



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMI - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E PETRÓLEO

PEA - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS

Eduardo Poleze, Deinar Mercaldi Rafani, Marcos Yukio Yamaguchi

Prof. Dr. Carlos Frederico Meschini, Prof. Dr. Cícero Couto de Moraes

LABORATÓRIO DE ELETROTÉCNICA GERAL

**EXPERIMENTO: CONDUTORES E DISPOSITIVOS DE
PROTEÇÃO**

Aluno

Nº. USP

1. INTRODUÇÃO

1.1. Condutores

Os **condutores elétricos** são utilizados para transportar energia elétrica ou sinais elétricos. Podem ser confeccionados na forma de **fios** (maciço, com seção transversal invariável) ou de **cabos** (composto por fios justapostos). Em ambos os casos, podem ou não apresentar proteção mecânica, cuja função é garantir a integridade física do material condutor, e/ou isolação, que garante a integridade da energia ou dos sinais transportados.

Dentre os **materiais condutores**, os mais utilizados na confecção dos fios e cabos são o **cobre** (resistividade = $1,724 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$) e o **alumínio** (resistividade = $2,820 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$). Em comparação, o cobre possui melhores propriedades elétricas, enquanto o alumínio apresenta melhores propriedades mecânicas (um condutor de cobre com o mesmo comprimento que um condutor de alumínio e a mesma resistência elétrica possui o dobro da massa). Devido à maior facilidade de oxidação e à baixa condutividade do alumínio oxidado, não se pode usar condutores de alumínio em instalações de baixa tensão.

A capacidade máxima de condução de corrente dos cabos com isolação está principalmente relacionada com a temperatura máxima de operação do isolante. A passagem de corrente causa, por efeito Joule, o aquecimento do condutor. Da energia térmica produzida, parte é armazenada no cabo e parte é transferida para a atmosfera, conforme a equação abaixo:

$$Wdt = Cd\theta(t) + h_t\theta(t)dt$$

Sendo:

W – Calor produzido por efeito Joule ($R \cdot I^2$) [W/m];

C – Capacidade térmica do condutor e do isolante [$J/^\circ\text{C} \cdot m$];

$\theta(t) = T_{condutor} - T_{ambiente}$ [$^\circ\text{C}$];

h_t – Coeficiente global de dissipação térmica para o meio ambiente [$W/^\circ\text{C} \cdot m$];

Assim, o aquecimento do condutor pode ser descrito por uma **equação diferencial de primeira ordem**, representada por:

$$W = C \frac{d\theta(t)}{dt} + h_t \theta(t)$$

A solução dessa equação diferencial é dada por:

$$\theta(t) = \frac{W}{h_t} \left(1 - e^{-\frac{t}{C/h_t}} \right) = \frac{R \cdot I^2}{h_t} \left(1 - e^{-\frac{t}{C/h_t}} \right)$$

Definindo-se as constantes A e B como:

$$A = \frac{R}{h_t}$$

$$B = \frac{C}{h_t},$$

é possível escrever a expressão da variação de temperatura $\theta(t)$ como sendo:

$$\theta(t) = AI^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{B}} \right)$$

A constante B é chamada de **constante de tempo** do sistema. Observe que, para $t = B$, o seguinte resultado é obtido:

$$\theta(B) = AI^2(1 - e^{-1}) = 0,632 \cdot AI^2$$

Pode-se obter a temperatura de regime ($t \rightarrow \infty$) na superfície do condutor ($T_{condutor,regime}$), a partir da expressão de $\theta(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) = T_{condutor,regime} - T_{ambiente} = AI^2$$

$$\therefore T_{condutor,regime} = T_{ambiente} + AI^2$$

A curva de aquecimento $\theta(t)$ é apresentada na Figura 1. Observe que é possível estimar os parâmetros A e B a partir de uma curva de aquecimento obtida experimentalmente, tendo o cuidado de manter o valor da I fixo.

