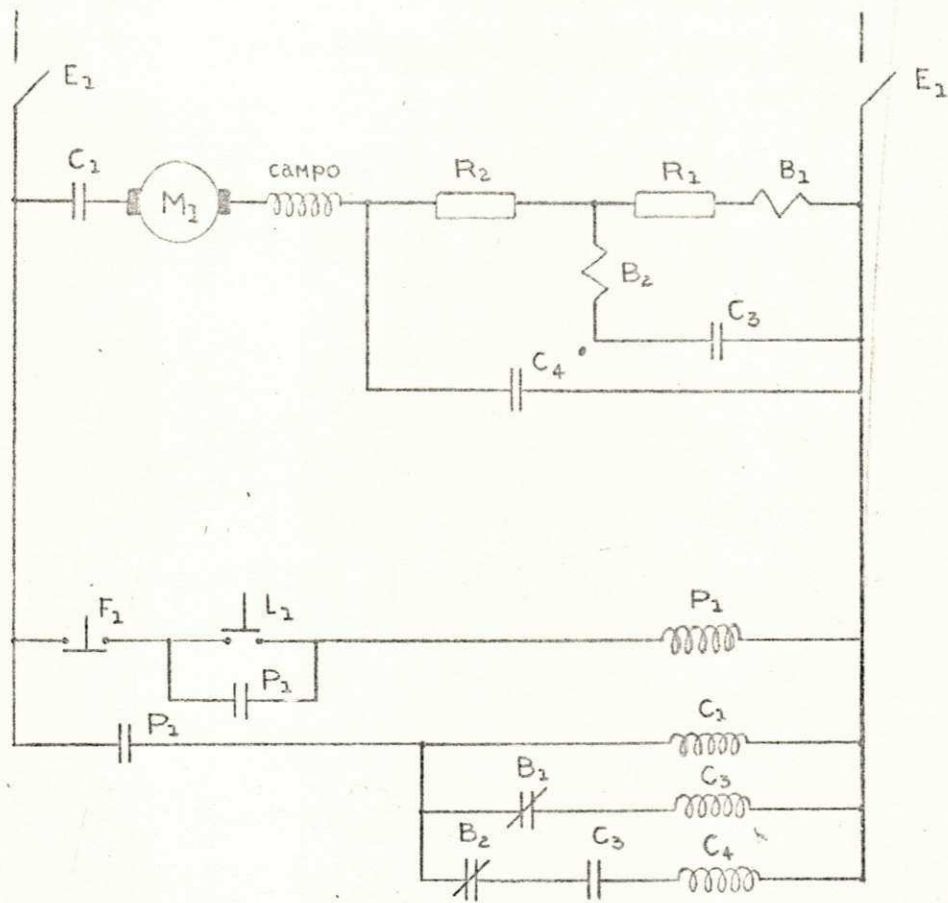


diagrama ideal do circuito de acelera
 ção simplificado controlado por
 relés de corrente

fig.(2-10)

- Preparação do Circuito

Ação : E_{1++}

- Aceleração

Ação Ideal : L_{1+} , P_{1++} , (L_{1-}) , C_{1++} , B_{1+} , $B_{1-(d)}$,
 C_{3++} , B_{2+} , $B_{2-(d)}$, C_{4++}

No entanto pode-se observar que há uma grande possibilidade de que a real ação do circuito seja a seguinte:

Ação que Pode Ocorrer : L_{1+} , P_{1++} , (L_{1-}) , C_{1++} , C_3
 $++$, C_{4++}

Isto significa que os relés de corrente podem não atuar, e o motor é partido ligado diretamente à rede. Finalmente, isto quer dizer que a confiabilidade do circuito é baixa porque este permite mais de uma forma de ação, o que não é permissível. Conseqüentemente a solução mostrada na fig.(2-10) não pode ser aceita pelo projetista.

É necessário então escolher outra forma mais complexa para o circuito de comando, que satisfaça a ordem de acionamento dos contactores exigida pelas soluções do projeto. A fig.(2-11) mostra o diagrama ideal da solução encontrada para o circuito de acionamento do motor M_1 . A numeração ao lado do diagrama denomina os seguintes circuitos:

circuito (1) - comando do freio eletromagnético

circuito (2) - comando do movimento para frente

circuito (3) - comando do movimento para trás

circuito (4) - comando do freio

O funcionamento do circuito é explicado , em seguida do diagrama , para cada movimento . A preparação do circuito consiste do fechamento das chaves separadoras E_1 e E_2 , e é a mesma para todos os movimentos . Cada movimento é descrito pelas condições iniciais e ação do circuito . Quando as condições iniciais são omitidas significa que estas condições são as mesmas obtidas da preparação do circuito para os movimentos .

Após a apresentação da descrição do funcionamento do circuito para cada movimento , é dada uma lista descritiva das funções dos dispositivos usados no circuito de acionamento .

O sistema de proteção elétrica utilizado é baseado na exposição apresentada no apêndice C . Para o circuito da ponte é utilizada a proteção elétrica exigida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas , (5) , e recomendações especiais estrangeiras , (10) .

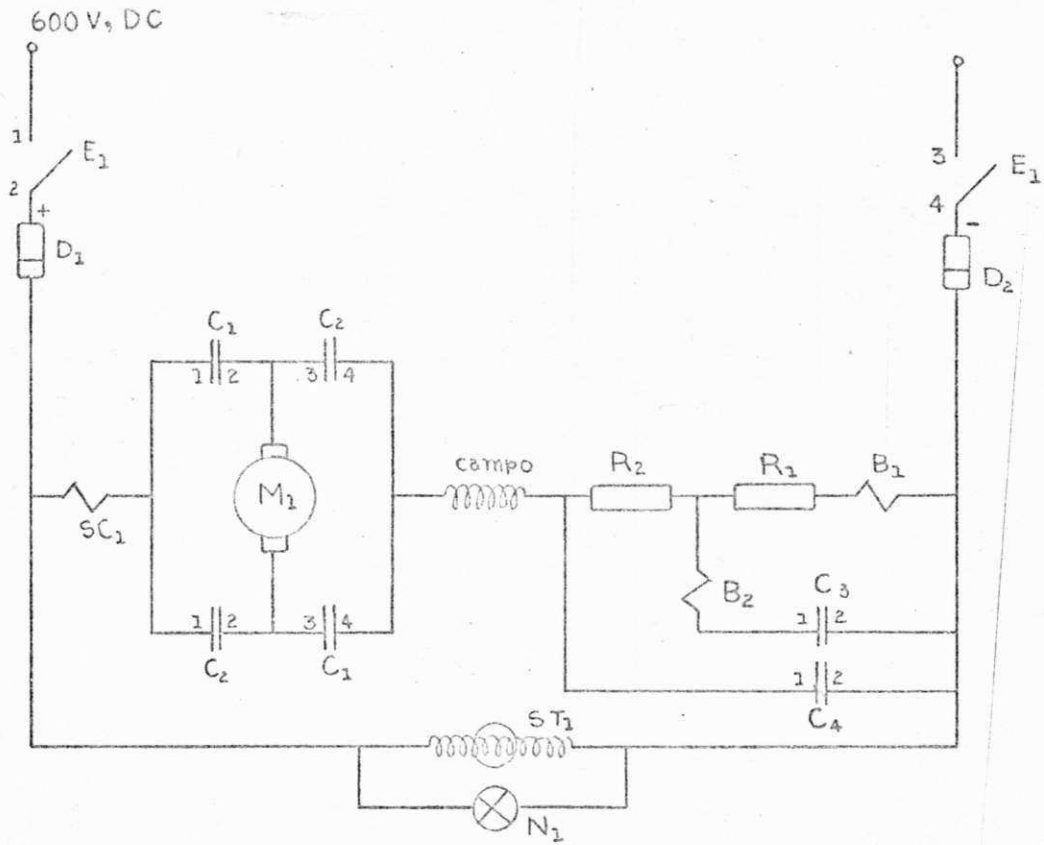


diagrama ideal do circuito de acio
 namento do motor M_1 - circuito prin
 cipal

fig.(2-11.a)

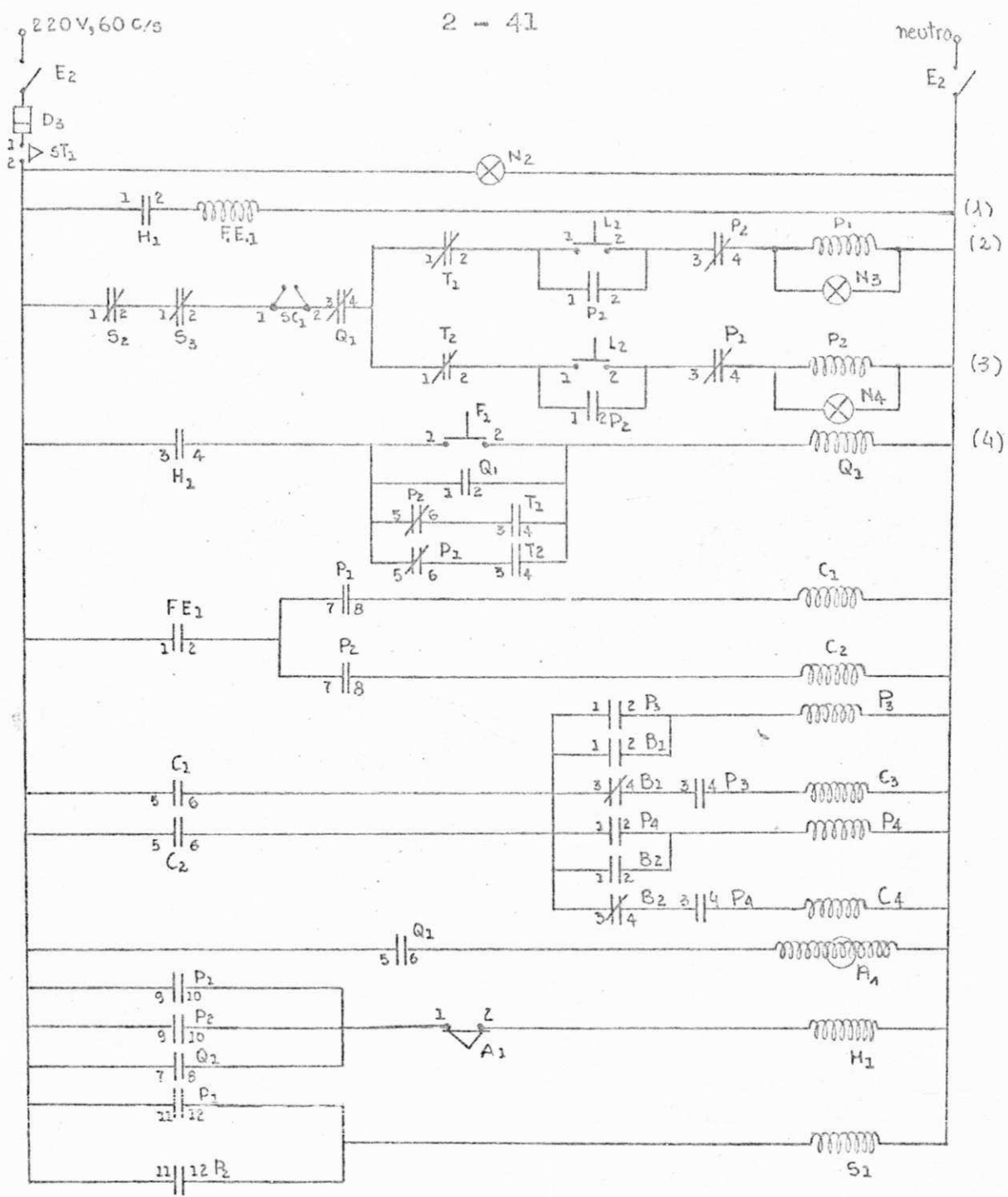


diagrama ideal do circuito de acio_ namento do motor M₁ - circuito de comando

fig.(2-11.b)

- Acionamento do Relé de Fim de Curso T_1 no Movimento para a Frente

Condições Iniciais : $P_1^+, H_1^+, FE_1^+, S_1^+, C_1^+, P_3^+,$
 C_3^+, P_4^+, C_4^+

Ação : $T_1^{++}, Q_1^+, P_1^-, S_1^-, C_1^-, P_3^-, C_3^-, P_4^-, C_4^-,$
 $A_1^+(d), H_1^-, FE_1^-, Q_1^-, A_1^-$

- Movimento para Trás com T_1^+

Condições Iniciais : T_1^+

Ação : $L_2^+, P_2^{++}, (L_2^-), H_1^{++}, FE_1^{++}, S_1^{++}, C_2^{++},$
 $B_1^+, P_3^{++}, B_1^-(d), C_3^{++}, B_2^+, P_4^{++}, B_2^-(d),$
 C_4^{++}, T_1^-

- Acionamento do Relé de Fim de Curso T_2 no Movimento para Trás

Condições Iniciais : $P_2^+, H_1^+, FE_1^+, S_1^+, C_2^+, P_3^+,$
 C_3^+, P_4^+, C_4^+

Ação : $T_2^{++}, Q_1^+, P_2^-, S_1^-, C_2^-, P_3^-, C_3^-, P_4^-, C_4^-,$
 $A_1^+(d), H_1^-, FE_1^-, Q_1^-, A_1^-$

- Movimento para Frente com T_2^+

Condições Iniciais : T_2^+

Ação : $L_1^+, P_1^{++}, (L_1^-), H_1^{++}, FE_1^{++}, S_1^{++}, C_1^{++},$
 $B_1^+, P_3^{++}, B_1^-(d), C_3^{++}, B_2^+, P_4^{++}, B_2^-(d),$
 C_4^{++}, T_2^-

2 - 12.2 FUNÇÃO DOS DISPOSITIVOS DO CIRCUITO DE ACIO-
NAMENTO

Dispositivos		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
L ₁	botão	1 NA (1,2)	comando do circuito (2)
L ₂	botão	1 NA (1,2)	comando do circuito (3)
F ₁	botão	1 NA (1,2)	comando do circuito (4)
P ₁	relé	1 NA (1,2)	alimentação do circuito (2)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre os circuitos (2) e (3)
		1 NF (5,6)	bloqueio entre os circuitos (2) e (4) com T ₂ ⁺
		1 NA (7,8)	comando do contactor C ₁
		1 NA (9,10)	comando do relé H ₁
		1 NA (11,12)	comando do relé S ₁
P ₂	relé	1 NA (1,2)	alimentação do circuito (3)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre os circuitos (2) e (3)
		1 NF (5,6)	bloqueio entre os circuitos (2) e (3)

Dispositivos		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
		1 NA (7,8)	tos (3) e (4) com T_1+
		1 NA (9,10)	comando do contactor C_2
		1 NA (11,12)	comando do relé H_1
P_3	relé	2 NA (1,2)(3,4)	comando do relé S_1
P_4	relé	2 NA (1,2)(3,4)	auxiliares da aceleração
Q_1	relé	1 NA (1,2)	auxiliares da aceleração
		1 NF (3,4)	alimentação do circuito (4)
		1 NA (5,6)	bloqueio entre os circuitos (2) e (3) e o circuito (4)
		1 NA (7,8)	comando do relé de tempo A_1
H_1	relé	1 NA (1,2)	comando do relé H_1
		1 NA (3,4)	comando do circuito (1)
			bloqueio entre o circuito (1) e os circuitos (2) e (3)
S_1	relé	1 NF (1,2)	bloqueio entre os motores M_1 e M_2 , fig(3-5)

Dispositivos		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
		1 NF (3,4)	bloqueio entre os motores M_1 e M_3 , fig.(4-18)
S_2	relé	1 NF (1,2)	bloqueio entre os motores M_2 e M_1
S_3	relé	1 NF (1,2)	bloqueio entre os motores M_3 e M_1
B_1	relé de corrente	1 NA (1,2) 1 NF (3,4)	auxiliar da aceleração auxiliar da aceleração
B_2	relé de corrente	1 NA (1,2) 1 NF (3,4)	auxiliar da aceleração auxiliar da aceleração
A_1	relé de tempo	1 NA (1,2)	comando do relé H_1
SC_1	relé de sobre corrente	1 NF (1,2)	abertura dos circuitos (2) e (3)
ST_1	relé de sub tensão	1 NA (1,2)	alimentação do circuito de comando

Dispositivos		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
T_1	relé de fim de curso	1 NF (1,2) 1 NA (3,4)	abertura do circuito (2) comando do circuito (4)
T_2	relé de fim de curso	1 NF (1,2) 1 NA (3,4)	abertura do circuito (3) comando do circuito (4)
C_1	contactor	2 NA (1,2)(3,4) 1 NA (5,6)	alimentação do motor no movimento para frente auxiliar da aceleração
C_2	contactor	2 NA (1,2)(3,4) 1 NA (5,6)	alimentação do motor no movimento para trás auxiliar da aceleração
C_3	contactor	1 NA (1,2)	corte da resistência R_1
C_4	contactor	1 NA (1,2)	corte da resistência R_2
FE_1	freio eletromagnético	1 NA (1,2)	bloqueio entre os circuitos (2) e (3) e o freio eletromagnético

Dispositivos		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
E ₁	chave faca	1 monofásico	alimentação do circuito principal
E ₂	chave faca		alimentação do circuito de comando
D ₁	fusível		proteção do circuito principal
D ₂	fusível		proteção do circuito principal
D ₃	fusível		proteção do circuito de comando
R ₁	resistência		auxiliar da aceleração
R ₂	resistência		auxiliar da aceleração
N ₁	lâmpada cor vermelha		sinalização: circuito principal energizado

Dispositivos		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
N ₂	lâmpada cor ver melha		sinalização : circuito de comando energizado
N ₃	lâmpada cor ver de		sinalização: circuito(2) energizado
N ₄	lâmpada cor ver de		sinalização: circuito(3) energizado

Informações suplementares relacionadas com o projeto de acionamento da ponte são fornecidas nos capítulos 5 e 6 .

CAPÍTULO 3

ACIONAMENTO DO TROLLEY

SÍMBOLOS E UNIDADES

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
$a_1 = \frac{T_{max} - T_p}{1 - S_c}$	constante	Nm
$a_2 = \frac{T_{max} - T_n}{S_c - S_n}$	constante	Nm
$b_1 = \frac{T_{max} - T_{psc}}{1 - S_c}$	constante	Nm
$b_2 = \frac{T_{psc} - T_{maxsn}}{S_c - S_n}$	constante	Nm
D_e	diâmetro do eixo	m
D_r	diâmetro da roda	m
F	coeficiente de atrito de ro- lamento	m
f	frequência de alimentação	c/s
g	aceleração da gravidade	m/s ²
G_c	força resistente total	N
G_{M_2}	peso do motor M_2	kg, N
G_o	peso de vazio	N
G_p	peso da carga nominal	N
i	razão de redução de veloci- dade	-

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
I	corrente do estator	A
I_n	corrente nominal do estator	A
I_p	corrente de partida do estator	A
J_2	momento de inércia do sistema trolley	Nms^2
J'_c	momento de inércia da carga referido ao eixo do motor	Nms^2
J_{M_2}	momento de inércia do motor M_2	Nms^2
k	coeficiente de atrito adicional	-
n	velocidade de rotação do motor	rpm
n_n	velocidade nominal de rotação do motor	rpm
n_o	velocidade síncrona de rotação do motor	rpm
$p = \frac{T_{max}}{T_n}$	constante	-
P_c	potência da carga	W
P_n	potência nominal do motor	W
s	deslizamento	-
$s_A = \frac{T_{max}}{T_n} s_n$	constante	-
s_c	deslizamento crítico na ca-	

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
	racterística mecânica natural	-
s_n	deslizamento nominal	-
s_o	deslizamento de vazio	-
t_a	tempo de aceleração	s
T_c	torque de carga	Nm, WS
T_d	torque dinâmico	Nm, WS
T_e	torque elétrico	Nm, WS
T_{fe_2}	torque fornecido pelo freio eletromagnético	Nm, WS
t_i	tempo de cada estágio de aceleração ou freio	s
$T_{máx}$	torque elétrico máximo	Nm, WS
T_n	torque elétrico nominal	Nm, WS
T_o	torque elétrico de vazio	Nm, WS
T_p	torque elétrico de partida	Nm, WS
V	tensão de alimentação	V
v_n	velocidade nominal de translação do trolley	m/s
x_{M_2}	distância de colocação dos relés de fim de curso	m
η_{M_2}	eficiência do motor	-
η_r	eficiência de cada estágio de engrenagens	-
μ	coeficiente de atrito nos mancais de rolamento	-

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
ω	velocidade angular do motor	rd/s
ω_n	velocidade angular nominal do motor	rd/s
ω_s	velocidade angular síncrona do motor	rd/s

3 - 1. INTRODUÇÃO

O trolley move-se em uma direção perpendicular ao movimento da ponte , e sobre o mesmo plano horizontal . Normalmente o trolley é constituído por uma cabine que contém o quadro de comando do sistema , os motores de acionamento do trolley e do guindaste com seus respectivos redutores de velocidade , e as restantes partes integrantes do guindaste. O trolley desloca-se apoiado em rodas que , por sua vez, deslocam-se sobre trilhos fixados na estrutura da ponte .A fig. (3-1) apresenta um diagrama cinemático simplificado do acionamento do trolley .

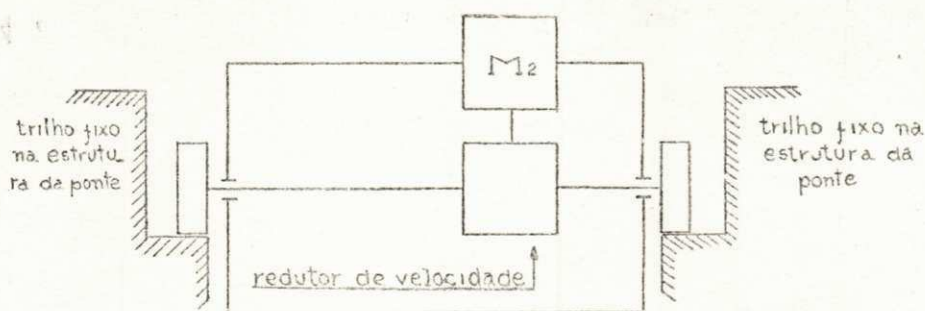


diagrama cinemático simplificado
do acionamento do trolley
fig.(3-1)

É requerido neste projeto que o motor de acionamento do trolley seja um motor de indução trifásico . Para os movimentos do trolley , os quais são dois movimentos e-

fetudor em direções opostas, o motor de acionamento deve trabalhar na região normal de sua característica mecânica natural. Isto possibilita inclusive o uso do motor de indução do tipo gaiola de esquilo. Este motor, além de ser mais robusto e simples de comandar, é também mais barato do que outro tipo de motor de igual porte. Um fator que limita a possibilidade do uso do motor gaiola, é a condição de partida. De acordo com as normas e regulamentos apresentados no apêndice B, art.(B-3.1), há um limite de potência para o uso de partida direta. E se o motor gaiola é partido por um qualquer dos métodos artificiais de partida, sempre resulta numa diminuição do torque de partida. Esta diminuição pode trazer problemas, alongando o tempo de aceleração, ou mesmo tornando o motor insuficiente para partir a carga exigida. No entanto a carga do trolley normalmente tem um inércia relativamente baixa, não exigindo altos torques de partida em comparação com o seu nominal. Os cálculos efetuados durante o desenvolvimento do projeto definem a escolha acertada.

Os movimentos do trolley, denominados para direita e para esquerda, devem ser acionados por botões de comando, e os circuitos de acionamento devem ser compostos apenas por dispositivos clássicos e padronizados. Estas condições são impostas ao autor pelos requisitos do projeto apresentados no capítulo 1.

No acionamento do trolley, tal como no da ponte,

cabe ao operador encontrar uma posição desejada durante os movimentos . No entanto estes movimentos devem ser limitados , nos seus terminais de curso , por dispositivos especiais de proteção mecânica .

3 - 2. REQUISITOS DO PROJETO

3 - 2.1. DADOS FORNECIDOS AO AUTOR

Para o projeto de acionamento do trolley os dados fornecidos ao autor são ;

motor de acionamento	
do trolley	- motor de indução trifásico
mancais de suporte	- mancais de rolamento
peso da carga	- $G_p = 200 \text{ kN} = 20,4 \text{ ton}$
velocidade de translação do trolley para carga nominal	- $v_n = 0,6 \text{ m/s}$

Outros parâmetros necessários e as soluções específicas são de escolha do autor . Estas soluções buscam sempre um ponto de encontro entre melhores resultados técnicos com uma maior economia na construção e atuação do sistema.

3 - 2.2 ESQUEMA DE SOLUÇÃO DO PROJETO DE ACIONAMENTO DO TROLLEY

Para projetar o acionamento do trolley o projetis

ta deve solucionar cada ítem do seguinte esquema ;

- escolha do motor
 - potência
 - características técnicas
 - velocidade nominal
- escolha do redutor de velocidade
 - razão de redução
 - eficiência
 - potência nominal
- diagrama operacional
 - regime permanente
 - aceleração
 - freio
 - inversão de velocidade
 - proteção
 - descrição da operação
- escolha dos equipamentos auxiliares

3 - 3. ESCOLHA DO MOTOR M_2

Para solucionar o sistema mecânico , encontrando a potência necessária para o acionamento do trolley , são precisos alguns parâmetros não fornecidos nas especificações do projeto . Estes parâmetros , escolhidos pelo autor, são relacionados a seguir :

diâmetro da roda	$D_r = 0,24 \text{ m}$
diâmetro do eixo	$D_e = 0,05 \text{ m}$
coeficiente de atrito nos	



mancais de rolamento	$\mu = 0,05$
coeficiente de atrito de ro- lamento	$F = 0,0005 \text{ m}$
coeficiente de atrito adici- onal	$k = 1,5$
eficiência de cada estágio de engrenagens	$\eta_r = 0,97$

Sobre a estrutura do trolley são localizados os motores M_2 e M_3 (de acionamento do guindaste) e o tambor com um comprimento variável do cabo de suporte da carga enrolado sobre êle , e ainda a construção do gancho de sustentação da carga . Além de todos estes pesos citados , ainda deve-se contar com o peso da própria construção do trolley. Todos estes pesos , dos motores M_2 e M_3 , do tambor , do cabo de suporte da carga , do gancho de amarramento da carga e da construção do trolley podem ser levados em conta, para o cálculo da potência do motor , como sendo 25% da carga nominal G_p . O fator 25% é um parâmetro escolhido pelo projetista , pois estes dados mecânicos exatos não foram fornecidos nas especificações do projeto . Portanto , o peso total do sistema é ;

$$G = 1,25 G_p = 1,25 \times 200 \text{ KN} = 250 \text{ KN}$$

A força total resistente é dada por (1 , pg20) ;

$$G_c = \frac{KG}{D_r} (2F + \mu D_e) = 1,5 \times \frac{250}{0,24} (2 \times 0,0005 + 0,05 \times 0,05) \text{ KN} =$$

$$= 5,45 \text{ KN}$$

E a potência necessária para acionar esta carga é;

$$P_c = \frac{G_c \times V_n}{(\eta_r)^3} = \frac{5,45 \times 0,6}{(0,97)^3} \text{ KW} = 3,6 \text{ KW}$$

onde se considerou que o redutor de velocidade é formado por tres estágios de engrenagens .

Considerando-se o tipo de movimento do trolley e a potência relativamente pequena para o acionamento da carga , pode-se escolher um motor de indução do tipo gaiola . O motor gaiola , em comparação com o de aneis , é mais barato , mais robusto e seu circuito de controle remoto é significativamente mais simples .

Escolhido em catálogo , o motor de acionamento do trolley tem as características seguintes ;

potência nominal	-	$P_n = 4 \text{ kW}$
velocidade nominal	-	$n_n = 870 \text{ rpm}$
tensão de alimentação	-	$V = 380 \text{ V}$
corrente nominal	-	$I_n = 10,1 \text{ A}$
frequência de alimentação	-	$f = 60 \text{ c/s}$
eficiência	-	$\eta_{M_2} = 0,85$
fator de potência	-	$\cos \varphi = 0,71$
número de polos	-	$p = 4$
peso	-	$G_{M_2} = 165 \text{ kg}$
		$GD_{M_2}^2 = 1,0 \text{ kgm}^2$

razão corrente de partida para a nominal	-	$I_p/I_n = 5,9$
razão torque de partida para o nominal	-	$T_p/T_n = 1,5$
razão torque máximo para o nominal	-	$T_{m\acute{a}x}/T_n = p = 2,9$

Conhecendo -se a frequência de alimentação e o número de polos pode-se escrever ;

$$n_o = \frac{120 \cdot f}{P} = \frac{120 \times 60}{4} \text{ rpm} = 900 \text{ rpm}$$

E o deslizamento nominal é ;

$$s_n = \frac{n_o - n}{n_o} = \frac{900 - 870}{900} = 0,033$$

3 - 4. REDUÇÃO DE VELOCIDADE

A velocidade de rotação das rodas é ;

$$n_r = \frac{30}{\pi} \times \frac{2v_n}{D_r} = \frac{30 \times 2 \times 0,6}{\pi \times 0,24} \text{ rpm} = 47,3 \text{ rpm}$$

E a razão de redução é ;

$$i = \frac{n_n}{n_r} = \frac{870}{47,2} = 18,2$$

Na realidade , um redutor de velocidade de razão $i = 18,2$ não necessita de tres estágios de engrenagens , como foi assumido para o cálculo da potência do motor . No en

tanto este parâmetro não afeta significativamente o projeto, desde que sempre se escolhe um motor de potência um pouco superior à potência da carga, e que se enquadre numa potência comercial. O dado significativo, com relação ao redutor de velocidade, é a sua eficiência que não pode ser inferior à eficiência total assumida no cálculo da potência do motor. Portanto, os dados do redutor são;

razão de redução	$i = 18,2$
potência nominal	$P_n = 4 \text{ kW}$
entrada de velocidade	$n_n = 870 \text{ rpm}$
eficiência mínima	$\eta = (\eta_r)^3 = (0,97)^3 =$ $= 0,91$

3 - 5. TORQUE DE CARGA NOMINAL DO SISTEMA

O torque de carga do sistema, nas condições de carga nominal, é dado pela expressão:

$$T_c = \frac{P_c}{\omega_n} = \frac{30 P_c}{\pi n_n} = \frac{30 \times 3,6 \times 10^3}{\pi \times 870} \text{ Nm} = 39,5 \text{ Nm}$$

3 - 6. TORQUE NOMINAL ELÉTRICO

O torque nominal fornecido pelo motor é dado por:

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30 P_n}{\pi n_n} = \frac{30 \times 4 \times 10^3}{\pi \times 870} \text{ Nm} = 44 \text{ Nm}$$

3 - 7. INÉRCIA DO SISTEMA

O torque de inércia do sistema é a soma dos torques de inércia do próprio rotor e da carga referido ao eixo do rotor .

O torque de inércia do rotor é dado por :

$$J_{M_2} = \frac{GD}{4g} = \frac{1,0}{4 \times 9,81} \text{ Kgs}^2 = 0,0225 \text{ Kgs}^2 = 0,25 \text{ Nms}^2$$

O torque de inércia da carga referido ao eixo do rotor é , (cap.2, art.(2-7)) :

$$\begin{aligned} J'_c &= \frac{G}{g} \left(\frac{V_n}{\pi n} \right)^2 \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 = \\ &= \frac{250 \times 10^3}{9,81} \left(\frac{0,6}{870} \right)^2 \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \text{ Nms}^2 = 1,08 \text{ Nms}^2 \end{aligned}$$

E o torque de inércia total é :

$$J_2 = J_{M_2} + J'_c = (0,25 + 1,08) \text{ Nms}^2 = 1,33 \text{ Nms}^2$$

3 - 8. PARTIDA E ACELERAÇÃO3 - 8.1 ESCOLHA DO MÉTODO DE PARTIDA

Se o motor é partido diretamente ligado à rede , pelas suas características fornecidas pelo fabricante , a corrente inicial de partida é :

$$I_p = 5,9 I_n = 5,9 \times 10,1 \text{ A} = 59,59 \text{ A}$$

Portanto, considerando-se que o motor satisfaz as exigências das concessionárias de energia locais para partida direta, e ainda satisfaz as recomendações do IEC, (apend. B, art. (B-3.1)), a escolha do autor para o método de partida do motor M_2 é a partida direta. Com esta escolha os circuitos de acionamento do motor tornam-se mais simples e, logicamente, o projeto torna-se economicamente mais vantajoso.

Com partida direta o torque inicial é:

$$T_p = 1,5 T_m = 1,5 \times 44 \text{ Nm} = 66 \text{ Nm}$$

3 - 8.2 TEMPO DE ACELERAÇÃO

Para uma verificação da escolha adequada do motor é necessário calcular o tempo de aceleração, (apend. B, art. (B-2.2)). Como não se conhece o valor das reatâncias e resistências do motor, pode-se então tentar usar a equação (B-13). Para isto é necessário comprovar se a resistência do estator pode ser desprezada para qualquer valor de velocidade na característica mecânica do motor. Uma forma de testar esta consideração é calcular o deslizamento crítico pela equação (B-8), para dois pontos conhecidos da característica mecânica do motor. Estes dois valores de s_c devem diferir de, no máximo, 15% para comprovar a validade de se fazer $r_1 \approx 0$. Este erro máximo de 15% é de escolha do autor,

significando que , se este erro é superado , o erro encontrado no cálculo do tempo , ao se desprezar a resistência do estator para todas as velocidades , é maior do que o erro resultante quando o cálculo do tempo é realizado por meio de linearizações da característica mecânica do motor .

Então para

$$T_e = T_p \quad e \quad s = 1$$

tem-se ;

$$S_c^I = \frac{T_{max}}{T_p} + \sqrt{\left(\frac{T_{max}}{T_p}\right)^2 - 1} = \frac{2,9}{1,5} + \sqrt{\left(\frac{2,9}{1,5}\right)^2 - 1} = 0,28$$

E para

$$T_e = T_n \quad e \quad s = s_n$$

tem-se ;

$$S_c^{II} = s_n \left[p + \sqrt{p^2 - 1} \right] = 0,033 \left[2,9 + \sqrt{2,9^2 - 1} \right] = 0,186$$

Como

$$\frac{S_c^I}{S_c^{II}} = \frac{0,28}{0,186} = 1,5$$

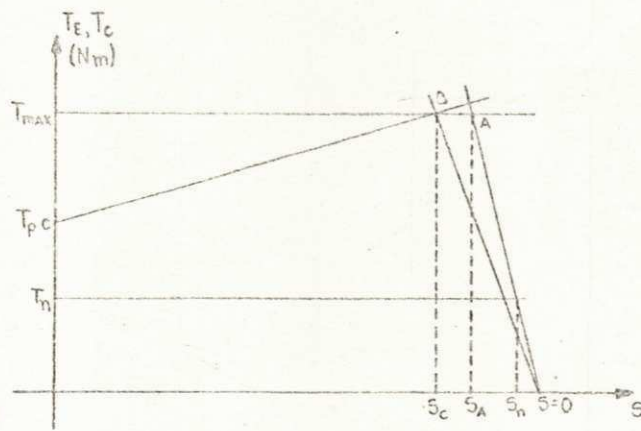
ou seja , o erro encontrado é de 50% , não se pode utilizar a consideração de $r_1 \cong 0$. Deve-se então calcular o tempo de aceleração linearizando-se a característica mecânica, como mostra a fig.(3-2) .

Pela equação (B-15) tem-se ;

$$s_a = \frac{T_{\max}}{T_n} s_n = 2,9 \times 0,033 = 0,0957$$

E pela equação (B-16) ;

$$s'_c = \frac{2 T_{\max}}{T_n} s_n = 2 \times 2,9 \times 0,033 = 0,191$$



linearização da característica
mecânica do motor

fig.(3-2)

Toma-se s_c como um valor intermediário entre s_a e s'_c , ou seja :

$$s_c = \frac{s_a + s'_c}{2} = \frac{0,0957 + 0,191}{2} = 0,143$$

Para se aplicar a equação (B-18) no cálculo do tempo no intervalo $1 \gg s \gg s_c$, faz-se :

$$a_1 = \frac{T_{\max} - T_p}{1 - s_c} = \frac{127,6 - 66}{1 - 0,143} \text{ Nm} = 71,8 \text{ Nm}$$

e

$$b_1 = \frac{T_{\max} - T_{psa}}{1 - s_c} = \frac{127,6 - 66 \times 0,143}{1 - 0,143} \text{ Nm} = 137 \text{ Nm}$$

Portanto, pela equação (B-18)

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{\omega_0 J_2}{a_1} \ln \frac{-a_1 s_c + b_1 - T_h}{-a_1 + b_1 - T_h} = \\ &= \frac{\pi \times 900 \times 1,33}{30 \times 71,8} \ln \frac{-71,8 \times 0,143 + 137 - 44}{-71,8 + 137 - 44} \text{ s} = 2,36 \text{ s} \end{aligned}$$

Para o intervalo $s_c \gg s \gg s_n$, faz-se ;

$$a_2 = \frac{T_{\max} - T_n}{s_c - s_n} = \frac{127,6 - 44}{0,143 - 0,033} \text{ Nm} = 760 \text{ Nm}$$

$$b_2 = \frac{T_n s_c - T_{\max} s_n}{s_c - s_n} = \frac{44 \times 0,143 - 127,6 \times 0,033}{0,143 - 0,033} \text{ Nm} = 19 \text{ Nm}$$

e

$$s_n' = \frac{n_0 - 0,95 n_n}{n_0} = \frac{900 - 0,95 \times 870}{900} = 0,077$$

E aplicando-se a equação (B-20)

$$\begin{aligned} t_2 &= \frac{\omega_0 J_2}{a_2} \ln \frac{a_2 s_c + b_2 - T_n}{a_2 s_n' + b_2 - T_n} = \\ &= \frac{\pi \times 900 \times 1,33}{30 \times 760} \ln \frac{760 \times 0,143 + 19 - 44}{760 \times 0,077 + 19 - 44} \text{ s} = 0,15 \text{ s} \end{aligned}$$

Finalmente , o tempo total de aceleração é :

$$t_a = t_1 + t_2 = (2,36 + 0,15) \text{ s} = 2,51 \text{ s}$$

Para a aceitação final do projeto da aceleração do motor M_2 , é necessário ainda calcular a aceleração média que deve ser limitada para evitar deslizamento das rodas do trolley sobre os trilhos . Para os movimentos horizontais de uma ponte rolante , usa-se o valor limite , (8, pag.1017) :

$$\left(\frac{dv}{dt} \right)_{\max} = 1,4 \text{ m/s}^2$$

Durante os dois estágios de aceleração \bar{v} , aceleração média é dada por :

$$\begin{aligned} \left(\frac{dv}{dt} \right) &= \frac{1}{t_a} \left[\int_{t=0}^{t=t_1} \frac{dv(t)}{dt} dt + \int_{t=t_1}^{t=t_2} \frac{dv(t)}{dt} dt \right] = \frac{1}{t_a} (V_2 + V_n^2 - V_1) = \\ &= \frac{V_n^2}{t_a} = \frac{0,95 V_n}{t_a} = \frac{0,95 \times 0,6}{2,51} \text{ m/s}^2 = 0,225 \text{ m/s}^2 < \left(\frac{dv}{dt} \right)_{\max} \end{aligned}$$

Conseqüentemente o projeto de aceleração do motor de acionamento do trolley é plenamente aceitável .

