



**UFPR**



# TE243

## Eletricidade Aplicada II

**Capítulo 4 – Proteção de sistemas elétricos prediais**

# 1. Introdução

- Em consequência da complexidade gerada para a utilização da energia elétrica como também de fatores internos e externos, é impossível que o sistema esteja imune a falhas;
- fim de evitar que esses elementos sofram danos, são aplicados esquemas de proteção que têm como principal objetivo preservar a integridade física desses elementos e manter a segurança de todos que usufruem da energia elétrica direta ou indiretamente.

- Um sistema de proteção deve possuir as seguintes características:
  - Rapidez: deve atuar no menor espaço de tempo entre a detecção da anomalia e a extinção desta;
  - Seletividade: evitar que partes não faltosas do sistema sejam desligadas indevidamente e;
  - Segurança: garantir que somente as partes defeituosas do sistema serão desligadas.
- Um aspecto de suma importância Para atingir os objetivos citados é a coordenação de dispositivos de proteção contra sobrecorrente.

- Em um sistema bem coordenado a atuação indevida dos dispositivos de proteção é evitada fazendo com que seja mantida a seletividade no sistema elétrico;
- A coordenação é feita mantendo-se intervalos de tempo de atuação entre os dispositivos de proteção aplicados no sistema;
- O processo de aplicar e coordenar os dispositivos é feito com a ajuda de gráficos de “tempo versus corrente”, em que é possível identificar para que valores de tempo e corrente um determinado dispositivo de proteção irá atuar.

- Cada dispositivo de proteção (fusíveis, disjuntores de baixa tensão e relés) possui uma curva característica de atuação, sendo que as curvas de fusíveis e alguns disjuntores de baixa tensão são fixas;
- Os relés de sobrecorrente, principalmente os digitais, possuem uma gama de configurações e ajustes que os deixam mais versáteis.

- Para que seja possível a aplicação dos dispositivos de proteção é necessário conhecer as curvas de danos dos elementos que integram o sistema como, motores, geradores, cabos, transformadores entre outros, e ainda os critérios de proteção de cada elemento;
- Com esse conhecimento é possível definir os parâmetros que necessitam ser protegidos e como deve ser a coordenação para que haja uma proteção de retaguarda eficiente e para que nenhum elemento fique desprotegido.

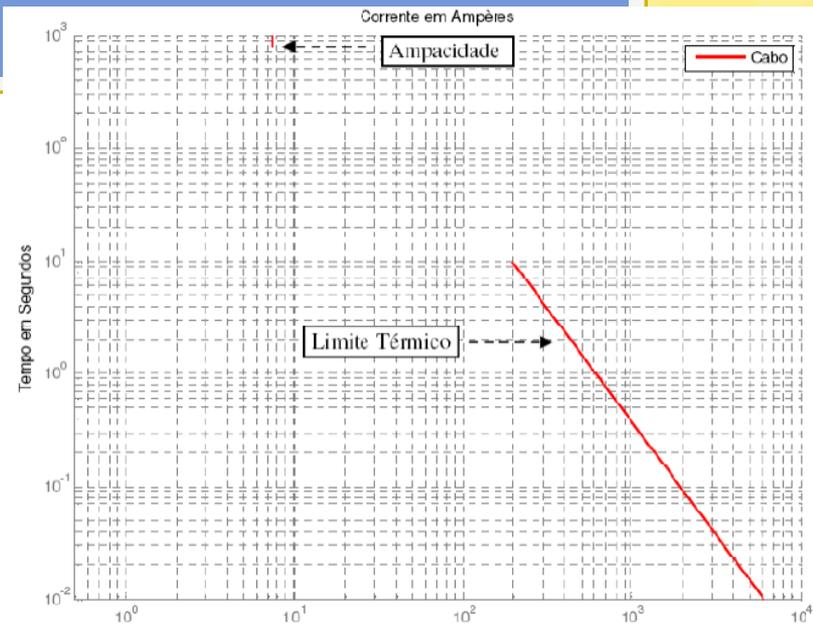
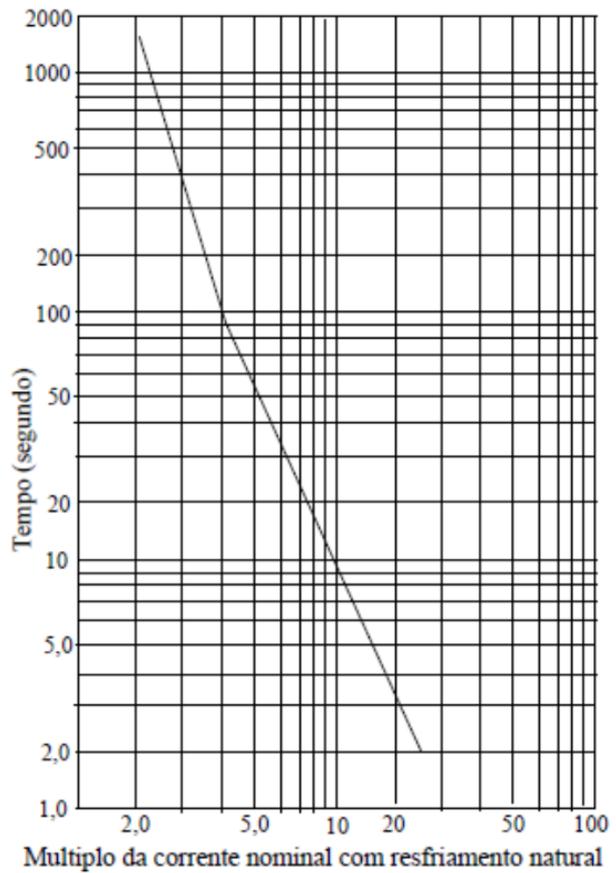


