

PEA 2401 - LABORATÓRIO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS I

CONDUTORES E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO (CDP_EA)

RELATÓRIO

-

NOTA

.....

Grupo:.....
.....
.....
.....

Professor:.....Data:.....

Objetivo:.....
.....
.....
.....

IMPORTANTE: Em todas as medições, o amperímetro de alicate deverá ser colocado no cabo de 16 mm² (cabo mais grosso), **e não no fio de 1,5 mm²**. O fio de 1,5 mm² alcança temperaturas mais elevadas, podendo causar o derretimento da capa amarela de proteção do alicate.

1. Curva teórica de aquecimento de um fio isolado ao ar livre

1.1 - Dados

Diâmetro externo do condutor	$D_{\text{cond}} = 1,4 \text{ mm}$
Diâmetro externo do fio	$D_{\text{fio}} = 2,7 \text{ mm}$
Temperatura máxima de operação(PVC)	$T_{\text{cond_max}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Resistividade ôhmica do cobre a 20°C	$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 0,017241 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Resistividade térmica do isolante	$\rho_{\text{iso}} = 6,0 \text{ }^{\circ}\text{Cm/W}$
Capacidade térmica específica do cobre	$c_{\text{cond}} = 3,45 \cdot 10^6 \text{ J/}^{\circ}\text{Cm}^3$
Capacidade térmica específica do isolante	$c_{\text{iso}} = 1,70 \cdot 10^6 \text{ J/}^{\circ}\text{Cm}^3$
Constantes da geometria da instalação para um fio isolado ao ar livre (Tabela IEC)	$E = 3,94$ $g = 0,60$ $z = 0,21$

1.2 - Calcular

- Resistência ôhmica do condutor à temperatura máxima de operação

$$S_{cond} = \pi \cdot \left(\frac{D_{cond}}{2}\right)^2 = \dots\dots\dots mm^2$$

$$R_{cond}(T_{cond\ max}) = \frac{\rho_{20^\circ C}}{S_{cond}} \cdot [1 + 0,00393 \times (T_{cond\ max} - 20)] = \dots\dots\dots \Omega / m$$

- Resistência térmica do isolante (Figura 1)

$$R_{tiso} = \frac{\rho_{iso}}{2\pi} \ln \frac{D_{fio}}{D_{cond}} = \dots\dots\dots ^\circ C m / W$$

- Resistência térmica do ar (Figura 1)

$$T_{amb} = \dots\dots\dots ^\circ C$$

$$h = \frac{z}{(10^{-3} \cdot D_{fio})^g} + E = \dots\dots\dots$$

$$\theta_s = T_{sup.iso} - T_{amb} = 15^\circ C \text{ (valor adotado)}$$

$$R_{tar} = \frac{10^3}{\pi \times D_{fio} \times h} \times \theta_s^{-0,25} = \dots\dots\dots ^\circ C m / W$$

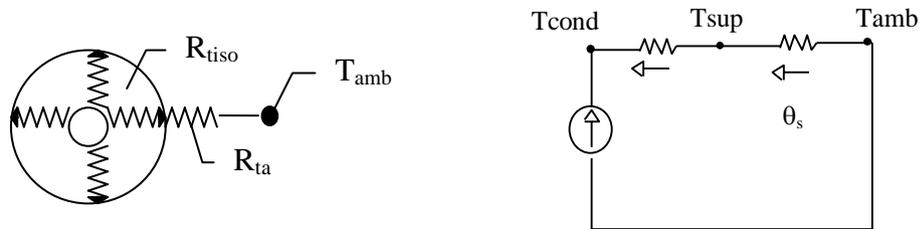


Figura 1 - Resistências térmicas

θ_s = elevação de temperatura da superfície da isolação sobre o ambiente ($^\circ C$);

h = coeficiente de dissipação de calor.

- Capacidade térmica do condutor

$$Q_{cond} = 10^{-6} \times c_{cond} \times S_{cond} = \dots\dots\dots J / ^\circ C m$$

- Capacidade térmica da isolação

$$Q_{iso} = 10^{-6} \times C_{iso} \times S_{iso} = 10^{-6} \times C_{iso} \times \frac{\pi}{4} \times (D_{fio}^2 - D_{cond}^2) = \dots\dots\dots J / ^\circ C m$$