3 - 9. FREIO

O motor pode ser freiado simplesmente desligando-o da rede , o que torna o projeto mais simples e econômico. Um

certo tempo depois de desligar o motor da rede , faz-se atuar um freio eletromagnético o qual trava o sistema . A equação mecânica deste movimento de desaceleração é :

$$T_d = -T_n = J_2 \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 J_2 \frac{ds}{dt}$$

O tempo de freiagem é então ;

$$\begin{aligned} t_f &= \frac{\omega_0 J_2}{T_n} \int_{s_n}^{s=1} ds = \frac{\omega_0 J}{T_n} (1-s_n) = \\ &= \frac{\pi \times 900 \times 1,33}{30 \times 44} (1-0,033) s = 2,76 s \end{aligned}$$

A variação do deslizamento no tempo durante o freio é :

$$s = s_n + \frac{T_n}{\omega_0 J_2} t$$

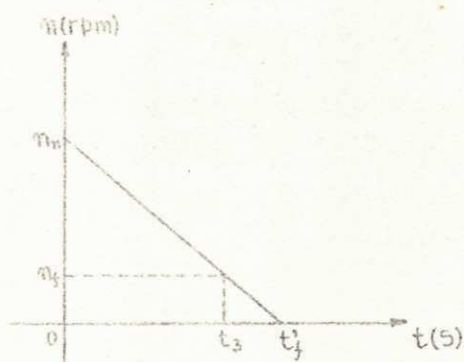
E a consequente variação de velocidade é :

$$n = n_n - \frac{30}{\pi} \frac{T_n}{J_2} t \quad (3-1)$$

Atuando-se o freio eletromagnético no tempo $t_3 = 2s$, escolhido arbitrariamente , a velocidade do motor neste instante é :

$$n_f = n_n - \frac{30}{\pi} \frac{T_n}{J_2} t_3 = \left[870 - \frac{30 \times 44 \times 2}{\pi \times 1,33} \right] \text{rpm} = 240 \text{rpm}$$

A fig.(3-3) mostra a função $n = f(t)$ de desaceleração do motor .



variação de velocidade do motor durante o freio

fig.(3-3)

3 - 9.1 FREIO ELETROMAGNÉTICO

O torque fornecido pelo freio eletromagnético é dado pela expressão

$$T_{fe_2} = \frac{\pi}{30} J_2 \frac{n_f}{t_4} - T_n$$

onde t_4 é o tempo de freio do motor contado a partir do ponto inicial de atuação do freio eletromagnético, (9, pag.74). Nos movimentos horizontais, como o do trolley, o torque do freio eletromagnético pode ser tomado como, (8, pag.1024)

$$T_{fe_2} = 1,5 T_n = 1,5 \times 44 \text{ Nm} = 66 \text{ Nm}$$

porque neste tipo de movimento não há ação de cargas ativas.

Após a atuação do freio eletromagnético o tempo t_4 é dado por :

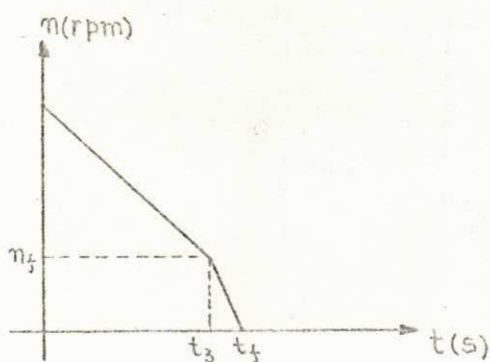
$$t_4 = -\frac{J_2}{T_n + T_f e_2} \frac{\pi}{30} \int_{n=n_f}^{n=0} dn = \frac{\pi}{30} \frac{J_2}{T_n + T_f e_2} n_f =$$

$$= \frac{\pi \times 1,33 \times 240}{30(44 + 66)} \text{ s} = 0,303 \text{ s}$$

Portanto, usando-se o freio eletromagnético no tempo $t_3 = 2 \text{ s}$, o tempo total de freio é :

$$t_f = t_3 + t_4 = (2 + 0,303) \text{ s} = 2,303 \text{ s}$$

A fig.(3-4) mostra a variação da velocidade do motor no tempo durante o freio, usando-se o freio eletromagnético.



variação da velocidade do motor durante o freio, usando-se o freio eletromagnético

fig.(3-4)

3 - 10. PROTEÇÃO DE FIM DE CURSO

A proteção de fim de curso , nos terminais do curso do trolley , é utilizada para impedir choques entre o trolley e a proteção mecânica necessariamente usada nos terminais dos seus trilhos . O relé de fim de curso é projetado aqui para acionar o circuito de freio do motor . Portanto , após o acionamento do relé , o trolley ainda se desloca durante o tempo de freiagem .

A distância percorrida pelo trolley depois do acionamento do relé de fim de curso é dada por :

$$dx = \pi D r \frac{n_r}{60} dt = \pi D r \frac{n}{60i} dt$$

A distância percorrida pelo trolley , depois de acionado o circuito de freio , pode ser calculada em duas etapas . A primeira etapa corresponde ao tempo t_3 quando o motor é desligado da rede . A segunda etapa corresponde ao tempo t_4 quando se tem a atuação do freio eletromagnético .

Substituindo-se o valor de $n=f(t)$, dado na equação (3-1) na expressão da distância obtem-se :

$$dx = \frac{\pi D r}{60i} \left[n_m - \frac{30}{\pi} \frac{T}{J_2} t \right] dt$$

onde T é o torque de freio atuando no eixo do motor .

Na primeira etapa tem-se :

$$x_1 = \frac{\pi D_r}{60 \cdot i} \int_{t=0}^{t_3} \left(n_n - \frac{T_n}{J_2} \frac{30}{\pi} t \right) dt = \frac{\pi D_r}{60 i} \left[n_n t_3 - \frac{T_n}{J_2} \frac{30}{\pi} t_3^2 \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,24}{60 \times 18,2} \left[870 \times 2 - \frac{1}{2} \times \frac{44}{1,33} \times \frac{30}{\pi} \times 2^2 \right] m = 0,763 m$$

Na segunda etapa pode-se usar a mesma equação de distância, considerando-se que para $t=0$ a velocidade inicial é $n_f = 240$ rpm e que o torque T é dado por :

$$T = T_n + T_{fe_2}$$

Portanto

$$x_2 = \frac{\pi D_r}{60 i} \left[n_f t_4 - \frac{30(T_n + T_{fe_2})}{J_2 \pi} t_4^2 \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,24}{60 \times 18,2} \left[240 \times 0,303 - \frac{30(44 + 66)}{2 \times 1,33 \times \pi} 0,303^2 \right] m = 0,025 m$$

A distância total percorrida é :

$$x = x_1 + x_2 = (0,763 + 0,025) m = 0,778 m$$

No entanto a distância de colocação do relé de fim de curso é determinada pela distância percorrida pelo trolley, quando este atua sem carga. Para se calcular esta distância é necessário conhecer o torque e a velocidade de vazio. Nesta situação o peso total acionado pelo motor M_2 é :

$$G' = 0,25 G_p = 0,25 \times 200 \text{ KN} = 50 \text{ KN}$$

A força resistente correspondente é :

$$G_o = \frac{k G'}{D_r} (2F + \mu D_e) = \frac{1,5 \times 50}{0,24} (2 \times 0,0005 + 0,05 \times 0,05) \text{ KN} =$$

$$= 1,09 \text{ KN}$$

E o torque de vazio é expresso por :

$$T_o = \frac{G_o \times D_r}{2 \times (\eta_r)^3 \times i} = \frac{1,09 \times 0,24 \times 10^3}{2 \times (0,97)^2 \times 18,2} \text{ Nm} = 7,9 \text{ Nm}$$

O deslizamento de vazio pode ser calculado considerando-se que a característica mecânica nesta região é dada por uma reta que passa pelos pontos $(s=0, T=0)$ e $(s=s_n, T=T_n)$, ou

$$s_o = \frac{T_o}{T_n} s_n = \frac{7,9}{44} \times 0,033 = 0,006$$

E a velocidade correspondente é :

$$n'_o = (1 - s_o) n_o = (1 - 0,006) \times 900 \text{ rpm} = 895 \text{ rpm}$$

Para o trolley em vazio, depois do acionamento do relé de fim de curso, a distância percorrida é também calculada em duas etapas. Na primeira etapa tem-se :

$$x'_1 = \frac{\pi D_r}{60i} \left[n_o t_s - \frac{30 \times T_o \times t_s^2}{2 \times \pi \times J_2} \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,24}{60 \times 18,2} \left[895 \times 2 - \frac{30 \times 7,9 \times 2^2}{2 \times \pi \times 1,33} \right] m = 1,17 m$$

Na segunda etapa tem-se :

$$n_4' = n_0 - \frac{30 \times T_0 \times t_3}{\pi \times J_1} = \left(895 - \frac{30 \times 7,9 \times 2}{\pi \times 1,33} \right) \text{rpm} = 807,5 \text{rpm}$$

$$t_4' = \frac{\pi J_2}{30 T_0 + T_{fe2}} n_4' = \frac{\pi \times 1,33 \times 807,5}{30 \times (7,9 + 66)} s = 1,57 s$$

e

$$x_2' = \frac{\pi D r}{60 i} \left[n_4' t_4' - \frac{30 (T_0 + T_{fe2}) t_4'^2}{2 \times \pi \times J_2} \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,24}{60 \times 18,2} \left[807,5 \times 1,57 - \frac{30 (7,9 + 66)}{2 \times \pi \times 1,33} \right] m = 0,42 m$$

A distância total percorrida pelo trolley em vazio é então

$$x = x_1' + x_2' = (1,17 + 0,42) m = 1,59 m$$

Esta distância pode ser minimizada se se faz atuar o freio eletromagnético num tempo t_3 menor do que 2s, depois de desligar o motor da rede. Fazendo-se $t_3 = 1s$ obtem-se :

Na primeira etapa

$$x_1' = \frac{\pi D r}{60 i} \left[n_0 t_3 - \frac{30 \times T_0 \times t_3^2}{2 \times \pi \times J_2} \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,24}{60 \times 18,2} \left[895 \times 1 - \frac{30 \times 7,9 \times 1}{2 \times \pi \times 1,33} \right] m = 0,597 m$$

Na segunda etapa

$$\eta_f^2 = n_0 - \frac{30 \times T_0 \times t_3}{\pi \times J_1} = \left(895 - \frac{30 \times 7,9 \times 1}{\pi \times 1,33} \right) \text{rpm} = 851,25 \text{rpm}$$

$$t_4^2 = \frac{\pi \times J_2}{30 \times (T_0 + T_{fe2})} \eta_f^2 = \frac{\pi \times 1,33 \times 851,25}{30 \times (7,9 + 66)} s = 1,66 s$$

e

$$x_2^2 = \frac{\pi \times D_r}{60 \times i} \left[\eta_f^2 t_4^2 - \frac{30 (T_0 + T_{fe2}) t_4^2}{2 \times \pi \times J_2} \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,24}{60 \times 18,2} \left[851,25 \times 1,66 - \frac{30 (7,9 + 66) \times 1,66^2}{2 \times \pi \times 1,33} \right] m = 0,47 m$$

E a distância total percorrida é :

$$x = x_1 + x_2 = (0,597 + 0,47) m = 1,067 m$$

Finalmente , a distância escolhida pelo autor para a colocação do relé de fim de curso , baseando-se no tempo $t_3 = 1s$ e dando uma margem de segurança , é :

$$x_{M_2} = 1,30 m$$

sendo x_{M_2} a distância medida a partir do terminal do curso do trolley .

Apenas para se ter conhecimento da distância per

corrida pelo trolley com carga , depois de acionado o relé e atuando-se o freio eletromagnético em $t_3 = 1s$, pode-se calcular :

Na primeira etapa

$$x_1 = \frac{\pi D r}{60 i} \left[n_n t_3 - \frac{30 \times T_n \times t_3^2}{2 \times \pi \times J_2} \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,24}{60 \times 18,2} \left[870 \times 1 - \frac{30 \times 44 \times 1^2}{2 \times \pi \times 1,33} \right] m = 0,49 m$$

Na segunda etapa

$$n_f = n_n - \frac{30 \times T_n \times t_3}{\pi \times J_1} = \left(870 - \frac{30 \times 44 \times 1}{\pi \times 1,33} \right) \text{rpm} = 556 \text{rpm}$$

$$t_4 = \frac{\pi}{30} \frac{J_2}{T_n + T_f e_2} n_f = \frac{\pi \times 1,33 \times 556}{30 \times (44 + 66)} s = 0,705 s$$

e

$$x_2 = \frac{\pi D r}{60 i} \left[n_f t_4 - \frac{30 (T_n + T_f e_2) t_4^2}{2 \times \pi \times J_2} \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,24}{60 \times 18,2} \left[\frac{556 \times 0,705}{1} - \frac{30 (44 + 66) 0,705^2}{2 \times \pi \times 1,33} \right] m = 0,133 m$$

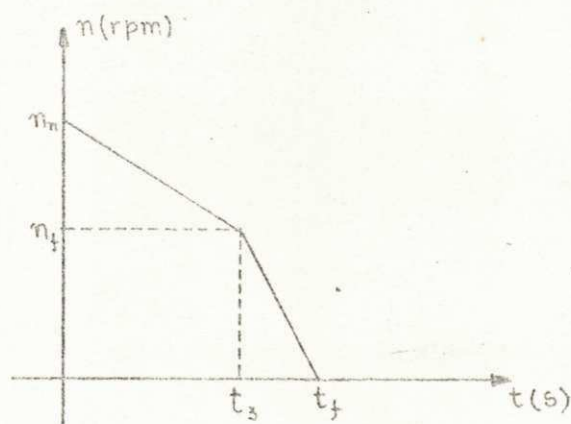
E a distância total percorrida pelo trolley em carga , depois de acionado o circuito de freio , é :

$$x = x_1 + x_2 = (0,49 + 0,133) m = 0,623 m$$

Para o trolley em carga o tempo total de freiagem, somando-se os tempos de cada etapa , é :

$$t_f = t_3 + t_4 = (1 + 0,705) s = 1,705 s$$

A fig.(3-5) mostra a variação de velocidade do motor com o tempo durante o freio, quando o freio eletromagnético é atuado em $t_3 = 1s$, o qual é a escolha final do autor.



variação de velocidade do motor durante o freio, usando-se o freio eletromagnético fig.(3-5)

3 - 11. CIRCUITO DE ACIONAMENTO DO TROLLEY

O trolley é acionado por controle remoto através de tres botões de comando. Dois destes botões acionam respectivamente os movimentos para direita e para esquerda. O terceiro botão aciona o freio de ambos os movimentos. Como a partida do motor é obtida ligando-o diretamente à rede, e o freio, por sua vez, é obtido desligando-se o motor da rede, o circuito de acionamento é bastante simples, pois não contém resistências adicionais nem outros elementos especi

ais para controle por meio de relés .

3 - 11.1 DIAGRAMA DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO

A fig.(3-6) mostra o diagrama ideal (apend.E,art.(E-1)) do circuito de acionamento do motor M_2 . A numeração ao lado do diagrama denomina os seguintes circuitos ;

- circuito (1) - comando do freio eletromagnético
- circuito (2) - comando do movimento para a direita
- circuito (3) - comando do movimento para a esquerda
- circuito (4) - comando do freio

A escolha do autor para o circuito de acionamento visa garantir a ordem de acionamento dos contactos imposta pelas soluções encontradas para o projeto . Outras soluções mais simplificadas não fornecem esta garantia , podendo causar uma falha da ordem predeterminada de acionamento dos contactos , o que leva à falha da atuação do sistema .

O funcionamento do circuito é explicado em seguida ao diagrama , para cada movimento em separado . A preparação do circuito consiste do fechamento das chaves separadoras E_3 e E_4 , e é a mesma para os dois movimentos . Cada

movimento é descrito por suas condições iniciais e pela ação do circuito . Quando as condições iniciais são omitidas significa que estas condições são as mesmas resultantes da preparação do circuito para os movimentos .

Os símbolos gráficos usados no diagrama na descrição do funcionamento do circuito são dados no apêndice E .

Uma lista descritiva das funções dos dispositivos usados no circuito de acionamento é apresentada no próximo, e também último , artigo deste capítulo .

O sistema de proteção elétrica utilizado no circuito de acionamento do trolley é baseado nas exigências da Associação Brasileira de Normas Técnicas (5) e recomendações e padrões do IEEE (11) e da Westinghouse Electric Corporation (10) . O apêndice C apresenta um resumo destas normas e recomendações .

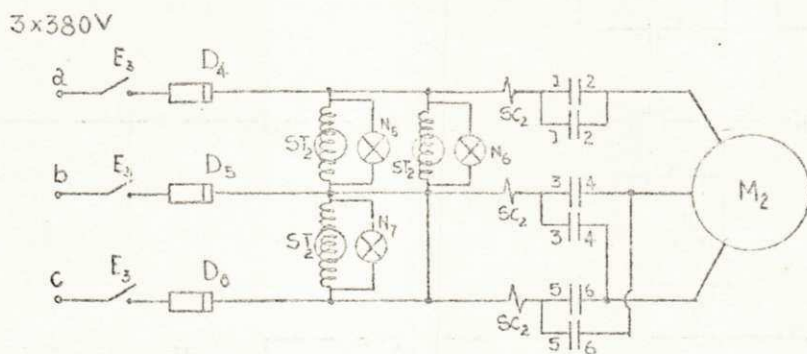


diagrama ideal do circuito de
 acionamento do motor M_2 -
 circuito principal

fig.(3-6)

- Preparação

Ação : $E_3 ++$, $E_4 ++$, $ST_2 ++$

- Movimento para a Direita- Aceleração

Ação : $L_3 +$, $P_5 ++$, $(L_3 -)$, $H_2 ++$, $FE_2 ++$, $S_2 ++$,
 $C_5 ++$

- Freio

Condições Iniciais : $P_5 +$, $H_2 +$, $FE_2 +$, $S_2 +$, $C_5 +$

Ação : $F_2 +$, $Q_2 +$, $(F_2 -)$, $P_5 -$, $S_2 -$, $C_5 -$,
 $A_2 + (d)$, $H_2 -$, $FE_2 -$, $Q_2 -$, $A_2 -$

- Movimento para a Esquerda- Aceleração

Ação : $L_4 +$, $P_6 ++$, $(L_4 -)$, $H_2 ++$, $FE_2 ++$, $S_2 ++$,
 $C_6 ++$

- Freio

Condições Iniciais : $P_6 +$, $H_2 +$, $FE_2 +$, $S_2 +$, $C_6 +$

Ação : $F_2 +$, $Q_2 +$, $(F_2 -)$, $P_6 -$, $S_2 -$, $C_6 -$,
 $A_2 + (d)$, $H_2 -$, $FE_2 -$, $Q_2 -$, $A_2 -$

- Acionamento do Relé de Fim de Curso T_3 no Movimento para a Direita

Condições Iniciais : $P_5 +$, $H_2 +$, $FE_2 +$, $S_2 +$, $C_5 +$

Ação : $T_3 ++$, $Q_2 +$, $P_5 -$, $S_2 -$, $C_5 -$, $A_2 + (d)$, $H_2 -$,
 $FE_2 -$, $Q_2 -$, $A_2 -$

- Movimento para a Esquerda com T_3^+

Condições Iniciais ; T_3^+

Ação ; L_4^+ , P_6^{++} , (L_4^-) , H_2^{++} , FE_2^{++} , S_2^{++} , C_6^{++} ,
 T_3^-

- Acionamento do Relé de Fim de Curso T_4 no Movimento para a Esquerda

Condições Iniciais : P_6^+ , H_2^+ , FE_2^+ , S_2^+ , C_6^+

Ação : T_4^{++} , Q_2^+ , P_6^- , S_2^- , C_6^- , $A_2^+(d)$, FE_2^- ,
 Q_2^- , A_2^-

- Movimento para a Direita com T_4^+

Condições Iniciais : T_4^+

Ação : L_3^+ , P_5^{++} , (L_3^-) , H_2^{++} , FE_2^{++} , S_2^{++} , C_5^{++} ,
 T_4^-

3 - 11.2 FUNÇÃO DOS DISPOSITIVOS DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
L_3	botão	1 NA (1,2)	comando do circuito (2)
L_4	botão	1 NA (1,2)	comando do circuito (3)
F_2	botão	1 NA (1,2)	comando do circuito (4)
P_5	relé	1 NA (1,2)	alimentação do circuito (2)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre os circuitos (2) e (3)

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
P ₆	relé	1 NF (5,6)	bloqueio entre os circuitos (2) e (4) com T ₄ ⁺
		1 NA (7,8)	comando do contactor C ₅
		1 NA (9,10)	comando do relé H ₂
		1 NA (11,12)	comando do relé S ₂
		1 NA (1,2)	alimentação do circuito (3)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre os circuitos (2) e (3)
		1 NF (5,6)	bloqueio entre os circuitos (3) e (4), com T ₃ ⁺
		1 NA (7,8)	comando do contactor C ₆
		1 NA (9,10)	comando do relé H ₂
		1 NA (11,12)	comando do relé S ₂
Q ₂	relé	1 NA (1,2)	alimentação do circuito (4)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre os circuitos (2) e (3) e o circuito (4)
		1 NA (5,6)	comando do relé de tempo A ₂
		1 NA (7,8)	comando do relé H ₂

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
H ₂	relé	1 NA (1,2)	alimentação do circuito (1)
		1 NA (3,4)	abertura do circuito(4)
S ₁	relé	1 NF (1,2)	bloqueio entre os motores M ₁ e M ₂
S ₂	relé	1 NF (1,2)	bloqueio entre os motores M ₂ e M ₁ , fig.(2-11)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre os motores M ₂ e M ₃ , fig.(4-18)
S ₃	relé	1 NF (3,4)	bloqueio entre os motores M ₃ e M ₂
A ₂	relé de tempo	1 NF (1,2)	abertura do relé H ₂
SC ₂	relé de sobre corrente	1 NF (1,2)	abertura dos circuitos (2) e (3)
ST ₂	relé de sub tensão	1 NA (1,2)	alimentação do circuito de comando

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
T ₃	relé de fim de curso	1 NF (1,2) 1 NA (3,4)	abertura do circuito(2) comando do circuito (4)
T ₄	relé de fim de curso	1 NF (1,2) 1 NA (3,4)	abertura do circuito(3) comando do circuito (4)
C ₅	contac- tor	3 NA (1,2)(3,4) e (5,6)	alimentação do motor no movimento para a direita
C ₆	contac- tor	3 NA (1,2)(3,4) e (5,6)	alimentação do motor no movimento para a esquerda
FE ₂	freio eletromagnético	1 NA (1,2)	bloqueio entre os circuitos (2) e (3) e o freio eletromagnético
E ₃	chave fa- ca	1 trifásico	alimentação do circuito principal
E ₄	chave fa- ca	1 monofásico	alimentação do circuito de comando

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
D ₄	fusível		proteção do circuito principal, fase a
D ₅	fusível		proteção do circuito principal, fase b
D ₆	fusível		proteção do circuito principal, fase c
D ₇	fusível		proteção do circuito de comando
N ₅	lâmpada vermelha		sinalização; fases a e b energizadas
N ₆	lâmpada vermelha		sinalização; fases a e c energizadas
N ₇	lâmpada vermelha		sinalização; fases b e c energizadas
N ₈	lâmpada vermelha		sinalização; circuito de comando energizado

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
N ₉	lâmpada verde		sinalização; circuito (2) energizado
N ₁₀	lâmpada verde		sinalização; circuito (3) energizado

Informações suplementares relacionadas com o projeto de acionamento do trolley são fornecidas nos capítulos 5 e 6 .

CAPÍTULO 4ACIONAMENTO DO GUINDASTESÍMBOLOS E UNIDADES

<u>SÍMBOLO</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
D_b	diâmetro da bilha	m
D_e	diâmetro do eixo	m
D_t	diâmetro do tambor	m
E_2	tensão entre escovas em circuito aberto	V
F	coeficiente de atrito de rolamento	m
f	frequência de alimentação	c/s
G_p	peso da carga nominal	N
G_r	força resistente nos mancais	Nm
I	corrente do rotor	A
i	razão de redução de velocidade	-
I_1	corrente máxima do rotor durante a aceleração	A
I_2	corrente mínima do rotor durante a aceleração	A
I_{ai}	corrente do rotor durante a aceleração	A
I'_{eq}	corrente média quadrática	A
I_{eq_i}	corrente equivalente para o <u>es</u>	

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
	quentamento	A
I_{fi}	corrente do rotor durante o freio	A
$I_{m\acute{a}x}$	corrente máx ^{ima} do rotor	A
I_n	corrente nominal do rotor	A
I_{n_1}	corrente do rotor em estado permanente correspondente à velocidade de n_1	A
I_{n_2}	corrente do rotor em estado permanente correspondente à velocidade de n_2	A
I_{pi}	corrente do rotor na partida	A
I_{vi}	corrente do rotor durante variação de velocidade	A
J_3	momento de inércia do sistema guindaste	Nms ²
J'_c	momento de inércia da carga referido ao eixo do motor	Nms ²
J_{M_3}	momento de inércia do motor M_3	Nms ²
J_t	momento de inércia do tambor	Nms ²
J'_t	momento de inércia do tambor referido ao eixo do motor	Nms ²
m	número de degraus de aceleração	-
n	velocidade de rotação do rotor	rpm
n_1	velocidade de rotação do rotor correspondente à velocidade v_1	rpm
n_2	velocidade de rotação do rotor correspondente à velocidade v_2	rpm

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
n_{fi}	velocidade de rotação do rotor <u>cor</u> respondente aos momentos de troca de característica mecânica durante o freio	rpm
n_n	velocidade nominal de rotação do rotor	rpm
n_o	velocidade síncrona de rotação do motor	rpm
P_c	potência da carga	W
P_i	potência consumida pela resistên cia R_i	W
P_n	potência nominal do motor	W
P_r	potência consumida nos mancais	W
r_2	resistência do rotor	--
r_{di}	resistência total do circuito do rotor	--
R_i	resistência adicional do circuito do rotor	--
s	deslizamento	-
s_1	deslizamento correspondente à velo cidade v_1	-
s_2	deslizamento correspondente à velo cidade v_2	-
s_{ai}	deslizamento correspondente à velo cidade de corte de resistência du rante a aceleração	-

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
s_c	deslizamento crítico na caracterís <u>tica mecânica natural</u>	--
s_{ci}	deslizamento crítico na caracterís <u>tica mecânica artificial</u>	--
s_{fi}	deslizamento correspondente à velo <u>cidade n_{fi}</u>	--
s_n	deslizamento nominal	--
t	tempo	S
T_1	torque elétrico correspondente à corrente I_1	Nm, WS
T_2	torque elétrico correspondente à corrente I_2	Nm, WS
T_{ai}	torque elétrico correspondente à corrente I_{ai}	Nm, WS
t_{ai}	tempo de aceleração	S
T_c	torque de carga	Nm, WS
T_d	torque dinâmico	Nm, WS
T_e	torque elétrico	Nm, WS
T_{fe_3}	torque fornecido pelo freio ele <u>tromagnético</u>	Nm, WS
T_{fi}	torque elétrico correspondente à corrente I_{fi}	Nm, WS
t_{fi}	tempo de freio	S
t_i	tempo de aceleração ou de freio pa <u>ra um degrau</u>	S
T_n	torque nominal elétrico	Nm, WS

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
T_{pi}	torque elétrico correspondente à corrente I_{pi}	Nm, Ws
t_{pi}	tempo relativo de inatividade do sistema	s
t_{ti}	tempo relativo de atividade do sistema	s
T_{vi}	torque elétrico correspondente à corrente I_{vi}	Nm, Ws
V	tensão de alimentação	V
$v_1 = 1,3v_n$	velocidade de descida da carga nominal	m/s
$v_2 = 0,6v_n$	velocidade de descida da carga nominal	m/s
v_e	velocidade de translação do eixo	m/s
v_n	velocidade de elevação da carga nominal	m/s
x_i	distância	m
x_2	reatância do rotor	--
x_{1-M_3}	distância de colocação do relé de fim de curso no movimento de elevação	m
x_{2-M_3}	distância de colocação do relé de fim de curso no movimento de descida	m
z_2	impedância do rotor	--

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
ϵ	tempo relativo de trabalho	-
$\lambda = \frac{I_1}{I_2}$	constante	-
η_{M_3}	eficiência do motor M_3	-
η_r	eficiência de um estágio de engrenagens	-
τ_R	constante de tempo térmica de uma resistência	s
w	velocidade angular do motor	rd/s
w_n	velocidade angular nominal do motor	rd/s
w_o	velocidade angular síncrona do motor	rd/s

4 - 1. INTRODUÇÃO

Para o acionamento do guindaste o motor requerido, nas especificações do projeto fornecidas ao autor, é um motor de indução trifásico de anéis. Neste projeto, um motor de indução de gaiola não poderia ser utilizado porque, apesar de que este motor se adapta a um tipo de movimento de freio em estado permanente requerido para a descida de carga, as velocidades de descida desejadas não podem ser encontradas, pois não se pode variar sua característica mecânica natural. O motor de indução de anéis se adapta muito bem às condições requeridas no projeto. Diferentes velocidades de funcionamento podem ser obtidas facilmente pelo controle de reostatos no rotor. E os pontos de funcionamento, requeridos nas especificações do projeto, podem ser exatamente encontrados. Para este tipo de acionamento os motores de corrente contínua também podem ser utilizados, apresentando tão boa performance quanto o de indução de anéis. Nos motores DC, shunt, série, composto ou independentemente excitado, as velocidades de funcionamento podem ser obtidas por adição de reostatos no seu circuito. A vantagem do uso do motor de indução, em relação ao uso do motor DC, está na maior facilidade de alimentação, pois não se necessita de dispositivos retificadores. Quando o guindaste atua com uma carga de grande inércia, é aconselhável o uso do motor série DC, para vencer o torque resistente na partida. Os cálculos realizados no desenvolvimento do projeto comprovam a escolha adequada.

O guindaste é montado sobre a estrutura do trolley e aciona a carga num plano vertical , através de um tambor sobre o qual é enrolado o cabo de sustentação da carga . A fig.(4-1) mostra um diagrama cinemático simplificado do seu acionamento .

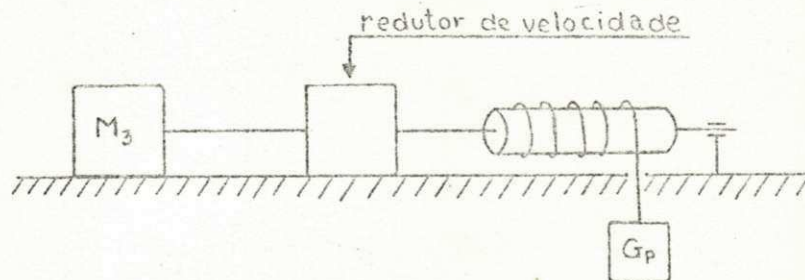


diagrama cinemático simplificado
do acionamento do guindaste
fig.(4-1)

Os movimentos do guindaste são realizados em duas direções ; o movimento de elevação e o movimento de descida que é subdividido em dois movimentos de diferentes velocidades . A velocidade menor de descida é normalmente utilizada pelo operador para encontrar uma posição requerida .Como nos capítulos precedentes , encontrar esta posição é uma função

do operador , e os únicos limites existentes nos movimentos devem ser fornecidos por dispositivos de proteção mecânica nos terminais do curso do gancho do guindaste . Todos os movimentos devem ser acionados por botões de comando , e é requerido do autor o uso apenas de controle automático de malha aberta , formado por dispositivos clássicos e padronizados .

4 - 2. REQUISITOS DO PROJETO

4 - 2.1 DADOS FORNECIDOS AO AUTOR

Os dados fornecidos ao autor para o projeto de acionamento do guindaste são ;

motor de acionamento do guindaste	-	motor de indução trifásico de anéis
mancais de suporte	-	mancais de rolamento
peso da carga nominal	-	$G_p = 200 \text{ kN} = 20,4 \text{ ton}$
velocidade de translação da carga nominal no movimento de elevação	-	$v_n = 0,08 \text{ m/s}$
velocidade de translação da carga nomi-		

nal nos movimentos de		
descida	-	$v_1 = 1,3 v_n$
velocidade síncrona		
do motor	-	$n_o = 900 \text{ rpm}$
inércia do tambor e		
cabo	-	$J_t = 45 \text{ Nms}^2$
tempo relativo de tra		
balho do motor	-	$\epsilon = 40\%$
eficiência de um está		
gio de engrenagens	-	$\eta_r = 0,97$
diâmetro do tambor	-	$D_t = 0,6 \text{ m}$

Outros parâmetros necessários e as soluções específicas do projeto são livre escolha do projetista. Este procura o ponto de otimização para que se obtenha melhores resultados técnicos com maior economia no projeto.

4 - 2.2 ESQUEMA DE SOLUÇÃO DO PROJETO DE ACIONAMENTO DO GUINDASTE

Para projetar o acionamento do guindaste o engenheiro projetista deve seguir o esquema abaixo, solucionando cada item;

- escolha do motor.
potência

características técnicas

velocidade nominal

- escolha do redutor de velocidade

razão de redução

eficiência

potência nominal

- diagrama operacional

movimento de elevação

regime permanente

aceleração

freio

movimento de descida com velocidade $v_1 =$

$1,3 v_n$

regime permanente

aceleração

freio

movimento de descida com velocidade $v_2 =$

$0,6 v_n$

regime permanente

aceleração

freio

proteção

descrição da operação

- escolha dos equipamentos auxiliares

4 - 3. ESCOLHA DO MOTOR M₃

Pelo sistema mostrado na fig.(4-1) , e considerando-se que o redutor de velocidade é composto por tres estágios de engrenagens , a potência necessária para o acionamento da carga G_p é :

$$P_c' = \frac{G_p \times V_n}{(\eta_r)^3} = \frac{200 \times 0,08}{(0,97)^3} \text{ KW} = 17,6 \text{ KW} \quad (4-1)$$

No caso do guindaste é desnecessário calcular a força resistente nos mancais para se conhecer a potência da carga . Utilizando-se mancais de rolamento esta força é desprezível diante da força necessária para erguer ou baixar a carga . Normalmente costuma-se calcular a potência necessária para acionar a carga pela equação (4-1) , e escolher um motor de potência um pouco superior para compensar a força resistente nos mancais de rolamento . No entanto, apenas a título de exemplificação , o momento resistente nos mancais é calculado a seguir . Para isto , como solução do autor , os seguintes dados são escolhidos :

diâmetro do eixo	-	$D_e = 0,08 \text{ m}$
diâmetro da bilha	-	$D_b = 0,01 \text{ m}$
coeficiente de atrito de rolamento	-	$F = 0,0005 \text{ m}$

A força resistente ao rolamento em cada mancal é
(2 , pag.103) :

$$G_r = \frac{\pi \times F \times G_p}{D_o \times \frac{D_e}{2}} = \frac{\pi \times 0,0005 \times 200}{0,01 + \frac{0,08}{2}} \text{ KN} = 6,28 \text{ KN}$$

onde o fator π leva em consideração que as bilhas são numerosas o suficiente para que o peso, G_p , se distribua sobre todas as bilhas situadas no lado inferior do mancal, sendo estas bilhas bastante próximas umas das outras.

A velocidade de rotação do tambor é :

$$n_t = \frac{v_n \times 60}{\pi \times D_t} = \frac{0,08 \times 60}{\pi \times 0,6} \text{ rpm} = 2,51 \text{ rpm}$$

E a correspondente velocidade de translação do eixo é :

$$v_e = \frac{\pi \times D_e \times n_t}{60} = \frac{\pi \times 0,08 \times 2,51}{60} \text{ m/s} = 0,0106 \text{ m/s}$$

Portanto a potência consumida nos mancais é :

$$P_r = \frac{2 \times G_r \times v_e}{(\eta_r)^3} = \frac{2 \times 6,28 \times 0,0106}{(0,97)^3} \text{ kW} = 0,146 \text{ kW}$$

A potência total para o acionamento da carga é :

$$P_c = P_c' + P_r = (17,6 + 0,15) \text{ kW} = 17,75 \text{ kW}$$

De acordo com a potência, P_c , obtida, o motor escolhido em catálogo tem dados :

potência nominal	-	$P_n = 20 \text{ kW}$
velocidade síncrona	-	$n_o = 900 \text{ rpm}$

velocidade nominal	-	$n_n = 864 \text{ rpm}$
eficiência	-	$\eta_{M_3} = 0,86$
fator de potência	-	$\cos \phi = 0,82$
tempo relativo de tra- balho	-	$\epsilon = 40\%$
razão de torque máxi- mo para o nominal	-	$T_{\max}/T_n = p = 2,5$
inércia do rotor	-	$J_{M_3} = 1,7 \text{ Nms}^2$
frequência de alimen- tação	-	$f = 60 \text{ c/s}$
tensão entre escovas com o circuito aberto	-	$E_2 = 280 \text{ V}$
tensão de alimentação	-	$V = 380 \text{ V}$

Com os dados de placa do motor é possível calcular outros parâmetros necessários ao projeto .

4 - 3.1 DESLIZAMENTO NOMINAL

O deslizamento nominal é definido como ;

$$s_n = \frac{n_o - n_n}{n_o} = \frac{900 - 864}{900} = 0,04$$

4 - 3.2 DESLIZAMENTO CRÍTICO

Desprezando-se a resistência do estator na região de funcionamento nominal da característica mecânica do motor o deslizamento crítico é dado pela equação (B-8) , ou

$$S_c = S_n \left[p + \sqrt{p^2 - 1} \right] = 0,04 \left[2,5 + \sqrt{(2,5)^2 - 1} \right] = 0,192$$

4 - 3.3 CORRENTE NOMINAL DO ROTOR

A potência de um motor assíncrono trifásico pode ser expressa como

$$P_n = \frac{3 E_2}{\sqrt{3}} I_n (1 - S_n)$$

e portanto

$$I_n = \frac{P_n}{\frac{3 E_2}{\sqrt{3}} (1 - S_n)} = \frac{20 \times 10^3}{3 \times \frac{280}{\sqrt{3}} (1 - 0,04)} \text{ A} = 43 \text{ A}$$

4 - 3.4 RESISTÊNCIA DO ROTOR

Considerando-se que $r_2/s_n \gg x_2$ pode-se escrever

$$r_2 = \frac{E_2 S_n}{\sqrt{3} I_n} = \frac{280 \times 0,04}{\sqrt{3} \times 43} \Omega = 0,15 \Omega$$

4 - 3.5 REATÂNCIA DO ROTOR

Sabendo-se que no instante de máximo torque a resistência e a reatância do rotor são aproximadamente iguais pode-se escrever :

$$x_2 \cong \frac{r_2}{s_c} = \frac{0,15}{0,192} \Omega = 0,78 \Omega$$

4 - 4. REDUÇÃO DE VELOCIDADE

Conhecidos os valores nominais das velocidades de rotação do motor e do tambor, tem-se :

$$i = \frac{n_m}{n_c} = \frac{864}{2,51} = 344$$

O redutor de velocidade tem então os seguintes dados :

razão de redução	$i = 344$
potência nominal	$P_n = 20 \text{ kW}$
velocidade de entrada	$n_1 = 1,3 n_n =$ $= 1,3 \times 864 \text{ rpm} = 1123,2 \text{ rpm}$
eficiência mínima	$\eta = (\eta_r)^3 = (0,97)^3 = 0,91$

a eficiência mínima é calculada com a consideração de que o redutor tem tres estágios . O redutor escolhido deve ter então no máximo tres estágios . Também é aceitável um redutor com menos de tres estágios , resultando uma eficiência mais alta do que a calculada acima . Só não é possível usar um redutor de eficiência menor do que a calculada .

4 - 5. TORQUE DE CARGA NOMINAL DO SISTEMA

O torque de carga nominal do sistema é dado por :

$$T_c = \frac{P_c}{\omega_n} = \frac{30 \times P_c}{\pi \times n_m} = \frac{30 \times 17,75 \times 10^3}{\pi \times 864} \text{ Nm} = 205 \text{ Nm}$$

4 - 6. TORQUE NOMINAL ELÉTRICO

O torque nominal fornecido pelo motor é :

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30 \times P_n}{\pi \times n_m} = \frac{30 \times 20 \times 10^3}{\pi \times 864} \text{ Nm} = 221 \text{ Nm}$$

4 - 7. INÉRCIA DO SISTEMA

A inércia do sistema é dada pela soma das inércias do motor, tambor e carga, as duas últimas parcelas referidas ao eixo do rotor. As inércias do rotor e do tambor são conhecidas, sendo necessário apenas referir a inércia do tambor ao eixo do rotor, ou

$$J'_t = J_t \times \frac{1}{i^2} = 45 \times \frac{1}{(344)^2} \text{ Nm s}^2 = 0,0003 \text{ Nm s}^2$$

A inércia da carga é, (cap.2, art.(2-7)) ;

$$J'_c = \frac{G_p}{g} \left(\frac{v_n}{n_m} \right)^2 \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 = \frac{200 \times 10^3}{9,81} \left(\frac{0,08}{864} \right)^2 \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \text{ Nm s}^2 =$$

$$= 0,0158 \text{ Nm s}^2$$

A inércia do sistema é então ,

$$J_3 = J_{M3} + J_t' + J_c' = (1,71 + 0,0003 + 0,0158) \text{ N m s}^2 =$$

$$= 1,73 \text{ N m s}^2$$

4 - 8. MOVIMENTO DE ELEVAÇÃO

4 - 8.1 PARTIDA E ACELERAÇÃO

4 - 8.1.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE ACELERAÇÃO

O número e valores dos degraus de resistências de aceleração depende da escolha de dois dos seguintes parâmetros , (apend.B,art.(B-4.1)) :

corrente máxima de aceleração	I_1
corrente mínima de aceleração	I_2
número de degraus	m

Escolhendo-se valores para I_1 e m , é necessário que o valor resultante de I_2 seja suficiente para produzir a aceleração , e satisfaça os requisitos de bom tempo de aceleração e número de degraus não excessivamente alto . Se o motor parte com carga nominal , como é o caso aqui, deve-se ter $I_2 \gg I_n$.