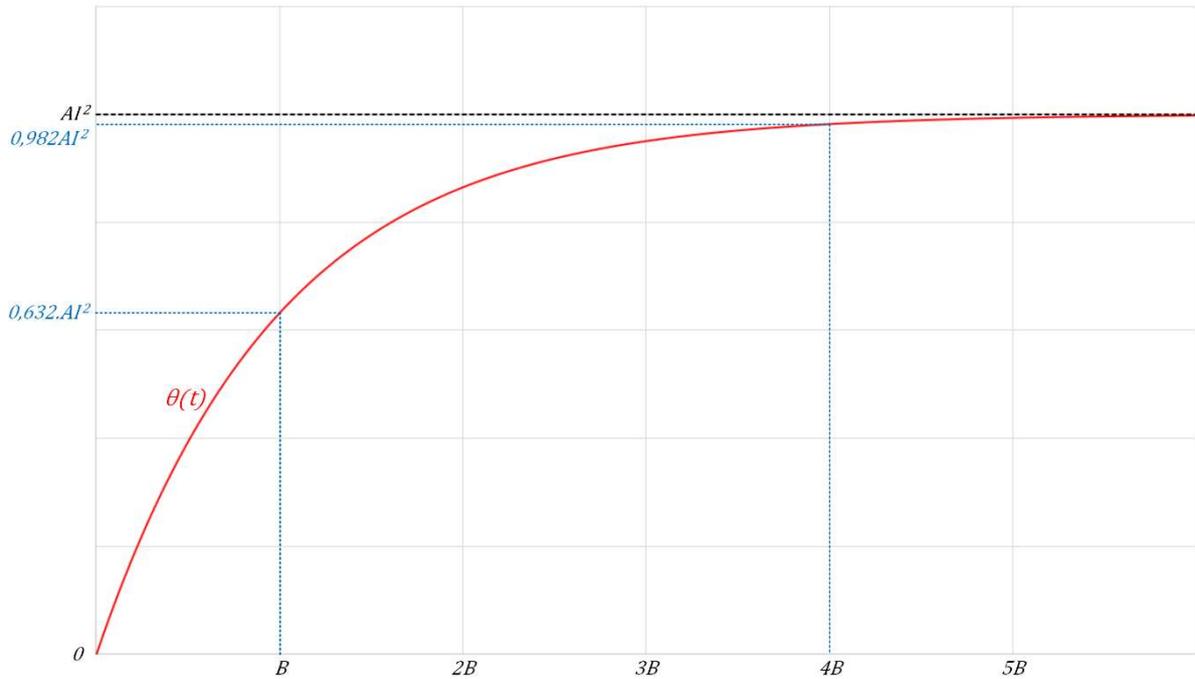


Figura 1 – Curva de aquecimento do condutor.

A temperatura de regime na superfície do condutor **deve ser menor que a maior temperatura que a isolamento pode atingir** continuamente em serviço normal. Essa temperatura varia conforme o material com o qual o isolante é fabricado.

É possível expressar a variação da resistência elétrica de um condutor metálico em função de sua temperatura através da expressão:

$$R = \frac{\rho_{20^{\circ}\text{C}}}{S_{\text{condutor}}} [1 + \alpha(T_{\text{condutor}} - 20^{\circ})] \left[\frac{\Omega}{\text{m}} \right],$$

sendo:

$\rho_{20^{\circ}\text{C}}$ – Resistividade do condutor a 20°C [$\Omega \cdot \text{m}$]

α – Coeficiente linear de variação da resistividade do material com a temperatura [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

Assim, conhecendo-se a temperatura de regime máxima que o isolante pode atingir, a resistência elétrica do condutor nessa temperatura [Ω/m] e o coeficiente global de dissipação h_t [$\text{W}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}$], é possível calcular a corrente máxima admissível para o fio através da expressão:

$$I = \sqrt{\frac{(T_{\text{regime}} - T_{\text{ambiente}}) \cdot h_t}{R}} = \sqrt{\frac{T_{\text{regime}} - T_{\text{ambiente}}}{A}}$$

1.2. Dispositivos de proteção

Os dispositivos de proteção têm como objetivo interromper o funcionamento de um circuito que se encontra em condição de sobrecarga de longa duração ou curto-circuito. A atuação deve ser a mais rápida possível para minimizar riscos à vida humana e aos equipamentos. Para instalações de baixa tensão, esses dispositivos são mais simples e possuem menor custo quando comparados com dispositivos usados em instalações elétricas mais sofisticadas. Nessa categoria, são exemplos de dispositivos de proteção os **elos fusíveis e os disjuntores**.