1.3 - Expressão final da curva teórica de aquecimento

A curva de aquecimento do condutor é dada por:

$$\theta(t) = T_{cond}(t) - T_{amb} = R_{cond} \times I^2 \times (R_{tiso} + R_{tar}) \times [1 - e^{-\frac{t}{(R_{tiso} + R_{tar}) \times (Q_{cond} + Q_{iso})}}]$$

ou

$$T_{cond}(t) = T_{amb} + A \cdot I^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) \tag{1}$$

em que

$$A = R_{cond} \cdot (R_{tiso} + R_{tar}) = \dots\dots\dots$$

$$B = (R_{tiso} + R_{tar}) \cdot (Q_{cond} + Q_{iso}) = \dots\dots\dots$$

1.4 - Corrente admissível em regime contínuo

Para um intervalo de tempo suficientemente grande ($t \rightarrow \infty$), resulta da Eq (1):

$$I_{adm_cont_t} = \sqrt{\frac{T_{cond_max} - T_{amb}}{A}} \tag{2}$$

$$I_{adm_cont_t} = \dots\dots\dots A$$

2. Curva experimental de aquecimento de um fio isolado ao ar livre

2.1 - Execute a montagem representada na Figura 2.

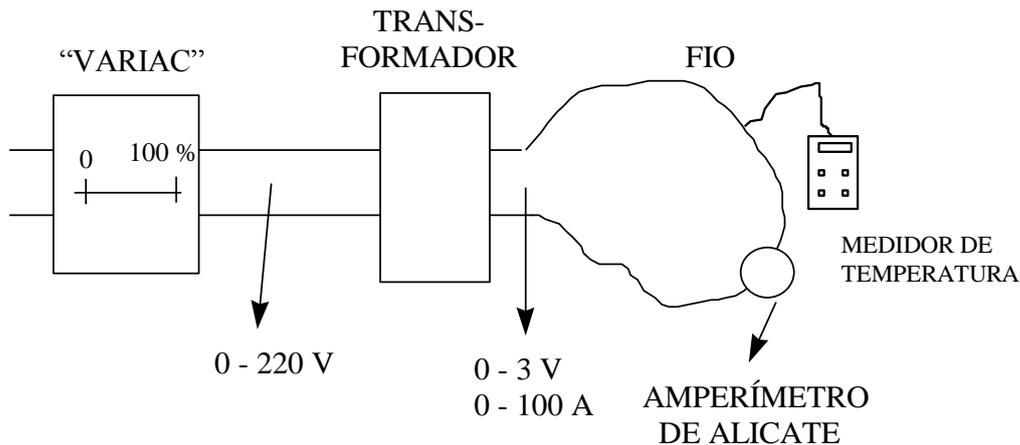


Figura 2 - Montagem experimental

2.2 - Levante a curva de temperatura de um fio isolado ao ar livre impondo o valor $I_{adm_cont_t}$ (Eq. (2)). Preencha a primeira coluna da Tabela 1.

ATENÇÃO: Devido ao aumento de resistência do condutor e à baixa tensão fornecida pelo transformador, a corrente irá diminuindo paulatinamente. Mantenha a corrente constante no valor especificado, ajustando o controle do variac ao longo do tempo.

Tabela 1 - Curvas de aquecimento de um fio isolado ao ar livre

Tempo (s)	Temperatura (°C)	
	Experimental	Teórica
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
90		
120		
150		
180		
210		
240		
270		
300		
330		
360		

- 2.3 - Utilizando a expressão obtida em 1.3 (Eq. (1)), preencha a segunda coluna da Tabela 1.
- 2.4 - Determine experimentalmente a corrente admissível em regime contínuo do fio (ajuste a corrente até que a temperatura se estabilize em 70 °C).

$$I_{adm_cont_e} = \dots\dots\dots A$$

Compare $I_{adm_cont_e}$ com $I_{adm_cont_t}$ e comente.

.....

.....

.....

.....

.....

- 2.5 - Estime o valor da constante A a partir da corrente admissível obtida em 2.4.

$$A_{exp} = \frac{T_{cond_max} - T_{amb}}{I_{adm_cont_e}^2}$$

$$A_{exp} = \dots\dots\dots$$

- 2.6 - Estime o valor da constante de tempo B, a partir da curva experimental de aquecimento (primeira coluna da Tabela 1). NB: em 4 constantes de tempo, a **elevação de temperatura** atinge 98,17% de seu valor de regime. Para determinar a constante de tempo, escolha o instante 4τ tal que:

$$T_{cond}(4\tau) = T_{amb} + 0,9817 \cdot (T_{\infty} - T_{amb}),$$

em que T_{∞} indica o valor de regime na curva experimental de aquecimento.

$$T_{cond}(4\tau) = \dots\dots\dots^\circ C$$

$$4\tau = \dots\dots\dots s$$

$$B_{exp} = \tau = \frac{4\tau}{4} = \dots\dots\dots s$$

3. Corrente admissível em regime cíclico de carga

3.1 - Considere o regime cíclico de carga representado na Figura 3.