Figura 11 – Curva do limite térmico de um cabo e sua ampacidade<sup>3</sup>.

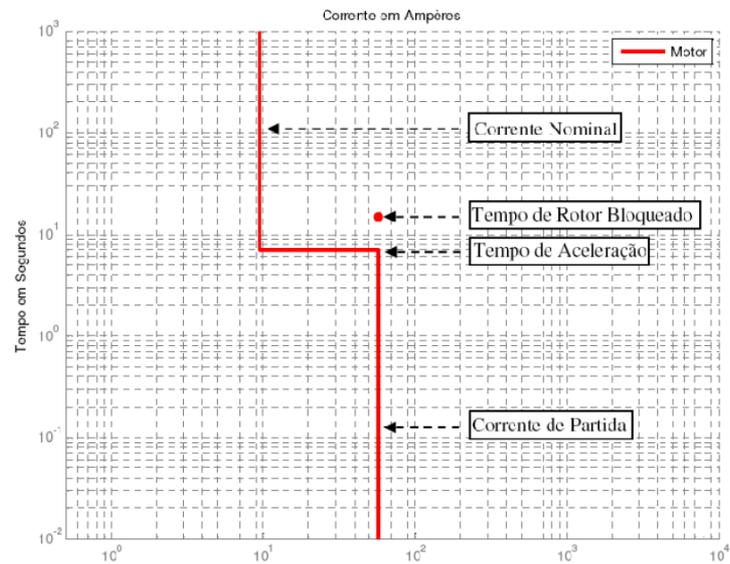
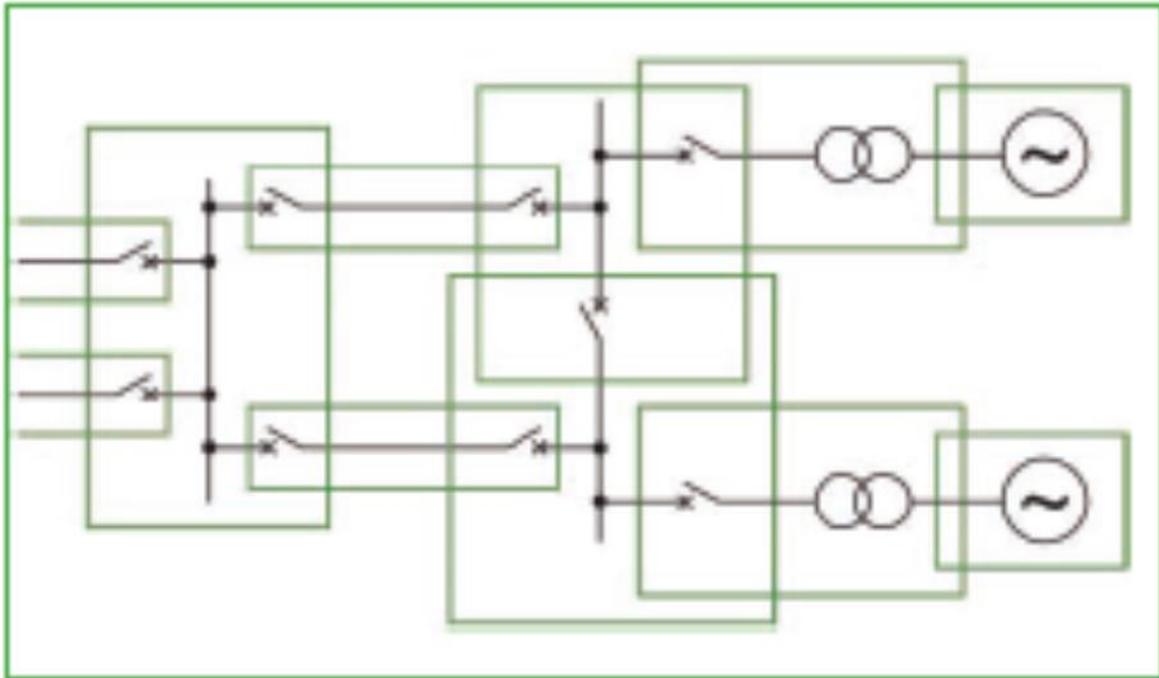