A **corrente nominal** destes dispositivos caracteriza-se por ser a máxima corrente que pode circular sem causar desligamento automático do circuito. O **tempo de seccionamento** do circuito, por sua vez, é proporcional ao inverso da magnitude da corrente de sobrecarga ou curto-circuito. Deste modo, quanto maior a corrente, menor é o tempo para a atuação do dispositivo de proteção.

Define-se ainda a **capacidade disruptiva**, que é expressa em valores de corrente máxima ou de potência aparente máxima que o dispositivo de proteção é capaz de interromper:

$$\begin{cases} S_{disruptiva} = \sqrt{3}V_{nominal} \cdot I_{nominal} \rightarrow \text{ circuitos trifásicos} \\ S_{disruptiva} = V_{nominal} \cdot I_{nominal} \rightarrow \text{ circuitos monofásicos} \end{cases}$$

Sendo:

$V_{nominal}$ – Tensão eficaz nominal da linha [V]

$I_{nominal}$ – Corrente disruptiva [A]

$S_{disruptiva}$ – Capacidade disruptiva [VA]

No caso dos **elos fusíveis**, a proteção se dá através da fusão do condutor para uma dada corrente especificada. O calor para a fusão é gerado por meio de efeito Joule. Os tipos mais comuns são: tipo rosca, cartucho, diazed e NH, que possui alta capacidade disruptiva.

Já **disjuntores de baixa tensão** interrompem os circuitos por meio de abertura de uma chave. Os disjuntores apresentam dois dispositivos de detecção de anormalidade nos circuitos:

- Elemento térmico: detecção de sobrecarga (longa duração)
- Elemento magnético: detecção de curto circuito (instantâneo)

Além disso, os disjuntores ainda contam com uma câmara para extinção do arco elétrico, que é formado durante a abertura da chave.

2. OBJETIVOS

Essa atividade experimental tem como objetivo:

- 1) Demonstrar a curva de aquecimento de um condutor em duas condições de funcionamento distintas;
- 2) Exemplificar o funcionamento de disjuntores como dispositivos de proteção;
- 3) Exemplificar o conceito de seletividade de proteção

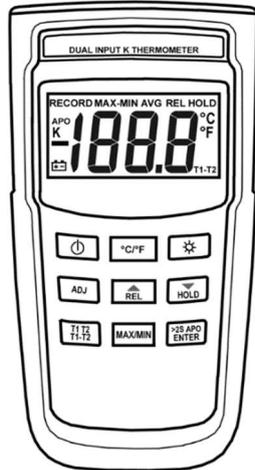
Após conclusão deste relatório, o aluno deverá ser capaz de:

- 1) Compreender como ocorre o processo de aquecimento de condutores em função da corrente e de outras variáveis (e.g.: temperatura ambiente, configuração da instalação etc.);
- 2) Compreender o funcionamento de dispositivos de proteção para baixas tensões (elos fusíveis e disjuntores);
- 3) Compreender o conceito de seletividade de proteção em circuitos e sua importância.