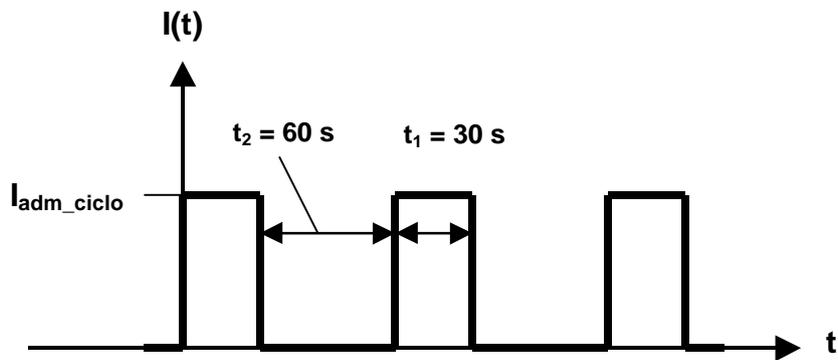


Figura 3 - Ciclo de carga

3.2 - Calcule o valor da corrente admissível no regime da Figura 3 (I_{adm_ciclo}), utilizando os parâmetros obtidos experimentalmente (A_{exp} e B_{exp}).

Para tanto, admita que no instante final do período em que a corrente é aplicada (t_1), a temperatura do condutor é T_{cond_max} ($= 70^\circ C$), conforme ilustra a Figura 4).

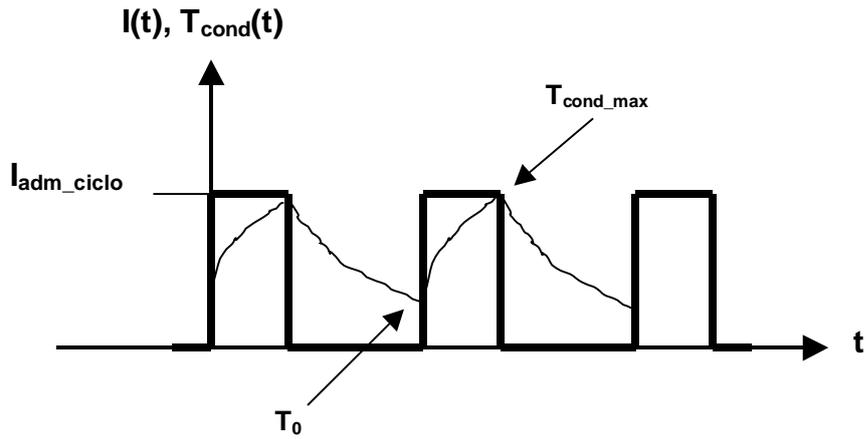


Figura 4 - Ciclo de carga e ciclo de temperatura

Para a fase de aquecimento tem-se:

$$T_{cond}(t_1) = T_{cond_max} = T_0 + (A_{exp} \cdot I_{adm_ciclo}^2 + T_{amb} - T_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{B_{exp}}}\right) \quad (3)$$

Para a fase de resfriamento tem-se:

$$T_{cond}(t_2) = T_0 = T_{amb} + (T_{cond_max} - T_{amb}) \cdot e^{-\frac{t_2}{B_{exp}}} \quad (4)$$

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (3) resulta:

$$I_{adm_ciclo} = \sqrt{\frac{(T_{cond_max} - T_{amb}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{B_{exp}}}\right)}{A_{exp} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{B_{exp}}}\right)}} = I_{adm_cont_e} \cdot \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{B_{exp}}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{B_{exp}}}}} \quad (5)$$

Note que, para $t_2 \rightarrow 0$ (eliminação do período de resfriamento), a Eq. (5) fornece a corrente admissível em regime contínuo (Eq. (2)).

$$I_{adm_ciclo} = \dots\dots\dots A$$

3.3 - Estime o fator de aumento da corrente admissível devido ao ciclo de carga.

$$f = \frac{I_{adm_ciclo}}{I_{adm_cont_e}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{B_{exp}}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{B_{exp}}}}}$$

$f = \dots\dots\dots$

3.4 - Imponha ao fio o ciclo de carga da Figura 3. Imponha inicialmente a corrente I_{adm_ciclo} e, quando a temperatura do condutor alcançar T_{cond_max} (70 °C), desligue o variac e inicie a contagem de tempo do primeiro período de resfriamento. A partir deste ponto ligue e desligue o variac nos instantes especificados e meça a temperatura do condutor, lançando os valores na Tabela 2.