Figura 9 – Curva tempo x corrente de um motor de indução representando suas grandezas protegidas<sup>2</sup>

## 2. Coordenação da Proteção e Seletividade

- O principal objetivo de estudos de coordenação e seletividade de dispositivos de proteção contra sobrecorrente é minimizar os efeitos que os curtos-circuitos podem causar no sistema elétrico;
- Isso é feito eliminando-se o curto-circuito rapidamente por meio do desligamento do menor número de equipamentos possível;
- Quando um sistema é capaz de detectar um comportamento faltoso e garantir que somente essas partes faltosas são tiradas de operação é possível denominar esse circuito como seletivo

- 
- Para garantir que a falta em determinado ponto do sistema seja detectada e que todos os elementos do sistema estejam protegidos é necessário que os elementos desse sistema estejam em pelo menos uma zona de proteção, região do sistema em que o dispositivo de proteção é responsável pela detecção e atuação em caso de falta;
  - Essas zonas são definidas pelo posicionamento dos dispositivos de proteção como exemplificado na Figura.



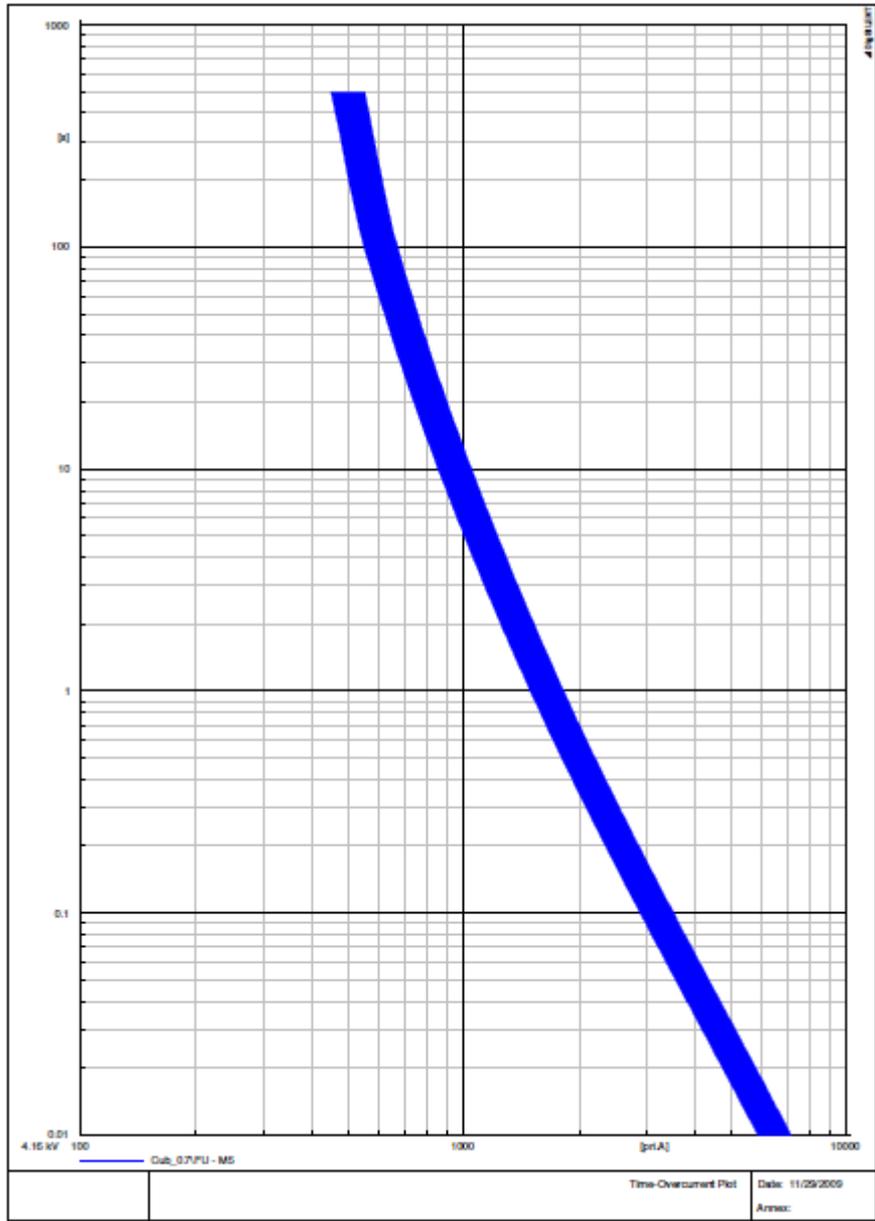
# 3. Dispositivos de proteção

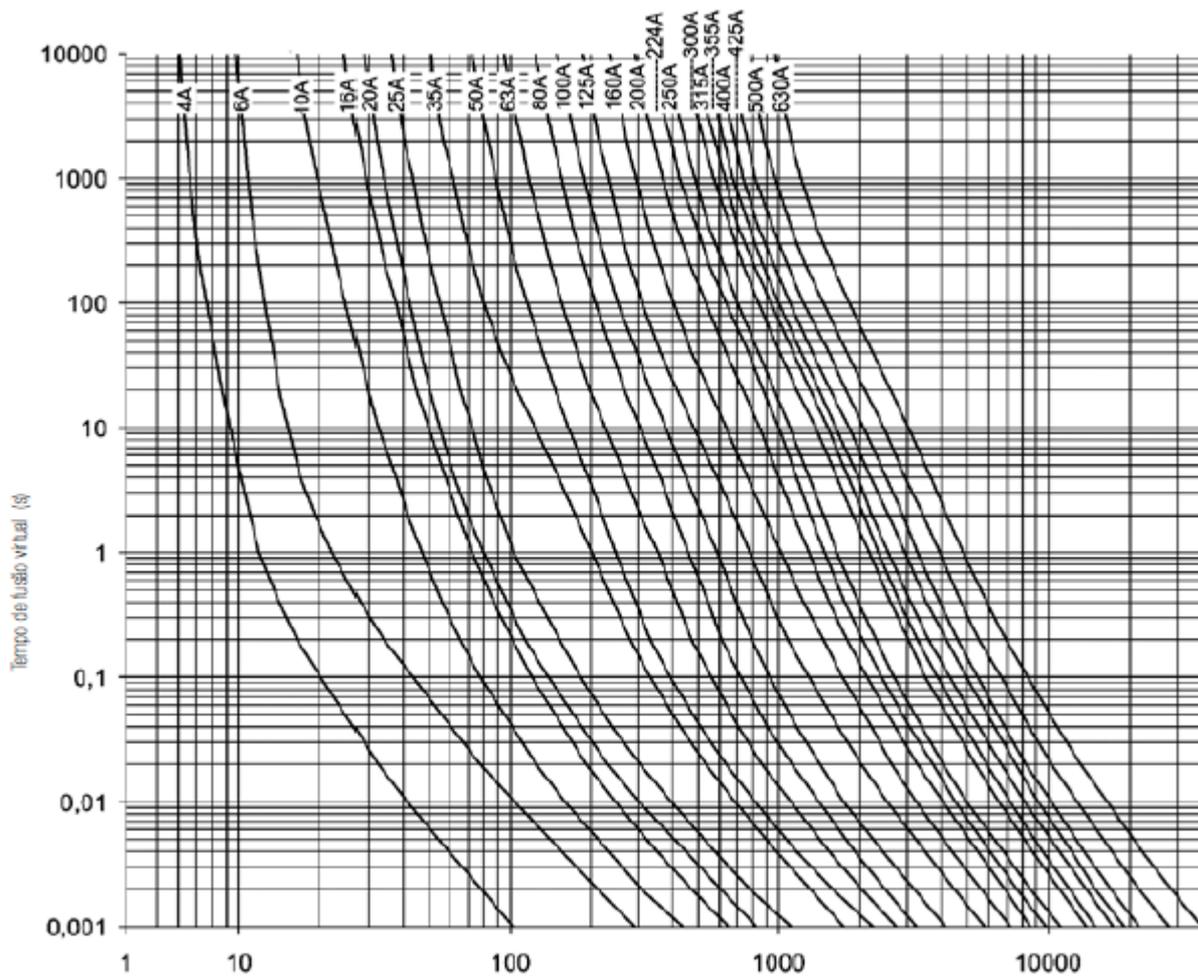
## Fusíveis

- O fusível é um dispositivo de proteção contra sobrecorrente que é caracterizado por um filamento ou placa metálica com um ponto de fusão baixo, tornando-o sensível às elevações na corrente, uma vez que, por efeito Joule, o filamento se funde e interrompe a circulação de corrente elétrica;
- Existem vários tipos de fusíveis, a depender da classe de tensão, tipo de aplicação e característica de atuação. Inicialmente, os fusíveis são divididos em: fusíveis de baixa tensão e fusíveis de alta tensão.



- Outro aspecto comum dos fusíveis são suas curvas de atuação com características de tempo inversamente proporcional à corrente elétrica, contendo uma faixa de imprecisão;
- O fusível tem uma corrente máxima e mínima de fusão para cada tempo de atuação.