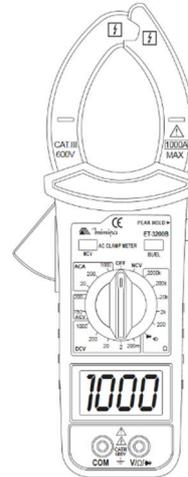
3. MATERIAIS

Os equipamentos usados nesta atividade experimental estão listados a seguir:

Termômetro Minipa MT-455



Amperímetro Alicate Minipa ET-3111



Kit Didático – Proteção de Circuitos

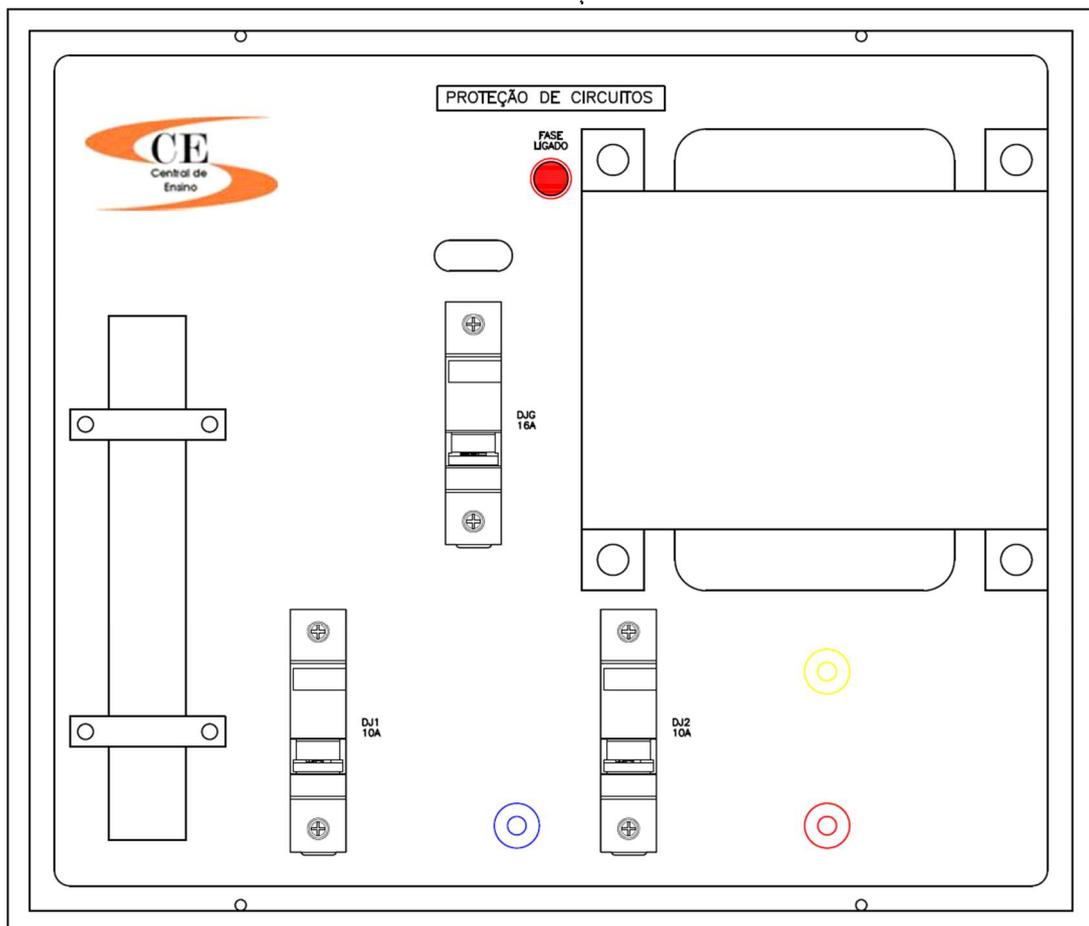


Figura 2 - Equipamentos utilizados na atividade experimental.

4. ROTEIRO DE LABORATÓRIO

4.1. Curva experimental de aquecimento de um fio isolado

Nesta primeira parte da experiência, serão levantadas as curvas de aquecimento de um fio de $1,5 \text{ mm}^2$ de seção transversal para uma corrente de regime específica em duas condições de instalação diferentes. Siga atentamente os procedimentos descritos abaixo:

Passo 1) Execute a montagem representada na Figura 3, identificando os diversos componentes painel do Kit. O fio mais grosso, em destaque na Figura 3, possui 16 mm^2 de seção transversal e está ligado ao secundário do transformador (saída de baixa tensão). O cabo de entrada do painel está ligado ao primário do transformador e deve ser conectado à saída do *variac*. O fio de $1,5 \text{ mm}^2$ deve ser conectado entre os terminais vermelho e amarelo do painel.