Escolhendo-se inicialmente

$$I_1 = 2 I_n$$

e

$$m = 5$$

pode-se calcular pela equação (B-23)

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{I_2}{I_1} = \left(S_n \frac{I_1}{I_n} \right)^{1/m} = \left(0,04 \times 2 \frac{I_n}{I_n} \right)^{1/5} = 0,6$$

e portanto

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda} = 2 \times I_n \times 0,6 = 1,2 I_n$$

sendo $I_2 > I_n$ a eficiência da aceleração é garantida. No entanto pode-se tentar diminuir o número de degraus, fazendo-se ;

$$I_1 = 2 I_n$$

e

$$m = 4$$

obtendo-se então

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{I_2}{I_1} = \left(S_n \frac{I_1}{I_n} \right)^{1/m} = \left(0,04 \times 2 \frac{I_n}{I_n} \right)^{1/4} = 0,572$$

e portanto

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda} = 2 \times I_n \times 0,572 = 1,154 I_n$$

Fazendo-se mais uma tentativa para

$$I_1 = 2 I_n$$

e

$$m = 3$$

obtem-se

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{I_2}{I_1} = \left(S_n \frac{I_1}{I_n} \right)^{1/m} = \left(0,04 \times 2 \frac{I_n}{I_n} \right)^{1/3} = 0,476$$

e conseqüentemente

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda} = 2 \times I_n \times 0,476 = 0,952 I_n$$

Sendo $I_2 < I_n$ é impossível se obter aceleração até a velocidade nominal .

Normalmente se respeita , como limite máximo de corrente suportada pelo motor sem provocar danos , a razão p fornecida pelo fabricante , ou

$$p = T_{\max} / T_n = 2,5$$

Portanto , a máxima corrente que pode ser utilizada é

$$I_{\max} = p I_n = 2,5 I_n$$

Então , para se conseguir um número relativamente pequeno de degraus de aceleração , o que torna o projeto mais vantajoso economicamente , pode-se tentar elevar o valor de I_1 , fazendo-se

$$I_1 = 2,5 I_n$$

e

$$m = 3$$

Portanto

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{I_2}{I_1} = \left(S_n \frac{I_1}{I_n} \right)^{2/3} = \left(0,04 \times 2,5 \frac{I_n}{I_n} \right)^{2/3} = 0,465$$

e

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda} = 2,5 I_n \times 0,465 = 1,16 I_n$$

O resultado obtido é satisfatório, desde que o resultante tempo de aceleração seja relativamente curto.

Aplicando-se as equações (B-24) obtém-se:

$$S_{a_1} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{\lambda} = 0,465$$

$$S_{a_2} = S_{a_1}^2 = (0,465)^2 = 0,217$$

$$S_{a_3} = S_{a_1}^3 = (0,465)^3 = 0,101$$

A resistência total no primeiro degrau é calculada sabendo-se que

$$z_2 = \frac{E_2}{\sqrt{3} I_1} = \frac{280}{\sqrt{3} \times 2,5 \times 43} \Omega = 1,51 \Omega$$

e

$$r_{d_1} = \sqrt{z_2^2 - X_2^2} = \sqrt{(1,51)^2 - (0,78)^2} \Omega = 1,29 \Omega$$

As resistências dos degraus consecutivos são dadas pelas equações (B-21), ou :

$$r_{d2} = r_{d1} S_{a1} = 1,29 \times 0,465 \Omega = 0,6 \Omega$$

$$r_{d3} = r_{d1} S_{a1}^2 = 1,29 \times (0,465)^2 \Omega = 0,28 \Omega$$

Os valores das resistências que devem ser adicionadas são então :

$$R_3 = r_{d1} - r_{d2} = (1,29 - 0,6) \Omega = 0,69 \Omega$$

$$R_4 = r_{d2} - r_{d3} = (0,6 - 0,28) \Omega = 0,32 \Omega$$

$$R_5 = r_{d3} - r_2 = (0,28 - 0,15) \Omega = 0,15 \Omega$$

As relações entre os valores r_{di} e R_i são ilustradas na fig.(4-2) .

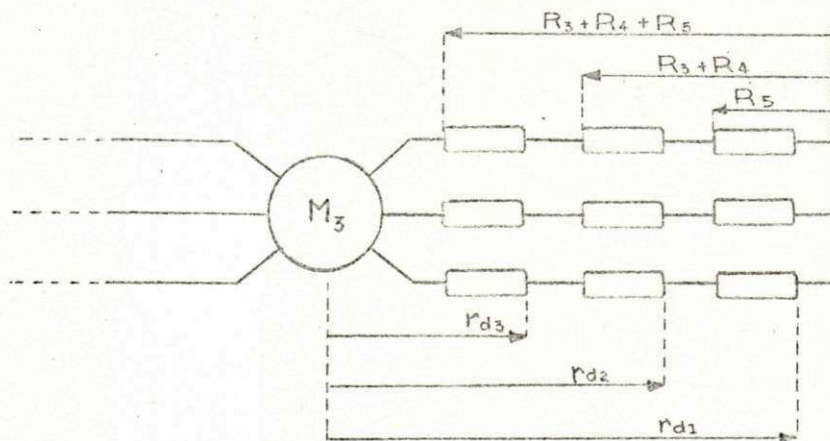


diagrama do motor de indução trifásico de anéis com resistência adicionais no circuito do rotor

fig.(4-2)

Os valores de I_1 e I_2 são :

$$I_1 = 2,3 I_n = 2,5 \times 43 \text{ A} = 107,5 \text{ A}$$

$$I_2 = 1,16 I_n = 1,16 \times 43 \text{ A} = 50 \text{ A}$$

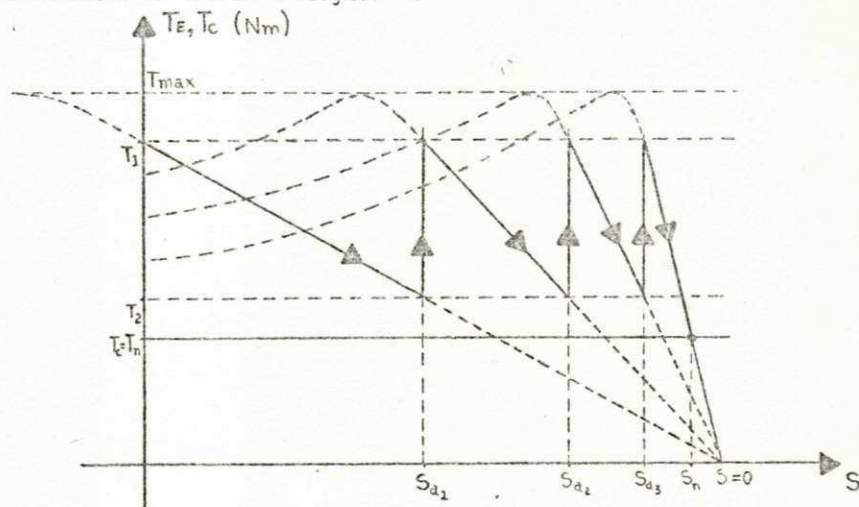
Os torques correspondentes às correntes I_1 e I_2 são :

$$T_1 = \frac{3}{\omega_0} I_1^2 \times r_{d2} = \frac{3 \times 30 \times (107,5)^2 \times 1,29}{\pi \times 900} \text{ Nm} = 475 \text{ Nm}$$

$$T_2 = \frac{3}{\omega_0} I_2^2 \times \frac{r_{d1}}{S_{a1}} = \frac{3 \times 30 \times (50)^2 \times 1,29}{\pi \times 900 \times 0,465} \text{ Nm} = 225 \text{ Nm}$$

4 - 8.1.2 CÁLCULO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

A fig.(4-3) mostra a característica mecânica do motor durante a aceleração .



característica mecânica do motor durante a aceleração
fig.(4-3)

O tempo total de aceleração é calculado em várias etapas, cada etapa correspondente a um degrau, (apend.B, art.(B-4.2)). Linearizando-se a função $T_e = f(s)$ pela equação (B-26) para o primeiro degrau se obtém:

$$T_E = T_1 s = 475 \times s$$

Esta linearização é satisfatória se, no ponto $s = s_{a1}$, se obtém $T_e = T_2$, ou

$$T_E = T_1 s_{a1} = T_1 \frac{T_2}{T_1} = T_1 \times \frac{T_2}{T_1} = T_2$$

No segundo degrau

$$T_E = \frac{T_1}{s_{a1}} s$$

que resulta no ponto s_{a2} ,

$$T_E = \frac{T_1}{s_{a1}} s_{a2} = \frac{T_1}{s_{a1}} s_{a1}^2 = T_1 s_{a1} = T_2$$

e assim sucessivamente para os degraus consecutivos. Isto mostra que a linearização obtida pela equação (B-26) satisfaz a característica mecânica nos pontos de interesse.

Aplicando-se as equações (B-28) obtém-se:

primeiro degrau

$$t_1 = \frac{\omega_0 J_3}{T_1} \ln \frac{1 - T_n/T_1}{s_{a1} - T_n/T_1} = \frac{\pi \times 900 \times 1,73}{30 \times 475} \ln \frac{1 - \frac{221}{475}}{0,465 - \frac{221}{475}} s =$$

$$= 0,92 s$$

segundo degrau

$$t_2 = t_1 S_{a_1} = 0,92 \times 0,465 \text{ s} = 0,43 \text{ s}$$

terceiro degrau

$$t_3 = t_1 S_{a_1}^2 = 0,92 \times (0,465)^2 = 0,2 \text{ s}$$

quarto degrau

Pode-se fazer

$$S_n' = S_{a_4} = S_{a_1}^4 = (0,465)^4 = 0,047$$

e

$$t_4 = \frac{W_0 J}{T_1} S_{a_3} \ln \frac{S_{a_3} - T_n/T_1 S_{a_3}}{S_{a_4} - T_n/T_1 S_{a_3}} = t_1 S_{a_3} = t_1 S_{a_1}^3 =$$

$$= 0,92 (0,465)^3 = 0,10 \text{ s}$$

Finalmente, o tempo total de aceleração é :

$$t_a = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = (0,92 + 0,43 + 0,20 + 0,10) \text{ s} = \\ = 1,65 \text{ s}$$

Para a aceitação final do projeto de aceleração é necessário ainda calcular a aceleração média do sistema. Para os movimentos verticais, esta aceleração média não deve ultrapassar o valor, (8, pag.1017)

$$\left(\frac{dv}{dt} \right)_{\max} = 2,0 \text{ m/s}^2$$

para evitar deslizamento do cabo sobre o tambor . Durante os quatro estágios de aceleração , a aceleração média da carga é :

$$\begin{aligned} \left(\overline{\frac{dv}{dt}} \right) &= \frac{1}{t_{a1}} \left[\int_{t=0}^{t=t_1} \frac{dv(t)}{dt} dt + \int_{t=t_1}^{t=t_2} \frac{dv(t)}{dt} dt + \int_{t=t_2}^{t=t_3} \frac{dv(t)}{dt} dt + \int_{t=t_3}^{t=t_4} \frac{dv(t)}{dt} dt \right] = \\ &= \frac{1}{t_{a1}} \left[V_{a1} + (V_{a2} - V_{a1}) + (V_{a3} - V_{a2}) + (V_n - V_{a3}) \right] = \\ &= \frac{V_n}{t_{a1}} \cong \frac{0,06}{1,65} \text{ m/s}^2 = 0,036 \text{ m/s}^2 < \left(\overline{\frac{dv}{dt}} \right)_{\text{max}} \end{aligned}$$

Portanto o projeto da aceleração do movimento de elevação da carga , no acionamento do guindaste , é satisfatório nas condições de ;

- corrente máxima não superior ao limite máximo indicado pelo fabricante ;
- tempo de aceleração conveniente ;
- número de degraus de aceleração relativamente pequeno ;
- aceleração média da carga inferior ao limite de segurança aconselhado .

4 - 8.1.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA DAS RESISTÊNCIAS DE ACELERAÇÃO

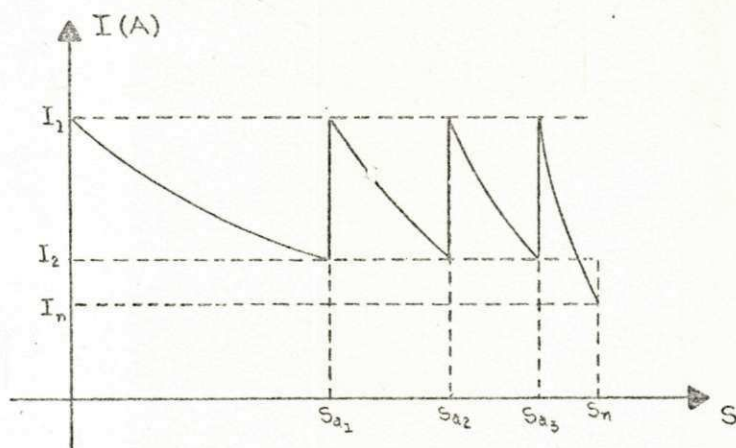
Durante a aceleração a variação da corrente com o

tempo , mostrada na fig.(4-4) , pode ser linearizada para cada degrau de aceleração com resistência adicional no circuito do rotor , pela equação

$$I(t) = - \frac{I_1 - I_2}{t_i} t + I_1$$

se no instante inicial de cada degrau se faz $t = 0$. Para qualquer degrau a corrente média é , (apend.D, eq.(D-1)) ,

$$\begin{aligned} [I'_{eq}]^2 &= \frac{1}{t_i} \int_{t=0}^{t=t_1} [I(t)]^2 dt = \frac{1}{t_i} \int_{t=0}^{t=t_1} \left[-\frac{I_1 - I_2}{t_i} t + I_1 \right]^2 dt = \\ &= \frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3} = \frac{107,5^2 + 50 \times 107,5 + 50^2}{3} A^2 = 6.473,75 A^2 \end{aligned}$$



variação da corrente com o tempo durante a aceleração

fig.(4-4)

Como , na realidade , a corrente I'_{eq} só percorre as resistências de aceleração durante uma fração do tempo

total de funcionamento do sistema, (cap.2, art.(2-8.4)) , é necessário calcular uma corrente equivalente , I'_{eq_i} , que percorrendo continuamente as resistências de aceleração provoque o mesmo esquentamento que a corrente I'_{eq} provoca durante o tempo de aceleração .

Sabendo-se que o tempo médio de funcionamento do sistema é 8 min = 480 s , (cap.1) , e considerando-se que o tempo total de aceleração no movimento de elevação do guindaste não é maior do que 1% do ciclo total de trabalho do sistema , tem-se , para o primeiro degrau de resistência :

$$t_{t_3} = 0,6 \times 4,8 \text{ s} = 3 \text{ s}$$

$$t_{t_3} + t_{p_3} = 480 \text{ s}$$

Assumindo que a constante de tempo térmica da resistência é $\zeta_r = 600 \text{ s}$, (14, tab(6-7)) , obtem-se , pela equação (D-8) ,

$$\begin{aligned} I_{eq_3} &= I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{t_3}}{\zeta_r}}}{1 - e^{-\frac{t_{t_3} + t_{p_3}}{\zeta_r}}}} = I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{3}{600}}}{1 - e^{-\frac{480}{600}}}} = \\ &= I'_{eq} \sqrt{0,01} \end{aligned}$$

A potência consumida pela resistência R_3 é portanto :

$$P_3 = R_3 I_{eq_3}^2 = R_3 \times 0,01 I_{eq}^2 = 0,69 \times 0,01 \times 6.473,75 \text{ W} \cong$$

$$\cong 45 \text{ W}$$

Escolhendo um valor comercial para a potência da resistência R_3 tem-se :

$$P_3 = 100 \text{ W}$$

Para o segundo degrau de resistência tem-se :

$$t_{t4} = 0,8 \times 4,8 \text{ s} = 3,84 \text{ s}$$

$$t_{t4} + t_{p4} = 480 \text{ s}$$

E portanto :

$$I_{eq_4} = I_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{t4}}{\tau_R}}}{1 - e^{-\frac{t_{t4} + t_{p4}}{\tau_R}}}} = I_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{3,84}{600}}}{1 - e^{-\frac{480}{600}}}} =$$

$$= I_{eq} \sqrt{0,011}$$

Conseqüentemente a potência consumida pela resistência R_4 é :

$$P_4 = R_4 \times (I_{eq_4})^2 = R_4 \times 0,11 \times I_{eq}^2 =$$

$$= 0,32 \times 0,011 \times 6.473,75 \text{ W} \cong 22,8 \text{ W}$$

Para o terceiro degrau se obtém :

$$t_{t5} = 0,95 \times 4,8 \text{ s} \cong 4,6 \text{ s}$$

$$t_{t5} + t_{p5} = 480 \text{ s}$$

A corrente equivalente para o esquentamento é :

$$I_{eq4} = I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{t5}}{G_R}}}{1 - e^{-\frac{t_{t5} + t_{p5}}{G_R}}}} = I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{4,6}{600}}}{1 - e^{-\frac{480}{600}}}} =$$

$$= I'_{eq} \sqrt{0,0145}$$

E portanto

$$P_5 = R_5 \times I_{eq5}^2 = R_5 \times 0,0145 \times I'_{eq} =$$

$$= 0,13 \times 0,0145 \times 6.473,75 \text{ W} \cong 12,2 \text{ W}$$

Como os valores de P_4 e P_5 são muito baixos, para o uso normal industrial, pode-se escolher finalmente valores maximizados. Esta maximização tem uma influência insignificante no custo do projeto. Portanto escolhe-se

$$P_4 = P_5 = 100 \text{ W}$$

4 - 8.2 FREIO

Durante o movimento de elevação o freio pode ser obtido apenas desconectando a fonte de alimentação do motor. Sendo a carga uma carga ativa, a ação da gravidade desacelera o motor, tendendo a inverter o seu sentido de rotação.

Sem o uso de um freio eletromagnético, o tempo

gasto para o motor atingir a velocidade nula é dado por ,
(cap.3,art.(3-8)) :

$$t_{f1} = \frac{\omega_0 J}{T_m} (1 - S_n) = \frac{\pi \times 900 \times 1,73 (1 - 0,04) s}{221} = 0,71 s$$

No entanto , como o motor aciona carga ativa , por medida de segurança , é interessante usar o freio eletromagnético simultaneamente com a desconecção do motor da fonte de alimentação . O tempo de freio é então determinado pelo torque fornecido pelo freio eletromagnético .

4 - 8.2.1 FREIO ELETROMAGNÉTICO

Para os movimentos verticais o torque fornecido pelo freio eletromagnético deve ser , (8 , pag.1024) ;

$$T_{fe3} = 2 T_m = 2 \times 221 \text{ Nm} = 442 \text{ Nm}$$

para dar maior segurança ao acionamento de cargas ativas .

Como o freio eletromagnético é usado no instante inicial do desligamento do motor de sua fonte de alimentação, o tempo de freiagem é dado por :

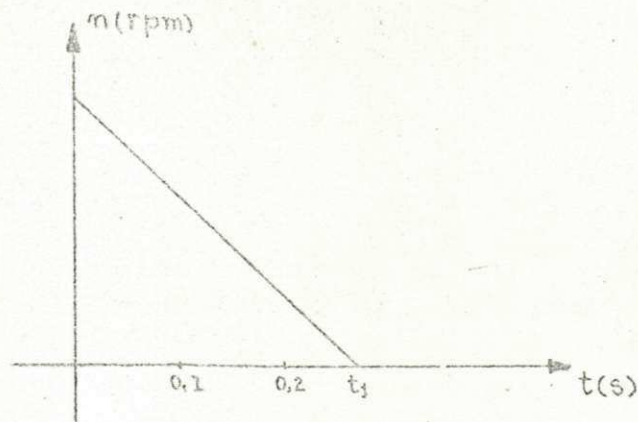
$$t_{f1} = - \frac{\pi}{30} J_s \frac{1}{T_m + T_{fe3}} \int_{n=n_m}^{n=0} dn = \frac{\pi}{30} J_s \frac{n_m}{T_m + T_{fe3}}$$

$$= \frac{\pi}{30} \times 1,73 \times \frac{864}{221 + 442} s = 0,24 s$$

A variação da velocidade no tempo durante o freio é dada por :

$$n = n_0 - \frac{30}{\pi} \frac{T_n + T_{fe3}}{J_3} t \quad (4-2)$$

Esta função é mostrada na fig.(4-5) .



variação da velocidade do motor
durante o freio
fig.(4-5)

Se o guindaste funciona em vazio , considerando o caso extremo em que o torque de vazio é nulo , o tempo de freio é :

$$t_{fz} = \frac{\pi}{30} J_3 \frac{n_0}{T_{fe3}} = \frac{\pi}{30} \times 1,73 \times \frac{900}{442} \text{ s} = 0,37 \text{ s}$$

4 - 8.3 PROTEÇÃO DE FIM DE CURSO

No movimento de elevação é necessário o uso de proteção mecânica que evite o enrolamento excessivo do cabo sobre o tambor . Esta proteção mecânica é conseguida a-

través de um relé de fim de curso o qual , quando acionado, comanda o circuito de freio , desligando o motor da rede e acionando o freio eletromagnético . Para localizar o relé de fim de curso é necessário conhecer a distância percorrida pela carga , após o acionamento do circuito de freio . A distância é dada por :

$$dx = \pi D_t \frac{n}{60} dt = \frac{\pi D_t}{60 i} n dt$$

Substituindo a função de n , dada na equação(4-2) na expressão da distância se obtém :

$$dx = \frac{\pi D_t}{60 i} \left(n_m - \frac{30}{\pi} \frac{T_n + T_{fe3}}{J_3} t \right) dt$$

e

$$x_1 = \frac{\pi D_t}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_{f1}} \left(n_m - \frac{30}{\pi} \frac{T_n + T_{fe3}}{J_3} t \right) dt =$$

$$= \frac{\pi D_t}{60 i} \left[n_m t_{f1} - \frac{30}{\pi} \frac{T_n + T_{fe3}}{J_3} \frac{t_{f1}^2}{2} \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,6}{60 \times 344} \left[864 \times 0,24 - \frac{30}{\pi} \times \frac{221 + 442}{1,73} \times \frac{0,24^2}{2} \right] m = 0,0093 m$$

No entanto , a escolha definitiva do ponto de localização do relé de fim de curso , depende da distância do percurso do gancho, depois de freiado , quando o guindaste atua em vazio . Novamente considerando que o torque de vazio é nulo , esta distância é :

$$x_i^2 = \frac{\pi D t}{60 i} \left[n_0 t_{f2} - \frac{30}{\pi} \frac{T_{ie2}}{J_3} \frac{t_{f2}^2}{2} \right] =$$

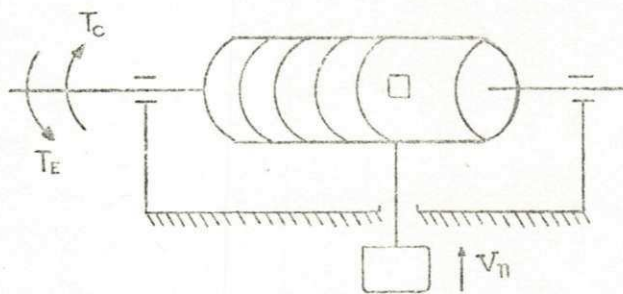
$$= \frac{\pi \times 0,6}{60 \times 344} \left[900 \times 0,37 - \frac{30}{\pi} \times \frac{442}{1,73} \frac{0,37^2}{2} \right] m = 0,015 m$$

Finalmente , a distância de colocação do relé de fim de curso escolhida pelo autor é :

$$x_{1-M_3} = 0,10 m$$

sendo x_{1-M_3} a distância medida a partir do terminal do ca bo .

A fig.(4-6) mostra um exemplo da colocação do relé de fim de curso , onde este é colocado num orifício do tambor e acionado quando pressionado pelo cabo de sustentação da carga .



colocação do relé de fim de curso

fig.(4-6)

4 - 9. MOVIMENTO DE DESCIDA COM VELOCIDADE v_1 4 - 9.1 REGIME PERMANENTE4 - 9.1.1 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE REGIME PERMANENTE

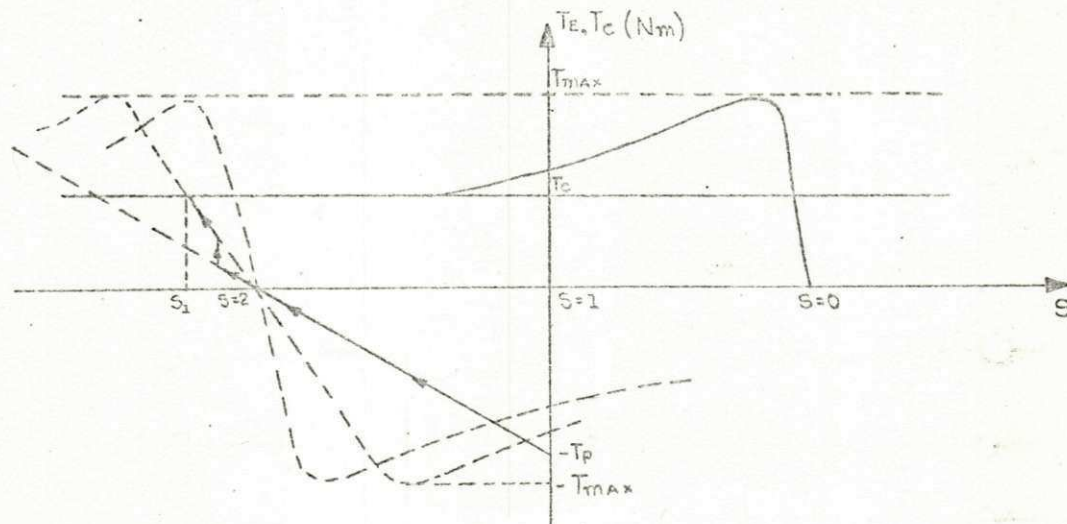
No movimento de descida da carga , a velocidade

$$v_1 = 1,3 v_n = 1,3 \times 0,08 \text{ m/s} = 0,104 \text{ m/s}$$

correspondente a

$$n_1 = 1,3 n_n = 1,3 \times 864 \text{ rpm} = 1123 \text{ rpm}$$

só pode ser obtida em regime permanente com o uso do freio regenerativo (apend.B, art.(B-5.1)) . A fig.(4-7) mostra a característica mecânica deste freio em regime permanente e durante a aceleração .



característica mecânica do motor em
freio regenerativo - aceleração e
regime permanente
fig.(4-7)

Conhecida a velocidade n_1 , o deslizamento correspondente é :

$$s_1 = 2 - \frac{n_0 - n_1}{n_0} = 2 - \frac{900 - 1123}{900} = 2,248$$

Na nova característica mecânica o torque de carga T_n do motor deve ser atingido no ponto de deslizamento s_1 . Pelas equações (B-33) e (B-34) se obtém

$$p' = \frac{T_{\max}}{T_c} = \frac{2,5 \times T_n}{T_c} = \frac{2,5 \times 221}{205} = 2,7$$

$$s_{c_6} = (2 - s_1) \left[p' + \sqrt{p'^2 - 1} \right] = (2 - 2,248) \left[2,7 + \sqrt{(2,7)^2 - 1} \right] = -1,29$$

e

$$R_6 = \left(-\frac{s_{c_6}}{s_c} - 1 \right) r_2 = \left(\frac{1,29}{0,192} - 1 \right) 0,15 \Omega = 0,86 \Omega$$

A corrente do rotor em regime permanente de freio regenerativo é :

$$I_{n_1} = \frac{E_2 (2 - s_1)}{\sqrt{3} (r_2 + R_6)} = \frac{280 (2 - 2,246)}{\sqrt{3} (0,15 + 0,86)} \text{ A} = -39,2 \text{ A}$$

Se o guindaste é acionado em vazio, a velocidade de funcionamento em regime permanente é próxima da velocidade síncrona do motor, e a corrente do rotor é bem próxima de zero.

4 - 9.1.2 CÁLCULO DA POTÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE REGIME PERMANENTE

Em regime permanente a potência consumida pela re

sistência R_6 é :

$$P_6' = R_6 I_{n1}^2 = 0,86 \times 39,2^2 \text{ W} = 1321,5 \text{ W}$$

Considerando que o tempo relativo de trabalho do motor é 40% , maximizando a potência da resistência R_6 pode-se fazer , (apend.E) :

$$t_{t6} = 0,4 \times 480 \text{ s} = 192 \text{ s}$$

$$t_{t6} + t_{p6} = 480 \text{ s}$$

Assumindo que a constante de tempo térmica da resistência é $\tau_R = 600 \text{ s}$, (14, tab.(6-7)) , obtém-se pela equação (B-3):

$$\begin{aligned} I_{eq6} &= I_{n1} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{t6}}{\tau_R}}}{1 - e^{-\frac{t_{t6} + t_{p6}}{\tau_R}}}} = \\ &= I_{n1} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{192}{600}}}{1 - e^{-\frac{480}{600}}}} = I_{n1} \sqrt{0,5} \end{aligned}$$

Portanto a potência consumida pela resistência R_6 é :

$$\begin{aligned} P_6 &= R_6 \times (I_{eq})^2 = R_6 \times 0,5 \times I_{n1}^2 = 0,86 \times 0,5 \times (39,2)^2 \text{ W} = \\ &= 660 \text{ W} \end{aligned}$$

Finalmente , a potência padronizada escolhida pelo autor para a resistência R_6 é :

$$P_6 = 700 \text{ W}$$

4 - 9.2 PARTIDA E ACELERAÇÃO4 - 9.2.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE ACELERAÇÃO

Para se estabelecer o número de degraus de resistências necessárias na aceleração, é preciso inicialmente calcular se a própria resistência R_6 , de estado permanente, preenche as condições necessárias a uma partida eficiente, (apend. B, art. (B-5.2.1)).

Para a resistência R_6 a corrente inicial de partida, dada pela equação (B-35), é:

$$I_p = \frac{E_2}{\sqrt{3} \sqrt{(R_6 + r_2)^2 + X^2}} = \frac{280}{\sqrt{3} \sqrt{(0,86 + 0,15)^2 + 0,78^2}} \text{ A} = 127 \text{ A}$$

Como esta corrente ultrapassa o valor máximo indicado pelo fabricante, $I_{\text{max}} = 2,5 I_n$, é necessário usar um degrau de resistência que limite esta corrente. Para se aproveitar parcialmente as resistências usadas na aceleração do movimento de elevação, o que reduz o preço do projeto, pode-se tentar utilizar o primeiro degrau de partida com valor de resistência dado por:

$$r_{d4} - r_2 = R_4 + R_5 + R_6 = (0,32 + 0,13 + 0,86) \Omega = 1,31 \Omega$$

Para r_{d4} a corrente de partida é

$$I_{p1} = \frac{E_2}{\sqrt{3} \sqrt{(r_{d4}^2 + X^2)}} = \frac{280}{\sqrt{3} \sqrt{(11,46)^2 + 0,78^2}} \text{ A} = 95,5 \text{ A}$$

e o torque de partida correspondente é :

$$T_{P1} = \frac{3}{\omega_0} I_{p1}^2 r_{d4} = \frac{3 \times 30 \times (95,5)^2 \times 1,46}{900 \pi} \text{ Nm} = 438 \text{ Nm}$$

A resistência $r_{d5} - r_2 = R_4 + R_5$ pode ser cortada no ponto $s = 0$, permanecendo no circuito a resistência R_6 de estado permanente.

4 - 9.2.2 CÁLCULO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

O tempo de aceleração é calculado em dois estágios. O primeiro estágio, com resistência r_{d4} no circuito do rotor, é definido no intervalo $2 \gg s \gg 1$. O segundo estágio, com a resistência R_6 adicionada ao circuito do rotor, é definido no intervalo $s \gg 2$.

primeiro degrau

Aplicando-se a equação (B-40) obtém-se :

$$\begin{aligned} t_b &= -\frac{\omega_0 J_s}{T_p} \ln \frac{(2 - S_{a0}) + T_c/T_p}{1 + T_c/T_p} = \\ &= -\frac{\pi \times 900 \times 1,73}{30 \times 438} \ln \frac{(2-2) + \frac{205}{438}}{1 + \frac{205}{438}} \text{ s} = 0,43 \text{ s} \end{aligned}$$

segundo degrau

Definindo-se

$$S_1' = 2 - \frac{n_0 - 0,95 n_1}{n_0} = 2 - \frac{900 - 0,95 \times 1123}{900} = 2,185$$

pode-se aplicar a equação (B-45) obtendo-se :

$$\begin{aligned}
 t_6 &= \frac{W_0 J_3}{T_c} (2-S_1) \ln \frac{(2-S_1) - (2-S_1)}{(2-2) - (2-S_1)} = \\
 &= \frac{\pi \times 900 \times 1,73}{30 \times 205} (2-2,248) \ln \frac{(2-2,185) - (2-2,248)}{-(2-2,248)} \text{ s} = \\
 &= 0,275
 \end{aligned}$$

O tempo total de aceleração é a soma dos tempos gastos em cada estágio , ou :

$$t_{a2} = t_5 + t_6 = (0,43 + 0,27) \text{ s} = 0,70 \text{ s}$$

Para a aceitação final do projeto é ainda necessário calcular se a aceleração média não ultrapassa o limite máximo aconselhado , (8, pag.1017) , ou :

$$\left(\frac{dv}{dt} \right)_{\text{máx}} = 2 \text{ m/s}^2$$

Durante os dois estágios de aceleração tem-se :

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{dv}{dt} \right) &= \frac{1}{t_{a2}} \left[\int_{t=0}^{t=t_5} \frac{dv(t)}{dt} dt + \int_{t=t_5}^{t=t_6} \frac{dv(t)}{dt} dt \right] = \\
 &= \frac{1}{t_{a2}} \left[v_{a5} + (v_1' - v_{a5}) \right] = \frac{v_1'}{t_{a2}} \cong \\
 &\cong \frac{0,104}{0,7} \text{ m/s}^2 = 0,149 \text{ m/s}^2 < \left(\frac{dv}{dt} \right)_{\text{máx}}
 \end{aligned}$$

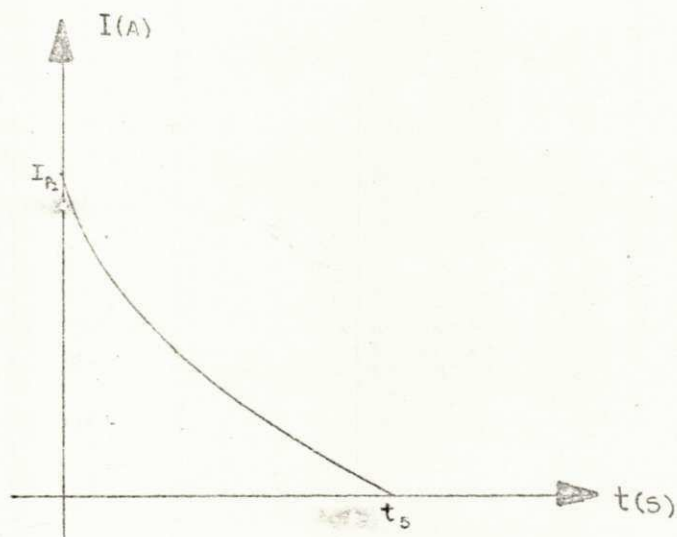
Portanto o projeto de aceleração é plenamente satisfatório .

4 - 9.2.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA DAS RESISTÊNCIAS DE ACELERAÇÃO

Durante o primeiro estágio de aceleração a corrente $I = f(t)$ pode ser dada pela função linearizada da seguinte equação :

$$I(t) = - \frac{I_{p1}}{t_s} t + I_{p1}$$

A fig.(4-8) apresenta a função não linearizada da variação da corrente com o tempo neste estágio .



variação da corrente durante o primeiro estágio de aceleração
fig.(4-8)

A corrente média neste estágio é , (apend.D, eq. (D-1)) :

$$I'_{eq}{}^2 = \frac{1}{t_5} \int_{t_0}^{t_1} \left(-\frac{I_{p1}}{t_5} t + I_{p1} \right)^2 dt = \frac{I_{p1}^2}{3} = \frac{95,5^2}{3} A^2 = 3.040 A^2$$

Considerando-se que o tempo relativo de aceleração não é maior do que 1% do ciclo total de trabalho do sistema, e sabendo-se que o tempo relativo de funcionamento em regime permanente regenerativo é suposto como 40% do ciclo total de trabalho do sistema, a potência calculada para o consumo da resistência R_6 no regime permanente regenerativo, (art.(4-9.1.2)), é suficiente para suportar também a aceleração.

Para as resistências R_4 e R_5 tem-se, (apend.D) :

$$t_{t7} = 0,62 \times 4,8 \text{ s} \cong 3 \text{ s}$$

$$G_7 = t_{t7} + t_{p7} = 180 \text{ s}$$

Tomando um valor médio para a constante de tempo térmica da resistência, ou seja, $G_R = 600 \text{ s}$, (14, tab.(6-7)) a corrente equivalente que percorre as resistências de aceleração causando o mesmo aquecimento que a corrente I'_{eq} provoca durante a aceleração é dada pela equação (D-8), ou :

$$\begin{aligned} I_{eq7} &= I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{t7}}{G_R}}}{1 - e^{-\frac{t_{t7} + t_{p7}}{G_R}}}} = I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{3}{600}}}{1 - e^{-\frac{180}{600}}}} = \\ &= I'_{eq} \sqrt{0,0091} \end{aligned}$$

E portanto

$$P_4 = R_4 I_{eqr}^2 = R_4 \times 0,0091 \times I_{eq}^2 =$$

$$= 0,32 \times 0,0091 \times 3040 \text{ W} \approx 10 \text{ W}$$

e

$$P_5 = R_5 I_{eqr}^2 = R_5 \times 0,0091 \times I_{eq}^2 =$$

$$= 0,13 \times 0,0091 \times 3040 \text{ W} \approx 4 \text{ W}$$

Portanto os valores escolhidos para P_4 e P_5 no art.(4-8.1.3) são satisfatórios ainda aqui .

4 - 9.3 FREIO

4 - 9.3.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE FREIO

Para se estacionar um motor o qual atua em regime permanente regenerativo , é suficiente inverter a sequência de fase de alimentação (apend.B, art.(B-5.3)) . A fig.(4-9) mostra a característica mecânica do motor durante o freio, quando se faz $T_e = T_c$ no ponto $s = 1$.