Tolerância  $\pm 5\%$  da corrente

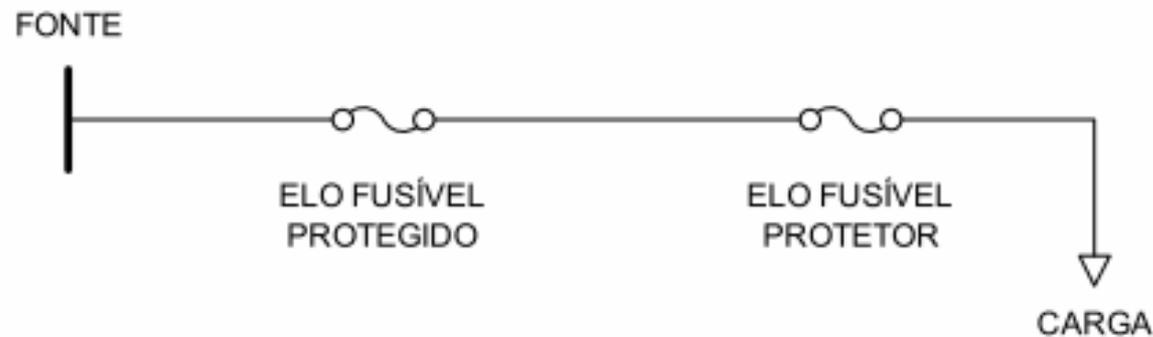
- Curvas tempo-corrente médias para fusíveis D partindo de um estado não preaquecido por carga

Corrente em A (valor eficaz)



## Coordenação de Fusíveis Série

O fusível protetor deve atuar primeiro, para isso o tempo total de interrupção fusível protetor deve ser menor que o tempo mínimo para a fusão do elo fusível protegido.



- Os fusíveis de BT suportam continuamente aproximadamente 150% do valor de seus respectivos elementos fusíveis.
- Deve-se sempre consultar a curva tempo x corrente fornecida pelo fabricante.

$$I_{fusível} = 1,45 \times I_{carga}$$

- Os demais elos-fusíveis instalados à montante do anterior, deverão obedecer aos critérios a seguir:
  - A capacidade nominal do elo-fusível deverá ser igual ou maior do que 1,45 vezes o valor máximo da corrente de carga medida ou convenientemente avaliada no ponto de instalação;
  - A capacidade nominal do fusível protetor deverá ser, no máximo, um quarto (1/4) da corrente de curto-circuito fase terra mínimo no fim do trecho protegido por ele;

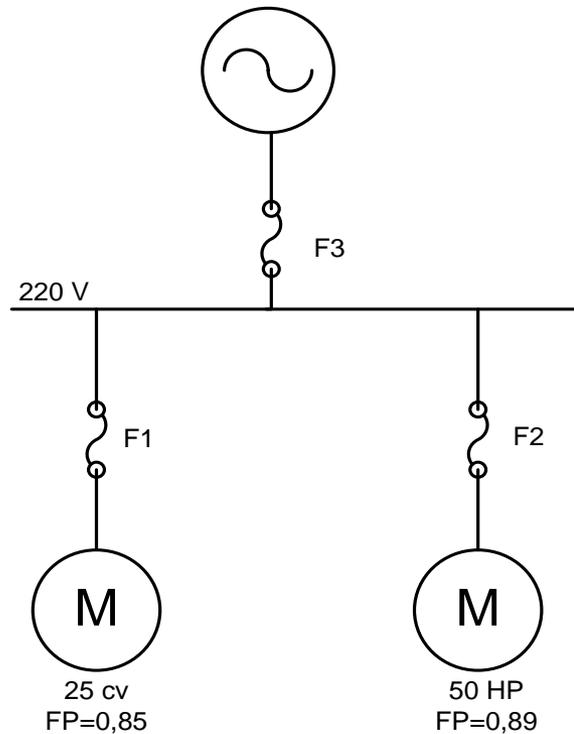
$$1,45I_{carga} \leq I_{fusivel} \leq \frac{I_{cc,\phi T}}{4}$$

- O elo protegido, deverá coordenar com o elo protetor, pelo menos, para o valor da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no ponto de instalação do elo protetor.

**“O tempo total de interrupção do fusível protetor não deve exceder 75% do mínimo tempo de fusão do fusível protegido”**

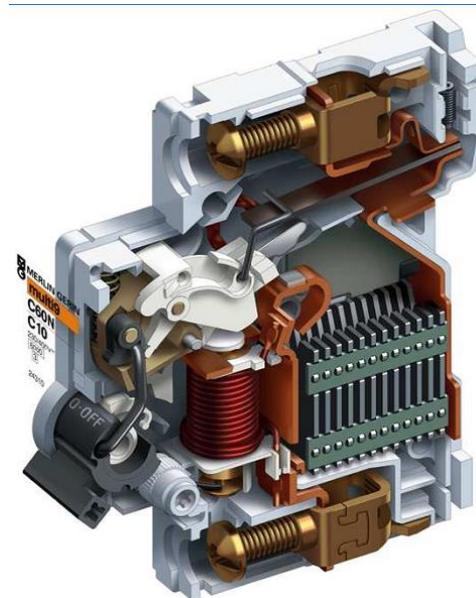
## Exercício 1:

Dimensione todos os elos fusíveis para o sistema de 220 V abaixo, considerando instalação em bandeja, temperatura ambiente de 30 °C :



# Disjuntores

- Equipamento de proteção cuja finalidade é conduzir a corrente de carga sob condições nominais e interromper correntes anormais de sobrecarga e de curto-circuito;

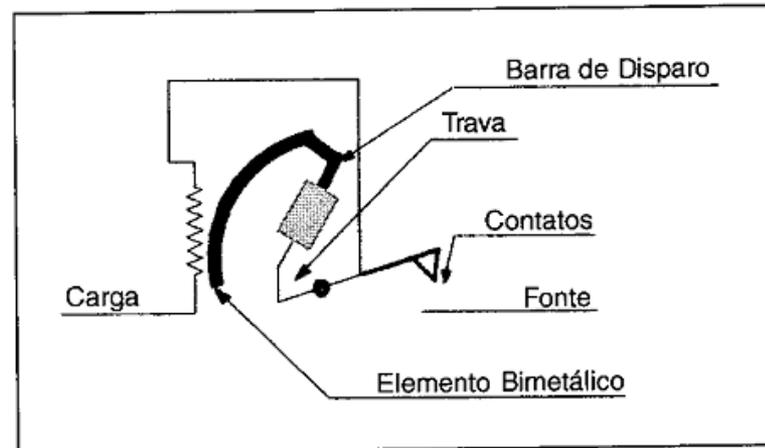
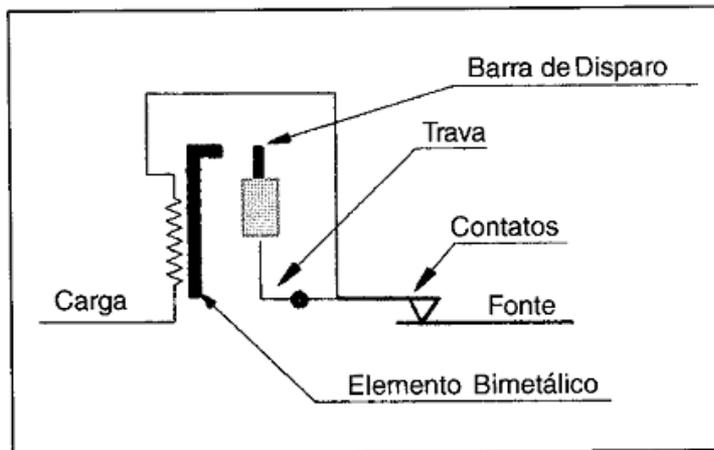
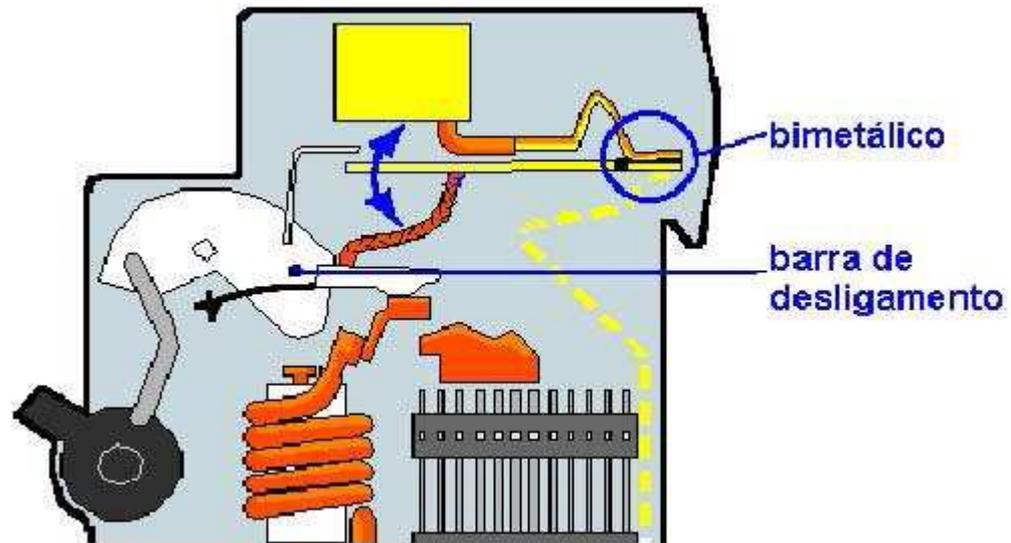


- Para a proteção contra a sobrecarga existe um elemento térmico (bimetálico).
- Para a proteção contra curto-circuito existe um elemento magnético.
- O disjuntor precisa ser caracterizado, além dos valores nominais de tensão, corrente e frequência, ainda pela sua capacidade de interrupção, e pelas demais indicações de temperatura e altitude segundo a respectiva norma, e agrupamento de disjuntores, segundo informações do fabricante, e outros, que podem influir no seu dimensionamento.