Atenção:

Somente conecte o fio de $1,5 \text{ mm}^2$ depois de se certificar que o cursor do *variac* está na posição de mínima saída e desligado.

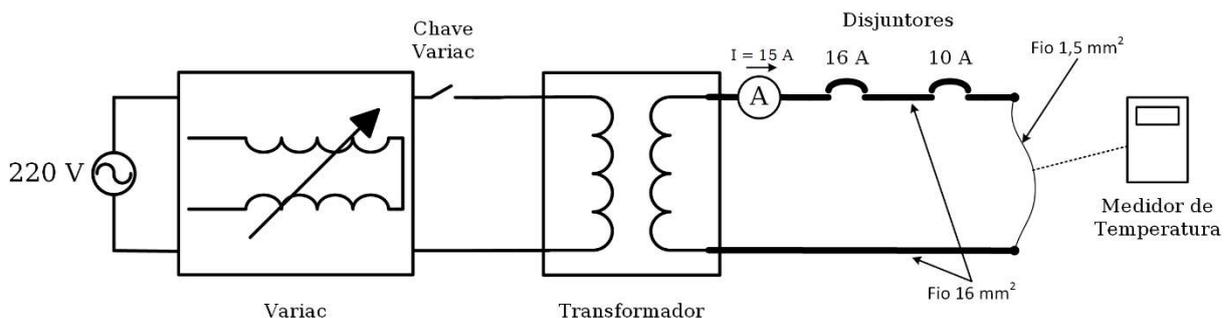


Figura 3 – Montagem para levantamento de curva de aquecimento do condutor.

Passo 2) Anote a temperatura ambiente, que é a leitura do medidor de temperatura antes de energizar a montagem. Certifique-se de que o fio de $1,5 \text{ mm}^2$ está ligado ao medidor de temperatura e não muito curvado.

Passo 3) Ligue o *variac* e, movendo suavemente seu cursor, ajuste a corrente no circuito para $I_{regime} = 15 A$. Após ajustar a corrente, desligue o circuito pelo chave da saída do *variac* e aguarde até que a temperatura do fio retorne à temperatura ambiente.

Atenção:

Deve-se levar em conta que, devido ao aumento de resistência do condutor e à baixa tensão fornecida pelo transformador, a corrente irá diminuindo paulatinamente. Para manter a corrente constante no valor especificado, ela deve ser continuamente medida com o amperímetro alicate, ajustando levemente o controle do *variac* quando necessário.

Passo 4) Religue o circuito e levante a curva de aquecimento do condutor, anotando a temperatura medida nos instantes de tempo descritos na Tabela 1. Mantenha o valor da corrente ($I_{regime} = 15 A$) constante. Ao final, não se esqueça de desenergizar o circuito.

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

Tempo [s]	Temperatura [°C]
0	
10	
20	
30	
40	
50	
60	
90	
120	
150	
180	
210	
240	
270	
300	
330	
360	

Passo 5) Calcule o valor experimental da constante A (A_{exp}) a partir da corrente I_{regime} .

Dica: usar a seguinte expressão:

$$A_{exp} = \frac{T_{regime} - T_{amb}}{(I_{regime})^2} =$$

Passo 6) Com o circuito ainda desligado, aguarde até que a temperatura do fio retorne à temperatura ambiente. Em seguida, dobre suavemente o trecho de fio ligado ao medidor de temperatura e introduza-o no eletroduto. Levante a curva de aquecimento para o condutor dentro do eletroduto e preencha a Tabela 2.

Tabela 2 – Curva de aquecimento de dois (=fio dobrado) em eletroduto.