Tabela 2 - Temperaturas inicial e final em cada ciclo

Ciclo	1	2	3	4	5
T_{cond_max} (°C)	70				
T_0 (°C)					

Da Tabela 2, destaque os valores correspondentes ao último ciclo medido:

$T_{cond_max_e} = \dots\dots\dots^\circ C$

$T_0 = \dots\dots\dots^\circ C$

Compare o valor $T_{cond_max_e}$ com o esperado (70 °C).

.....

4. Levantamento da curva tempo x corrente de disjuntor de baixa tensão

4.1 - Determine aproximadamente o limiar de atuação da proteção magnética do disjuntor de 15A. Para tanto, inicie o experimento com uma corrente elevada (maior que 50 A) e observe que a abertura do disjuntor é imediata (atuação do elemento magnético - proteção contra curto-circuito). Para isso, ajuste a posição do variac experimentalmente. A partir desse ponto deve-se diminuir o valor da corrente até a obtenção de uma corrente mínima (I_{limiar}) onde a abertura do disjuntor continua imediata, conforme ilustrado na Figura 5.

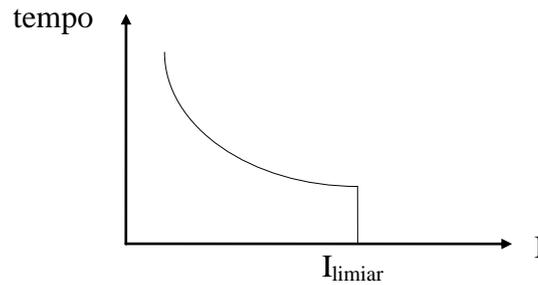


Figura 5 - Limiar de atuação da proteção manética

$I_{\text{limiar}} = \dots\dots\dots A$

4.2 - Levante a curva tempo x corrente do disjuntor de 15A, a partir do valor de corrente determinado no item anterior e diminuindo sucessivamente a corrente. Considere um mínimo de 5 pontos até o limite inferior de 25 A. Complete a Tabela 3 e trace o gráfico tempo x corrente na Figura 6.

ATENÇÃO: Para cada ponto obtido, permita o resfriamento do disjuntor por um tempo mínimo de 2 minutos.

Tabela 3 - Curva tempo x corrente do disjuntor de 15 A

Corrente (A)	Tempo(s)

5. Coordenação da proteção

5.1 - Considerando a equação de aquecimento fio isolado ao ar livre (Eq. (1)), preencha a primeira coluna da Tabela 4, supondo que o fio parte sempre da temperatura ambiente e alcança a temperatura máxima ($T_{cond_max} = 70\text{ °C}$) após o tempo especificado. Trace na Figura 6 a correspondente curva tempo x corrente.

Tabela 4 - Correntes para coordenação disjuntor-fio

Tempo(s)	Corrente fornecida pela Eq. (1) (A)	Corrente fornecida pela Eq. (6) (A)
30		(*)
20		(*)
10		
5		
4		
3		
2		
1		

(*) A Eq. (6) pressupõe pequena duração do curto-circuito e, assim, os valores de tempo 20 s e 30 s são descartados.

5.2 - Determine a equação de suportabilidade do fio (hipótese adiabática). Considere que (i) o fio se encontrava operando na temperatura máxima (70 °C) antes da ocorrência do curto-circuito, e (ii) a temperatura máxima admissível do fio durante o curto-circuito é 150 °C.

Neste caso, tem-se (processo adiabático):

$$[\text{Calor produzido}] = [\text{Calor armazenado}]$$

ou

$$R_{cond} \cdot I^2 \cdot t = (Q_{cond} + Q_{iso}) \cdot \Delta T$$

ou ainda

$$I^2 \cdot t = \frac{(Q_{cond} + Q_{iso}) \cdot \Delta T}{R_{cond}} \quad (6)$$

A resistência do condutor na Eq. (6) deve ser calculada na temperatura máxima especificada (150 °C).

$$I^2 \cdot t = \dots\dots\dots$$

Utilize a equação acima para preencher a segunda coluna da Tabela 4. Trace na Figura 6 a correspondente curva tempo x corrente. NB: Demonstra-se facilmente que, num papel log-log, a Eq. (6) é representada por uma reta com inclinação de aproximadamente 117°.

5.3 - Utilizando o gráfico da Figura 6, verifique:

a) seletividade entre os disjuntores de 15 A e 30 A

.....
.....
.....
.....
.....

b) adequação dos disjuntores de 15 A e 30 A para proteger o fio de 1,5mm²

.....
.....
.....
.....
.....

c) a diferença entre as duas curvas que descrevem o comportamento do fio

.....
.....
.....
.....
.....