- Em resumo, os DTMs cumprem 3 funções básicas:
  1. Abrir e fechar os circuitos (Manobra)
  2. Proteger os condutores e equipamentos contra sobrecarga (dispositivo térmico)
  3. Proteger condutores contra as correntes de curto-circuito (dispositivo magnético).
  
- Disjuntores devem sempre ser ligados aos condutores fase

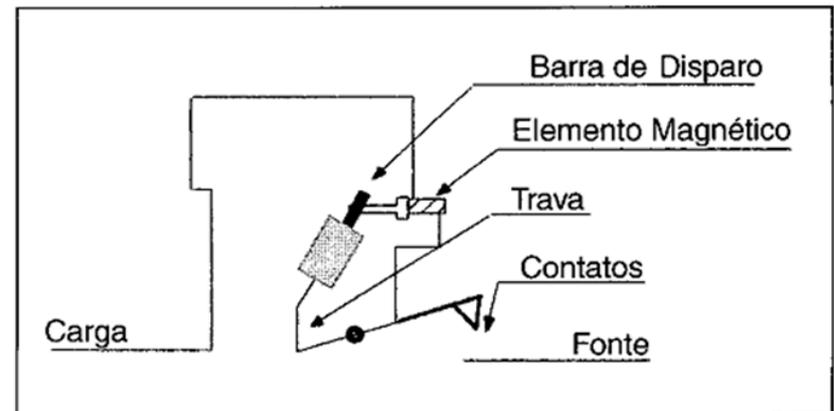
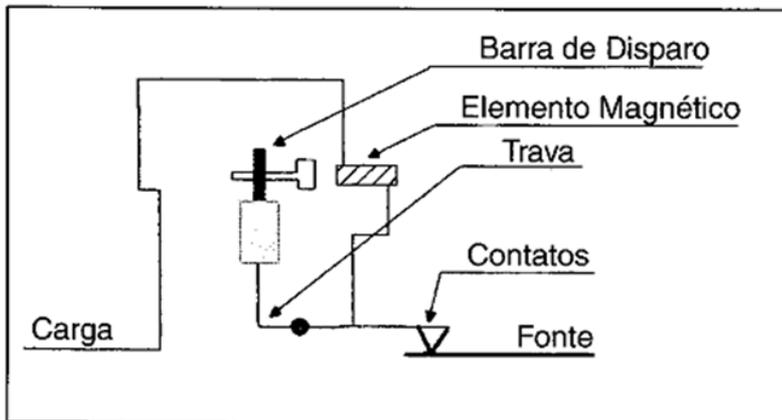
- 
- Disjuntores Termomagnéticos atuam por:
    - Efeito térmico com sobrecarga.
    - Efeito eletromagnético com corrente de curto-circuito.

- Disparador térmico simples:
  - Elemento bimetálico: duas lâminas de metal soldadas, com diferentes coeficientes de dilatação térmica.
  - Quando sensibilizadas por uma corrente superior ao estabelecido ambas dilatam, de maneira desigual, arqueando o conjunto e deslocando a barra de disparo.
  - Este elemento pode ser adquirido de forma separada, como no caso do relé térmico, ou modernamente, vem acoplado nos disjuntores, permitindo economia de espaço.



- Disparador magnético:

- Bobina que, quando conduz corrente acima do valor estabelecido, atrai um êmbolo ferromagnético processando a abertura dos contatos do disjuntor.



- 
- Os seguintes itens devem ser discriminados:
    - Corrente nominal de operação
    - Capacidade de interrupção
    - Tensão nominal
    - Frequência nominal
    - Tipo (térmico, magnético, termomagnético, ajustável,...)