Tempo [s]	Temperatura [°C]
0	
10	
20	
30	
40	
50	
60	
90	
120	
150	
180	
210	
240	
270	
300	
330	
360	

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

Atenção:

Use um disjuntor de 10 A diferente do utilizado na etapa anterior da atividade experimental.

Passo 1) Execute a montagem descrita na Figura 4.

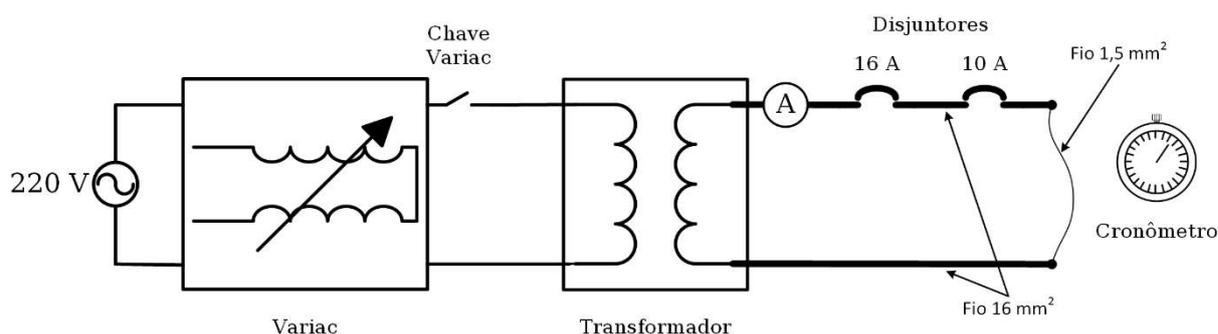


Figura 4 – Montagem para levantamento de curva tempo x corrente de disjuntor de baixa tensão.

Passo 2) Determine aproximadamente o limiar de atuação da proteção magnética do disjuntor de 10 A. Para isso, utilize o amperímetro alicate com a opção “Peak hold” ativada, energize o circuito e faça a contagem de tempo até a atuação do disjuntor. Inicie o experimento com uma corrente elevada (maior que 50 A) e observe que a abertura do disjuntor é imediata. A partir desse ponto, diminua o valor da corrente até a obtenção de uma corrente mínima (I_{limiar}), onde a abertura do disjuntor continua imediata. **Observação:** um tempo de atuação de 2 segundos ou menos já é considerado imediato para um disjuntor dessa categoria.

Passo 3) Levante a curva tempo x corrente do disjuntor de 10 A, a partir do limiar de atuação e diminuindo sucessivamente a corrente. Considere um mínimo de 5 pontos.
Complete a

Tabela 3:

Atenção:

Para cada ponto obtido, permitir 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]

4.3. Seletividade de disjuntores

Atenção:

Permita o resfriamento dos disjuntores antes de iniciar esta etapa da atividade experimental

Passo 1) Conecte dois fios de 1,5mm² entre os terminas azul-amarelo e vermelho-amarelo do painel do kit para implementar a montagem descrita na Figura 5. Certifique-se que todos os disjuntores estão com a chave na posição ON. Com ajuda do *variatic*, imponha uma corrente de 16 A em dos disjuntores de 10 A (a corrente no outro disjuntor deve estar em um valor próximo a isso, verifique) Figura 4. Aguarde e verifique qual dos disjuntores será desarmado primeiro. Explique o que ocorreu com base na curva de atuação dos disjuntores (Curva C), obtida no site do fabricante.