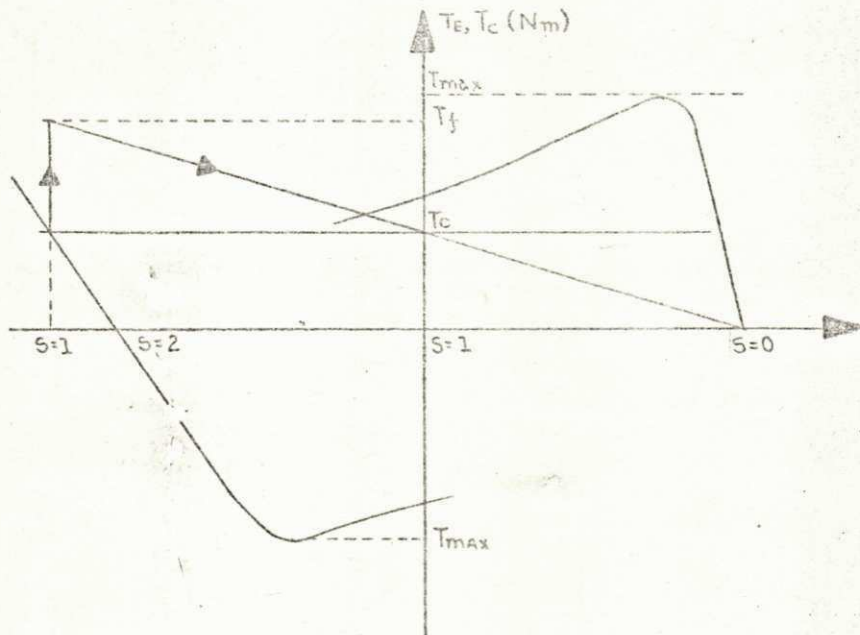
Para que no ponto de velocidade nula tenha-se torque elétrico igual ao torque de carga , deve-se adicionar a resistência r_{d6} dada pela equação (B-48) . Para isto aplica-se a equação (B-49) , ou

$$p' = \frac{T_{max}}{T_c} = \frac{2,5 \times T_m}{T_c} = \frac{2,5 \times 221}{205} = 2,7$$

$$s_{c1} = p' + \sqrt{p'^2 - 1} = 2,7 + \sqrt{(2,7)^2 - 1} = 5,2$$

e a resistência é :

$$r_{d6} - r_2 = \left(\frac{s_{c1}}{s_c} - 1 \right) r_2 = \left(\frac{5,2}{0,192} - 1 \right) 0,15 \Omega = 3,91 \Omega$$



característica mecânica do motor
durante o freio do movimento
regenerativo
fig.(4-9)

Com a resistência r_{d6} no circuito do rotor a corrente no instante inicial de freio é

$$I_{f1} = \frac{E_2 s_1}{\sqrt{3} \times r_{d6}} = \frac{280 \times 2,248}{\sqrt{3} (3,91 + 0,15)} \text{ A} = 90 \text{ A}$$

e o torque correspondente é :

$$T_{f1} = \frac{3}{\omega_0} I_{f1}^2 \times \frac{r_{d6}}{s_1} = \frac{3 \times 30 \times (90)^2 \times (3,91 + 0,15)}{\pi \times 900 \times 2,48} \text{ Nm} =$$

$$= 465 \text{ Nm}$$

Sendo a corrente inicial de freio inferior ao limite máximo permissível, é suficiente usar apenas um degrau. Aproveitando ainda as resistências R_4 e R_5 para o freio, tem-se

$$r_{d6} - r_2 = R_4 + R_5 + R_7$$

$$R_7 = (r_{d6} - r_2) - (R_4 + R_5) = [3,91 - (0,32 + 0,13)] \Omega = 3,46 \Omega$$

4 - 9.3.2 CÁLCULO DO TEMPO DE FREIO

Sendo o freio realizado em um único degrau, o tempo é calculado aplicando-se a equação (B-54) no intervalo $s_1 \gg s \gg 1$, resultando

$$s' = \frac{n_0 - (-0,05 n_0)}{n_0} = \frac{900 + 0,05 \times 900}{900} = 1,05$$

e

$$t_{f3} = \frac{-\omega_0 J_3}{T_c} \ln \frac{s'-1}{s_1-1} = \frac{-\pi \times 900 \times 1,73}{30 \times 205} \ln \frac{1,05-1}{2,248-1} \text{ s} =$$

$$= 2,9 \text{ s}$$

4 - 9.3.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA DAS RESISTÊNCIAS DE FREIO

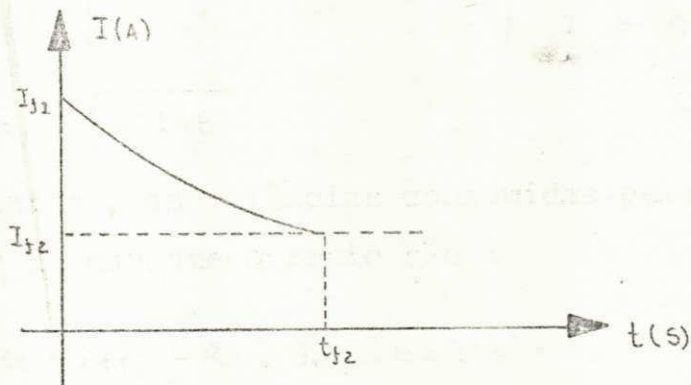
No instante final do freio, quando $s=1$ e $T_e = T_c$,

a corrente é dada por :

$$I_{f2} = \frac{E_2}{\sqrt{3} [r_{d0}^2 + x_2^2]} = \frac{280}{\sqrt{3} [(3,91+0,15)^2 + 0,78^2]} \quad A = 39,3 \text{ A}$$

Portanto , durante o freio , a corrente varia entre os valores $I_{f1} = 90 \text{ A}$ e $I_{f2} = 39,3 \text{ A}$. A fig.(4-10) mostra a variação da corrente com o tempo . Esta função pode ser linearizada , sendo dada por :

$$I(t) = - \frac{I_{f1} - I_{f2}}{t_{f2}} t + I_{f1}$$



variação da corrente durante
o freio

fig.(4-10)

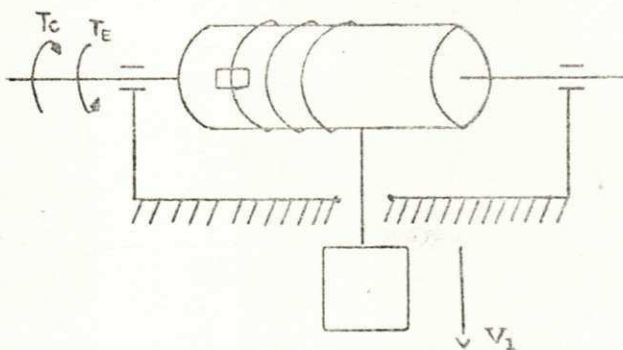
O quadrado da corrente média durante o freio é ,
(apend.D, eq(D-1)) :

$$I_{eq}^2 = \frac{1}{t_{f2}} \int_{t=0}^{t=t_{f2}} [I(t)]^2 dt = \frac{1}{t_{f2}} \int_{t=0}^{t=t_{f2}} \left[- \frac{I_{f1} - I_{f2}}{t_{f2}} t + I_{f1} \right]^2 dt =$$

$$= \frac{I_{f1}^2 + I_{f1} I_{f2} + I_{f2}^2}{3} = \frac{90^2 + 90 \times 39,3 + 39,3^2}{3} \text{ A}^2 = 4.470 \text{ A}^2$$

4 - 9.4 PROTEÇÃO DE FIM DE CURSO

A proteção de fim de curso no movimento de descida da carga com o motor atuando em regime permanente regenerativo é necessária, porque quando a carga se apoia no solo o motor passa a funcionar na sua região $2 > s > 1$ da característica mecânica. A proteção de fim de curso evita excessivo desenrolamento do cabo. Tal como no caso do movimento de elevação, o relé de fim de curso pode ser colocado num orifício do tambor. No entanto, neste caso, o relé é acionado quando o cabo de sustentação para de fazer pressão sobre ele. A fig.(4-11) exemplifica a colocação do relé.



colocação do relé de fim de curso

fig.(4-11)

Para se definir a posição do relé, é preciso calcular o ponto de aplicação do freio eletromagnético. Como é possível aproveitar o mesmo circuito de freio para as ve

locidades v_1 e v_2 do movimento de descida, o ponto de aplicação do freio eletromagnético depende também do freio no movimento com velocidade v_2 . Além disso, o acionamento do guindaste em vazio também influi no ponto de posicionamento do relé. Finalmente, esta posição é calculada no art. (4-12.5).

4 - 9.5 FUNCIONAMENTO DO MOTOR EM VAZIO ATUANDO EM REGIME REGENERATIVO

4 - 9.5.1 REGIME PERMANENTE

Se o motor trabalha em vazio, o torque de carga é dado pelo torque de acionamento do tambor, cabo, gancho e perdas mecânicas do próprio motor e redutor de velocidade. Normalmente, sendo este torque muito pequeno em relação ao torque de carga nominal, pode-se ter uma idéia de funcionamento do motor em vazio considerando-se que o torque de carga é nulo nesta situação. Na realidade o motor funciona numa região muito próxima desta consideração.

Em vazio, assumindo que o torque de carga é nulo, o motor trabalha aproximadamente na velocidade de sincronismo. E a velocidade de descida do gancho de sustentação da carga é:

$$V_0 = \frac{\pi D_t n_0}{60 i} = \frac{\pi \times 0,6 \times 900}{60 \times 344} \text{ m/s} = 0,082 \text{ m/s}$$

No intervalo $2 > s > s_{a5}$, o tempo é dado pela equação (B-41), onde o limite superior da integral é definido como

$$s' = 1,95$$

porque no ponto $s=2$ o torque dinâmico é considerado nulo. E o torque T_{a5} é dado sabendo-se que no ponto s_{a5}

$$I_{a5} = \frac{E_2 (2 - s_{a6})}{\sqrt{3} (R_6 + r_2)} = \frac{280 (2 - 1,7)}{\sqrt{3} (0,86 + 0,15)} \quad A = 48,6 \text{ A}$$

e

$$T_{a5} = \frac{3}{\omega_0} I_{a6}^2 \frac{R_6 + r_2}{(2 - s_{a6})} = \frac{3 \times 30 \times (48,6)^2 \times (0,86 + 0,15)}{\pi \times 900 \times (2 - 1,7)} \text{ Nm} =$$

$$= 250 \text{ Nm}$$

Finalmente o tempo do segundo estágio de aceleração é :

$$t_7 = \omega_0 \frac{J_3 (2 - s_{a6})}{T_{a6}} \ln \frac{2 - s_{a6}}{2 - s'} = \frac{\pi \times 900 \times 1,73 (2 - 1,73)}{30 \times 250} \ln \frac{2 - 1,73}{2 - 1,95}$$

$$= 0,35 \text{ s}$$

Em vazio o tempo total de aceleração é a soma dos tempos t_5 e t_7 , ou :

$$t_{a3} = t_5 + t_7 = (0,43 + 0,35) \text{ s} = 0,78 \text{ s}$$

Apenas a título de exemplificação pode-se testar, para o funcionamento em vazio, se a aceleração média do sistema é ainda inferior ao limite máximo aconselhado, (8, pag.1017):

$$\left(\frac{d\bar{v}}{dt}\right)_{\max} = 2 \text{ m/s}^2$$

Para os dois estágios de aceleração tem-se :

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\bar{v}}{dt}\right) &= \frac{1}{t_{a3}} \left[\int_{t=0}^{t=t_5} \frac{dv(t)}{dt} + \int_{t=t_5}^{t=t_6} \frac{dv(t)}{dt} \right] = \\ &= \frac{1}{t_{a3}} \left[v_{a3} + v_n - v_{a3} \right] = \\ &= \frac{v_n}{t_{a3}} = \frac{n_0 \pi D t}{60 \times 1 \times t_{a3}} = \frac{900 \times \pi \times 0,6}{60 \times 344 \times 0,78} \text{ m/s}^2 = \\ &= 0,083 \text{ m/s}^2 < \left(\frac{d\bar{v}}{dt}\right)_{\max} \end{aligned}$$

4 - 9.5.3 FREIO

Se o motor trabalha em vazio, no instante inicial da aplicação do freio elétrico, a corrente é

$$I_{f3} = \frac{E_2 \times S_{f3}}{\sqrt{3} r_{d6}} = \frac{280 \times 2}{\sqrt{3} (3,91 + 0,15)} \text{ A} = 80 \text{ A}$$

e o torque correspondente é :

$$T_{f3} = \frac{3}{\omega_0} I_{f3}^2 \frac{r_{d3}}{s_{f3}} = \frac{3 \times 30 \times (40)^2 \times (3,91 + 0,15)}{\pi \times 900 \times 2} \text{ Nm} = 415 \text{ Nm}$$

E no ponto $s = 1$ tem-se $T_e = T_c$.

O tempo de freio pode ser calculado pela equação (B-54) , sendo o limite superior da integral o próprio $s=1$, porque neste ponto o torque dinâmico é diferente de zero, para a atuação em vazio do motor . Portanto tem-se :

$$t_{f4} = \frac{-\omega_0 J_3}{T_c} \ln \frac{s_{f4}}{s_{f3}} = - \frac{\pi \times 900 \times 1,73}{205} \ln \frac{1}{2} = 0,55 \text{ s}$$

Se o motor não for desconectado da rede neste tempo , o sentido de rotação do rotor se inverte , e passa a haver uma aceleração no sentido de erguer o gancho do guindaste . Conseqüentemente este tempo já determina que o freio eletromagnético , no máximo , atua 0,55 s depois de acionado o circuito de freio . Como o ponto de atuação do freio eletromagnético depende também do segundo movimento de descida de carga , este ponto é escolhido posteriormente no artigo (4-11) .

4 - 10. MOVIMENTO DE DESCIDA COM VELOCIDADE v_2 4 - 10.1 REGIME PERMANENTE4 - 10.1.1 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE REGIME PERMANENTE

No movimento de descida de carga , a velocidade

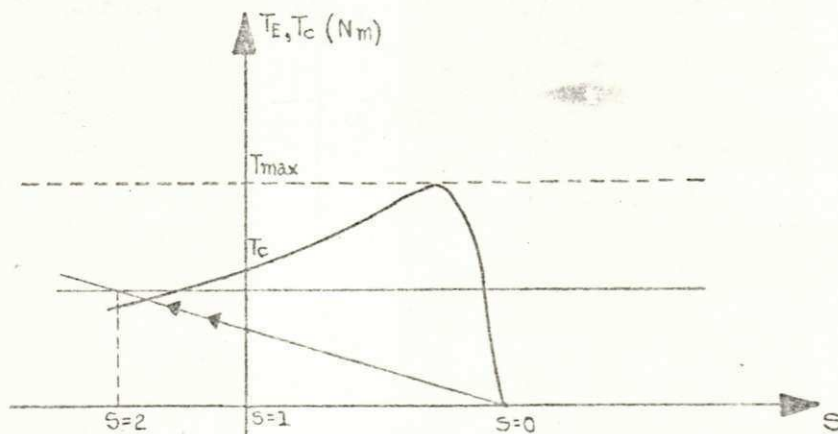
$$v_2 = 0,6 v_n = 0,6 \times 0,08 \text{ m/s} = 0,048 \text{ m/s}$$

correspondente a

$$n_2 = 0,6 n_n = 0,6 \times 864 \text{ rpm} = 518,4 \text{ rpm}$$

$$s_2 = \frac{n_0 - (-n_2)}{n_0} = \frac{900 - (-518,4)}{900} = 1,58$$

pode ser obtida em regime permanente usando-se o freio por inversão com carga ativa (apend.B,art.(B-6)) , A característica mecânica do motor neste regime é dada na fig.(4-13) .



característica mecânica do freio por
inversão em regime permanente
fig.(4-13)

A resistência que deve ser adicionada ao circuito do rotor para se obter o ponto s_2 , correspondente à carga T_c , é calculado pelas equações (B-59) e (B-60), ou :

$$p' = \frac{T_{\max}}{T_c} = \frac{2,5 \times T_n}{T_c} = \frac{2,5 \times 221}{205} = 2,7$$

$$s_{c2} = s_2 (p' + \sqrt{p'^2 - 1}) = 1,58 (2,7 + \sqrt{(2,7)^2 - 1}) = 8,2$$

$$(r_{d7} - r_2) = \left(\frac{s_{c2}}{s_c} - 1 \right) r_2 = \left(\frac{8,2}{0,192} - 1 \right) 0,15 \Omega = 6,25 \Omega$$

A corrente de regime permanente correspondente é :

$$I_{n2} = \frac{E_2 s_2}{\sqrt{3} r_{d7}} = \frac{280 \times 1,58}{\sqrt{3} (6,25 + 0,15)} \text{ A} = 40 \text{ A}$$

A resistência adicionada ao circuito do rotor é :

$$(r_{d7} - r_2) = R_4 + R_5 + R_8$$

e

$$\begin{aligned} R_8 &= (r_{d7} - r_2) - (R_4 + R_5) = [6,25 - (0,32 + 0,13)] \Omega = \\ &= 5,8 \Omega \end{aligned}$$

4 - 10.1.2 CÁLCULO DA POTÊNCIA DAS RESISTÊNCIAS DE REGIME PERMANENTE

Em regime permanente de freio por inversão as potências consumidas pelas resistências R_4 , R_5 e R_8 são :

$$P_4' = R_4 I_{n_2}^2 = 0,32 \times (40)^2 \text{ W} = 510 \text{ W}$$

$$P_5' = R_5 I_{n_2}^2 = 0,13 \times (40)^2 \text{ W} = 210 \text{ W}$$

$$P_8' = R_8 I_{n_2}^2 = 5,8 \times (40)^2 \text{ W} = 9.300 \text{ W}$$

Considerando que o tempo de trabalho relativo do motor é 40%, maximizando o tempo de trabalho do motor em freio por inversão, tem-se, (apend.D) :

$$t_{t_9} = 0,4 \times 480 \text{ s} = 192 \text{ s}$$

$$t_{t_9} + t_{p_6} = 480 \text{ s}$$

Assumindo que a resistência tem constante de tempo térmica $\zeta_R = 600 \text{ s}$, (14, tab.(6-7)), pela equação (D-8) pode-se obter :

$$\begin{aligned} I_{eq_9} &= I_{n_2} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{t_9}}{\zeta_R}}}{1 - e^{-\frac{t_{t_9} + t_{p_6}}{\zeta_R}}}} = I_{n_2} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{192}{600}}}{1 - e^{-\frac{480}{600}}}} = \\ &= I_{n_2} \sqrt{0,5} \end{aligned}$$

Conseqüentemente, as potências consumidas pelas resistências R_4 , R_5 e R_8 são :

$$P_4 = R_4 I_{eq_9}^2 = R_4 \times 0,5 \times I_{n_2}^2 = 0,32 \times 0,5 \times (40)^2 \text{ W} = 255 \text{ W}$$

$$P_5 = R_5 I_{eq_9}^2 = R_5 \times 0,5 \times I_{n_2}^2 = 0,13 \times 0,5 \times (40)^2 \text{ W} = 105 \text{ W}$$

$$P_8 = R_8 I_{eq_9}^2 = R_8 \times 0,5 \times I_{n_2}^2 = 5,8 \times 0,5 \times (40)^2 \text{ W} = 4.650 \text{ W}$$

Como as potências P_4 e P_5 calculadas aqui são superiores aos valores escolhidos nos artigos (4-6.1.3), (4-7.2.3) e (4-7.3.2), prevalecem finalmente os valores escolhidos pelo autor neste artigo, e que são dados a seguir.

$$P_4 = 300 \text{ W}$$

$$P_5 = 200 \text{ W}$$

$$P_8 = 5 \text{ kW}$$

4 - 10.2 PARTIDA E ACELERAÇÃO

4 - 10.2.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE ACELERAÇÃO

Inicialmente pode-se fazer a tentativa de partir o motor apenas com a própria resistência r_{d7} adicionada no circuito do rotor. Como a corrente de partida para esta re

sistência é provavelmente menor do que a corrente nominal do motor, não há necessidade de resistências adicionais para limitar a corrente inicial. Apenas se o tempo de aceleração não for razoavelmente curto é que se usa degraus adicionais de aceleração.

No instante inicial a corrente de partida é

$$I_{p2} = \frac{E_2}{\sqrt{3} r_{d1}} = \frac{280}{\sqrt{3} (6,25 + 0,15)} \text{ A} = 25,4 \text{ A}$$

e o torque correspondente é :

$$\begin{aligned} T_{p2} &= \frac{3}{\omega_0} I_{p2}^2 r_{d0} = \frac{3 \times 30 \times (25,4)^2 \times (6,25 + 0,15)}{\pi \times 900} \text{ Nm} = \\ &= 131 \text{ Nm} \end{aligned}$$

4 - 10.2.2 CÁLCULO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

O tempo de aceleração é calculado pela equação (B-64), onde o limite superior da integral é

$$s_2^2 = \frac{n_0 + 0,95 n_2}{n_0} = \frac{900 + 0,95 \times 518,4}{900} = 1,55$$

porque no ponto s_2 o torque dinâmico é nulo. Portanto pode-se obter :

$$\begin{aligned} t_{a4} &= \frac{-\omega_0 J_3}{T_p} \ln \frac{s_2^2 - \frac{T_c}{T_p}}{1 - \frac{T_c}{T_p}} = \frac{-\pi \times 900 \times 1,73}{131} \ln \frac{1,55 - \frac{205}{131}}{1 - \frac{205}{131}} \text{ s} = \\ &= 3,47 \text{ s} \end{aligned}$$

Sendo 3,47 s um tempo razoavelmente curto para a aceleração da carga nominal, o motor pode partir apenas com a resistência r_{d7} de estado permanente no circuito do rotor.

A aceleração média deve ser inferior ao limite máximo aconselhado, (8, pag. 1017),

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{\max} = 2 \text{ m/s}^2$$

para evitar deslizamento do cabo sobre o tambor.

Então, durante a aceleração tem-se:

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{\text{méd}} = \frac{1}{t_{a4}} \int_0^{t_{a4}} \frac{dv(t)}{dt} dt = \frac{v_2}{t_{a4}} \approx \frac{0,048}{3,47} \text{ m/s}^2 =$$

$$= 0,014 \text{ m/s}^2 < \left(\frac{dv}{dt}\right)_{\max}$$

4 - 10.2.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE ACELERAÇÃO

Como a resistência usada na aceleração é a mesma usada durante o estado permanente, torna-se desnecessário calcular a potência da resistência durante a aceleração. Sendo a potência consumida pela resistência durante o regime permanente bastante superior à potência consumida durante o instante de aceleração, o valor calculado no art. (4-10.1.2) é predominante, e válido para a aceleração.

4 - 10.3 FREIO4 - 10.3.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE FREIO

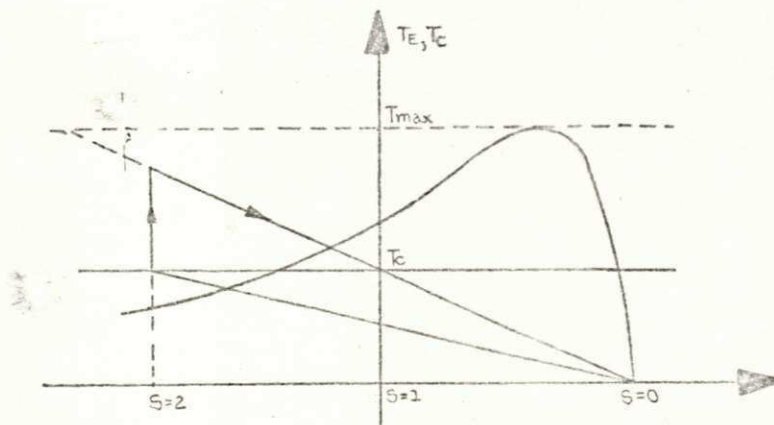
O freio do motor atuando em regime permanente de freio por inversão pode ser obtido com uma troca adequada do valor da resistência adicional, (apend. B, art. (B-6.3)). Aproveitando o circuito de freio usado no artigo (4-7.3) obtém-se

$$I_{f4} = \frac{E_2 \cdot s_2}{\sqrt{3} r_{dc}} = \frac{280 \times 1,58}{\sqrt{3} (3,91 + 0,15)} \text{ A} = 63,2 \text{ A}$$

e o torque correspondente é :

$$T_{f4} = \frac{3}{\omega_0} I_{f4}^2 \frac{r_{dc}}{s_2} = \frac{3 \times 30 \times (63,2)^2 (3,91 + 0,15)}{\pi \times 900 \times 1,58} \text{ Nm} = 328 \text{ Nm}$$

A fig.(4-14) mostra a característica mecânica do motor nesta situação .



característica mecânica do motor em freio
fig.(4-14)

4 - 10.3.2 CÁLCULO DO TEMPO DE FREIO

O tempo de freio é calculado aplicando-se a equação (B-54) no intervalo $s_2 \gg s \gg 1$, onde se faz

$$s' = \frac{n_0 - (-0,05 n_0)}{n_0} = \frac{900 + 0,05 \times 900}{900} = 1,05$$

resultando :

$$t_{fs} = \frac{-\omega_0 J_3}{T_c} \ln \frac{s'-1}{s_2-1} = \frac{-\pi \times 900 \times 1,73}{30 \times 205} \ln \frac{1,05-1}{1,58-1} s =$$

$$= 2,6 \text{ s}$$

4 - 10.3.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE FREIO

Para o freio deste movimento a corrente varia entre os valores I_{f4} e I_{f2} , sendo $I_{f4} < I_{f1}$, onde I_{f1} é a corrente inicial de freio no movimento de descida com velocidade v_1 , as potências consumidas pelas resistências durante o freio do movimento com velocidade v_2 são inferiores às potências calculadas no artigo (4-9.3.3). Consequentemente o dimensionamento escolhido naquele artigo ainda é válido para o caso presente.

4 - 10.4 PROTEÇÃO DE FIM DE CURSO

Se a carga se apoia no solo quando o motor atua em regime permanente de freio por inversão, o torque da carga ativa passa a ser nulo, levando o motor à posição de repouso. Neste ponto o motor é mantido porque o torque elétrico de partida é inferior ao torque de carga, sendo impossível haver movimento em qualquer direção. Para cargas inferiores ao valor do torque elétrico de partida, o motor passa a atuar erguendo a carga num movimento de elevação. Portanto, a proteção de fim de curso aqui só é necessária para pequenas cargas. No entanto, se o circuito de freio do movimento com velocidade v_1 é aproveitado para freiar o movimento com velocidade v_2 , esta proteção vai atuar acionando o circuito de freio, sem trazer problemas para este último movimento, mesmo no caso de cargas maiores do que o torque elétrico de partida. A posição do relé é calculada no artigo (4-12.5), depois de obtidos os resultados de todas as possibilidades extremas dos movimentos de descida da carga.

4 - 10.5 FUNCIONAMENTO DO MOTOR COM A MÍNIMA CARGA
ATUANDO EM REGIME PERMANENTE DE FREIO POR
INVERSÃO

4 - 10.5.1 REGIME PERMANENTE

O freio por inversão em regime permanente não pode ser obtido para o motor em vazio. Como se sabe, é necessário, para garantir o regime, que o torque de carga seja maior do que o torque de partida fornecido pelo motor. Também, se o torque de carga é muito pequeno, a velocidade de funcionamento resultante em regime permanente é excessivamente baixa. Sendo o torque de partida

$$T_{p2} = 131 \text{ Nm}$$

e

$$\frac{T_{p2}}{T_c} = \frac{131}{205} = 0,64$$

um torque de carga de 80% do torque de carga nominal deve fornecer aproximadamente uma velocidade de 50% da velocidade v_2 . Velocidades menores são insatisfatórias por serem excessivamente lentas. Portanto tendo-se

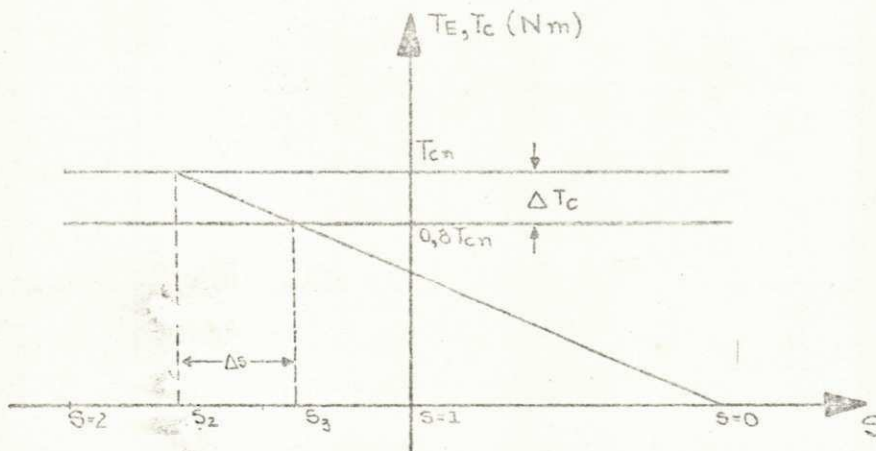
$$T_E = T_p s$$

resulta :

$$s_3 = \frac{0,8 T_c}{T_p} = \frac{0,8 \times 205}{131} = 1,25$$

$$n_3 = n_0 (1 - s^2) = 900 (1 - 1,25^2) \text{ rpm} = -225 \text{ rpm}$$

A fig.(4-15) mostra a característica mecânica do motor em funcionamento de regime permanente de freio por inversão, para os dois valores limite de carga, ou seja, para a carga T_c nominal e para 80% de T_c .



Característica mecânica do motor em regime permanente de freio por inversão para a variação de carga mecânica permitida fig.(4-15)

Se é necessário uma faixa maior de variação da carga mecânica, o projeto pode ser facilmente ampliado, calculando-se outros valores de resistências adicionais de regime permanente. Pode-se então fazer corresponder uma resistência adicional para cada faixa de variação da carga mecânica. E para cada resistência pode-se ter um botão de acionamento por controle remoto do circuito de comando. O operador comanda então a variação da característica mecânica de acordo com a carga acionada.

4 - 10.5.2 ACELERAÇÃO

Para a carga reduzida, o tempo de aceleração do motor é calculado também pela equação (B-64), sendo

$$S'_3 = \frac{n_0 + 0,95 n_3}{n_0} = \frac{900 + 0,95 \times 225}{900} = 1,23$$

o limite superior da integral. O tempo resultante é:

$$t_{aE} = \frac{-\omega_0 J_3}{T_P} \ln \frac{S'_3 - \frac{0,8 T_c}{T_P}}{1 - \frac{0,8 T_c}{T_P}} = \frac{-\pi \times 900 \times 1,73}{131} \ln \frac{1,23 - \frac{0,8 \times 205}{131}}{1 - \frac{0,8 \times 205}{131}} s =$$

$$= 3,16 s$$

Mais uma vez pode-se calcular a aceleração média para garantir que não ultrapassa o valor máximo aconselhado para os movimentos verticais, (8, pag. 1017), ou:

$$\left(\frac{d\bar{v}}{dt} \right)_{\max} = 2 \text{ m/s}^2$$

Então, para carga reduzida, tem-se:

$$\left(\frac{d\bar{v}}{dt} \right) = \frac{1}{t_{aE}} \int_{t=0}^{t=t_{aE}} \frac{dv(t)}{dt} dt = \frac{v_{n3}}{t_{aE}} \cong \frac{n_3 \pi D t}{60 i t_{aE}} =$$

$$= \frac{225 \times \pi \times 0,6}{60 \times 344 \times 3,16} \text{ m/s}^2 = 0,0065 \text{ m/s}^2 < \left(\frac{d\bar{v}}{dt} \right)_{\max}$$

4 - 10.5.3 FREIO

Para carga reduzida , a corrente inicial de freio é dada por

$$I_{fs} = \frac{E_2 S_3}{\sqrt{3} r_{dc}} = \frac{280 \times 1,25}{\sqrt{3} (3,91 + 0,15)} \quad A = 50 A$$

e o torque correspondente é :

$$T_{fs} = \frac{3}{\omega_0} \frac{I_{fs}^2}{S_3} \cdot r_{dc} = \frac{3 \times 30 \times (50)^2 (3,91 + 0,15)}{\pi \times 900 \times 1,25} \text{ Nm} = 260 \text{ Nm}$$

Como no ponto $s = 1$ o torque dinâmico é diferente de zero , para se calcular o tempo de freio aplica-se a equação (B-54) , onde $s = 1$ é o limite superior da integral. Então , o tempo resultante é :

$$t_{t6} = \frac{-\omega_0 J_3}{T_c} \ln \frac{1-0,8}{S_3-0,8} = \frac{-\pi \times 900 \times 1,73}{30 \times 205} \ln \frac{1-0,8}{1,25-0,8} \text{ s} =$$

$$= 0,65 \text{ s}$$

4 - 11. CÁLCULO DO TEMPO DE ATUAÇÃO DO FREIO ELETROMAGNÉTICO NOS MOVIMENTOS DE DESCIDA

Os diversos tempos de freio calculados para os movimentos de descida são :

- movimento de descida em freio regenerativo a plena carga , (art.(4-9.3.2)) ;

$$t_{f3} = 2,9 \text{ s}$$

- movimento de descida em freio regenerativo em vazio , (art.(4-9.5.3)) ;

$$t_{f4} = 0,55 \text{ s}$$

- movimento de descida em freio por inversão a plena carga , (art.(4-10.3.2)) ;

$$t_{f5} = 2,0 \text{ s}$$

- movimento de descida em freio por inversão com 80% da carga nominal , (art.(4-10.5.3)) ;

$$t_{f6} = 0,65 \text{ s}$$

Pode-se observar que o menor tempo de freio determina o tempo de atuação do freio eletromagnético .Conseqüentemente , o freio eletromagnético deve ser acionado 0,55 s depois de atuado o freio elétrico fornecido pelo próprio motor , lembrando que a menor carga acionada em freio por inversão deve ser $0,8 T_c$.

Em cada movimento é necessário calcular a velocidade para a qual o freio eletromagnético é atuado, e o novo tempo de freiação. Por escolha do autor, no instante em que o freio eletromagnético é atuado o motor é desligado da rede.

4 - 11.1 MOVIMENTO DE DESCIDA EM FREIO REGENERATIVO A PLENA CARGA

Pela equação (B-54) tem-se

$$t_8 = \frac{-\omega_0 J_3}{T_c} \ln \frac{s_{f4} - 1}{s_1 - 1}$$

e portanto :

$$s_{f4} = (s_1 - 1) e^{-\frac{t_8 T_c}{\omega_0 J_3} + 1} = (2,248 - 1) e^{-\frac{0,55 \times 205 \times 30}{\pi \times 900 \times J_3} + 1} = 1,645$$

A velocidade correspondente é então :

$$n_{f4} = n_0 (1 - s_{f4}) = 900 (1 - 1,645) \text{ rpm} = 580 \text{ rpm}$$

No ponto de velocidade n_{f4} o motor é desligado da rede e o freio eletromagnético, de torque $T_{fe_3} = 2T_n$, artigo (4-8.2.1), é atuado. Portanto, tem-se :

$$t_9 = \frac{-\pi}{30} J_3 \frac{1}{T_c + T_{fe_3}} \int_{n=n_{f4}}^{n=0} dn = -\frac{\pi}{30} J_3 \frac{n_{f4}}{T_c + T_{fe_3}} =$$

$$= \frac{-\pi \times 1,73 \times 580}{30 \times (205 + 442)} \text{ s} = 0,15 \text{ s}$$

O tempo total de freio é então :

$$t_{f7} = t_8 + t_9 = (0,55 + 0,15) \text{ s} = 0,7 \text{ s}$$

4 - 11.2 MOVIMENTO DE DESCIDA EM FREIO REGENERATIVO EM VAZIO

Neste caso o freio eletromagnético é atuado no ponto $s = 1$, correspondente à velocidade nula. Conseqüentemente, o tempo de freio é o próprio tempo de atuação do freio eletromagnético, calculado no artigo (4-9.5.3), ou seja :

$$t_{f4} = t_3 = 0,55 \text{ s}$$

4 - 11.3 MOVIMENTO DE DESCIDA EM FREIO POR INVERSÃO A PLENA CARGA

Pela equação (B-54) tem-se

$$t_8 = \frac{-\omega_0 J_3}{T_c} \ln \frac{s_{j5} - 1}{s_2 - 1}$$

e portanto

$$s_{j5} = (s_2 - 1) e^{-\frac{t_8 T_c}{\omega_0 J_3} + 1} = (1,58 - 1) e^{\frac{0,55 \times 205 \times 30}{\pi \times 900 \times 1,73} + 1} =$$

$$= 1,30$$

A velocidade correspondente é :

$$n_{f5} = n_0(1 - s_{f5}) = 900(1 - 1,3) \text{ rpm} = 270 \text{ rpm}$$

Depois de atuado o freio eletromagnético, o tempo de freio é :

$$t_{10} = -\frac{\pi J_3}{30} \frac{n_{f5}}{T_c + T_{je3}} = -\frac{\pi \times 1,73 \times 270}{30(205 + 442)} \text{ s} = 0,075 \text{ s}$$

O tempo total de freiagem é então :

$$t_{f8} = t_e + t_{10} = (0,55 + 0,075) \text{ s} = 0,625 \text{ s}$$

4 - 11.4 MOVIMENTO DE DESCIDA EM FREIO POR INVERSÃO COM 80% DA CARGA NOMINAL

Ainda pela equação (B-54) tem-se

$$t_8 = -\frac{\omega_0 J_3}{T_c} \ln \frac{s_{f6} - 0,8}{s_3 - 0,8}$$

e conseqüentemente :

$$s_{f6} = (s_3 - 0,8) e^{-\frac{t_8 T_c}{\omega_0 J_3}} + 0,8 =$$

$$= (1,25 - 0,8) e^{-\frac{0,55 \times 205 \times 30}{\pi \times 900 \times 1,73}} + 0,8 = 1,033$$

A velocidade correspondente é :

$$n_{f6} = n_0 (1 - s_{f6}) = 900 (1 - 1,033) \text{ rpm} = -29,7 \text{ rpm}$$

Depois de atuado o freio eletromagnético , o tempo de freio é :

$$t_{f1} = \frac{-\pi}{30} J_3 \frac{n_{f6}}{0,8 T_c + T_{je3}} = \frac{-\pi \times 1,73 \times (-29,7)}{30 (0,8 \times 205 + 442)} \text{ s} = 0,89 \times 10^{-2} \text{ s}$$

O tempo total de freiagem é aproximadamente :

$$t_{f9} = t_4 = 0,55 \text{ s}$$

4 - 12. CÁLCULO DA LOCALIZAÇÃO DO RELÉ DE FIM DE CURSO NOS MOVIMENTOS DE DESCIDA

A localização do relé de fim de curso é determinada calculando-se a distância percorrida pela carga do guindaste , depois de acionado o circuito de freio . Esta distância deve ser então calculada para cada movimento de descida .