5.4 - Ligue o fio de 1,5 mm² em série com o disjuntor de 15 A e imponha corrente de 50 A. Verifique se o disjuntor abre antes ou depois da temperatura do condutor alcançar 70°C. Comente.

.....
.....
.....
.....
.....

5.5 - Substitua o disjuntor de 15 A pelo de 30 A e repita o item anterior. Comente.
(Obs: se o disjuntor não interromper o circuito e a temperatura no condutor ultrapassar um valor de 80°C, desligue o circuito).

.....
.....
.....
.....
.....

5.6 - Comente os resultados.

.....
.....
.....
.....
.....

6. Conclusões

.....
.....
.....
.....
.....

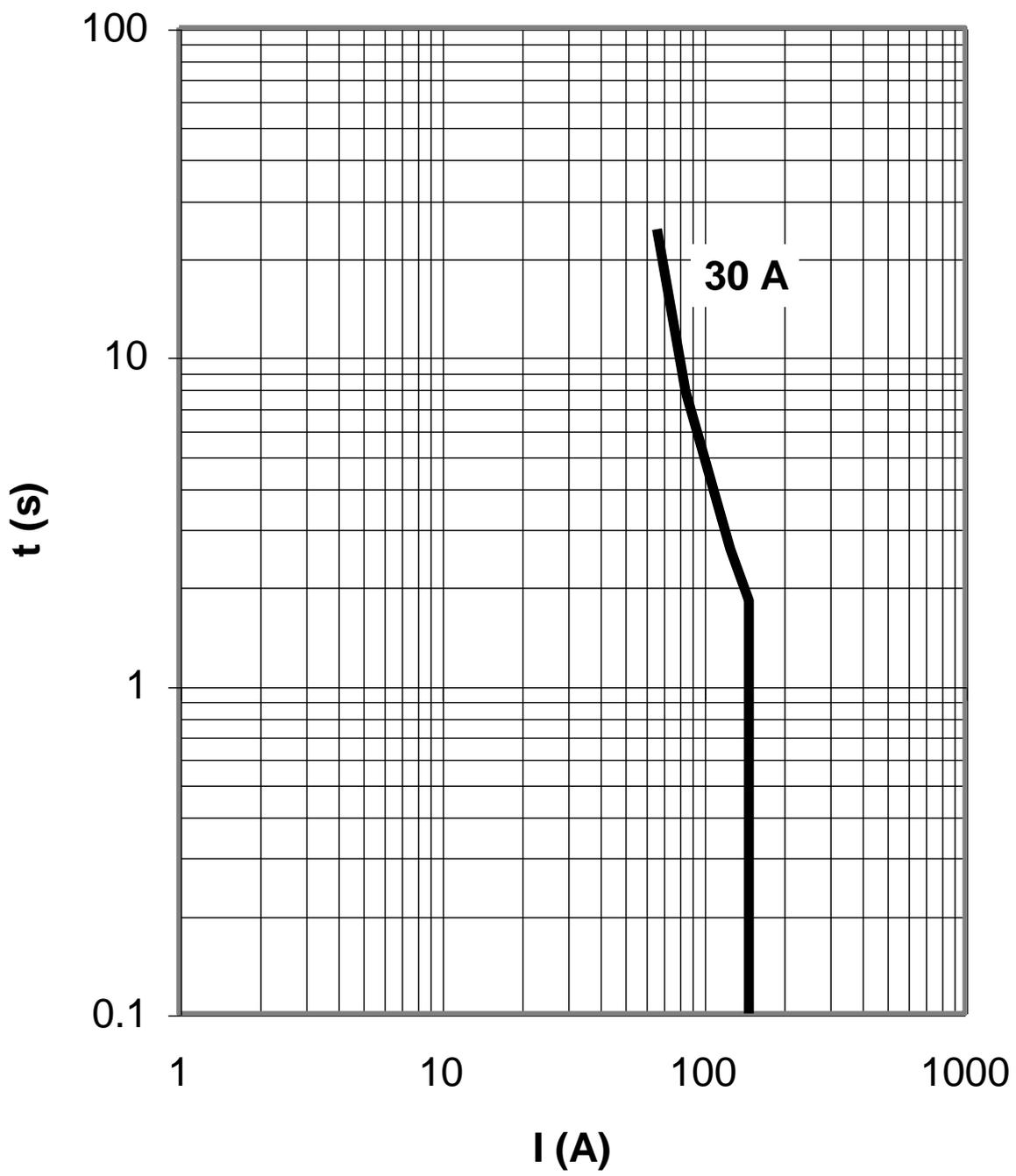


Figura 6