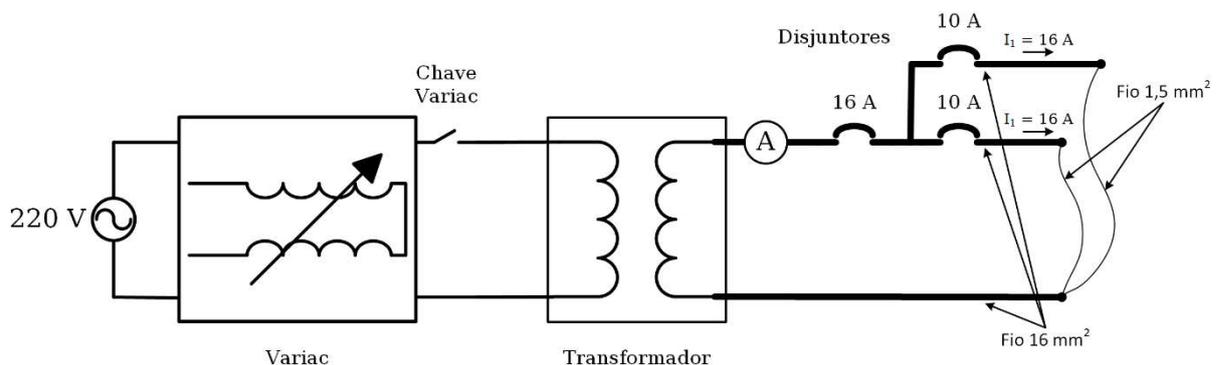


Figura 5 – Montagem para verificação da coordenação da proteção.

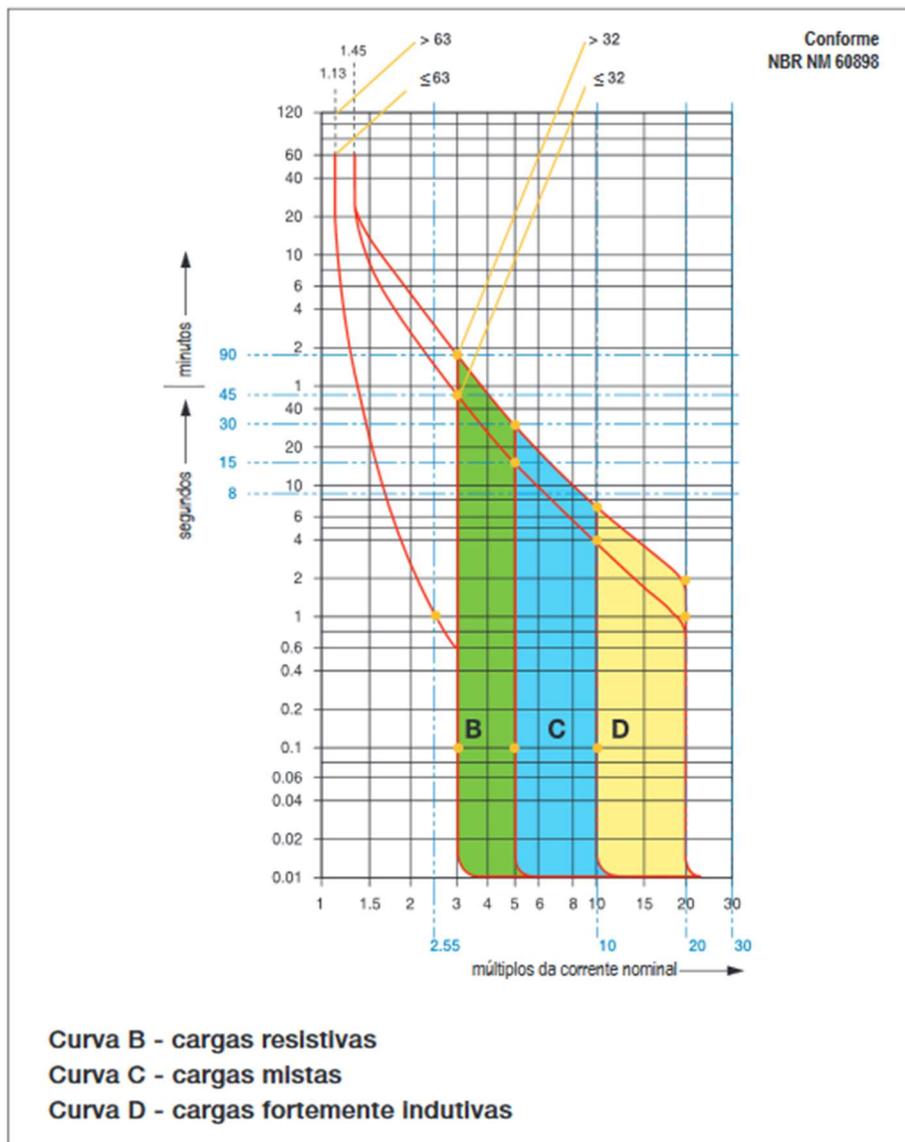


Figura 6 – Curva de atuação dos disjuntores.