4 - 12.1 MOVIMENTO DE DESCIDA EM FREIO REGENERATIVO A PLENA CARGA

Aplicando-se a equação (B-54) para o intervalo $s_1 \gg s \gg s_{f4}$ e sabendo-se que

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

tem-se que a velocidade em função do tempo é :

$$n(t) = n_0 (s_1 - 1) e^{-\frac{t T_c}{\omega_0 J_3}}$$

A distância x_3 percorrida pela carga neste intervalo é :

$$x_3 = \frac{\pi D t}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_3} n(t) dt = \frac{\pi D t}{60 i} n_0 (s_1 - 1) \int_{t=0}^{t=t_3} e^{-\frac{t T_c}{\omega_0 J_3}} dt =$$

$$= \frac{\pi^2 n_0^2 D t J_3 (1 - e^{-\frac{t_3 T_c}{\omega_0 J_3}}) (s_1 - 1)}{1800 \times i \times T_c} =$$

$$= \frac{\pi^2 (900)^2 0,6 \times 1,73 \times (1 - e^{-\frac{0,55 \times 205 \times 30}{\pi \times 900 \times 3,73}}) (2,248 - 1)}{1800 \times 344 \times 205} m = 0,04 m$$

Depois que o freio eletromagnético é atuado a velocidade $n = f(t)$ é

$$n = \left(n_{t_4} - \frac{30}{\pi} \frac{T_c + T_f e_2}{J_3} t \right)$$

e a distância correspondente é :

$$x_4 = \frac{\pi D t}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_3} \left(n_{t_4} - \frac{30}{\pi} \frac{T_c + T_f e_2}{J_3} t \right) dt =$$

$$= \frac{\pi D t}{60 i} \left[n_{t_4} t_3 - \frac{30}{\pi} \frac{T_c + T_f e_2}{J_3} \frac{t_3^2}{2} \right] =$$

$$= \frac{\pi \times 0,6}{60 \times 344} \left[580 \times 0,15 - \frac{30}{\pi} \frac{205 + 442}{1,73} \frac{0,15^2}{2} \right] m = 0,006 m$$

A distância total percorrida pela carga depois de acionado o circuito de freio é :

$$X_5 = X_3 + X_4 = (0,04 + 0,006) \text{ m} = 0,046 \text{ m}$$

4 - 12.2 MOVIMENTO DE DESCIDA EM FREIO REGENERATIVO EM VAZIO

Aplicando-se a equação (B-54) e assumindo que para este movimento $T_c \cong 0$, se obtém :

$$n = n_0 \left(s_{f3} e^{-\frac{t T_c}{\omega_0 J_3}} - 1 \right)$$

E a distância correspondente é :

$$\begin{aligned} X_6 &= \frac{\pi D t}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_8} n(t) dt = \frac{\pi D t}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_8} \left(s_{f3} e^{-\frac{t T_c}{\omega_0 J_3}} - 1 \right) dt = \\ &= \frac{\pi D t n_0}{60 i} \left[\frac{n_0 J_3 \pi}{30 T_c} s_{f3} \left(1 - e^{-\frac{t_8 T_c}{\omega_0 J_3}} \right) - t_8 \right] = \\ &= \frac{\pi \times 0,6 \times 900}{60 \times 344} \left[\frac{900 \times 1,73 \times \pi \times 2}{30 \times 205} \left(1 - e^{-\frac{0,55 \times 205 \times 30}{\pi \times 900 \times 1,73}} \right) - 0,55 \right] \text{ m} = \\ &= 0,018 \text{ m} \end{aligned}$$

4 - 12.3 MOVIMENTO DE DESCIDA EM FREIO POR INVERSÃO
A PLENA CARGA

Aplicando-se a equação (B-54) para o intervalo de
 finido por $s_2 \gg s \gg s_{f5}$ se obtém :

$$n(t) = n_0 (s_2 - 1) e^{-\frac{t T_c}{\omega_0 J_3}}$$

E a distância correspondente é :

$$\begin{aligned} X_7 &= \frac{\pi D_t}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_8} n(t) dt = \frac{\pi D_t n_0 (s_2 - 1)}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_8} e^{-\frac{t T_c}{\omega_0 J_3}} dt \\ &= \frac{\pi^2 n_0^2 D_t J_3 (1 - e^{-\frac{t_8 T_c}{\omega_0 J_3}}) (s_2 - 1)}{1800 \times i \times T_c} = \\ &= \frac{\pi^2 (900)^2 0,6 \times 1,73 \times (1 - e^{-\frac{955 \times 205 \times 30}{900 \times \pi \times 1,73}}) (1,58 - 1)}{1800 \times 344 \times 205} m = 0,018 m \end{aligned}$$

Depois que o freio eletromagnético é atuado , a
 velocidade $n = f(t)$ é :

$$n = n_{f5} - \frac{30}{\pi} \frac{T_c + T_{fe3}}{J_3} t$$

E a distância correspondente é :

$$\begin{aligned} X_8 &= \frac{\pi D_t}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_{10}} (n_{f5} - \frac{30}{\pi} \frac{T_c + T_{fe3}}{J_3} t) dt = \\ &= \frac{\pi D_t}{60 i} \left[n_{f5} \times t_{10} - \frac{30}{\pi} \frac{T_c + T_{fe3}}{J_3} \frac{t_{10}^2}{2} \right] = \end{aligned}$$

$$= \frac{\pi \cdot 0,6}{60 \times 344} \left[270 \times 0,075 - \frac{30}{\pi} \frac{205 + 442}{1,73} \frac{0,075^2}{2} \right] m =$$

$$= 0,002 \text{ m}$$

A distância total percorrida neste movimento é :

$$X_9 = X_7 + X_8 = (0,018 + 0,002) m = 0,020 \text{ m}$$

4 - 12.4 MOVIMENTO DE DESCIDA EM FREIO POR INVERSÃO COM 8% DA CARGA NOMINAL

Aplicando-se a equação (B-54) ao movimento se obtem :

$$\eta = \eta_0 \left[(s_3 - 0,8) e^{-\frac{t T_c}{\omega_0 J_3}} - 0,2 \right]$$

E a distância percorrida pela carga é :

$$X_{10} = \frac{\pi D_t}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_8} \eta(t) dt = \frac{\pi D_t \eta_0}{60 i} \int_{t=0}^{t=t_8} \left[(s_3 - 0,8) e^{-\frac{t T_c}{\omega_0 J_3}} - 0,2 \right] dt =$$

$$= \frac{\pi^2 \eta_0^2 D_t J_3 (s_3 - 0,8) (1 - e^{-\frac{t_8 T_c}{\omega_0 J_3}})}{1800 \times i \times T_c} - \frac{\pi D_t \eta_0 \times 0,2 t_8}{60 i}$$

$$= \frac{\pi^2 (900)^2 \cdot 0,6 \times 1,73 (1,25 - 0,8) (1 - e^{-\frac{0,55 \times 205 \times 30}{\pi \times 900 \times 1,73}})}{1800 \times 344 \times 205} - \frac{\pi \times 0,6 \times 900 \times 0,2 \times 0,55}{60 \times 344}$$

$$= 0,005 \text{ m}$$

4 - 12.5 LOCALIZAÇÃO DO RELÉ DE FIM DE CURSO

Comparando-se os resultados obtidos nos artigos (4-12.1) , (4-12.2) , (4-12.3) e (4-12.4) , para as distâncias percorridas pela carga depois de acionado o circuito de freio , pode-se observar que a maior distância obtida é a distância x_9 do movimento regenerativo a plena carga . Este resultado é naturalmente esperado , porque para cargas ativas tem-se :

- para um mesmo tipo de freio , quanto menor a carga menor é a distância percorrida depois do acionamento do freio , porque mais rápido é o freio ;
- para a mesma carga , quanto menor a velocidade do sistema no ponto de atuação do freio , menor é a distância percorrida depois do acionamento do circuito de freio , porque também mais rápido é o freio .

Conseqüentemente , a distância $x_9 = 0,046$ m determina o ponto de localização do relé de fim de curso . Finalmente , acrescentando-se um fator de segurança , se escolhe

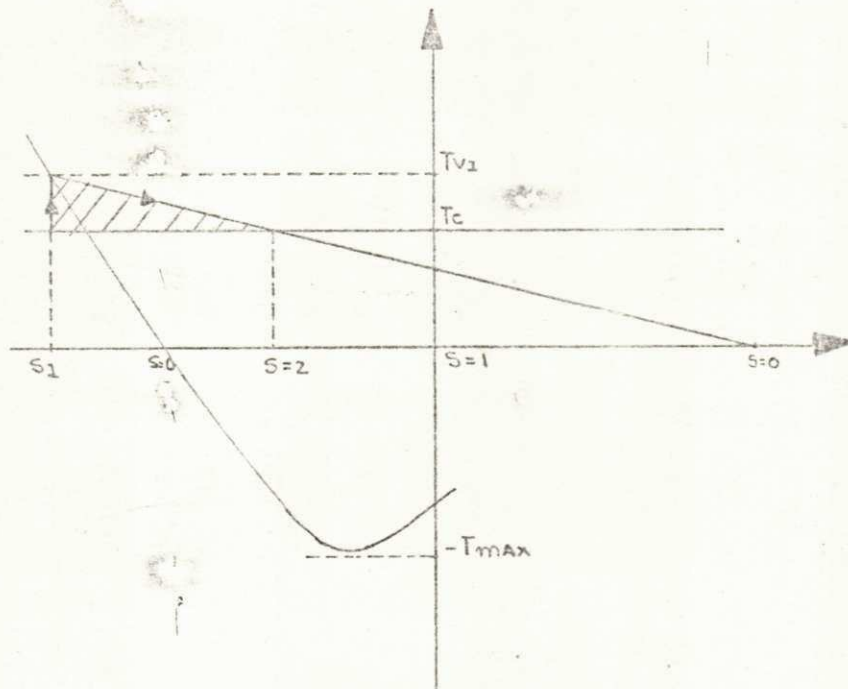
$$\dot{x}_{2-M_3} = 0,14 \text{ m}$$

sendo x_{2-M_3} a distância medida a partir do terminal do cabo .

4 - 13. VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DURANTE O MOVIMENTO DE DESCIDA

4 - 13.1 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE v_1 PARA A VELOCIDADE v_2

A fig.(4-16) mostra a variação da característica mecânica do motor , quando se varia sua velocidade de funcionamento de v_1 para v_2 . A área sombreada na figura representa o momento dinâmico de desaceleração que leva o motor do ponto s_1 para o ponto s_2 .



Característica mecânica do motor durante variação de velocidade de v_1 para v_2
fig.(4-16)

No instante inicial da variação de característica a corrente correspondente é :

$$I_{v1} = \frac{E_2 S_1}{\sqrt{3} (r_{d1})} = \frac{290 \times 2,248}{\sqrt{3} (6,25 + 0,15)} \text{ A} = 57,2 \text{ A}$$

E o torque neste instante é :

$$T_{v1} = \frac{3}{\omega_0} I_{v1}^2 \frac{r_{d1}}{s_1} = \frac{3 \times 30 \times (57,2)^2 \times (6,25 + 0,15)}{\pi \times 900 \times 2,248} \text{ Nm} = 294 \text{ Nm}$$

O momento dinâmico de desaceleração é dado por :

$$0 < T_d = T_E - T_c = J \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 J \frac{ds}{dt}$$

sendo o torque elétrico expresso por

$$T_E = \frac{T_c}{s_2} s$$

e o deslizamento

$$s_2' = \frac{n_0 + 1,05 n_2}{n_b} = \frac{900 + 1,05 \times 518,4}{900} = 1,6$$

porque no ponto s_2 tem-se $T_d = 0$, o tempo gasto na variação de velocidade é :

$$t_{v1} = -\omega_0 J_3 \int_{s=s_1}^{s=s_2'} \frac{ds}{T_E - T_c} = -\frac{\omega_0 J_3 s_2}{T_c} \ln \frac{s_2' - s_2}{s_1 - s_2} =$$

$$= \frac{-\pi \times 900 \times 1,73}{30 \times 205} \times 1,58 \ln \frac{1,6 - 1,58}{0,248 - 1,58} s = 4,4 s$$

No instante inicial da variação de característica a corrente correspondente é :

$$I_{v1} = \frac{E_2 S_1}{\sqrt{3} (r_{d1})} = \frac{280 \times 2,248}{\sqrt{3} (6,25 + 0,15)} \quad A = 57,2 \text{ A}$$

E o torque neste instante é :

$$T_{v1} = \frac{3}{\omega_0} I_{v1}^2 \frac{r_{d1}}{s_1} = \frac{3 \times 30 \times (57,2)^2 \times (6,25 + 0,15)}{\pi \times 900 \times 2,248} \text{ Nm} = 294 \text{ Nm}$$

O momento dinâmico de desaceleração é dado por :

$$0 < T_d = T_E - T_c = J \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 J \frac{ds}{dt}$$

sendo o torque elétrico expresso por

$$T_E = \frac{T_c}{s_2} s$$

e o deslizamento

$$s'_2 = \frac{n_0 + 1,05 n_2}{n_b} = \frac{900 + 1,05 \times 518,4}{900} = 1,6$$

porque no ponto s_2 tem-se $T_d = 0$, o tempo gasto na variação de velocidade é :

$$t_{v1} = -\omega_0 J_3 \int_{s=s_1}^{s=s'_2} \frac{ds}{T_E - T_c} = \frac{-\omega_0 J_3 s_2}{T_c} \ln \frac{s'_2 - s_2}{s_1 - s_2} =$$

$$= \frac{-\pi \times 900 \times 1,73}{30 \times 205} \times 1,58 \ln \frac{1,6 - 1,58}{0,248 - 1,58} \text{ s} = 4,4 \text{ s}$$

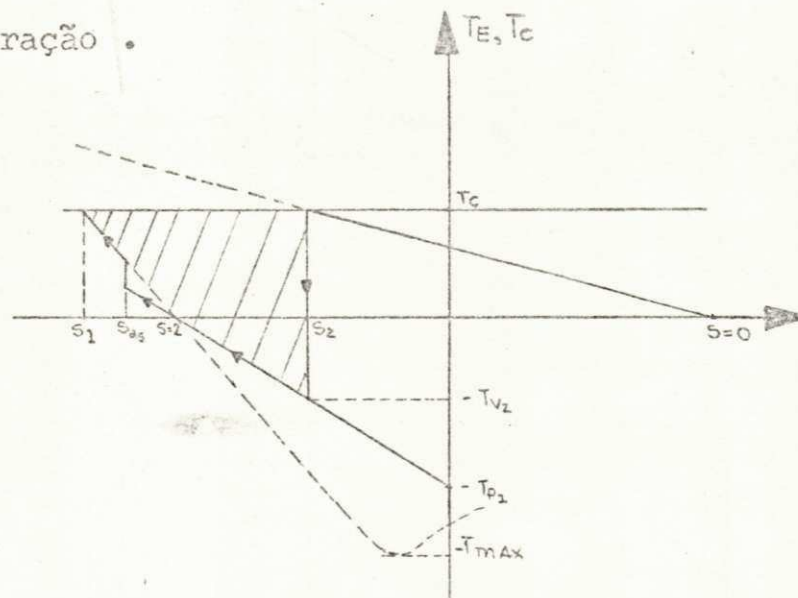
A aceleração média durante a variação de velocidade de de v_1 para v_2 é :

$$\left(\frac{\overline{dv}}{dt}\right) = \frac{1}{t_{v_2} - t_{v_1}} \int_{t_{v_1}}^{t_{v_2}} \frac{dv(t)}{dt} dt = \frac{v_2 - v_1}{t_{v_2} - t_{v_1}} = \frac{0,048 - 0,104}{4,4} \text{ m/s}^2 =$$

$$\cong -0,013 \text{ m/s}^2 < \left(\frac{dv}{dt}\right)_{\text{max}} = 2 \text{ m/s}^2$$

4 - 13.2 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE v_2 PARA A VELOCIDADE v_1

A fig.(4-17) mostra a variação da característica mecânica do motor durante a troca de velocidade de v_2 para v_1 . A área sombreada na figura representa o momento dinâmico de aceleração.



característica mecânica do motor durante variação de velocidade de v_2 para v_1
fig.(4-17)

No instante inicial da troca de característica mecânica, o motor entra na característica do primeiro degrau de aceleração do freio regenerativo. Num tempo $t_5 = 0,43$ s depois, a resistência adicional é trocada e o motor passa a funcionar na sua característica mecânica de regime permanente. Neste instante inicial tem-se:

$$I_{V2} = \frac{E_2 (2 - s_2)}{3 r_{d4}} = \frac{280(2 - 1,58)}{3(1,36 + 0,15)} \text{ A} = 45 \text{ A}$$

E o torque correspondente é:

$$T_{V2} = \frac{3}{\omega_0} \frac{(I_{V2})^2 r_{d4}}{2 - s_2} = \frac{3 \times 30 \times (45)^2 (1,36 + 0,15)}{\pi \times 900 \times (2 - 1,58)} \text{ Nm} = 232 \text{ Nm}$$

No tempo $t_5 = 0,43$ s, o deslizamento do motor é calculado por meio da equação (B-40), ou

$$t_5 = -\frac{\omega_0 J_3}{T_{P1}} \ln \frac{(2 - s_{a5}) + \frac{T_c}{T_{P2}}}{(2 - s_2) + \frac{T_c}{T_{P2}}}$$

e o deslizamento s_{a5} é:

$$\begin{aligned} s_{a5} &= \left(\frac{T_c}{T_{P1}} + 2 \right) \left(1 - e^{-\frac{t_5 T_{P1}}{\omega_0 J_3}} \right) + s_2 e^{-\frac{t_5 T_{P2}}{\omega_0 J_3}} = \\ &= \left(\frac{205}{438} + 2 \right) \left(1 - e^{-\frac{0,43 \times 438 \times 30}{\pi \times 900 \times 1,73}} \right) + 1,58 e^{-\frac{0,43 \times 438 \times 30}{\pi \times 900 \times 1,73}} = 2,2 \end{aligned}$$

No ponto de deslizamento s_{a5} a resistência de aceleração é cortada, e o tempo para o motor encontrar o regime permanente é calculado pela equação (B-45), onde

$$s_1' = 2,24$$

Portanto, tem-se:

$$t_{12} = \frac{W_2 J_3 (2 - s_2)}{T_c} \ln \frac{(2 - s_1) - (2 - s_2)}{(2 - s_3) - (2 - s_1)} =$$

$$= \frac{11 \times 900 \times 1,73}{30 \times 205} (2 - 2,248) \ln \frac{(2 - 2,24) - (2 - 2,248)}{(2 - 2,2) - (2 - 2,248)} \text{ s} = 0,354 \text{ s}$$

O ponto $s_1^* = 2,24$ é arbitrariamente escolhido pelo autor, correspondente a mais de 95% da velocidade n_1 , mas sendo menor do que s_1 . O deslizamento anteriormente escolhido, $s_1^* = 2,185$, correspondente a 95% da velocidade n_1 é menor do que o deslizamento s_{a5} . Pode-se então afirmar que, quando a resistência de aceleração é cortada, o motor já está trabalhando na sua velocidade de regime permanente.

A aceleração média durante a variação de velocidade de v_2 para v_1 é:

$$\left(\frac{dv}{dt} \right) = \frac{1}{t_5} \int_{t=0}^{t=t_5} \frac{dv(t)}{dt} dt = \frac{v_1 - v_2}{t_5} \cong \frac{0,104 - 0,048}{0,43} \text{ m/s}^2 =$$

$$= 0,13 \text{ m/s}^2 < \left(\frac{dv}{dt} \right)_{\max} = 2 \text{ m/s}^2$$

Para a variação de velocidade de v_2 para v_1 , outra alternativa poderia ser escolhida. Esta alternativa é do ponto s_2 entrar diretamente na característica mecânica de regime permanente do freio regenerativo, sem passar pela característica correspondente à resistência de acelera-

ção . No entanto , esta forma tráz maior complexidade ao circuito de comando , dando-se preferência ao método acima exposto e calculado .

4 - 14. CIRCUITO DE ACIONAMENTO DO GUINDASTE

O guindaste é também acionado por controle remoto . O comando da aceleração em cada movimento é solucionado por relés de tempo . O operador simplesmente maneja quatro botões . Um botão comanda a aceleração do movimento de elevação , dois outros comandam os movimentos de descida com velocidades v_1 e v_2 , e o quarto botão aciona o freio para todos os movimentos .

4 - 14.1 DIAGRAMA DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO

As figs.(4-18.a) e (4-18.b) apresentam o diagrama ideal (apend.E,art(E-1)) do circuito de acionamento do motor M_3 . A numeração ao lado do diagrama denomina os seguintes circuitos :

- circuito (1) - comando do freio eletromagnético
- circuito (2) - comando do movimento de elevação
- circuito (3) - comando do freio do movimento de elevação
- circuito (4) - comando do freio dos movimentos de descida
- circuito (5) - comando do movimento de descida com velocidade v_1

- Movimento de Descida com Velocidade v_1 Aceleração

Ação : L_6^+ , P_8^{++} , (L_6^-) , S_3^{+++} , H_3^{+++} , FE_3^{+++} , C_8^{+++} ,
 C_{12}^{+++} , $A_6^{++}(d)$, C_{13}^{++}

Freio por Acionamento de F_3

Condições Iniciais : P_8^+ , S_3^+ , H_3^+ , FE_3^+ , C_8^+ ,
 C_{12}^+ , A_6^+ , C_{13}^+

Ação : F_3^+ , Q_4^+ , (F_3^-) , P_8^- , C_8^- , C_{12}^- , A_6^- , C_{13}^- ,
 C_7^+ , C_{14}^+ , $A_7^+(d)$, S_3^- , H_3^- , FE_3^- , Q_4^- ,
 C_7^- , C_{14}^- , A_7^-

Freio por Acionamento do Relé de Fim de Curso T_6

Condições Iniciais : P_8^+ , S_3^+ , H_3^+ , FE_3^+ , C_8^+ ,
 C_{12}^+ , A_6^+ , C_{13}^+

Ação : T_6^{++} , Q_4^+ , P_8^- , C_8^- , C_{12}^- , A_6^- , C_{13}^- , C_7^+ ,
 C_{14}^+ , $A_7^+(d)$, S_3^- , H_3^- , FE_3^- , Q_4^- , C_7^- , C_{14}^- ,
 A_7^-

- Movimento de Descida com Velocidade v_2 Aceleração

Ação : L_7^+ , P_9^{++} , (L_7^-) , S_3^{+++} , H_3^{+++} , FE_3^{+++} , C_7^{+++} ,
 C_{15}^{++}

Freio por Acionamento de F_3

Condições Iniciais : P_9^+ , S_3^+ , H_3^+ , FE_3^+ , C_7^+ , C_{15}^+

Ação : F_3^+ , Q_4^+ , (F_3^-) , P_9^- , C_{15}^- , C_{14}^+ , $A_7^+(d)$,
 S_3^- , H_3^- , FE_3^- , Q_4^- , C_7^- , C_{14}^- , A_7^-

Freio por Acionamento do Relé de Fim de Curso T₆Condições Iniciais : P₉⁺, S₃⁺, H₃⁺, FE₃⁺, C₇⁺, C₁₅⁺Ação : T₆⁺⁺, Q₄⁺, P₉⁻, C₁₅⁻, C₁₄⁺, A₇^{+(d)}, S₃⁺, H₃⁻,
FE₃⁻, Q₄⁻, C₇⁻, C₁₄⁻, A₇⁻- Variação de velocidade de v₁ para v₂ no Movimento de Des-
cidaCondições Iniciais : P₈⁺, S₃⁺, H₃⁺, FE₃⁺, C₈⁺, C₁₂⁺,
A₆⁺, C₁₃⁺Ação : L₇⁺, P₈⁻, C₈⁻, C₁₂⁻, A₆⁻, C₁₃⁻, P₉⁺⁺, (L₇⁻),
C₇⁺⁺, C₁₅⁺⁺- Variação de velocidade de v₂ para v₁ no Movimento de Des-
cidaCondições Iniciais : P₉⁺, S₃⁺, H₃⁺, FE₃⁺, C₇⁺, C₁₅⁺Ação : L₆⁺, P₉⁻, C₇⁻, C₁₅⁻, P₈⁺⁺, C₈⁺⁺, C₁₂⁺⁺, A₆⁺⁺
(d), C₁₃⁺⁺

4 - 14.2 FUNÇÃO DOS DISPOSITIVOS DO CIRCUITO DE ACIO-
NAMENTO

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
L ₅	botão	1 NA (1,2)	comando do circuito (2)
L ₆	botão	1 NA (1,2) 1 NF (3,4)	comando do circuito (5) bloqueio entre os circuitos (5) e (6)
L ₇	botão	1 NA (1,2) 1 NF (3,4)	comando do circuito (6) bloqueio entre os circuitos (5) e (6)
E ₃	botão	1 NA (1,2)	comando dos circuitos (3) e (4)
P ₇	relé	1 NA (1,2) 1 NF (3,4) 1 NF (5,6) 1 NA (7,8) 1 NA (9,10) 1 NA (11,12)	alimentação do circuito (2) bloqueio entre o circuito (2) e os circuitos (4), (5) e (6) bloqueio entre os circuitos (3) e (2) para T ₆ + comando dos relés H ₃ e S ₃ comando do contactor C ₇ comando dos relés de tempo A ₃ , A ₄ e A ₅ e do contactor C ₉

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
P ₈	relé	1 NA (1,2)	alimentação do circuito (5)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre o circuito (5) e os circuitos (2) e (3)
		1 NF (5,6)	bloqueio entre os circuitos (5) e (6) para T ₅₊
		1 NA (7,8)	comando dos relés H ₃ e S ₃
		1 NA (9,10)	comando do contactor C ₈
		1 NA (11,12)	comando do relé de tempo A ₆ e do contactor C ₁₂
P ₉	relé	1 NA (1,2)	alimentação do circuito (6)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre o circuito (6) e os circuitos (2) e (3)
		1 NF (5,6)	bloqueio entre os circuitos (6) e (4) para T ₅₊
		1 NA (7,8)	comando dos relés H ₃ e S ₃
		1 NA (9,10)	comando do contactor C ₇
		1 NA (11,12)	comando do contactor C ₉
Q ₃	relé	1 NA (1,2)	alimentação do circuito (3)

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
Q ₄	relé	1 NF (3,4)	abertura do circuito (2)
		1 NF (5,6)	bloqueio entre os circuitos (3) e (4)
		1 NA (1,2)	alimentação do circuito (4)
		1 NF (3,4)	abertura dos circuitos (5) e (6)
		1 NF (5,6)	bloqueio entre os circuitos (4) e (3)
		1 NA (7,8)	comando dos relés H ₃ e S ₃
		1 NA (9,10)	comando do contactor C ₇
H ₃	relé	1 NA (11,12)	comando do relé de tempo A ₇ e do contactor C ₁₃
		1 NA (1,2)	alimentação do circuito (1)
S ₁	relé	1 NA (3,4)	abertura dos circuitos (3) e (4)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre os motores M ₁ e M ₃
S ₂	relé	1 NF (3,4)	bloqueio entre os motores M ₂ e M ₃

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
S ₃	relé	1 NF (1,2)	bloqueio entre os motores M ₃ e M ₁ , fig(2-11)
		1 NF (3,4)	bloqueio entre os motores M ₃ e M ₂ , fig.(3-5)
A ₃	relé de tempo	1 NF (1,2)	abertura do contactor C ₉
A ₄	relé de tempo	1 NA (1,2)	comando do contactor C ₁₀
A ₅	relé de tempo	1 NA (1,2)	comando do contactor C ₁₁
A ₆	relé de tempo	1 NA (1,2)	comando do contactor C ₁₃
A ₇	relé de tempo	1 NF (1,2)	abertura dos relés H ₃ e S ₃
SC ₃	relé de sobre corrente	1 NF (1,2)	abertura dos circuitos (2), (3), (4), (5) e (6)

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
ST ₃	relé de sub-tensão	1 NA (1,2)	alimentação do circuito de comando
T ₅	relé de fim de curso	1 NF (1,2) 1 NA (3,4)	abertura do circuito (2) comando do circuito (3)
T ₆	relé de fim de curso	1 NF (1,2) 1 NA (3,4)	abertura dos circuitos (5) e (6) comando do circuito (4)
C ₇	contacto	3 NA (1,2)(3,4)(5,6) 1 NF (7,8)	alimentação do motor nos movimentos de elevação, descida com velocidade v_2 e freio dos movimentos de descida bloqueio contra o acionamento simultâneo dos contactores C ₇ e C ₈
C ₈	contacto	3 NA (1,2)(3,4)(5,6)	alimentação do motor no movimento de descida com velocidade v_1

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
C ₉	contac- tor	3 NF (1,2)(3,4) (5,6)	inclusão das resistências R ₃ no circuito do rotor
C ₁₀	contac- tor	3 NA (1,2)(3,4) (5,6)	corde das resistências R ₄ do circuito do rotor
C ₁₁	contac- tor	3 NA (1,2)(3,4) (5,6)	corde das resistências R ₅ do circuito do rotor
C ₁₂	contac- tor	3 NF (1,2)(3,4) (5,6)	inclusão das resistências R ₆ no circuito do rotor
C ₁₃	contac- tor	3 NA (1,2)(3,4) (5,6)	corde das resistências R ₄ e R ₅ do circuito do rotor
C ₁₄	contac- tor	3 NF (1,2)(3,4) (5,6)	inclusão das resistências R ₇ no circuito do rotor
C ₁₅	contac- tor	3 NF (1,2)(3,4) (5,6)	inclusão das resistências R ₈ no circuito do rotor
FE ₃	freio e- letromág- netico	1 NA (1,2)	bloqueio entre o aciona- mento do motor e o freio eletromagnético

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
E ₅	chave faca	1 trifásico	alimentação do circuito principal
E ₆	chave faca	1 monofásico	alimentação do circuito de comando
D ₈	fusível		proteção do circuito principal , fase <u>a</u>
D ₉	fusível		proteção do circuito principal , fase <u>b</u>
D ₁₀	fusível		proteção do circuito principal , fase <u>c</u>
D ₁₁	fusível		proteção do circuito de comando
R ₃	resistência		auxiliar do circuito (2)
R ₄	resistência		auxiliar dos circuitos(2), (4) , (5) e (6)

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
R ₅	resis- tência		auxiliar dos circuitos(2) (4) , (5) e (6)
R ₆	resis- tência		auxiliar do circuito (5)
R ₇	resis- tência		auxiliar do circuito (4)
R ₈	resis- tência		auxiliar do circuito (6)
N ₁₁	lâmpada cor ver melha		sinalização: fases <u>a</u> e <u>b</u> energizadas
N ₁₂	lâmpada cor ver melha		sinalização: fases <u>a</u> e <u>c</u> energizadas
N ₁₃	lâmpada cor ver melha		sinalização: fases <u>b</u> e <u>c</u> energizadas

Dispositivo		Contactos	Função
Símbolo	Nome		
N ₁₄	lâmpada cor ver melha		sinalização: circuito de comando energizado
N ₁₅	lâmpada cor ver de		sinalização: circuito (2) energizado
N ₁₆	lâmpada cor ver de		sinalização: circuito (5) energizado
N ₁₇	lâmpada cor ver de		sinalização: circuito (6) energizado

Informações suplementares relacionadas com o projeto de acionamento do guindaste são fornecidas nos capítulos 5 e 6 e no apêndice D .

CAPÍTULO 5INSTRUÇÕES DE OPERAÇÃOSÍMBOLOS E UNIDADES

<u>SÍMBOLO</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
T_o	torque de vazio	Nm, Ws
T_c	torque da carga nominal	Nm, Ws
v_o	velocidade de vazio	m/s
x_i	distância	m
x_{M_i}	menor distância alcançada pela ponte, trolley ou gancho do correspondente terminal de curso	m
x_{M_i}	distância de colocação dos relés de fim de curso	m

5 - 1. INTRODUÇÃO

Para o operador é necessário fornecer algumas instruções de operação , as quais possibilitam o uso adequado do sistema da ponte-rolante .

Um conjunto de lâmpadas de sinalização fornecem ao operador informações quanto ao funcionamento normal do sistema , e também quanto às possíveis condições de anomalia que possam ocorrer . Portanto , estas lâmpadas facilitam , para o operador , encontrar um defeito que por ventura ocorra no sistema .

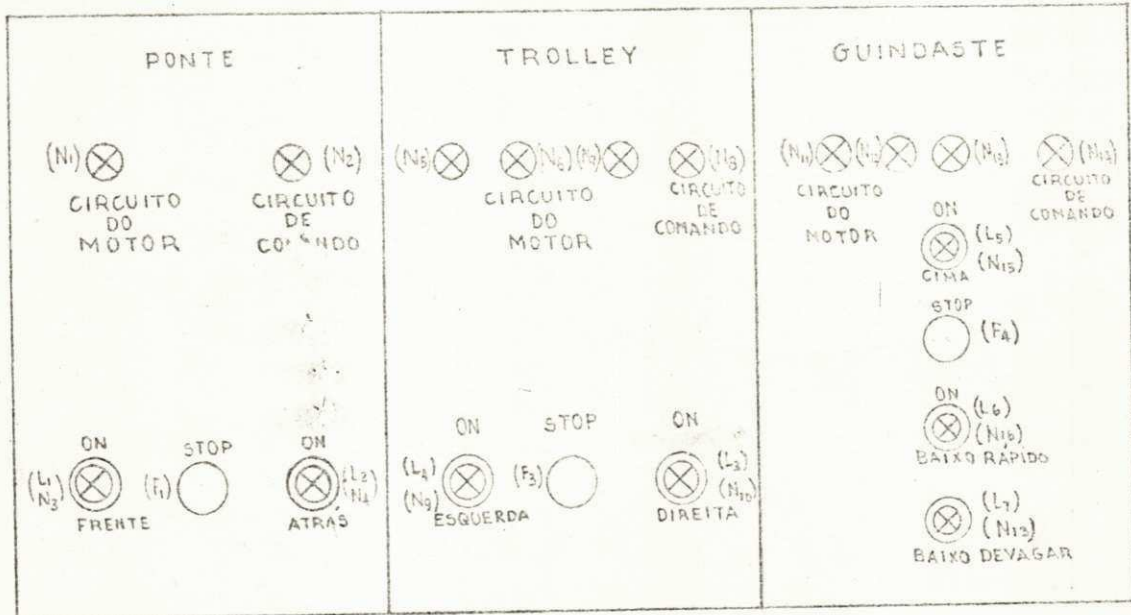
Também é necessário para o operador conhecer os limites de carga que o sistema pode acionar , e ainda os limites de distância, determinados pelos relés de fim de curso .

Todas estas informações suplementares , necessá-rias à operação adequada do sistema , são apresentadas a seguir .

5 - 2. DISPOSIÇÃO DOS BOTÕES E LÂMPADAS DE SINALIZA-
ÇÃO NO QUADRO DE COMANDO

A fig.(5-1) mostra a disposição dos botões e lâmpadas de sinalização no quadro de comando . Apenas para efeito de reconhecimento do operador , na fig.(5-1) aparece, entre parênteses e à esquerda de cada elemento , a sua respectiva denominação . Na construção real do quadro de comando esta denominação é colocada no interior do quadro , no

seu chassis .



quadro de comando
fig.(5-1)

5 - 3. INDICAÇÕES DAS LÂMPADAS DE SINALIZAÇÃO

As indicações fornecidas pelas lâmpadas de sinalização dos circuitos de acionamento da ponte, trolley e do guindaste são descritas respectivamente nas tabelas (5-1) e (5-2), (5-3) e (5-4), (5-5) e (5-6): Para todos os tres movimentos, as indicações das tabelas são fornecidas considerando-se que:

- as chaves manuais denominadas E_i estão fechadas;
- as lâmpadas de sinalização estão perfeitas;
- os contactos e conexões do circuito estão perfeitos.

5 - 3.1 PONTE

Tabela (5-1)

Funcionamento Normal

Lâmpadas				Motor	Botões		INDICAÇÕES
N_1	N_2	N_3	N_4	M_1	L_1	L_2	
+	+						circuitos principal e de comando energizados
+	+	+		acionado	+		circuito de acionamento para frente energizado
+	+		+	acionado		+	circuito de acionamento para trás energizado

Tabela (5-2)
Funcionamento Anormal

Lâmpadas				Motor	Botões		INDICAÇÕES
N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	M ₁	L ₁	L ₂	
-	-						fusíveis D ₁ e, ou, D ₂ queimados
+	-						contacto do relé de sub-tensão aberto, ou fusível D ₃ queimado
+	+	-	-	trava do	+	+	contacto do relé de sobre-corrente SC ₁ aberto
+	+	+		trava do	+		freio eletromagnético bloqueando o motor
+	+		+	trava do		+	freio eletromagnético bloqueando o motor

5 - 3.2 TROLLEY

Tabela (5-3)
Funcionamento Normal

Lâmpadas						Motor	Botões		INDICAÇÕES
N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	M ₂	L ₃	L ₄	
+	+	+	+						circuitos principal e de comando energizados

Tabela (5-3) - continuação

Lâmpadas						Motor	Botões		INDICAÇÕES
N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	M ₂	L ₃	L ₄	
+	+	+	+	+		acio nado	+		circuito de acionamento para direita energizado
+	+	+	+		+	acio nado		+	circuito de acionamento para esquerda energiza do

Tabela (5-4)

Funcionamento Anormal

Lâmpadas						Motor	Botões		INDICAÇÕES
N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	M ₂	L ₃	L ₄	
-	-	+							fusível D ₄ queimado
-	+	-							fusível D ₅ queimado
+	-	-							fusível D ₆ queimado
+	+	+	-						contacto do relé de sub- tensão ST ₂ aberto, ou fu sível D ₇ queimado
+	+	+	+	-	-	trava do	+	+	contacto do relé de so- bre-corrente SC ₂ aberto
+	+	+	+	+		trava do	+		freio eletromagnético bloqueando o motor
+	+	+	+		+	trava do		+	freio eletromagnético bloqueando o motor

5 - 3.3 GUINDASTE

Tabela (5-5)
Funcionamento Normal

Lâmpadas							Motor	Botões			INDICAÇÕES
N ₁₁	N ₁₂	N ₁₃	N ₁₄	N ₁₅	N ₁₆	N ₁₇	M ₃	L ₅	L ₆	L ₇	
+	+	+	+								circuitos principal e de comando energizados
+	+	+	+	+			acionado	+			circuito de acionamento para elevação energizado
+	+	+	+		+		acionado		+		circuito de acionamento para descida rápida energizado
+	+	+	+			+	acionado			+	circuito de acionamento para descida lenta energizado

Tabela (5-6)
Funcionamento Anormal

Lâmpadas							Motor	Botões			INDICAÇÕES
N ₁₁	N ₁₂	N ₁₃	N ₁₄	N ₁₅	N ₁₆	N ₁₇	M ₃	L ₅	L ₆	L ₇	
-	-	+									fusível D ₈ queimado
-	+	-									fusível D ₉ queimado
+	-	-									fusível D ₁₀ queimado

Tabela (5-6) - continuação

Lâmpadas							Motor	Botões			INDICAÇÕES
N ₁₁	N ₁₂	N ₁₃	N ₁₄	N ₁₅	N ₁₆	N ₁₇	M ₃	L ₅	L ₆	L ₇	
+	+	+	-								contacto do relé de sub-tensão ST ₃ aberto ou fusível D ₁₁ ³ queimado
+	+	+	+	-	-	-	trava <u>do</u>	+	+	+	contacto do relé de sobre-corrente SC ₃ aberto
+	+	+	+	+			trava <u>do</u>	+			freio eletromagnético bloqueando o motor
+	+	+	+		+		trava <u>do</u>		+		freio eletromagnético bloqueando o motor
+	+	+	+			+	trava <u>do</u>			+	freio eletromagnético bloqueando o motor

5 - 4. LIMITE DE CARGA MÍNIMA NOS MOVIMENTOS5 - 4.1 PONTE

O acionamento da ponte em vazio significa o acionamento da ponte quando o guindaste está sem carga. A velocidade de vazio da ponte é, (art.(2-7)) ;

$$v_0 = 0,55 \text{ m/s}$$

Portanto não há limite de carga mínima no acionamento da ponte .

5 - 4.2 TROLLEY

Tal como no caso da ponte , o acionamento do trolley em vazio corresponde ao acionamento quando o guindaste não tem carga amarrada ao gancho . A velocidade de vazio do trolley é , (art.(3-10)) :

$$v_0 = 0,62 \text{ m/s}$$

Conseqüentemente , também aqui não há limite de carga mínima .

5 - 4.3 GUINDASTE

5 - 4.3.1 MOVIMENTO DE ELEVACÃO

Se o guindaste atua sem carga no movimento de elevação , a velocidade do gancho é , (art.(4-8.3)) :

$$v_0 = 0,082 \text{ m/s}$$

Para este movimento não há limite de carga mínima .

5 - 4.3.2 MOVIMENTO DE DESCIDA RÁPIDO

Durante o movimento de descida com velocidade v_1 , ou movimento de descida rápido, o motor atua em regime permanente regenerativo. Desta forma não há limite de carga mínimo. O caso extremo, quando o motor atua em vazio, fornece uma velocidade do cabo de sustentação de, (art.(4-9.5.1)) :

$$v_0 = 0,082 \text{ m/s}$$

5 - 4.3.3 MOVIMENTO DE DESCIDA LENTO

Apenas neste movimento existe um limite de carga mínimo. Como calculado no artigo (4-10.5.1) a mínima carga admissível é :

$$T_0 = 0,8 T_c = 0,8 \times 205 \text{ Nm} = 164 \text{ Nm}$$

E a velocidade correspondente é :

$$v_0 = 0,021 \text{ m/s}$$

rantia quanto ao cumprimento desta ordem de acionamento. Estas formas simplificadas oferecem então o risco de , durante qualquer um dos movimentos , falharem as imposições requeridas pelas soluções do projeto .

Os circuitos de acionamento de cada movimento do sistema são eletricamente bloqueados entre si , para evitar a possibilidade de operação de dois ou mais motores simultaneamente .

Todas as operações do sistema são sinalizadas por meio de lâmpadas indicativas , as quais informam ao operador as condições de funcionamento normal do sistema , e também as possíveis condições de anormalidade , facilitando o reconhecimento da causa de um defeito .

Todas as soluções do sistema de proteção elétrica são baseadas em normas brasileiras (5) e em recomendações estrangeiras (10 , 11) . A proteção mecânica do sistema é constituída por relés de fim de curso em todos os movimentos , e freios eletromagnéticos acoplados a cada motor .

Os motores de acionamento utilizados no sistema total da ponte-rolante são :

- ponte - motor série DC (M_1)
- trolley - motor de indução trifásico de gaiola (M_2)
- guindaste - motor de indução trifásico de aneis (M_3)

Esta escolha faz parte dos requisitos exigidos do autor nas especificações do projeto , e é justificada pela boa adapta

5 - 5. DISTÂNCIAS MÍNIMAS DOS FINS DE CURSO NOS MOVIMENTOS

5 - 5.1 PONTE

Em ambas as direções de movimento no acionamento da ponte, a menor distância alcançada entre a ponte e os extremos dos trilhos é dada por, (art.(2-11)) :

$$\begin{aligned} X_{O-M_1} &= x_{M_1} - (x_1' - x_2') = (1,00 - (0,81 - 0,074))m = \\ &= 0,116 \text{ m} \end{aligned}$$

se a ponte atua em vazio .

Atuando com plena carga, a menor distância atingida é :

$$\begin{aligned} X_{M_1} &= x_{M_1} - (x_1 - x_2) = (1,00 - (0,55 - 0,16))m = \\ &= 0,434 \text{ m} \end{aligned}$$

5 - 5.2 TROLLEY

Nas duas direções de acionamento do trolley a menor distância alcançada entre o trolley e os extremos dos seus trilhos é para o acionamento em vazio . Esta distância é dada por, (art.(3-10)) :

$$\begin{aligned}
 X_{O-M_2} &= x_{M_2} - (x_1' - x_2') = (1,30 - (0,597 - 0,47))m = \\
 &= 0,233 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Se o trolley é acionado com plena carga , a menor distância entre os extremos dos trilhos e o trolley é :

$$\begin{aligned}
 X_{M_2} &= x_{M_2} - (x_1 - x_2) = (1,30 - (0,763 - 0,025))m = \\
 &= 0,512 \text{ m}
 \end{aligned}$$

5 - 5.3 GUINDASTE

5 - 5.3.1 MOVIMENTO DE ELEVAÇÃO

A menor distância alcançada entre o gancho e o final do curso do cabo , no acionamento do guindaste em movimento de elevação , é para o acionamento do motor em vazio. Neste caso tem-se , (art.(4-8.3)) :

$$\begin{aligned}
 X_{O-1-M_3} &= x_{1-M_3} - x_1' = (0,10 - 0,015) \text{ m} = \\
 &= 0,085 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Se o guindaste atua a plena carga no movimento de elevação , tem-se :

$$\begin{aligned}
 X_{1-M_3} &= x_{1-M_3} - x_1 = (0,10 - 0,0093) \text{ m} = \\
 &= 0,0907 \text{ m}
 \end{aligned}$$

5 - 4.3.2 MOVIMENTO DE DESCIDA RÁPIDO

Se o guindaste é atuado em vazio , com o motor trabalhando em regime permanente regenerativo , a menor distância alcançada entre o gancho e o solo de apoio é , (art. (4-12)) :

$$\begin{aligned} X_{0-2-M_3} &= x_{2-M_3} - x_5 = (0,14-0,018) \text{ m} = \\ &= 0,122 \text{ m} \end{aligned}$$

Para o mesmo movimento com o guindaste atuando em plena carga , a menor distância atingida é :

$$\begin{aligned} X_{0-2-M_3} &= x_{2-M_3} - x_5 = (0,14-0,046) \text{ m} = \\ &= 0,094 \text{ m} \end{aligned}$$

5 - 4.3.3 MOVIMENTO DE DESCIDA LENTO

Para descer uma carga com velocidade v_2 , ou em movimento de descida lento , o motor atua em regime permanente de freio por inversão . A menor carga admissível neste regime é 80% da carga nominal . Para esta carga , a menor distância atingida , entre o gancho e o solo de apoio , é (art. (4-12)) :

$$\begin{aligned} X'_{0-2-M_3} &= x_{2-M_3} - x_{10} = (0,14-0,005) \text{ m} = \\ &= 0,135 \text{ m} \end{aligned}$$

Quando o guindaste atua com plena carga , a menor distância atingida é :

$$\begin{aligned}x'_{2-M_3} &= x_{2-M_3} - x_9 = (0,14 - 0,02) \text{ m} = \\ &= 0,120 \text{ m}\end{aligned}$$

ESPECIFICAÇÕES DOS DISPOSITIVOS USADOS NOS
CIRCUITOS DE ACIONAMENTO

<u>QUANT.</u>	<u>SÍMBOLO</u>	<u>NOME</u>	<u>FABRICANTE</u>	<u>TIPO</u>	<u>CARACTER. TÉCNICAS</u>
5	L ₁ - N ₃ L ₂ - N ₄ L ₃ - N ₉ L ₄ - N ₁₀ L ₅ - N ₁₅	botão com lâm- pada ver de	Telemecâni- ca Elétri- ca S.A.	ZB2 - AW072 ZB2 - AW 33	contacto; 1NA ; 220 V , 60 c/s
2	L ₆ - N ₁₆ L ₇ - N ₁₇	botão com lâm- pada ver de	Telemecâni- ca Elétri- ca S.A.	ZB2 - AW075 ZB2 - AW 33	contactos; 1NA- 1NF; 220 V, 60c/s
3	F ₁ , F ₂ , F ₃	botão	Telemecâni- ca Elétri- ca S.A.	XB2 - AA21	contacto ; 1NA; 220 V , 60 c/s
4	P ₁ , P ₂ P ₅ , P ₆	relé	Siemens do Brasil, S.A	3TA66- 120A	contactos; 5NA- 5NF; 220V, 60c/s, 5 A bobina; 220V, 60c/s

QUANT.	SÍMBOLO	NOME	FABRICANTE	TIPO	CARACTER. TÉCNICAS
9	P ₃ , P ₄ , Q ₃ H ₁ , H ₂ , H ₃ S ₁ , S ₂ , S ₃	relé	Siemens do Brasil S.A	3TA60 02-OA	contactos; 2NA - 2NF; 220 V , 5A 60 c/s bobina; 220V, 60c/s
4	P ₇ , P ₈ P ₉ , Q ₄	relé	Siemens do Brasil S.A	3TA65 01-OA	contactos; 4NA - 1NF; 220 V , 5A 60 c/s bobina; 220V, 60c/s
2	Q ₁ , Q ₂	relé	Siemens do Brasil S.A.	3TA60 01-OA	contactos; 3NA - 1NF; 220 V , 5A 60 c/s bobina; 220V, 60c/s
2	B ₁ , B ₂	relé de corrente DC			contactos; 1NA - 1NF; 220V , 5A 60 c/s bobina; corrente mínima de fecha- mento 68- 2%, cor- rente máxima de a bertura 38 2%; ca racterística dada na fig.(6-1); ten- são de isolamento 1 kW

<u>QUANT.</u>	<u>SÍMBOLO</u>	<u>NOME</u>	<u>FABRICANTE</u>	<u>TIPO</u>	<u>CARACTER. TÉCNICAS</u>
4	A ₁ , A ₄ A ₅ , A ₆	relé de tempo	Siemens do Brasil S. A.	7PN 40	contacto; 1NA; 220V 5A , 60c/s bobina; 220V, 60c/s faixa de ajuste 0,3 a 6 s ; calibres: 2s - A ₁ 1,38s - A ₄ 1,61s - A ₅ 0,43s - A ₆
3	A ₂ , A ₃ , A ₇	relé de tempo	Siemens do Brasil S. A.	7PN 40	contacto; 1NF; 220V 5A , 60c/s bobina; 220V, 60c/s faixa de ajuste 0,06 a 1,2 s ; calibres: 1s - A ₂ 0,92s - A ₃ 0,55s - A ₇
1	SC ₁	relé de sobrecorrente DC			contacto; 1NF; 220V 5A , 60c/s bobina; característica na fig.(6-2) tensão de isolamento 1 kV

<u>QUANT.</u>	<u>SÍMBOLO</u>	<u>NOME</u>	<u>FABRICANTE</u>	<u>TIPO</u>	<u>CARACTER. TÉCNICAS</u>
1	SC ₂	relé de sobre- corrente			contacto; 1NF; 220V 5A , 60c/s bobinas ; 3 ; ca- racterística na fig.(6-3); tensão de isolamento 1kv
1	SC ₃	relé de sobre- corrente			contacto; 1NF; 220V 5A , 60c/s bobinas ; 3 ; ca- racterística na fig.(6-4); tensão de isolamento 1KV
1	ST ₁	relé de sub- tensão DC			contacto; 1NA; 220V 25A , 60c/s bobina; 600V; ten- são máxima de a- bertura 540V, atra- zo no tempo de a- bertura t= 5 s
2	ST ₂ , ST ₃	relé de sub- tensão			contacto; 1NA; 220V 25A , 60c/s bobinas; 3 ; 380V 60c/s; tensão má-

QUANT.	SÍMBOLO	NOME	FABRICANTE	TIPO	CARACTER. TÉCNICAS
6	T ₁ , T ₂ , T ₃ T ₄ , T ₅ , T ₆	relé de fim de curso	Siemens do Brasil S. A.	3SE1 000-1	<p>xima de abertura 340V, atrazo no tem po de abertura t= = 5 s</p> <p>contactos; 1NA - 1NF; 220V, 60c/s , 5A</p> <p>distâncias de co- locação :</p> <p>T₁ - movimento pa ra frente</p> <p>T₂ - movimento pa ra trás</p> <p>$x_{M_1} = 1,0 \text{ m}$</p> <p>T₃ - movimento pa ra direita</p> <p>T₄ - movimento pa ra esquerda</p> <p>$x_{M_2} = 1,30 \text{ m}$</p> <p>T₅ - movimento de elevação</p> <p>$x_{1-M_3} = 0,10 \text{ m}$</p> <p>T₆ - movimento de descida</p> <p>$x_{2-M_3} = 0,14 \text{ m}$</p>

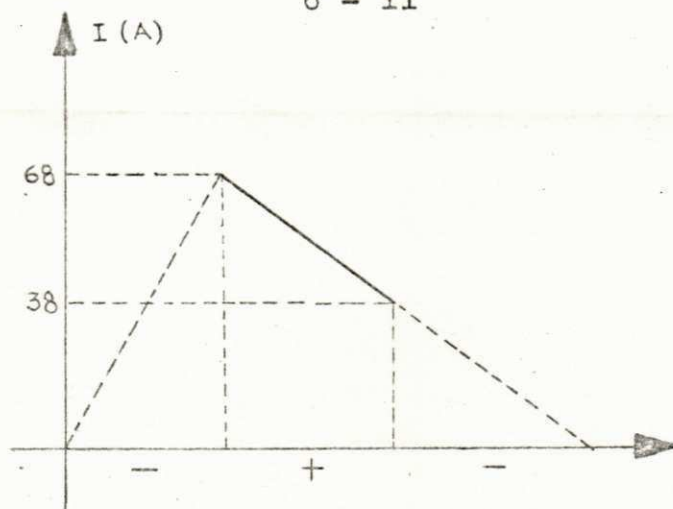
QUANT.	SÍMBOLO	NOME	FABRICANTE	TIPO	CARACTER. TÉCNICAS
2	C ₁ , C ₂	contac- tor			contactos; 2NA(1,2)(3,4) 600V DC, 50A 1NA (5,6)220V 60c/s , 10A bobina;220V,60c/s
2	C ₃ , C ₄	contac- tor			contactos;1NA(1,2) 600V DC,50A bobina;220V,60c/s
2	C ₅ , C ₆	contac- tor	Telemecâni ca Elétri- ca, S.A.	CNI CB 130	contactos;3NA;15A 380V , 60 c/s bobina;220V,60c/s
5	C ₇ ,C ₈ ,C ₁₀ C ₁₁ , C ₁₃	contac- tor	Telemecâni ca Elétri- ca, S.A.	CNI DB 133	contactos;3NA;65A 380V , 60c/s bobina;220V,60c/s
4	C ₉ , C ₁₂ C ₁₄ , C ₁₅	contac- tor	Telemecâni ca Elétri- ca, S.A.	CNI DB 133	contactos;3NF;65A 380V, 60c/s bobina;220V,60c/s
3	FE ₁ , FE ₂ FE ₃	freio eletro magné- tico			torque fornecido: FE ₁ - 290 Nm FE ₂ - 66 Nm

<u>QUANT.</u>	<u>SÍMBOLO</u>	<u>NOME</u>	<u>FABRICANTE</u>	<u>TIPO</u>	<u>CARACTER. TÉCNICAS</u>
					FE ₃ - 442 Nm bobina; 220V, 60c/s contacto mecânico auxiliar; 1NA, 5A 220V, 60c/s; diagra ma simplificado - fig.(6-5)
1	E ₁	chave faca			contactos; 2; 600 V DC, 50A
2	E ₂ , E ₆	chave faca			contactos; monofá- sico; 220V, 60c/s, 6A
1	E ₃	chave faca			contactos; trifási co; 380V , 60c/s , 15A
1	E ₄	chave faca			contactos; monofá- sico; 220V, 60c/s, 4A
1	E ₅	chave faca			contactos; trifási co; 380V , 60c/s , 65A

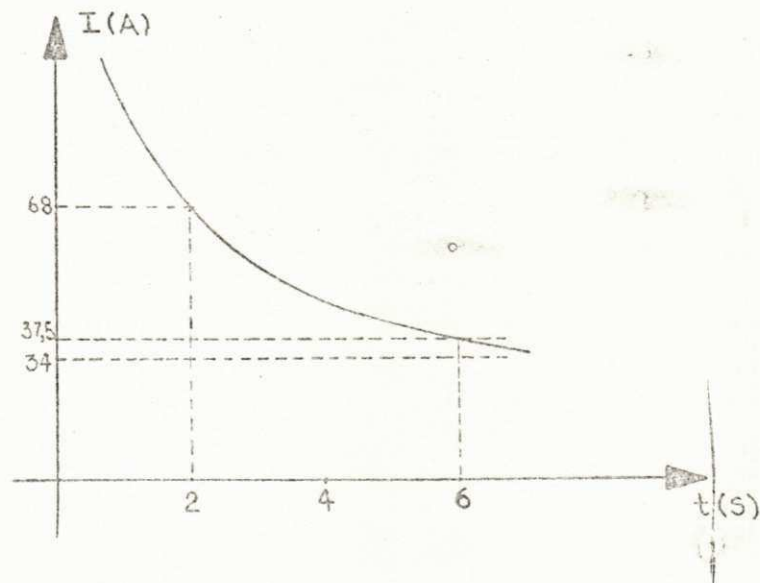
<u>QUANT.</u>	<u>SÍMBOLO</u>	<u>NOME</u>	<u>FABRICANTE</u>	<u>TIPO</u>	<u>CARACTER, TÉCNICAS</u>
2	D_1, D_2	fusível rápido	Siemens do Brasil S. A.	5 SB 321	600V DC, 50A, ca- racterística na fig.(6-6)
3	$D_4, D_5,$ D_6	fusível retarda do	Siemens do Brasil S. A.	5 SB 281	380V, 60c/s, 25A característica na fig.(6-7)
3	D_8, D_9 D_{10}	fusível rápido	Siemens do Brasil S. A.	5 SB 321	380V, 60c/s, 50A característica na fig.(6-6)
2	D_3, D_{11}	fusível	Siemens do Brasil S. A.	5 SB 131	220V, 60c/s, 6A
1	D_7	fusível	Siemens do Brasil S. A.	5 SB 121	220V, 60c/s, 4A
2	R_1, R_2	resis- tência			600V, DC, 100 W $R_1 = 4,23 - -$ $R_2 = 2,83 - -$
3	R_3	resis- tência			380V, 60c/s, 100W, 0,69 - -

<u>QUANT.</u>	<u>SÍMBOLO</u>	<u>NOME</u>	<u>FABRICANTE</u>	<u>TIPO</u>	<u>CARACTER. TÉCNICAS</u>
3	R ₄	resis- tência			380V, 60c/s, 300W 0,32 - -
3	R ₆	resis- tência			380V, 60c/s, 600W 0,86 - -
6	R ₅ , R ₇	resis- tência			380V, 60c/s, 200W (3)R ₅ = 0,13 - - (3)R ₇ = 3,46 - -
3	R ₈	resis- tência			380V, 60c/s, 5 kW 5,8 - -
1	N ₁	lâmpa- da cor verme- lha			600V DC
3	N ₂ , N ₈ N ₁₄	lâmpa- da cor verme- lha			220V , 60c/s
6	N ₅ , N ₆ N ₇ , N ₁₁ N ₁₂ , N ₁₃	lâmpa- da cor verme- lha			380V , 60c/s

<u>QUANT.</u>	<u>SÍMBOLO</u>	<u>NOME</u>	<u>FABRICANTE</u>	<u>TIPO</u>	<u>CARACTER. TÉCNICAS</u>
1	M_1	motor			motor série DC , 18 kW , 600V , 900 rpm
1	M_2	motor			motor de indução trifásico, gaiola de esquilo, 4 kW, 380V , 870 rpm
1	M_3	motor			motor de indução trifásico de a- neis , 20 kW, 380V 864 rpm
3		reductor de velo- cidade			$i = 75$, 18 kW, $\gamma =$ $= 0,91$, velocidade de entrada $n_n =$ $= 900$ rpm $i = 18,2$, 4 kW , $\gamma = 0,91$, veloci- dade de entrada $n_n = 870$ rpm $i = 344$, 20 kW , $\gamma =$ $= 0,91$, veloci- dade de entrada $n_n =$ $= 864$ rpm

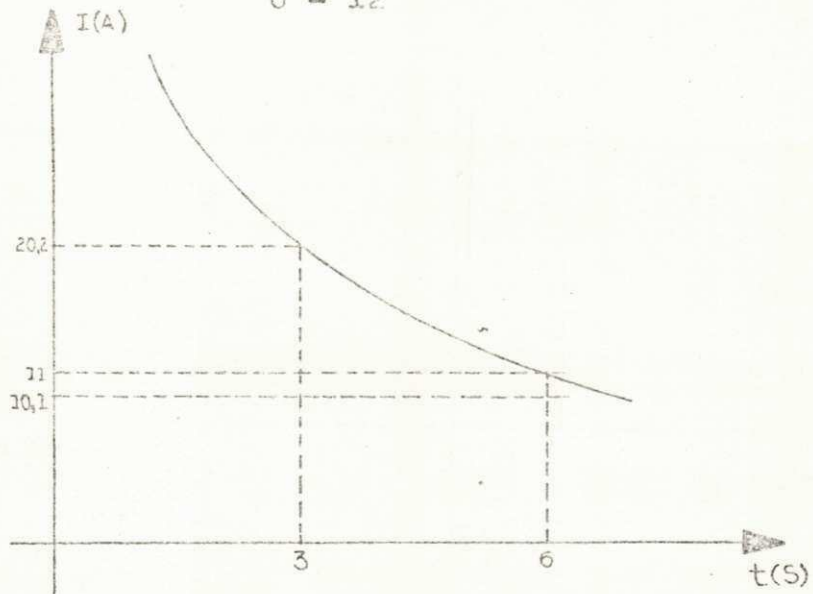


característica dos relés
de corrente B_1 e B_2
fig.(6-1)

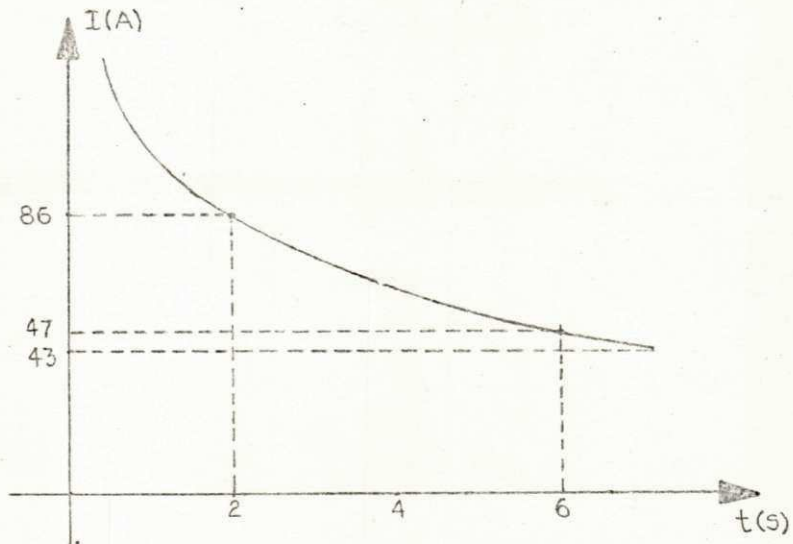


característica do relé de
sobrecorrente SC_1
fig.(6-2)

6 - 12



característica do relé de
sobre-corrente SC₂
fig.(6-3)



característica do relé de
sobre-corrente SC₃
fig.(6-4)

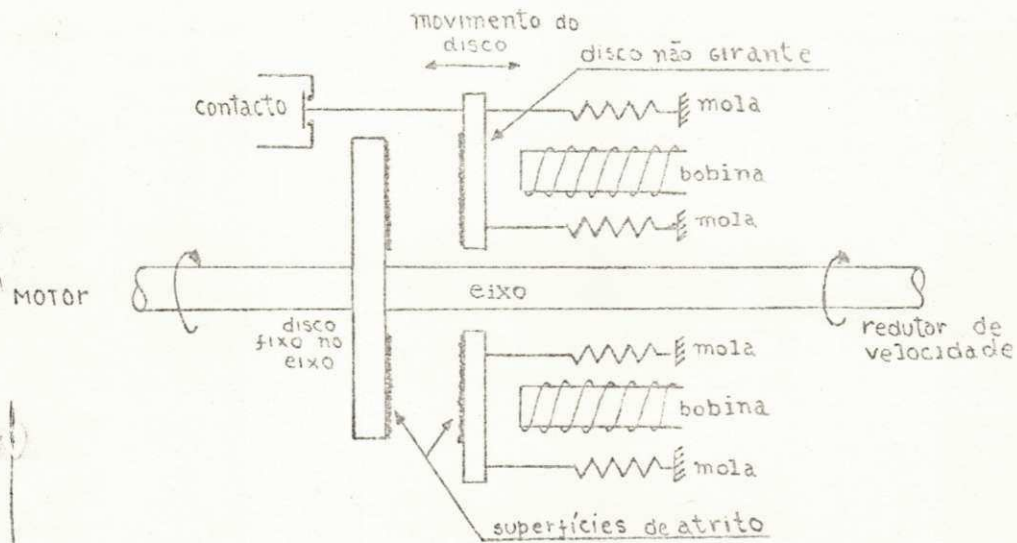


diagrama simplificado do freio
eletromagnético com o aciona-
mento do contacto mecânico

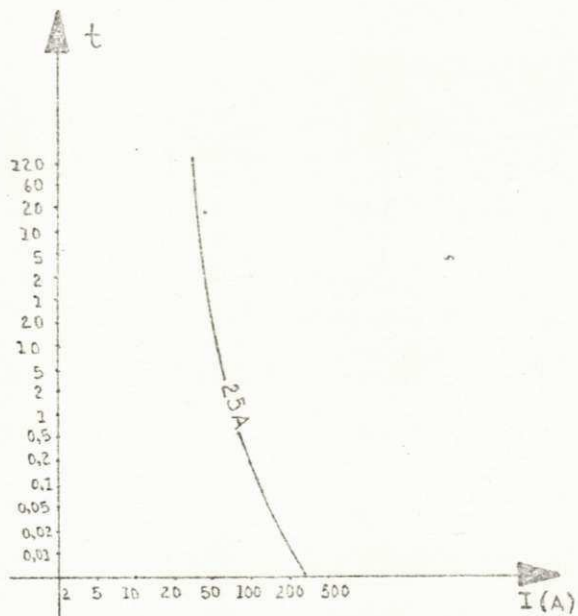
fig.(6-5)



característica dos fusíveis

D_1 , D_2 , D_8 , D_9 e D_{10}

fig.(6-6)



característica dos fusíveis

D_4 , D_5 e D_6

fig.(6-7)

CAPÍTULO 7CONCLUSÃO

O trabalho apresentado consiste da realização do projeto dos circuitos de acionamento de uma ponte-rolante , com res movimentos independentes . Nos capítulos 2 a 6 são desenvolvidas as soluções práticas do projeto , cujas bases teóricas são discutidas nos apêndices A a D . O trabalho constitui um projeto-modelo industrial , realizado para exemplificação dos procedimentos corretos que devem ser utilizados na solução de projetos correlatos .

O solucionamento de problemas mais banais, tais como o cálculo dos degraus de aceleração de motores acionando cargas reativas e o cálculo dos parâmetros de regime permanente neste tipo de acionamento , é baseado nas referências bibliográficas indicadas no texto e inúmeras outras publicações referentes ao assunto . No entanto, para problemas tais como o cálculo dos tempos gastos nos regimes transitórios do sistema e cálculo dos parâmetros dos regimes permanente e transitório do acionamento de cargas ativas, como nos movimentos de descida de carga do guindaste , a bibliografia existente em mãos do autor é insuficiente para solucionar o projeto . Para estes problemas , métodos de cálculos desenvolvidos pelo próprio autor são descritos dos apêndices .

Normas nacionais aplicáveis ao projeto só são encontradas relativas à proteção elétrica geral de motores e circuitos elétricos . Não existem documentações , nem reco-

mendações oficiais nacionais , específicas para o acionamento de pontes-rolantes (22) . Para preencher esta lacuna , o autor utiliza normas e recomendações estrangeiras na solução de problemas específicos .

Os catálogos obtidos para escolha dos motores de acionamento e equipamentos auxiliares apresentam-se falhos no ponto de vista técnico , normalmente fornecendo maiores detalhes econômicos e comerciais do que detalhes técnicos interessantes para o projeto . Por esta razão a lista de equipamentos fornecida no capítulo 6 está incompleta . Esta lista é então dada apenas para exemplificação dos dados técnicos e especificações necessárias à compra do material para a construção do sistema .

De acordo com as especificações iniciais do projeto , não é considerada como uma possível solução a aplicação de circuitos eletrônicos , mais sofisticados e também mais caros , para o controle da aceleração , freio e posicionamento do sistema . Portanto os circuitos de acionamento são constituídos por relés , contactores e resistências , e dotados apenas de automatizações de malha aberta , obtidas por meio destes dispositivos clássicos e padronizados . A ponte-rolante é então acionada , em qualquer um dos seus movimentos , por controle remoto através de botões de comando .

Em cada um dos tres circuitos de acionamento , respectivamente da ponte , do trolley e do guindaste , é necessário obedecer a uma dada ordem de acionamento dos contactores , obtida por meio de contactos e relés auxiliares . Outras possíveis soluções mais simplificadas não oferecem ga-

ção da característica mecânica de cada motor à carga por ele acionada .

No acionamento da ponte a aceleração do motor série DC é controlada por relés de corrente . O motor gaiola de acionamento do trolley , no entanto , tem partida direta, desde que suas condições de partida respeitam as normas de utilização de energia elétrica das concessionárias de energia nacionais (12 , 13) e também recomendações estrangeiras (8) referentes à partida direta dos motores gaiola .

No acionamento do guindaste as diferentes velocidades de descida de carga são obtidas usando-se a ação de freio regenerativo e de freio por inversão em regime permanente do motor de indução de anéis . Regulação de velocidade , aceleração e freio do motor são conseguidos por meio de resistências adicionais inseridas no circuito do rotor e controladas por relés temporizados .

Apenas para o movimento de descida de carga do guindaste com velocidade lenta , quando o motor atua em regime permanente de freio por inversão , há um limite de carga mínima imposto pela solução do projeto . Maior faixa de variação de carga neste movimento pode ser obtida projetando-se diferentes valores de resistências adicionais , um para cada gama de variação de carga . O aumento desta faixa de variação de carga mecânica é uma expansão do projeto que pode ser facilmente realizada .

APÊNDICE AMOTOR SÉRIE DCSÍMBOLOS E UNIDADES

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
$a = \frac{B_1 - B_2}{I_1 - I_2}$	constante	$\text{Wb/m}^2 \text{ A}$
B	densidade de fluxo no eixo <u>di</u> reto	Wb/m^2
B_1	densidade de fluxo no eixo <u>di</u> reto correspondente à corren te I_1	Wb/m^2
B_2	densidade de fluxo no eixo <u>di</u> reto correspondente à corren te I_2	Wb/m^2
B_n	densidade de fluxo no eixo <u>di</u> reto correspondente à corren te I_n	Wb/m^2
$b = \frac{I_1 B_2 - I_2 B_1}{I_1 - I_2}$	constante	Wb/m^2
$c = \frac{I_1 - I_2}{n_i - n_{i-1}}$	constante	A/rpm
$d = \frac{I_1 n_i - I_2 n_{i-1}}{n_i - n_{i-1}}$	constante	A

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
E	força eletromotriz gerada na armadura	V
$e = \alpha c^2 K_2$	constante	Nm/rpm ²
$f = c(2ad+b)K_2$	constante	Nm/rpm
$h = d(ad+b)K_2$	constante	Nm
I_1	corrente máxima da armadura durante a aceleração	A
I_2	corrente mínima da armadura durante a aceleração	A
I_a	corrente da armadura	A
I_n	corrente nominal da armadura	A
J	momento de inércia do sistema motor-carga	Nms ²
$K_1 = \frac{PZ}{2\pi q}$	constante	$\frac{Vs}{Wb \times rd} = \frac{Nm}{Wb \cdot A}$
$K_2 = K_1 \times S$	constante	$\frac{Vs m^2}{Wb \times rd} = \frac{Nm^3}{Wb \cdot A}$
$K_3 = \frac{\pi}{30} \times K_2$	constante	$\frac{Vs m^2}{Wb}$
$K_4 = \frac{\phi}{I_a}$	constante	Wb/A
$K_5 = \frac{J}{\sqrt{K_1 K_4}} \frac{\pi}{30}$	constante	(Nm) ^{1/2} x rpm
$K_6 = \frac{r_a + r_2 + R_i}{K_1 K_4} \frac{\pi}{30}$	constante	rpm
L_a	indutância do circuito de armadura	H

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
n	velocidade de rotação do rotor	rpm
n_i	velocidade de rotação do rotor correspondente ao corte de <u>de</u> graus de aceleração	rpm
n_n	velocidade nominal de rotação do rotor	rpm
P	número de polos	-
q	número de caminhos paralelos no enrolamento de armadura	-
r_a	resistência de armadura	Ω
R_i	resistência adicional do circuito de armadura	Ω
r_i	resistência total do circuito de armadura	Ω
r_f	resistência de campo	Ω
S	área do entre-ferro	m^2
t	tempo	s
T_c	torque de carga	Nm, Ws
T_d	torque dinâmico	Nm, Ws
T_e	torque elétrico	Nm, Ws
t_i	tempo de aceleração em cada degrau	s
V	tensão de alimentação	V
Z	número de condutores ativos no	

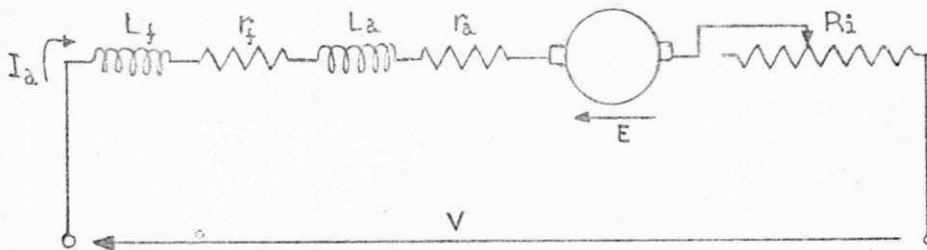
SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
	enrolamento de armadura	-
\varnothing	fluxo no eixo direto	Wb
\varnothing_1	fluxo no eixo direto correspon <u>dente</u> à corrente I_1	Wb
\varnothing_2	fluxo no eixo direto correspon <u>dente</u> à corrente I_2	Wb
\varnothing_n	fluxo no eixo direto correspon <u>dente</u> à corrente I_n	Wb
w	velocidade angular do motor	rd/s
w_n	velocidade angular nominal do motor	rd/s

A - 1. CARACTERÍSTICAS TORQUE - VELOCIDADE

(características mecânicas do motor)

O trabalho do motor em regime permanente é definido pelas suas características torque-velocidade .

O motor série DC se caracteriza pela ligação do seu campo de excitação em série com o circuito de armadura. O seu circuito equivalente é mostrado na fig.(A-1) .



circuito equivalente do motor
série DC
fig.(A-1)

No regime permanente tem-se :

$$V = (r_a + r_f + R_i) I_a + E \quad (A-1)$$

$$E = K_1 \Phi \omega = K_2 B \omega = K_3 B n \quad (A-2)$$

$$T_E = K_1 \Phi I_a = K_2 B I_a \quad (A-3)$$

Se o motor atua na região linear da sua curva de magnetização, o fluxo de campo ϕ , é proporcional à corrente I_a , ou

$$\phi = K_4 I_a \quad (A-4)$$

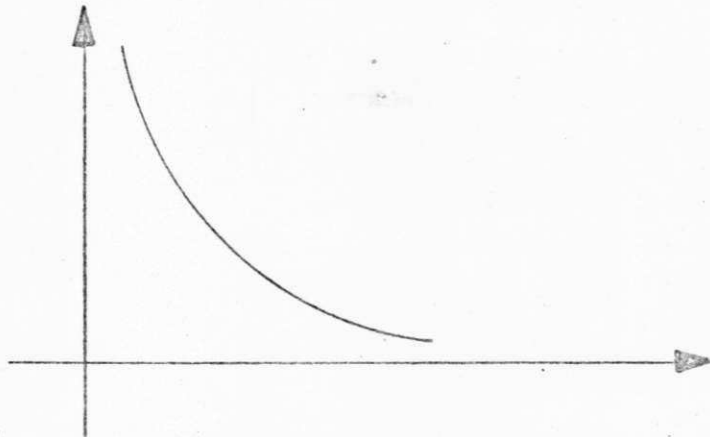
Portanto, a característica torque-velocidade no estado permanente é dada pela equação,

$$\omega = \frac{V}{K_1 K_4 \sqrt{\frac{T_E}{K_1 K_4}}} - \frac{r_a + r_r + R_i}{K_2 K_4} \quad (A-5)$$

ou ainda

$$n = \frac{K_5}{\sqrt{T_E}} - K_6 \quad (A-6)$$

A equação (A-6) representa uma hipérbole que é mostrada na fig.(A-2). Pode-se observar que este tipo de motor só deve ser acionado com carga no eixo, nunca em va zio.



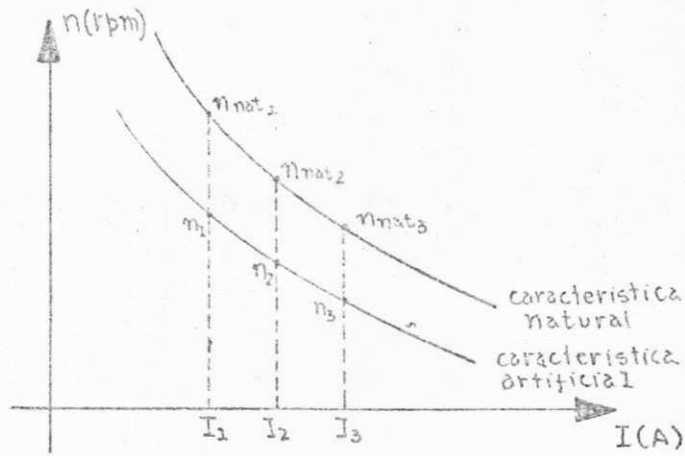
característica torque-velocidade
do motor série DC
fig.(A-2)

De uma maneira geral , a característica torque-velocidade , calculada na base de circuito magnético não saturado , difere bastante da característica real , porque normalmente as máquinas operam numa região saturada do seu circuito magnético . O problema de calcular uma característica com reostatos adicionais no circuito de armadura torna-se então mais complexo . Pode-se contornar a dificuldade usando-se a característica natural (sem elementos adicionais no circuito da máquina) , fornecida pelo fabricante , como uma base para o cálculo da característica artificial (com elementos adicionais no circuito da máquina) . A característica artificial pode então ser calculada pelo seguinte método ;

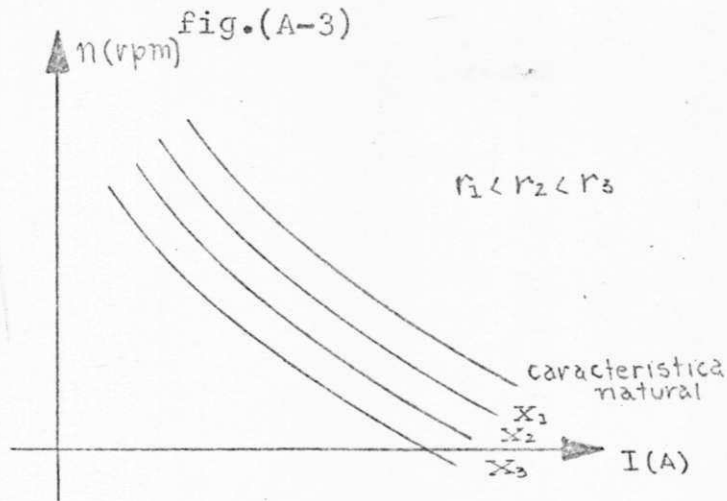
- aplica-se as equações (A-1) e (A-2) a ambos os circuitos , natural e artificial , e combinando-se os resultados obtêm-se :

$$n = n_{\text{nat}} \left[\frac{V - I_a (r_a + r_f + R_i)}{V - I_a (r_a + r_f)} \right] \quad (\text{A-7})$$

- para valores da corrente I_a determina-se os valores correspondentes da velocidade n ; constroi-se uma característica de carga artificial para cada valor de R_i ; a obtenção de uma característica artificial é ilustrada na fig. (A-3) ; por sua vez , a fig.(A-4) apresenta um conjunto destas características artificiais , podendo-se observar que menores valores de velocidade resultam para uma mesma corrente , a medida que a resistência adicional aumenta .



determinação da característica artificial de carga



características de carga para diferentes valores de R_i

fig.(A-4)

A - 2. PARTIDA E ACELERAÇÃO POR MEIO DE REOSTATOS

A fig.(A-1) representa também um esquema geral de partida por meio de reostatos de um motor série DC . O reostato adicional é utilizado com a finalidade de limitar a

corrente de partida , seguindo as indicações de máxima corrente utilizável ditadas pelo fabricante .

O comportamento do motor durante o regime transitório de aceleração é regido pelo sistema de equações (A-8) se o torque de carga é constante com a velocidade .

$$\left. \begin{aligned} V &= (r_a + r_f + R_i) I_a + (i_a + i_f) \frac{dI_a}{dt} + K_1 \phi \omega \\ T_E &= K_1 \phi I_a = J \frac{d\omega}{dt} + T_c \end{aligned} \right\} \quad (A-8)$$

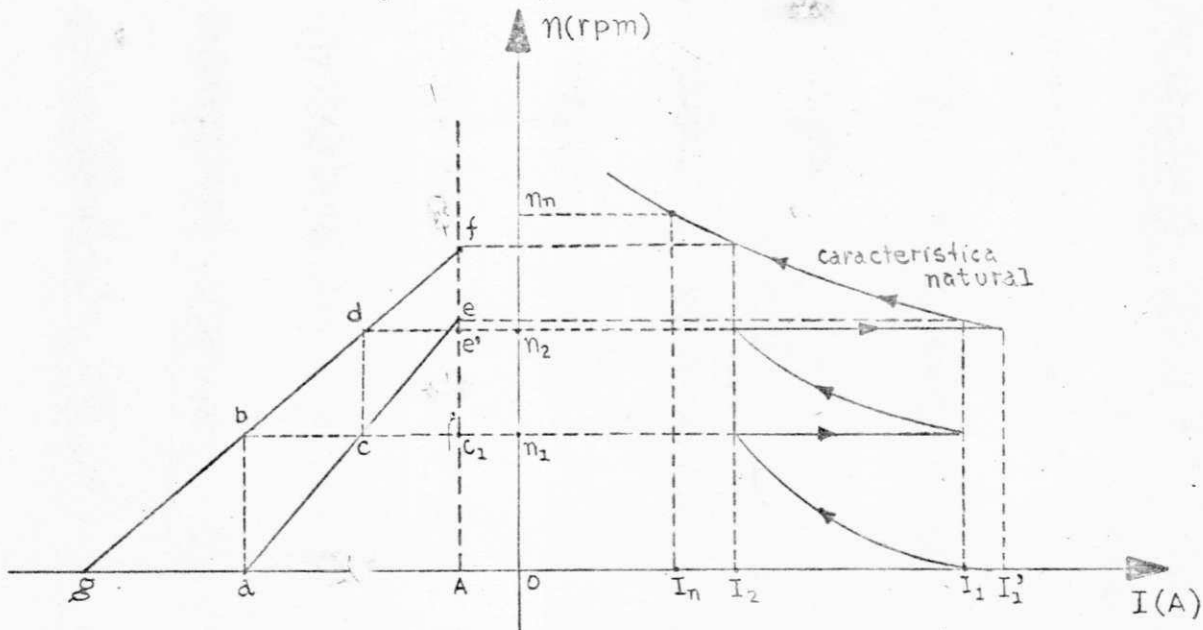
As soluções do sistema (A-8) de equações diferenciais não lineares são encontradas geralmente através de computadores digital e , ou , analógico . No entanto , a complexidade da resolução do sistema é diminuída nos problemas de engenharia usando-se métodos de solução para o cálculo dos reostatos . Nestes métodos considera-se que cada ponto das características mecânicas , ou de carga , da máquina é um ponto representativo de um regime permanente elétrico .