5. RELATÓRIO

No relatório deverá constar o roteiro da atividade experimental preenchido com todos os resultados coletados e as respostas dos itens solicitados a seguir. Busque sempre deixar claro o raciocínio adotado e estabelecer um paralelo entre a teoria vista em sala de aula e os resultados obtidos no laboratório. Apresente, por meio de tabelas comparativas, os valores teóricos e os obtidos experimentalmente.

Utilize para os cálculos solicitados os valores descritos a seguir:

- Resistividade ôhmica do cobre a 20°C ($\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 0,017241 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);
- Área do condutor ($S = 1,54 \text{ mm}^2$);
- Coeficiente de variação da resistividade com a temperatura ($\alpha = 0,00393 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$);
- Coeficiente de dissipação térmica para o meio ambiente ($h_t = 0,167865 \text{ W}/^{\circ}\text{Cm}$).

Parte 1 – Em relação à atividade experimental descrita na seção 4.1 – Curva experimental de aquecimento de um fio isolado, faça o que se pede:

- a) Apresentar e comentar os valores de temperatura em função do tempo, teóricos para o fio isolado, experimentais para o fio isolado e experimentais para dois fios em eletroduto, justificando as diferenças observadas.
- b) Apresentar e comentar os valores teóricos e experimentais do parâmetro A na equação de aquecimento do fio.
- c) Apresentar o valor teórico calculado para a constante de tempo B, e estimar o seu valor a partir da curva experimental de aquecimento para um fio isolado ao ar livre.
- d) Apresentar e comentar os valores admissíveis de corrente para os casos a seguir:
 - d-1) Teórico para um fio;
 - d-2) Experimental para um fio;
 - d-3) Experimental para dois fios em eletroduto.

Parte 2 - Em relação às atividades experimentais descritas nas seções 4.2 – Levantamento da curva tempo x corrente de disjuntor de baixa tensão e 4.3 – Seletividade de disjuntores, faça o que se pede:

- a) Compare a curva de atuação (tempo x corrente) do disjuntor de 10 A obtida experimentalmente com a curva fornecida pelo fabricante (Figura 6). Justifique eventuais discrepâncias.
- b) Na primeira parte do experimento, que consistia em fazer o levantamento das curvas de aquecimento de um condutor de seção $1,5\text{mm}^2$, foi imposta no circuito uma corrente de aproximadamente 15 A. Explique por que o disjuntor de 10 A não foi chaveado durante a execução do experimento, com base na curva de atuação levantada experimentalmente e na curva fornecida pelo fabricante (Figura 6).
- c) Diz-se que há seletividade entre disjuntores se o disjuntor mais próximo da carga com defeito atua antes do outro mais distante. Explicar qual a vantagem de se ter seletividade e verificar se há seletividade entre os disjuntores de 10 A e 16 A na Figura 7, a seguir:

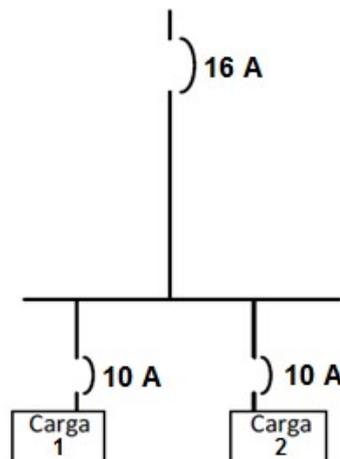


Figura 7 – Exemplo para verificação de seletividade