Os próximos dois artigos apresentam respectivamente um método gráfico e um analítico de cálculo do número de degraus de resistência , seus valores e as velocidades de corte de cada degrau , para uma aceleração do motor em série DC . Em ambos os métodos a aceleração é realizada com a corrente variando, em cada estágio, entre os pontos I_1 e I_2 . Respectivamente , I_1 e I_2 são as correntes máxima e mínima durante a aceleração , e são de escolha do projetista , respeitando as indicações do fabricante . A corrente máxima geralmente é tomada com um valor próximo da máxima corrente

suportada pela máquina , sem causar danos , e indicada pelo fabricante . A mínima é escolhida para satisfazer a condição de menor tempo de aceleração e maior economia do projeto . Portanto a corrente I_2 deve ser alta o bastante para diminuir o tempo gasto na aceleração , mas não alta o suficiente para elevar excessivamente o número de degraus de aceleração .

A - 2.1 MÉTODO GRÁFICO DE CÁLCULO DOS DEGRAUS DE ACELERAÇÃO (6, pag52)

A fig.(A-5) ilustra o método gráfico , cujos passos são os seguintes ;



método gráfico de cálculo dos
degraus de aceleração

fig.(A-5)

- sobre a característica natural do motor seleciona-se os pontos I_1 e I_2 ;
- à esquerda do ponto O , marca-se o ponto A no eixo horizontal , tal que o segmento da reta OA seja proporcional à resistência $(r_a - r_f)$ interna do motor ;
- pelo ponto A traça-se uma reta vertical ;
- pelos pontos I_1 e I_2 da característica natural traça-se duas retas horizontais , as quais interceptam a reta vertical traçada pelo ponto A nos pontos e e f ;
- com a mesma escala utilizada para marcar a distância OA , marca-se as distâncias Oa e Og sobre o eixo horizontal e tais que ;

$$\overline{Oa} = V/I_1 \quad \text{e} \quad \overline{Og} = V/I_2$$

- liga-se os pontos a e e e os pontos g e f , obtendo-se as retas \overline{ae} e \overline{gf} , que representam relações lineares entre velocidade e resistência , para um mesmo valor de corrente ; estas relações são conseqüentes da equação ;

$$n = \frac{V - (r_a + r_t + R_i) I_a}{K_2 \phi} \quad (\text{A-9})$$

- traça-se uma reta vertical pelo ponto a até interceptar a reta gf no ponto b ;

- traça-se uma reta horizontal pelo ponto b até interceptar a reta ae no ponto c ;
- segue-se o mesmo processo para desenhar a reta vertical cd e a reta horizontal passando pelo ponto d ;
- antes de aceitar os resultados do projeto é necessário considerar a distância entre as retas horizontais que passam pelos pontos d e e ; esta distância é equivalente à diferença entre as correntes I_1 e I_1' na característica natural ; pode-se então distinguir dois casos ;
 - esta distância é zero ou próxima de zero ; os resultados do projeto são então aceitáveis ;
 - esta distância é tal que não pode ser desprezada ; então se $\Delta = I_1 - I_1' < 0,4 I_n$ ou $\Delta = I_1' - I_1 > 0,25 I_n$ os resultados do projeto não são aceitáveis , devendo-se repetir todo o processo para novos valores de I_1 e I_2 ;
- se o projeto é aceitável tem-se ; o comprimento da reta bc corresponde ao valor da resistência do primeiro degrau , e o comprimento da reta de corresponde ao valor da resistência do segundo degrau ; o comprimento total da reta Oa corresponde à resistência total do circuito no instante ini-

cial da aceleração; o comprimento da reta cc_1 corresponde à resistência total adicionada ao circuito depois do corte do primeiro degrau ; as velocidades n_1 , n_2 ,correspondem às velocidades de corte dos degraus de aceleração .

A - 2.2 MÉTODO ANALÍTICO DE CÁLCULO DOS DEGRAUS DE ACELERAÇÃO

Para o cálculo analítico dos degraus de aceleração um método, desenvolvido pelo autor , é descrito a seguir ;

- escolhe-se os valores I_1 e I_2 das correntes máxima e mínima de aceleração ;

- no instante inicial da partida tem-se ;

$$r_1 = \frac{V}{I_1} = r_a + r_f + R_1 + R_2 + \dots + R_m \quad (A-10)$$

- quando a corrente atinge o valor I_2 , corta-se o primeiro degrau de resistência , e a velocidade correspondente é ;

$$n_1 = \frac{V - I_2 r_1}{K_2 \phi_2} \quad (A-11)$$

- o valor da resistência do segundo degrau é ;

$$r_2 = V - \frac{K_2 \phi_1 n_1}{I_1} = r_a + r_f + R_2 + R_3 + \dots + R_m \quad (A-12)$$

- novamente quando a corrente atinge o valor de I_2 corta-se o segundo degrau de resistência, e a velocidade correspondente é;

$$\eta_2 = \frac{V - I_2 r_2}{K_2 \phi_2} \quad (A-13)$$

- os degraus são assim sucessivamente calculados de modo que, no último degrau, se tem;

$$r_{d_{m+1}} = \frac{V - K_2 \phi_2 \eta_m}{I_1'} = r_a + r_f \quad (A-14)$$

- como no método anterior, pode-se distinguir dois casos;

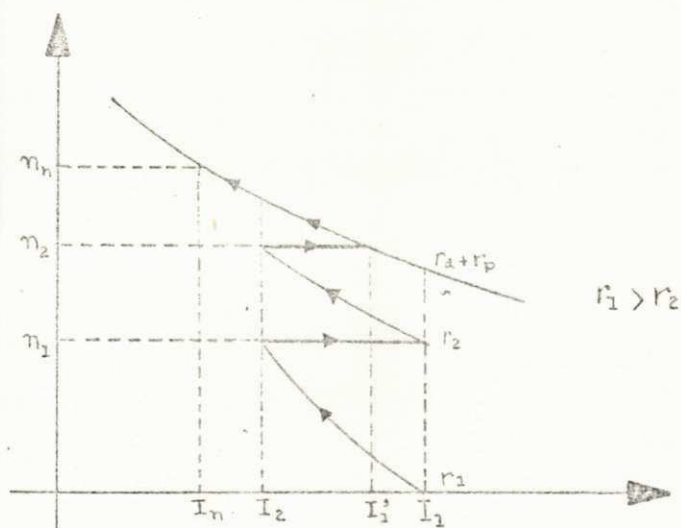
- se $\Delta = I_1 - I_1' \approx 0$, os resultados do projeto são aceitáveis;

- se $\Delta = I_1 - I_1' < 0,4 I_n$ ou

$$\Delta = I_1' - I_1 > 0,25 I_n, \text{ os resultados}$$

do projeto não são aceitáveis, devendo-se repetir todo o processo para novos valores de I_1 e I_2 .

A fig.(A-6) ilustra a variação da característica de carga do motor durante a aceleração, correspondente à variação da resistência R_1 .



variação da característica de carga
do motor durante a aceleração

fig.(A-6)

A - 2.3 TEMPO DE ACELERAÇÃO

O tempo exato de aceleração do motor série DC é calculado resolvendo-se o sistema (A-8) de equações diferenciais não lineares. No entanto a dificuldade de resolver este sistema, leva o engenheiro a considerar algumas linearizações que facilitam a solução do problema. Um método de linearização, desenvolvido pelo autor, para calcular o tempo de aceleração, é dado a seguir.

A equação dinâmica que rege o sistema motor-carga é :

$$T_d = T_E - T_c = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{30} J \frac{dn}{dt}$$

(A-15)

Com o torque de carga , T_c , constante é suficiente exprimir o torque elétrico , T_e , como uma função linear da velocidade , para se encontrar facilmente a solução da equação diferencial (A-15) .

A - 2.3.1 CÁLCULO DA FUNÇÃO $B = f(I_a)$ LINEARIZADA

Normalmente o fabricante fornece a curva de magnetização da máquina , apresentada na fig.(A-7) .

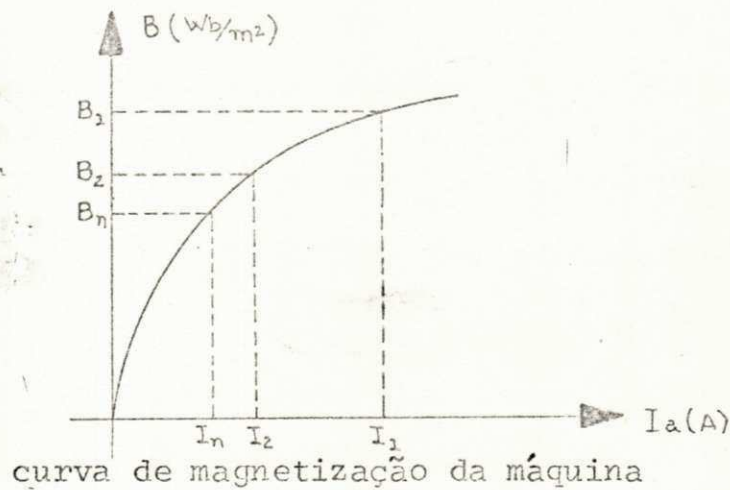


fig.(A-7)

Esta função não linear pode ser linearizada por uma reta que passa pelos pontos (I_1, B_1) e (I_2, B_2) . Com isto se obtém ;

$$B = a I_a + b$$

(A-16)

A - 2.3.2 CÁLCULO DA FUNÇÃO $I_a = f(n)$ LINEARIZADA

Durante a aceleração a função $I_a = f(n)$ é dada pelas curvas da fig.(A-6) . Uma linearização destas características pode ser obtida considerando-se que , para o intervalo (I_1 , I_2) de cada característica , a corrente é uma função linear da velocidade . Portanto , a função $I_a = f(n)$ linearizada é dada pela reta que passa pelos pontos (I_1 , n_{i-1}) e (I_2 , n_i) , onde $i=1,2,\dots,m$. Com esta linearização a corrente é expressa como

$$I_a = - C_n + d \quad (A-17)$$

A - 2.3.3 CÁLCULO DA FUNÇÃO $T_e = f(n)$

Substituindo-se na equação (A-3) a densidade de fluxo B por sua função dada pela equação (A-16) , e a corrente I_a pela equação (A-17) , se obtém ;

$$T_e = e_n^2 - f_n + h \quad (A-18)$$

A - 2.3.4 CÁLCULO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

Substituindo-se a equação (A-18) na equação(A-15) resulta ;

$$T_d = e n^2 - f n + h - T_c = \frac{\pi}{30} J \frac{dn}{dt} \quad (A-19)$$

E o tempo de aceleração num degrau genérico é ;

$$t_i = \frac{\pi}{30} J \int_{n_{i-1}}^{n_i} \frac{dn}{e n^2 - f n + h - T_c} \quad (A-20)$$

O tempo total de aceleração é a soma dos tempos de cada degrau , ou

$$t_a = \sum_{i=1}^{i=m+1} t_i \quad (A-21)$$

As linearizações utilizadas para o cálculo do tempo levam a um erro que dificulta o emprego de relés de tempo nos circuitos de comando para a aceleração . Pode-se observar que a linearização da densidade de fluxo diminui o torque dinâmico , enquanto que a linearização da característica de carga aumenta o torque dinâmico . No entanto , o aumento obtido no torque dinâmico é maior do que a diminuição resultante . O tempo calculado é portanto menor do que o tempo real de aceleração do motor .

APÊNDICE BMOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICOSÍMBOLOS E UNIDADES

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
$a_1 = \frac{T_{\max} - T_p}{1 - s_c}$	constante	Nm
$a_2 = \frac{T_{\max} - T_n}{s_c - s_n}$	constante	Nm
$b_1 = \frac{T_{\max} - T_{psc}}{1 - s_c}$	constante	Nm
$b_2 = \frac{T_n s_c - T_{\max} s_n}{s_c - s_n}$	constante	Nm
E_2	tensão entre escovas em circuito aberto	V
I	corrente do rotor	A
I'	corrente do rotor referida ao estator	A
I_1	corrente máxima do rotor durante a aceleração	A
I_2	corrente mínima do rotor durante a aceleração	A
I_f	corrente do rotor durante o freio	A

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
I_n	corrente nominal do rotor	A
I_p	corrente do rotor na partida	A
I_s	corrente do estator	A
J	momento de inércia do sistema motor-carga	Nms ²
$K = \frac{3}{\omega_0}$	constante	s/rd
m	número de degraus de <u>acelera</u> <u>ção</u>	-
n	velocidade de rotação do <u>ro</u> <u>tor</u>	rpm
n_0	velocidade síncrona de <u>rota</u> <u>ção</u> do motor	rpm
$P = T_{\text{máx}} / T_n$	constante	-
r_1	resistência do estator	Ω
r_2	resistência do rotor	Ω
r_2'	resistência do rotor referida ao estator	Ω
r_{di}	resistência total do circuito do rotor	Ω
R_i	resistência adicional do <u>cir</u> <u>cuito</u> do rotor	Ω
s	deslizamento	-
s_1	deslizamento de regime <u>perma</u> <u>nente</u> em freio regenerativo	-
s_2	deslizamento de regime <u>perma</u>	-

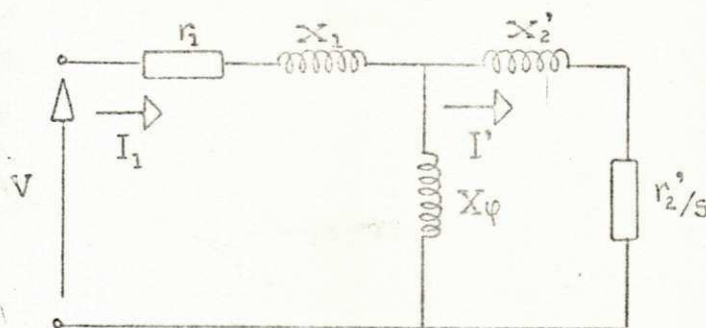
SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
	nente de freio por inversão	-
$S_a = \frac{T_{\text{máx}}}{T_n} S_n$	constante	-
s_{ai}	deslizamento correspondente à velocidade de corte de <u>resis</u> tências durante a aceleração	-
s_c	deslizamento crítico na carac <u>terística</u> natural	-
s_{ci}	deslizamento crítico numa ca <u>racterística</u> artificial	-
s_{fi}	deslizamento correspondente à velocidade de corte de <u>resis</u> tências durante o freio	-
s_n	deslizamento nominal	-
t	tempo	s
T_1	torque elétrico correspon <u>den</u> te à corrente I_1	Nm,Ws
T_2	torque elétrico correspon <u>den</u> te à corrente I_2	Nm,Ws
t_a	tempo de aceleração	s
T_c	torque de carga	Nm,Ws
T_d	torque dinâmico	Nm,Ws
T_e	torque elétrico	Nm,Ws
T_f	torque elétrico de freio	Nm,Ws
t_i	tempo de aceleração ou freio para um degrau	s
$T_{\text{máx}}$	torque elétrico máximo	Nm,Ws

SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
T_n	torque elétrico nominal	Nm, Ws
T_p	torque elétrico de partida	Nm, Ws
V	tensão de alimentação	V
x_1	reatância do estator	Ω
x_2	reatância do rotor	Ω
x_2'	reatância do rotor referida ao estator	Ω
x	reatância de magnetização	Ω
z_2	impedância do rotor	Ω
$\lambda = I_1 / I_2$	constante	-
w	velocidade angular do rotor	rd/s
w_0	velocidade angular síncrona do motor	rd/s

B - 1. CARACTERÍSTICAS TORQUE - VELOCIDADE

(características mecânicas do motor em regime permanente)

O funcionamento do motor em regime permanente é definido por suas características torque-velocidade . Estas características podem ser derivadas do circuito equivalente para uma fase do motor de indução trifásico , o qual é mostrado na fig.(B-1) .



circuito equivalente para uma
fase do motor de indução tri-
fásico

fig.(B-1)

No regime permanente o torque elétrico é dado por .

$$T_E = \frac{2 T_{max} (1 + \epsilon S_c)}{S/S_c + S_c/S + 2 \epsilon S_c} \quad (B-1)$$

onde

$$S = \frac{n_0 - n}{n}$$

$$s_c = \pm \frac{r_2^2}{\sqrt{R_{eq}^2 + (X_{eq} + X_2')^2}} \quad (B-2)$$

$$T_{max} = \frac{3 V^2 X^2}{2 \omega_0 [R_{eq} \pm \sqrt{R_{eq}^2 + (X_{eq} + X_2')^2}] \sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_\psi)^2}} \quad (B-3)$$

$$\epsilon = \frac{R_{eq}}{r_2^2} \quad (B-4)$$

$$R_{eq} = \frac{r_2 X_\psi^2}{r_1^2 + (X_1 + X_\psi)^2} \quad (B-5)$$

$$X_{eq} = \frac{X_\psi (r_2^2 + 1) + X_2}{r_1^2 + (X_1 + X_\psi)^2} \quad (B-6)$$

Se a resistência R_{eq} pode ser desprezada, o que equivale a fazer $r_1 \approx 0$, obtêm-se as equações (B-1), (B-2) e (B-3) nas suas versões simplificadas, ou:

$$T_E = \frac{2 T_{max}}{s/s_c + s_c/s} \quad (B-7)$$

$$s_c = \pm s \left[\frac{T_{max}}{T_E} + \sqrt{\left(\frac{T_{max}}{T_E}\right)^2 - 1} \right] \quad (B-8)$$

$$T_{max} = \frac{\pm 3 V_1^2 X_\psi^2}{2 \omega_0 [1 + X_2' (X_1 + X_\psi)]} \quad (B-9)$$

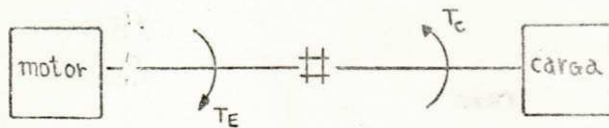
Quando o motor trabalha com baixos valores do deslizamento, ou seja, quando $s \ll s_c$, a função $T_e = f(s)$ dada pela equação (B-7) pode ser linearizada, ou;

ga mecânica , ou a um movimento de translação de uma carga mecânica num plano horizontal . À esquerda do mesmo eixo representa-se uma carga ativa , correspondente a um movimento de descida de uma carga mecânica . Ao acionamento da carga ativa correspondem velocidades negativas , enquanto que ao acionamento da carga reativa correspondem velocidades positivas .

O torque dinâmico do sistema motor-carga é definido como

$$T_d = T_E - T_c$$

com bases na fig.(B-4) .



representação dos torques elétrico e de carga no sistema
fig.(B-4)

O sinal do torque dinâmico correspondente aos movimentos de elevação e de descida no acionamento de uma carga mista , é definido na tabela (B-1) .

Tabela (B-1)

Movimento de elevação			Movimento de descida		
aceleração	est.perm.	freio	aceleração	est.perm.	freio
$T_d > 0$	$T_d = 0$	$T_d < 0$	$T_d < 0$	$T_d = 0$	$T_d > 0$

B - 3. PARTIDA E ACELERAÇÃO DO MOTOR GAIOLA

B - 3.1 ESCOLHA DO MÉTODO DE PARTIDA

O motor de indução de gaiola parte por um dos seguintes métodos ;

- partida direta , ligando-se o motor diretamente à rede ;
- partida artificial , resultando geralmente na aplicação de tensão reduzida nos terminais do estator durante parte da aceleração .

A escolha do método de partida a ser utilizado depende das condições do projeto e das normas relativas ao caso . A partida direta é normalmente utilizada para pequenos motores , cuja corrente de partida não tem influência significativa no sistema total .

Deve ser fixada pelo órgão competente , em cada localidade do país , a potência máxima dos motores que podem ter partida a plena tensão . Esta potência depende das

características dos motores , instalações e redes das companhias fornecedoras de energia elétrica , (5 , §22.9.1) .

Cada concessionária de energia elétrica determina suas condições de aceitação de partida direta . Por exemplo :

- se a energia elétrica é fornecida em baixa tensão os motores de indução, de rotor curto-circuitado , só podem partir diretamente ligados à rede se a potência do motor é inferior a 7,5 hp (12, tabela nº 8) ;
- se o fornecimento de energia elétrica é em alta tensão , não há especificações quanto ao valor máximo permissível da potência de motores de indução , limitando a possibilidade de partida direta

De acordo com as normas técnicas polonesas , PN - 58/E-05012 , (8 , pag.848) , a partida direta do motor de indução trifásico , 380 V , pode ser realizada até a potência de 5,5 kW . As normas técnicas polonesas estão em concordância com as recomendações oficiais da International Electrotechnical Commission , (IEC) . Como os países europeus geralmente têm suas normas baseadas nas recomendações do I.E.C. , qualquer uma das normas destes países pode ser citada em concordância com o estabelecido acima pelas normas polonesas .

B - 3.2 CÁLCULO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO PARA PARTIDA DIRETA

O tempo de aceleração é mais um dado indicativo da escolha acertada do motor para o acionamento de uma carga especificada. O cálculo deste tempo é realizado através da equação dinâmica

$$T_d = T_e - T_c = J \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 J \frac{ds}{dt} \quad (B-11)$$

resultando

$$t_a = -\omega_0 J \int_{s=1}^{s=s_n} \frac{ds}{T_e - T_c} \quad (B-12)$$

Se o torque elétrico T_e é substituído pela equação (B-1), obtém-se, para torque de carga constante:

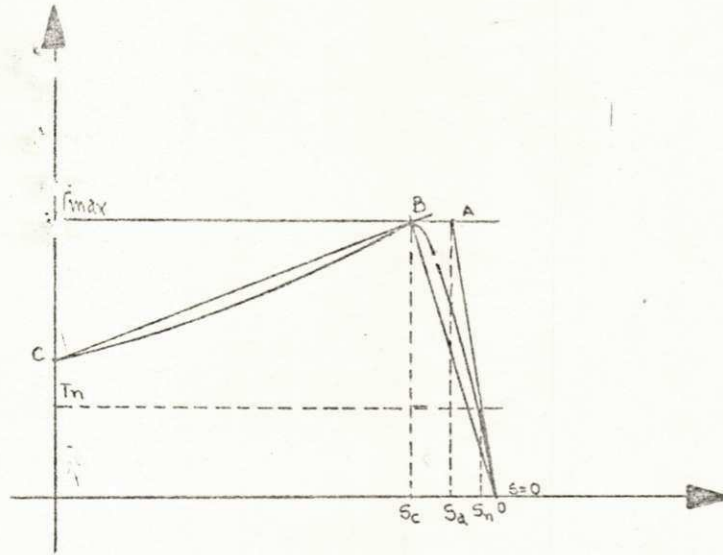
$$t_a = \omega_0 J \int_{s=1}^{s=s_n} \frac{(s^2 + 2\epsilon s_c^2 s + s_c^2) ds}{T_c s^2 - [2 T_{max} (1 + \epsilon s_c) s_c - 2\epsilon s_c^2 T_c] s + T_c s_c^2} \quad (B-13)$$

Se a resistência r_1 é desprezível o tempo é calculado substituindo-se a expressão do torque elétrico dada pela equação (B-7) na equação (B-12), resultando, para torque de carga constante:

$$t_a = \omega_0 J \int_{s=1}^{s=s_n} \frac{(s^2 + s_c^2) ds}{T_c s^2 - 2 T_{max} s_c s + T_c s_c^2} \quad (B-14)$$

Quando a resistência r_1 não é conhecida e também não é desprezível, pode-se calcular o tempo de aceleração por uma linearização da característica torque-velocidade do motor. Um método de procedimento, desenvolvido pelo autor, é apresentado a seguir;

- na característica mecânica do motor, fig.(B-5), traça-se uma reta horizontal pelo ponto T_{\max} ;



linearização da característica
mecânica do motor

fig.(B-5)

- traça-se uma segunda reta, pelos pontos $(s=s_n, T_e=T_n)$ e $(s=0, T_e=0)$, que intercepta a primeira reta no ponto A;
- o ponto A define o deslizamento s_A dado por

$$s_A = \frac{T_{\max}}{T_n} s_n \quad (\text{B-15})$$

o qual é obrigatoriamente menor do que o deslizamento s_c ;

- considera-se que em condições nominais de trabalho do motor se tem

$$s_n \ll s_c$$

$$r_1 \ll r_2/s_n$$

e portanto da equação (B-10) pode-se escrever

$$s'_c = \frac{2 T_{\max}}{T_n} \times s_n \quad (\text{B-16})$$

sendo s'_c obrigatoriamente maior do que o deslizamento crítico real s_c ;

- escolhe-se então um valor intermediário para s_c , tal que $s_A < s_c < s'_c$ e marca-se no eixo horizontal da característica mecânica do motor;

- traça-se uma reta vertical pelo ponto s_c que intercepta a reta horizontal traçada pelo ponto T_{\max} , no ponto B;

- traça-se as retas \overline{CB} e \overline{BO} as quais definem a característica mecânica do motor linearizada;

- para $l \gg s \gg s_c$ pode-se escrever

$$T_E = -a_1 s + b_1 \quad (\text{B-17})$$

que substituindo na equação (B-12) resulta ;

$$t_1 = -\omega_0 J \int_{s=1}^{s=s_c} \frac{ds}{-a_1 s + b_1 - T_c} =$$

$$= \frac{\omega_0 J}{a_1} \ln \frac{-a_1 s_c + b_1 - T_c}{-a_1 + b_1 - T_c} \quad (B-18)$$

- para $s_c \gg s \gg s_n$ se obtem ;

$$T_E = a_2 s + b_2 \quad (B-19)$$

como no ponto $s=s_n$ tem-se $T_d=0$, para se encontrar um tempo finito é necessário calcular um deslizamento arbitrário s'_n , correspondente a uma velocidade um pouco menor do que a velocidade de regime permanente. Normalmente, em problemas de engenharia, é suficiente considerar s'_n correspondente a cerca de 95% da velocidade nominal ; portanto tem-se ;

$$t_2 = -\omega_0 J \int_{s=s_c}^{s=s'_n} \frac{ds}{a_2 s + b_2 - T_c} =$$

$$= \frac{\omega_0 J}{a_2} \ln \frac{a_2 s_c + b_2 - T_c}{a_2 s'_n + b_2 - T_c} \quad (B-20)$$

- o tempo total de aceleração é a soma dos tempos calculados, ou

$$t_a = t_1 + t_2$$

B - 4. PARTIDA E ACELERAÇÃO DO MOTOR DE ANEIS POR MEIO DE RESISTÊNCIAS ADICIONADAS AO CIRCUITO DO ROTOR

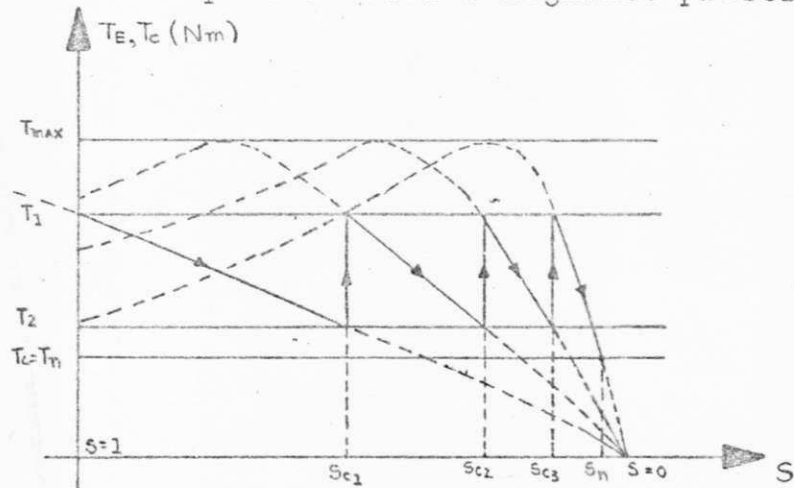
Normalmente a aceleração do motor de indução de aneis é realizada usando-se resistências adicionadas ao circuito do rotor . Estas resistências deslocam a característica mecânica do motor , mantendo o valor do torque máximo..A aceleração pode então ser realizada em vários estágios, fazendo-se com que , em cada estágio , o torque varie entre os valores T_1 e T_2 . Os valores T_1 e T_2 são definidos pelas correntes correspondentes I_1 e I_2 . Estas correntes são escolhidas pelo projetista , respeitando-se as seguintes considerações ;

- a corrente I_1 , máximo valor obtido durante a aceleração , deve ser menor ou igual ao máximo valor de corrente admissível indicada pelo fabricante;
- a corrente I_2 , mínimo valor obtido durante a aceleração , deve ser suficientemente alta para resultar um bom tempo de aceleração , mas não demasiadamente alta para elevar excessivamente o número de degraus de resistência , o que encarece o projeto .

B - 4.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE ACELERAÇÃO

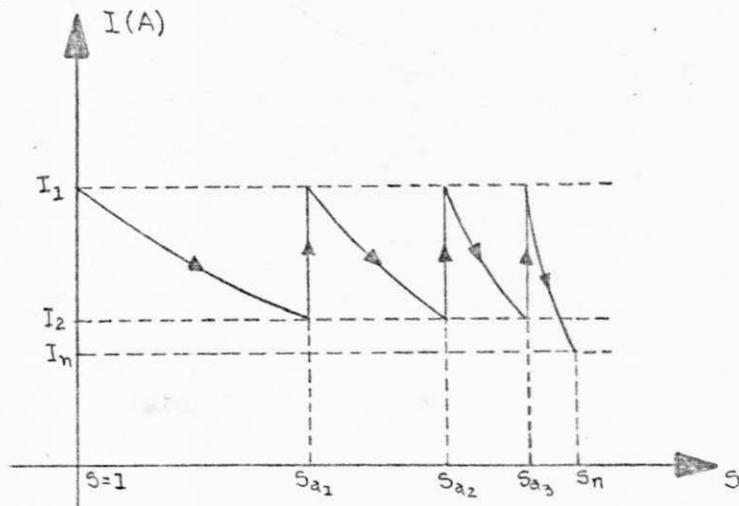
A fig.(B-6) mostra a variação da característica

mecânica do motor , durante a aceleração . A fig.(B-7) mostra a correspondente variação da corrente . Para o cálculo destas características pode-se usar o seguinte processo ;



variação da característica mecânica do motor durante a aceleração

fig.(B-6)



variação da corrente do rotor durante a aceleração

fig.(B-7)

- escolhe-se valores para dois dos seguintes parâmetros ;

corrente máxima de aceleração , I_1 ;

corrente mínima de aceleração , I_2 ;

número de degraus , m , onde m é um número inteiro ;

- sabendo-se que

$$T_E = K I^2 r d / s$$

tem-se

$$T_1 = K I_1^2 r d_1 = K I_1^2 \frac{r d_2}{S a_1} = \dots = K I_1^2 \frac{r_2}{S a_m}$$

e

$$T_2 = K I_2^2 \frac{r d_1}{S a_1} = K I_2^2 \frac{r d_2}{S a_2} = \dots = K I_2 \frac{r d_m}{S a_m} = K I_2 \frac{r_2}{S a_m^m}$$

consequentemente

$$r d_2 = r d_1 S a_1$$

$$r d_3 = r d_2 S a_1 = r d_1 S a_1^2$$

⋮

$$r_2 = r d_m S a_1 = r d_1 S a_1^m$$

(B-21)

- das equações (B-21) se obtém

$$m = \frac{\ln \frac{r_2}{r d_1}}{\ln \frac{I_2}{I_1}}$$

e como

$$\frac{r d_1}{r_2} = \frac{I_1}{I_2 S a_1^m}$$

resulta

$$m = \frac{l_n \frac{I_1 S_n}{I_n}}{l_n \frac{I_2}{I_1}} \quad (\text{B-22})$$

- da equação (B-22) obtém-se ;

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{I_2}{I_1} = \left(S_n \frac{I_1}{I_n} \right)^{1/m} \quad (\text{B-23})$$

- desprezando-se a queda de tensão na reatância x_2 pode-se escrever ;

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{S_{a1}} \quad \therefore S_{a1} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{S_{a1}}{S_{a2}} \quad \therefore S_{a2} = S_{a1} \frac{I_2}{I_1} = S_{a1}^2 \quad (\text{B-24})$$

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{S_{a_{m-1}}}{S_{a_m}} \quad \therefore S_{a_m} = S_{a_{m-1}} \frac{I_2}{I_1} = S_{a_1}^m$$

- os valores das resistências adicionais são então;

$$R_m = r_{dm} - r_2$$

$$R_{m-1} = r_{d_{m-1}} - r_{dm}$$

⋮

$$R_2 = r_{d2} - r_{d3}$$

$$R_1 = r_{d1} - r_{d2}$$

(B-25)

B - 4.2 CÁLCULO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

O cálculo exato do tempo de aceleração de um motor de indução com reostatos adicionais no rotor envolve um conjunto de equações diferenciais não lineares, cujos métodos de solução são bastante complexos. O cálculo aproximado pode ser realizado, e é normalmente utilizado nos projetos práticos, linearizando-se a característica mecânica do motor. Um método de cálculo do tempo de aceleração, desenvolvido pelo autor, é baseado nas seguintes considerações:

- durante cada degrau, o motor trabalha numa região linear de sua característica mecânica;
- equações representativas de um estado permanente elétrico podem ser empregadas em cada ponto de interesse para o cálculo.

A linearização da função $T_e = f(s)$, fig.(B-6), pode ser realizada da seguinte forma:

- a função $T_e = f(s)$ para cada degrau pode ser escrita como uma reta, ou

$$T_e = T_1 s \quad 1^\circ \text{ degrau} \quad (B-26)$$

$$T_e = \frac{T_1}{s_{a_1}} s \quad 2^\circ \text{ degrau} \quad (B-27)$$

$$T_e = \frac{T_1}{s_{a_m}} s = \frac{T_n}{s_n} s \quad m^\circ \text{ degrau} \quad (B-28)$$

Esta forma de linearização soluciona o problema

do cálculo do tempo, mas o tempo resultante encontrado é um pouco maior do que o tempo real de aceleração. Isto porque a linearização da característica mecânica, pelo método acima descrito, leva a uma diminuição do torque dinâmico.

Substituindo-se as equações (B-26) para cada degrau na equação dinâmica (B-11) resulta:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= -\omega_0 J \int_{s=1}^{s=s_{a1}} \frac{ds}{T_1 s - T_c} = \frac{\omega_0 J}{T_1} \ln \frac{1 - T_c/T_1}{s_{a1} - T_c/T_1} && 1^\circ \text{degrau} \\
 t_2 &= -\omega_0 J \int_{s=s_{a1}}^{s=s_{a2}} \frac{ds}{\frac{T_2}{s_{a1}^2} s - T_c} = t_1 s_{a1} && 2^\circ \text{degrau} \\
 t_3 &= -\omega_0 J \int_{s=s_{a2}}^{s=s_{a3}} \frac{ds}{\frac{T_3}{s_{a1}^2} s - T_c} = t_1 s_{a1}^2 && 3^\circ \text{degrau} \\
 &\vdots && \\
 t_m &= -\omega_0 J \int_{s=s_{am}}^{s=s'_n} \frac{ds}{\frac{T_m}{s_n} s - T_c} = \frac{\omega_0 J}{T_n} \ln \frac{s_{am} - T_c/T_n s_n}{s'_n - T_c/T_n s_n} && m^\circ \text{degrau}
 \end{aligned} \tag{B-29}$$

Na equação do tempo para o m° degrau, s'_n é um deslizamento arbitrariamente escolhido, correspondendo a uma velocidade inferior a nominal, para resultar um tempo finito, porque no ponto s_n o torque dinâmico é nulo. Em problemas de engenharia é geralmente suficiente escolher um deslizamento s'_n correspondente a 95% da velocidade nominal.

B - 5. FREIO REGENERATIVO NO MOTOR DE ANEIS

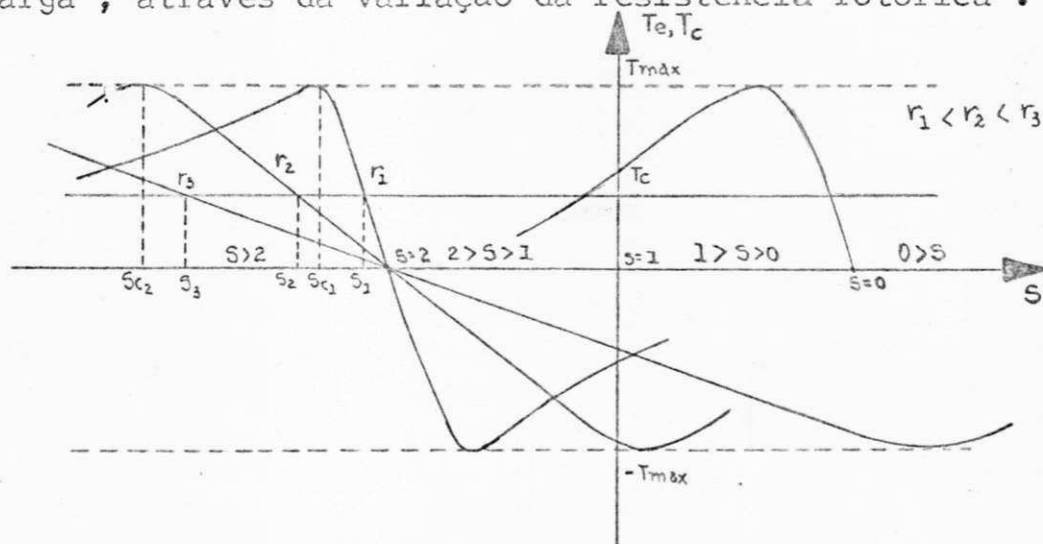
O freio regenerativo num motor de indução só pode ser obtido quando o motor aciona uma carga mecânica ativa tal que leve o sistema a uma velocidade maior do que a

velocidade de sincronismo do motor . Portanto , durante o regime regenerativo , o motor atua como um gerador , devolvendo energia ativa para a rede .

Os próximos artigos são dedicados ao estudo da atuação do motor em freio regenerativo no regime permanente, aceleração e freio . Os métodos de cálculo das resistências adicionais de estado permanente , aceleração e freio , e do tempo de aceleração e freio aqui apresentados são métodos desenvolvidos pelo autor .

B - 5.1 REGIME PERMANENTE

A fig.(B-8) mostra a característica mecânica natural do motor em regime regenerativo , ilustrando a variação de velocidade de regime permanente obtida para a mesma carga , através da variação da resistência rotórica .



características mecânicas do motor
atuando em freio regenerativo

fig.(B-8)

Se na característica de freio regenerativo se tem

$$|2 - s_{ci}| \gg |2 - s_1|$$

pode-se escrever, pela equação (B-10),

$$T_c = \frac{2 T_{max}}{2 - s_{ci}} (2 - s_1) \quad (B-30)$$

Como na característica natural da região motor se tem

$$T_n = \frac{2 T_{max}}{s_c} s \quad (B-31)$$

e ainda sabendo-se que

$$(2 - s_{ci}) = \frac{-r_2 + Ri}{r_2} s_c \quad (B-32)$$

resulta, combinando-se as equações (B-30), (B-31) e (B-32)

$$Ri = \left(-\frac{T_n}{T_c} \times \frac{(2 - s_1)}{s_n} - 4 \right) r_2$$

Se s_{ci} não é suficientemente distante de s_1 pode-se obter, pela equação (B-8),

$$(2 - s_{ci}) = (2 - s_1) [p' + \sqrt{p'^2 + 1}] \quad (B-33)$$

onde

$$p' = \frac{T_{max}}{T_c}$$

Conhecido o valor de s_{ci} , obtém-se, pela equa-

ção (B-32) ,

$$R_j = \left(-\frac{(2.5s_c)}{s_c} - 1 \right) r_2 \quad (B-34)$$

B - 5.2 PARTIDA E ACELERAÇÃO

B - 5.2.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE ACELERAÇÃO

O motor é partido de modo que durante o intervalo $2 > s > 1$ os torque elétrico e mecânico têm o mesmo sentido, fornecendo um torque dinâmico elevado de aceleração . Desta forma , somente o limite da corrente de partida justifica o uso de degraus de resistência para a aceleração neste intervalo . A fig.(B-9) ilustra as características mecânicas de aceleração e regime permanente em freio regenerativo , em comparação com a característica do motor quando acionando a carga na sua região reativa .

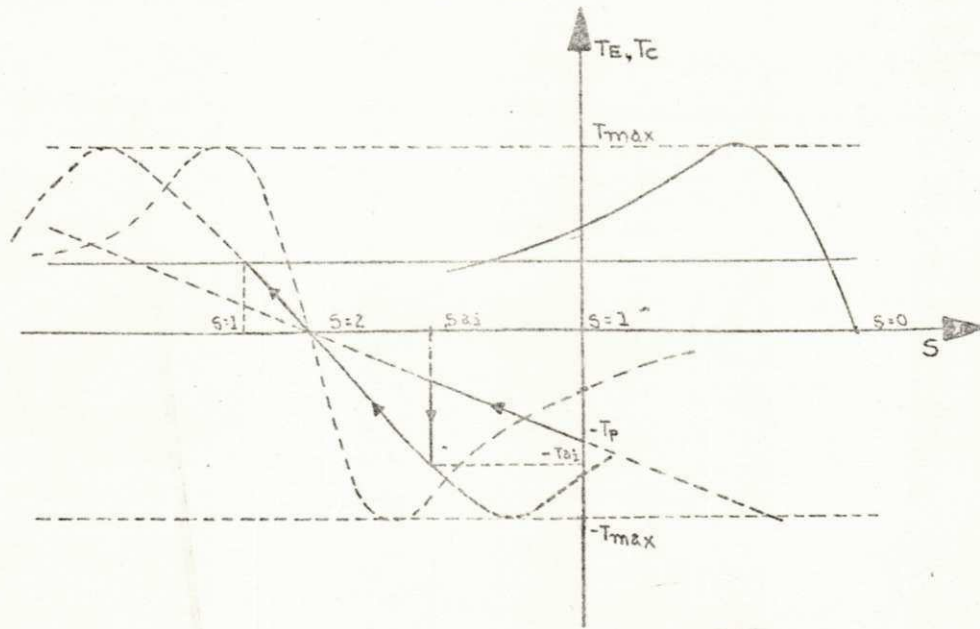
No instante inicial de partida a corrente é dada por :

$$I_p = \frac{E_2}{\sqrt{3} \sqrt{(R_j + r_2)^2 + X^2}} \quad (B-35)$$

E o torque correspondente é :

$$T_p = \frac{I_p}{I_n} T_n \quad (B-36)$$

B - 24



variação da característica mecânica
durante aceleração no regime regene
rativo

fig.(B-9)

Da equação (B-33), a resistência que limita a cor
rente de partida é :

$$R_1 = \sqrt{\frac{E_2^2}{3 I_2^2} - X_2^2} - r_2 \quad (B-37)$$

B - 5.2.2 CÁLCULO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

Para o intervalo $2 > s > 1$ o torque dinâmico é :

$$0 > T_d = T_E - T_c = J \frac{dw}{dt} = -w_0 J \frac{ds}{dt} \quad (B-38)$$

Como a função $T_e = f(s)$ no primeiro estágio de aceleração é dada por

$$T_E = -T_P (2-s) \quad (B-39)$$

o tempo de aceleração neste estágio é.

$$t_1 = -\omega_0 J \int_{s=1}^{s=s_{a1}} \frac{ds}{-T_P (2-s) - T_c} = \frac{-\omega_0 J}{T_P} \ln \frac{(2-s_{a1}) + \frac{T_c}{T_P}}{1 + \frac{T_c}{T_P}} \quad (B-40)$$

E para um degrau genérico

$$T_E = \frac{T_{ai}}{(2-s_{ai})} (2-s) \quad (B-41)$$

e

$$t_i = -\omega_0 J \int_{s_{aj}}^{s_{aj+1}} \frac{ds}{\frac{T_{ai}}{(2-s_{aj})} (2-s) - T_c} = \frac{\omega_0 J (2-s_{aj})}{T_{ai}} \ln \frac{(2-s_{aj}) + \frac{T_c}{T_{ai}} (2-s_{aj})}{(2-s_{aj}) + \frac{T_c}{T_{ai}} (2-s_{aj})} \quad (B-42)$$

Para o intervalo $s > 2$ o torque dinâmico é :

$$0 > T_d = T_E - T_c = J \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 J \frac{ds}{dt} \quad (B-43)$$

A função $T_e = f(s)$ linearizada para um degrau genérico deste intervalo é

$$T_E = \frac{T_{ai}}{(2-s_{aj})} (2-s) \quad (B-44)$$

e o tempo correspondente é :

$$t_i = -\omega_0 J \int_{s=5_{ai}-1}^{s=5_{ai}} \frac{ds}{\frac{T_{ai}}{(2-5_{ai})} (2-s) - T_c} = \frac{\omega_0 J (2-5_{ai})}{T_{ai}} \ln \frac{(2-5_{ai}) - \frac{T_c}{T_{ai}} (2-5_{ai})}{(2-5_{ai}) - \frac{T_c}{T_{ai}} (2-5_{ai})} \quad (B-45)$$

No último degrau, o limite superior da integral deve ser s_1' , escolhido arbitrariamente e correspondente a uma velocidade próxima e inferior a de regime permanente, para resultar um tempo finito nos cálculos. Normalmente, nos problemas de engenharia, é aconselhado como suficiente escolher um deslizamento s_1' correspondente a cerca de 95% da velocidade final de regime permanente. O próprio ponto s_1 traz como resultado um tempo infinito, pois neste ponto o torque dinâmico é nulo.

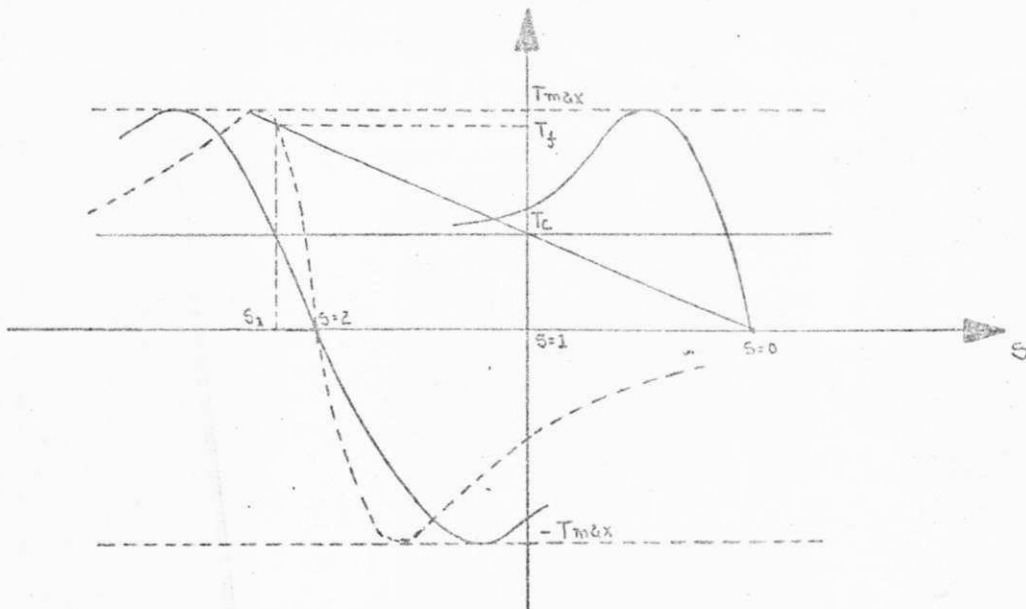
B - 5.3 FREIO

B - 5.3.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE FREIO

Para se estacionar um motor o qual atua em regime permanente de freio regenerativo, usa-se uma inversão dos terminais do estator, conduzindo o motor à região de freio ($s > 1$) da sua característica mecânica. Este método é ilustrado na fig.(B-10).

Pode-se usar resistências adicionais no circuito do rotor, para limitar a corrente e o tempo de freiagem.

No instante inicial de freio tem-se



variação da característica mecânica
durante o freio
fig.(B-10)

$$I_f = \frac{E_2 s_1}{\sqrt{3} \sqrt{(R_1 + r_2)^2 + X_2^2}} \quad (B-46)$$

e

$$T_f = \frac{I_f}{I_n} T_n \quad (B-47)$$

Como no acionamento de cargas ativas é obrigado o uso de freio mecânico, por exemplo o freio eletromagnético, teoricamente o melhor ponto de atuação deste freio é o ponto ($s=1$, $T_e=T_c$). Isto diminui o esforço do freio mecânico. Para se obter este ponto adiciona-se a resistência dada pela expressão

$$R_i = \left(\frac{s_{ci}}{s_c} - 1 \right) r_2 \quad (\text{B-48})$$

onde

$$s_{ci} = (p' + \sqrt{p'^2 - 1}) \quad (\text{B-49})$$

com

$$p' = \frac{T_{\max}}{T_c}$$

Se para a resistência R_i , dada pela equação (B-48), a corrente I_f , dada pela equação (B-46), é superior ao limite máximo indicado pelo fabricante, outro grau de freio deve ser calculado para o instante inicial e tal que

$$R_i = \sqrt{\frac{E_2^2}{3I_p^2} - x_2^2} - r_2 \quad (\text{B-50})$$

onde I_p é uma corrente escolhida pelo projetista, e de valor inferior ao limite máximo indicado pelo fabricante.

B - 5.3.2 CÁLCULO DO TEMPO DE FREIO

O momento dinâmico durante o freio é

$$0 < T_d = T_E - T_c = J \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 J \frac{ds}{dt}$$

sendo o torque elétrico, no degrau inicial de freio, dado pela equação

$$T_E = \frac{T_f}{s_1} s \quad (\text{B-51})$$

o tempo de freio neste degrau é :

$$t_{11} = -\omega_0 J \int_{s=s_{11}}^{s=s'_{11}} \frac{ds}{\frac{T_f}{s_1} s - T_c} = -\frac{\omega_0 J s_1}{T_f} \ln \frac{s_{11} - \frac{T_c}{T_f} s_1}{s_1 - \frac{T_c}{T_f} s_1} \quad (B-52)$$

Para o último degrau tem-se ,

$$T_E = T_c s \quad (B-53)$$

e

$$t_i = -\omega_0 J \int_{s=s_{ji}}^{s=s'} \frac{ds}{T_c s - T_c} = -\frac{\omega_0 J}{T_c} \ln \frac{s' - 1}{s_{ji} - 1} \quad (B-54)$$

onde s' é o deslizamento correspondente a ,aproximadamente 5% da velocidade nominal do motor , escolhido arbitrariamente , porque no ponto $s=1$ tem-se $T_d=0$, resultando infinito o tempo gasto para se encontrar condições de regime permanente .

B - 6. FREIO POR INVERSÃO COM CARGA ATIVA NO MOTOR DE ANEIS

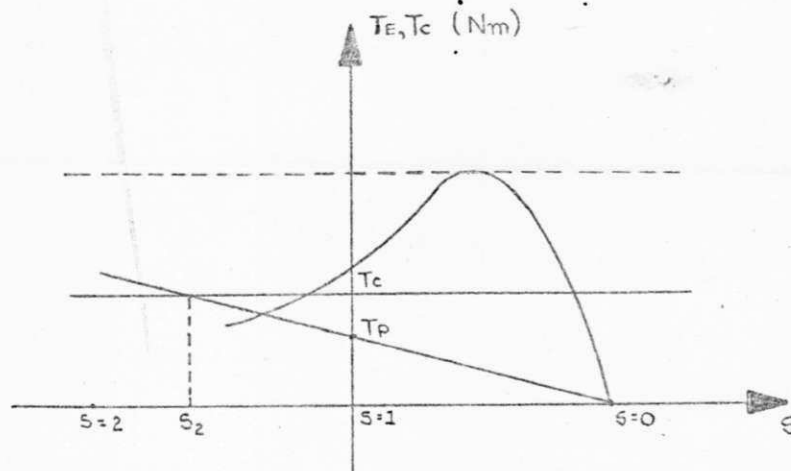
Quando um motor de indução aciona cargas ativas, o freio por inversão pode ser utilizado em um regime permanente . Isto significa que o campo magnético girante do estator deve ter o sentido de rotação contrário ao sentido de rotação do rotor . O torque elétrico atua então em oposição ao sentido de giro do rotor .

Os métodos de cálculo de resistências adicionais de regime permanente , aceleração e freio , bem como os mé-

todos de cálculo do tempo de aceleração e freio , desenvolvidos pelo autor , são descritos nos próximos artigos .

B - 6.1 REGIME PERMANENTE

A fig.(B-11) mostra uma característica mecânica artificial de freio por inversão em regime permanente .



característica mecânica de freio por
inversão em regime permanente
fig.(B-11)

Para que o ponto de equilíbrio s_2 seja encontrado é necessário que na partida o torque elétrico seja menor do que o torque de carga .

Se na característica de freio pode-se escrever

B - 6.2 PARTIDA E ACELERAÇÃOB - 6.2.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE ACELERAÇÃO

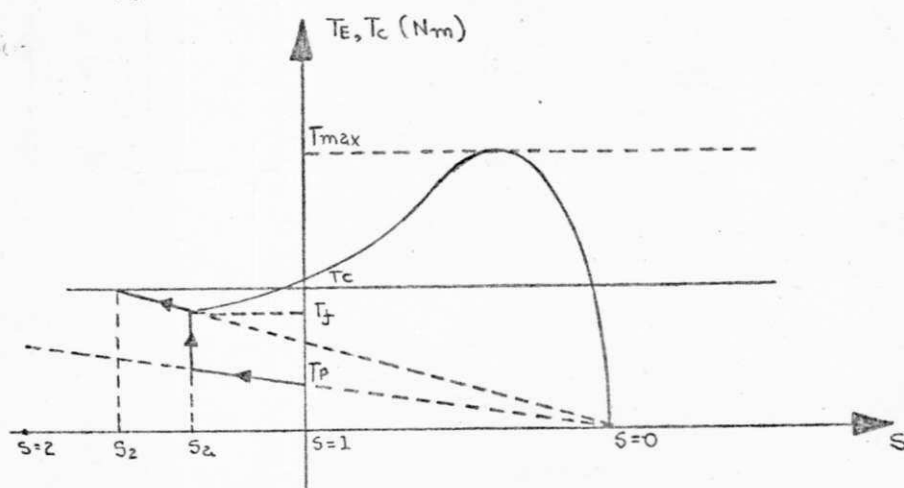
Como o processo de obtenção do freio por inversão em regime permanente só é garantido se $T_p < T_c$, a resistência adicionada para o regime permanente é também suficiente para limitar a corrente de partida. Consequentemente o uso de degraus de aceleração só é justificado se o tempo gasto na aceleração for demasiadamente longo.

No instante inicial tem-se

$$I_p = \frac{E_2}{\sqrt{3} \sqrt{(R_1 + r_2)^2 + X_2^2}} \quad (\text{B-61})$$

e

$$T_p = \frac{3}{\omega_0} I_p^2 (R_1 + r_2) \quad (\text{B-62})$$



freio por inversão com carga ativa - aceleração com dois degraus

fig.(B-12)

Se outros degraus são necessários, as resistências adicionais devem fornecer um torque elétrico no ponto $s=1$ de valor inferior ao torque fornecido pela resistência de regime permanente. A fig.(B-12) mostra a característica mecânica do motor durante uma aceleração realizada com dois degraus.

B - 6.2.2 CÁLCULO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

Durante a aceleração do movimento de freio por inversão, o torque dinâmico é dado por :

$$0 > T_d = T_E - T_c = J \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 J \frac{ds}{dt}$$

Sendo, no primeiro degrau de aceleração, o torque elétrico expresso por

$$T_E = T_p s \quad (B-63)$$

tem-se :

$$t_1 = -\omega_0 J \int_{s=1}^{s=s_{a1}} \frac{ds}{T_p s - T_c} = \frac{-\omega_0 J}{T_p} \ln \frac{s_{a1} - T_c/T_p}{1 - T_c/T_p} \quad (B-64)$$

No segundo degrau o torque elétrico é dado por

$$T_E = \frac{T_f s}{s_a} \quad (B-65)$$

e conseqüentemente o tempo neste degrau é :

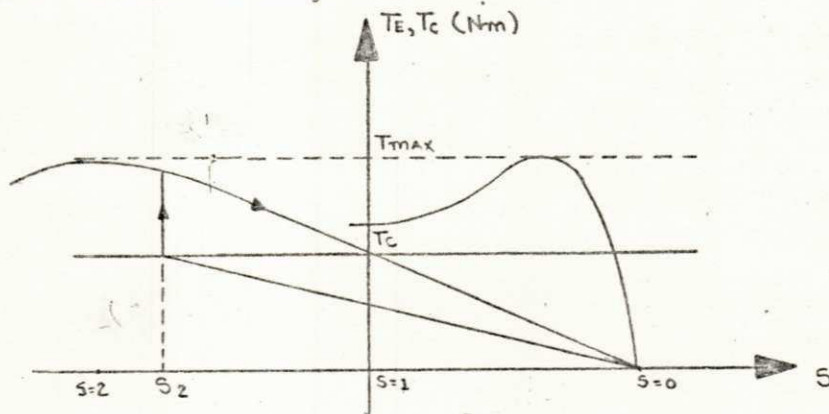
$$t_2 = -\omega_0 J \int_{s=s_a}^{s=s_a'} \frac{ds}{\frac{T_f}{s_a} s - T_c} = \frac{-\omega_0 J s_a}{T_f} \ln \frac{s_a' - T_c/T_f s_a}{s_a - T_c/T_f s_a} \quad (B-66)$$

Nesta última equação, s_2' é o deslizamento correspondente a cerca de 95% da velocidade correspondente ao deslizamento s_2 , porque no ponto s_2 tem-se $T_d=0$, e o tempo para se encontrar esta condição tende para infinito. O valor de s_2' é escolhido arbitrariamente, e o valor indicado acima é geralmente uma escolha adequada para este tipo de projeto.

B - 6.3 FREIO

B - 6.3.1 CÁLCULO DOS DEGRAUS DE FREIO

Para se estacionar um motor atuando em regime permanente de freio por inversão, é suficiente realizar uma troca adequada do valor da resistência adicional rotórica, para aumentar o torque elétrico tornando-o superior ao torque de carga. A fig.(B-13) mostra a característica mecânica do motor nestas condições.



característica mecânica no freio

fig.(B-13)

Como se pode notar , a região de funcionamento deste tipo de freio é a mesma região obtida para se estacionar o motor quando este atua em regime regenerativo , (apend.B, art.(B-5.3.1)). Portanto , usando-se as equações (B-46) e (B-47) , obtem-se

$$I_f = \frac{E_2 S_2}{\sqrt{3} \sqrt{(R_1 + r_2)^2 + X_2^2}} \quad (B-67)$$

e

$$T_f = \frac{I_f}{I_n} T_n \quad (B-68)$$

Da mesma forma que no caso do freio regenerativo , o ponto ótimo teoricamente para a atuação de um freio mecânico é o ponto ($s=1$, $T_e = T_c$) , o qual é obtido com a resistência

$$R_i = \left(\frac{S_{ci}}{S_c} - 1 \right) r_2 \quad (B-69)$$

onde

$$S_{ci} = \left(p' + \sqrt{p'^2 - 1} \right) \quad (B-70)$$

com

$$p' = \frac{T_{max}}{T_c}$$

Também aqui , se a resistência R_i , dada pela equação (B-69) , fornece corrente I_f , dada pela equação (B-67) , de valor superior ao limite máximo indicado pelo fabricante, outro degrau de freio deve ser utilizado no instante inicial com resistência de valor

$$t_i = -\omega_0 J \int_{s=s_{ji}}^{s=s'} \frac{ds}{T_c s - T_c} = \frac{\omega_0 J}{T_c} \ln \frac{s'-1}{s_{ji}-1} \quad (\text{B-75})$$

com s' sendo o deslizamento correspondente a aproximadamente 5% da velocidade nominal do motor, para que a equação (B-75) forneça como resultado $t_i \neq \infty$, pois no ponto $s = 1$ tem-se $T_d = 0$. O valor 5% citado acima é uma escolha arbitrária adequada para os projetos em geral.

APÊNDICE CPROTEÇÃO ELÉTRICAC - 1. PROTEÇÃO CONTRA SOBRE - CARGA

Os relés térmicos fornecem uma boa proteção para sobre-cargas leves e médias . No entanto , frequentemente estes relés não protegem adequadamente os circuitos contra sobre-cargas pesadas . O compromisso inverso aparece nos relés de proteção contra sobre-cargas pesadas . Estes dão proteção adequada nas sobre-cargas pesadas , mas protegem as cargas leves e médias . Portanto , para uma proteção adequada dos circuitos , normalmente é necessário o uso de dois tipos de relés . Geralmente os relés de sobre - cargas têm ação de tempo inverso , principalmente na proteção de sobre-cargas leves e médias , (10, pag.(5-3)) .

Para a instalação de força motriz , segue-se no país as instruções das normas técnicas brasileiras , ou seja :

- para proteção contra sobre-carga dos motores deve-se utilizar um dos seguintes métodos , (5, §22.8.1) ;
 - a) fusíveis de ação retardada em todos os condutores dos ramais não ligados à terra ;

- b) relés térmicos , ajustáveis ou não, fazendo parte integrante da construção de contadores usados para o controle remoto ;
- c) relés térmicos não ajustáveis fazendo parte integrante da construção do motor .

- a capacidade nominal dos dispositivos de proteção deve ser de 125% da corrente nominal (5, §22.8.2);
- a capacidade nominal dos dispositivos de proteção dos ramais de alimentação dos motores é dada conforme a tabela abaixo, (5, tab. nº19, anexo 2);

Tabela

tipo de motor	% da corrente nominal
Assíncrono trifásico , gaiola , com partida a plena tensão	300
Assíncrono trifásico, de aneis e motores de corrente contínua	150

- deverão ser colocados dispositivos de proteção contra sobre-carga nos circuitos de controle e sinalização , em todos os condutores não ligados à terra , (5, §23.2.1 , §9.5.1) . A capacidade nomi-

nal dos dispositivos de proteção do condutor deve ser no máximo igual ao limite de condução de corrente do condutor, (5, §9.5.3) .

C - 2. PROTEÇÃO CONTRA SUB - TENSÃO
(10, pag.(5-5)) e (11, pag.13)

Um motor de indução trabalhando na sua velocidade nominal é essencialmente um equipamento de kVA constante , para uma dada carga no eixo . Portanto , uma sub-tensão trifásica equilibrada resulta numa sobre-corrente trifásica equilibrada . Uma sub-tensão nos terminais de alimentação do motor pode levá-lo a não encontrar sua velocidade nominal durante a aceleração , ou a parar quando a carga é pesada . Quando uma severa queda de tensão acontece na alimentação do motor , o relé de sobre-carga eventualmente detecta esta condição . No entanto o motor deve ser rapidamente desconectado da rede de alimentação . Uma sub-tensão também pode provocar perda de velocidade do motor sem que isto acarrete sobre-carga .

A proteção contra sub-tensão , quando é utilizada, deve ter um pequeno atraso no tempo . Quedas de tensão por 5 a 12 ciclos de duração , na base de $f = 60$ c/s , não afetam os motores , os quais devem ser mantidos na rede de alimentação . Normalmente estes relés devem atuar abrindo os circuitos de alimentação do motor depois de alguns segundos de atraso no tempo .

Para um sistema industrial formado por vários motores , onde cada motor tem proteção contra sub-tensão , geralmente se usa relés com diferentes atrasos no tempo de religação dos motores . Isto evita reaceleração dos motores simultaneamente .

C - 3. CHAVE SEPARADORA

De acordo com as exigências das normas técnicas do país de instalações de força motriz , tem-se os seguintes itens referentes à chave separadora :

- cada motor deve ser dotado de chave separadora individual , colocada antes do seu dispositivo de proteção , (5,§22.7.1) ; a chave separadora deve ter capacidade nominal de pelo menos 115% da corente nominal do motor , (5,§22.7.3.a) ;
- o circuito de controle remoto deve ficar desenergizado quando a chave separadora do motor estiver aberta , (5,§22.12.1) .

APÊNDICE DCÁLCULO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELAS
RESISTÊNCIAS ADICIONAISSÍMBOLOS E UNIDADES

<u>SÍMBOLO</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
A	emissão térmica	J/°s
I_{eq}	corrente equivalente para o esquentamento	A
I'_{eq}	corrente média quadrática	A
$I_{eq_{máx}}$	corrente média quadrática máxima	A
$I_{eq_{mín}}$	corrente média quadrática mínima	A
Q	quantidade de calor gerada por um corpo em um segundo	J/s
t_i	tempo	s
t_{pi}	tempo de inatividade de um sistema	s
t_{ti}	tempo de atividade de um sistema	s
ζ_{est_i}	temperatura estável	°
$\zeta_{máx}$	temperatura máxima	°

O cálculo térmico das resistências consiste em de terminar a corrente estabelecida em regime permanente que causa o mesmo esquentamento, ou a mesma elevação de temperatura, que a corrente variável real causa. Para isto é necessário calcular a corrente equivalente para o esquentamento.

A corrente média quadrática é definida como uma corrente equivalente de grandeza constante que circula na resistência durante o intervalo de tempo t_i de circulação da corrente variável, causando o fluxo da mesma quantidade de eletricidade que a corrente variável real. Esta corrente média quadrática é dada por :

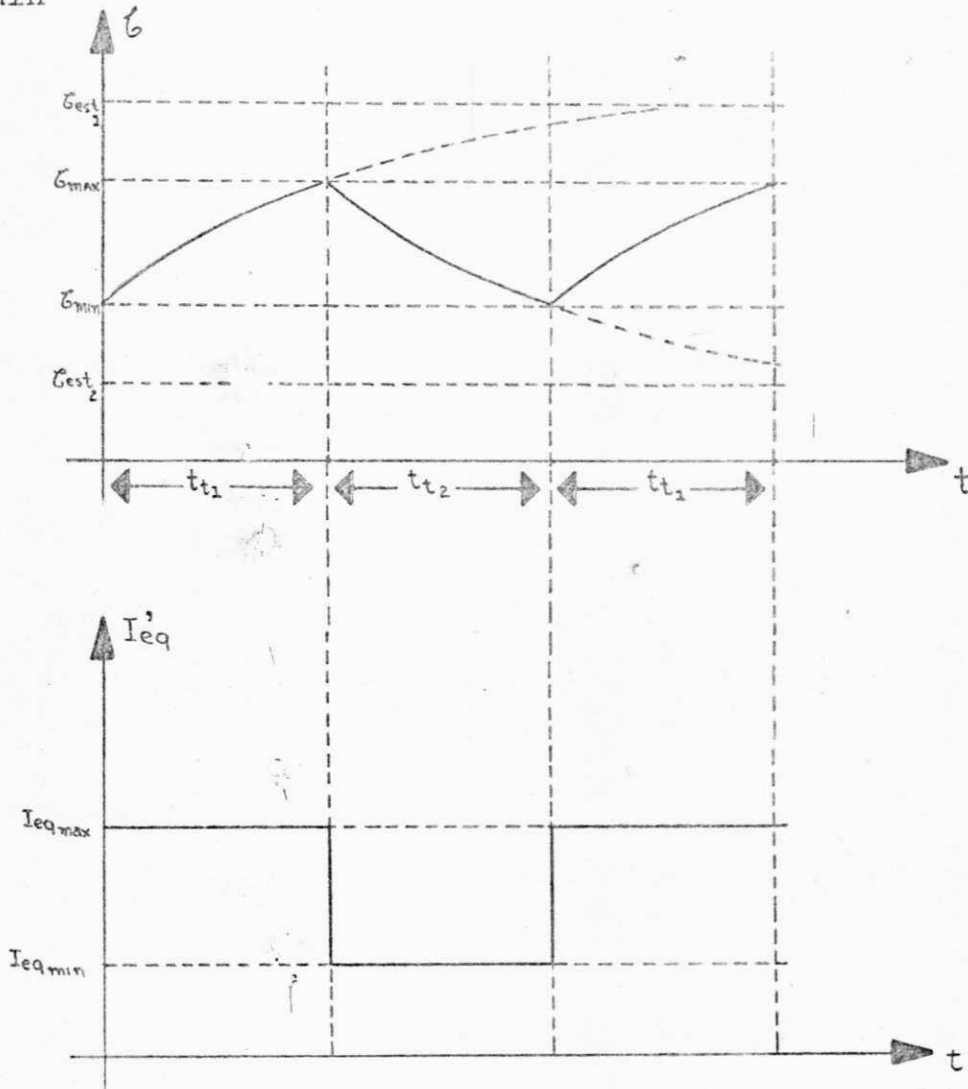
$$I_{eq} = \sqrt{\frac{1}{t_i} \int_0^{t_i} [I(t)]^2 dt} \quad (D-1)$$

Finalmente, a corrente equivalente para o esquentamento é definida como uma corrente equivalente de grandeza constante que causa o esquentamento estável da resistência igual ao esquentamento máximo obtido pela circulação da corrente variável real, no intervalo de tempo considerado.

Se a corrente média quadrática é aplicada na resistência em regime intermitente, depois de estabilizado o ciclo de esquentamento, a curva térmica da resistência é a curva mostrada na fig.(D-1). Durante o tempo t_{t1} a resistência é percorrida pela corrente média quadrática máxima, à qual corresponde a temperatura estável ζ_{est_1} . Durante o

<u>SÍMBOLO</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>UNIDADE</u>
t_{\min}	temperatura mínima	°
t_R	constante de tempo térmica de uma resistência	s

tempo t_{t2} a corrente média quadrática é mínima e correspondente à temperatura estável ζ_{est2} . O resultado final é o esquentamento da resistência variando entre os pontos ζ_{max} e ζ_{min} os quais são dados por :



curva térmica da resistência para aplicação da corrente média quadrática I'_{eq} durante regime intermitente de trabalho

fig.(D-1)

$$C_{\max} = C_{\text{est}_1} \left(1 - e^{-\frac{tt_1}{C_R}}\right) + C_{\min} e^{-\frac{tt_2}{C_R}} = \frac{Q_{\max}}{A} \quad (\text{D-2})$$

$$C_{\min} = C_{\text{est}_2} \left(1 - e^{-\frac{tt_2}{C_R}}\right) + C_{\max} e^{-\frac{tt_1}{C_R}} = \frac{Q_{\min}}{A} \quad (\text{D-3})$$

onde

$$C_{\text{est}_1} = \frac{Q_1}{A} = \frac{I_{\text{eq max}}^2 R_i}{A} \quad (\text{D-4})$$

$$C_{\text{est}_2} = \frac{Q_2}{A} = \frac{I_{\text{eq min}}^2 R_i}{A} \quad (\text{D-5})$$

$$Q_{\max} = I_{\text{ea}}^2 R_i \quad (\text{D-6})$$

Combinando-se as equações (D-2), (D-3), (D-4), (D-5) e (D-6) obtém-se :

$$I_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{I_{\text{eq max}}^2 \left(1 - e^{-\frac{tt_1}{C_R}}\right) + I_{\text{eq min}}^2 \left(e^{-\frac{tt_1}{C_R}} - e^{-\frac{tt_1 + tt_2}{C_R}}\right)}{1 - e^{-\frac{tt_1 + tt_2}{C_R}}}} \quad (\text{D-7})$$

sendo I_{eq} a corrente equivalente para o esquentamento .

Se o ciclo de trabalho da resistência se divide num tempo t_{ti} de atividade do sistema e num tempo t_{pi} de inatividade, o que significa

$$I'_{eq_{min}} = 0$$

$$I'_{eq_{max}} = I'_{eq}$$

se obtém :

$$I_{eq} = I'_{eq} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{ti}}{\tau_R}}}{1 - e^{-\frac{t_{ti} + t_{pi}}{\tau_R}}}} \quad (D-8)$$

Finalmente, a potência nominal da resistência R_i submetida à corrente I'_{eq} durante um intervalo de tempo t_{ti} e inativa durante o intervalo de tempo t_{pi} é :

$$P_i = R_i I_{eq}^2 \quad (D-9)$$

Este apêndice é baseado na referência 14, capítulo 6 .

APÊNDICE EDIAGRAMAS DOS CIRCUITOS ELÉTRICOS E
SÍMBOLOS GRÁFICOSE - 1. DIAGRAMAS DOS CIRCUITOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Todo projeto industrial de instalações elétricas deve conter diagramas tais que informem detalhadamente sobre os seguintes itens :

- operação do sistema ;
- conexões exatas entre os instrumentos , equipamentos e caixas de terminais do sistema ;
- localizações dos instrumentos e equipamentos e caixas de terminais ;
- tipo de instrumentos e equipamentos requeridos ;
- tipo dos fios ou cabos usados nas conexões ;
- identificação dos instrumentos , equipamentos, caixas de terminais e terminais dos fios ou cabos .

Todas estas informações devem ser fornecidas de tal maneira que na montagem do sistema não haja liberdade de escolha para as conexões e localizações dos dispositivos . Desta forma , o projetista impõe as conexões entre os dispositivos , suas localizações e identificações , exatamente como determinadas em suas soluções . É então comum um projeto de ins

talações elétricas conter quatro diagramas , os quais juntos preenchem as condições acima citadas . Estes quatro diagramas são definidos da seguinte forma :

- Diagrama Ideal

é um diagrama usado para a explicação do funcionamento dos circuitos ;

- Diagrama Ideal Detalhado

é um diagrama que difere do primeiro porque mostra adicionalmente todas as conexões entre os terminais dos instrumentos , equipamentos e caixas de terminais , exatamente como estas conexões são projetadas ; é usado para a manutenção do sistema;

- Diagrama de Localização

é um diagrama que mostra a localização dos instrumentos , equipamentos e caixas de terminais , com suas respectivas dimensões , indicando distâncias entre os dispositivos e medidas das caixas que os contém ; é usado para a montagem do sistema ;

- Diagrama de Conexões

é um diagrama que mostra cada conexão particular entre os terminais dos instrumentos , equipamentos e caixas de terminais , indicando o tipo de fio ou cabo usado nas conexões ; é também utilizado para a montagem do sistema , e é facilmente acompanhado

durante a montagem , quando é apresentado da se
guinte forma :

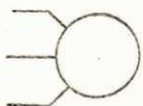
Diagrama de Conexões		
Terminais	Endereço	Fio ou Cabo
P ₁₋₁	P ₂₋₂	AWG-16 verde
P ₁₋₂	Q ₁₋₃	AWG-16 branco
P ₁₋₃	Q ₂₋₁	AWG-14 branco
P ₂₋₁	Q ₃₋₁	AWG-14 preto
P ₂₋₂	P ₁₋₁	AWG-16 verde
.	.	.
.	.	.
.	.	.

como se pode notar , cada conexão é especificada
duas vezes .

Em todos os diagramas os dispositivos são identifi
cados por um símbolo propriamente escolhida pelo projetista.

Para a realização dos tres últimos diagramas é necessário que o projetista tenha um prévio conhecimento das dimensões dos dispositivos utilizados e dos símbolos dos seus terminais , normalmente indicados em catálogos .

E - 2. SÍMBOLOS GRÁFICOS USADOS NOS CIRCUITOS DE ACIONAMENTO E NAS DESCRIÇÕES DE SEU FUNCIONAMENTO



motor de indução trifásico



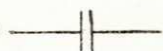
armadura do motor DC



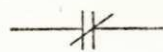
botão NA



botão NF



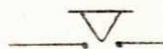
contacto NA



contacto NF



contacto térmico NF



contacto NA com retardo no tempo de fechamento



contacto NA com retardo no tempo de abertura



contacto NF com retardo no tempo de fechamento



contacto NF com retardo no tempo de abertura



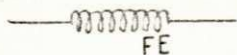
bobina de relé ou contactor



bobina de relé de corrente



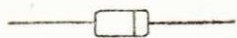
bobina de relé temporizado



bobina de freio eletromagnético



chave faca



fusível



resistência

- NA normalmente aberto
- NF normalmente fechado
- + dispositivo acionado por um certo inter
valo de tempo durante o funcionamento do
circuito
- ++ dispositivo acionado e assim mantido du
rante o funcionamento do circuito
- dispositivo desacionado

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - LIPKIN , B. Y.
ELECTRICAL EQUIPMENT FOR INDUSTRY
Higher School Publishing House
Moscow - 1967

- 2 - FONSECA , ADEMAR
CURSO DE MECÂNICA - Vol. III
Ao Livro Técnico S. A.
Rio de Janeiro - 1964

- 3 - GOGOLEWSKI , Z. - KUCZEWSKI , Z.
NAPED ELEKTRYCZNY
Wydawnictwa Naukowo - Techniczne
Warszawa - 1971

- 4 - SIEMENS DO BRASIL S. A.
Carta de Catálogo - símbolo SP/6-002

- 5 - EXECUÇÃO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO
Associação Brasileira de Normas Técnicas - NB-3

- 6 - CHILIKIN , M.
ELECTRIC DRIVE
Mir Publishers
Moscow - 1970

- 7 - FITZGERALD - KINGSLEY - KUSKO
ELECTRIC MACHINERY
McGraw - Hill Book Company
New York - 1971

- 8 - PORADNIK INZYNIERA ELEKTRYKA
Wydawnictwa Naukowo - Techniczne
Warszawa - 1968

- 9 - WARNER ELECTRIC BRAKE & CLUTCH COMPANY
Catálogo P-137-8 , 197
Beloit , Wisconsin

- 10 - WESTINGHOUSE . ELECTRIC CORPORATION
Relay Instrument Division
New York , New Jersey

- 11 - IEEE GUIDE OF PROTECTION OF INDUCTION MOTOR
The Institute of Electrical and Electronics Engineers
Inc.
New York - 1972

- 12 - FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM BAIXA TENSÃO
Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba
Paraíba - 1973

- 14 - NORMA PARA FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
BAIXA TENSÃO (Zona Urbana)

Companhia de Eletrificação da Borborema
Paraíba

- 14 - VESHENEVSKI , S.
CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES EN EL ACCIONAMIENTO
ELECTRICO
Editorial Mir
Moscow - 1972
- 15 - SIEMENS DO BRASIL S. A.
Catálogo - Motores Trifásico Assíncronos para Baixa Ten
são - 1972
- 16 - TELEMACÂNICA ELÉTRICA S. A.
Catálogo - Aparelhagem para Automatizações Industriais,
1971
- 17 - SISKIND , CHARLES S.
SISTEMAS INDUSTRIALES DE REGULACION ELECTRIC
Editorial Labor S. A.
Barcelona - 1968
- 18 - FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ALTA TENSÃO
Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba
Paraíba - 1973
- 19 - NORMA PARA FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM AL-
TA TENSÃO

Companhia de Eletrificação da Borborema
Paraíba

- 20 - TITARENKO , M. - NORKOV , I.
PROTECTIVE RELAYING IN ELECTRIC POWER SYSTEMS
Dukelsky Peace Publishers
Moscow
- 21 - HEUMANN , GERHART W.
MAGNETIC CONTROL OF INDUSTRIAL MOTORS
John Wiley & Sons , Inc.
New York - 1961
- 22 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
Catálogo de Normas 1972