## ◦ Dimensionamento de Disjuntores:

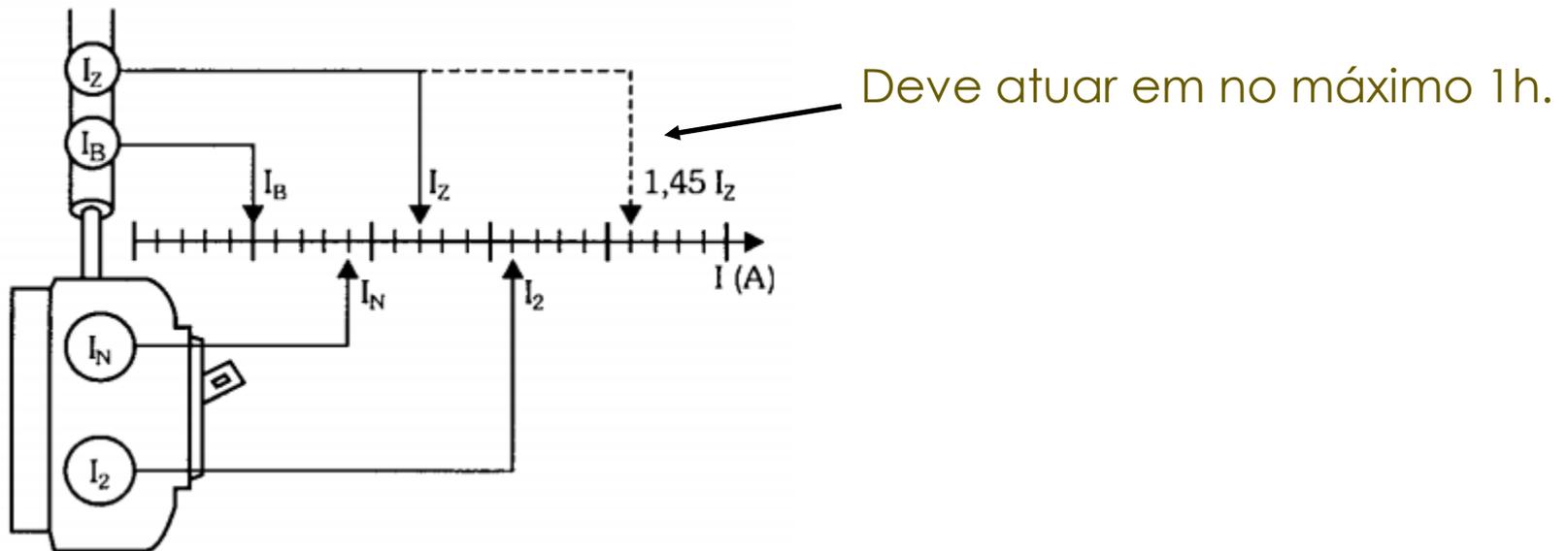
- A NBR 5410-2004 estabelece condições que devem ser cumpridas para que haja coordenação entre os condutores de um circuito e o dispositivo de proteção.
- O item 5.3.4 da norma diz que a corrente do disjuntor deve interromper a corrente de sobrecarga antes do aquecimento excessivo dos condutores.

- O item 5.3.4 estabelece que proteção deve satisfazer as duas inequações:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \qquad I_2 \leq 1.45I_Z$$

- $I_B$  – corrente de projeto
- $I_N$  – corrente nominal do disjuntor
- $I_Z$  – capacidade de condução dos condutores vivos
- $I_2$  – corrente convencional de atuação do disjuntor ou fusível.

- Condição para atuação sob sobrecarga



## ○ Condição para atuação sob sobrecarga

**Tabela 3.11** Determinação Prática do Disjuntor Unipolar de Maior Corrente Nominal a Ser Utilizado na Proteção dos Condutores contra Correntes de Sobrecarga, de Acordo com a NBR-5410

Seção nominal dos condutores (mm <sup>2</sup> )	Corrente nominal* máxima dos disjuntores Unipolar (A)				
	1 circuito com 2 condutores carregados	1 circuito com 3 condutores carregados	2 circuitos com 2 condutores carregados cada	3 circuitos com 2 condutores carregados cada	2 circuitos com 3 condutores carregados cada
<b>Linha tipo B</b>					
1,5	15	15	15	10	10
2,5	25	20	20	15	15
4	35/30**	30	25	20	20
6	40	40/35**	35	30	30
10	60	50	50/40**	40	40
16	70	60	60	50	60/50**
25	100	70	70	70	70
35	100	100	100	70	70
50	100	100	100	100	100
<b>Linha tipo C</b>					
1,5	20	15	15	15/10**	15
2,5	25	25	20	20/15**	20
4	35	35/30**	30	25	25
6	50	40	40	35	35
10	60	60	50	40	50/40**
16	70	70	60	60	60
25	100	90	70	70	70
35	100	100	100	90	90
50	100	100	100	100	100

\*Valores referidos a 20°C para disjuntores de 10 A a 60 A e a 40°C para disjuntores de 70 A a 100 A.

\*\*O primeiro valor refere-se ao tipo unipolar e o segundo ao multipolar.

## Proteção contra Correntes de Curto-Circuito

- A NBR-5410 impõe duas condições básicas que devem ser cumpridas para que seja garantida a proteção de um circuito contra as correntes do curto-circuito:

$$I_{(int)} > I_k \quad I^2t < K^2S^2$$

Onde:

$I_{(int)}$  = capacidade de interrupção do dispositivo de proteção;

$I_k$  = corrente de curto-circuito presumida no ponto de aplicação do dispositivo de proteção;

$I^2t$  = integral de Joule que o dispositivo de proteção deixa passar;

$K^2S^2$  = integral de Joule necessária para aquecer o condutor desde a temperatura máxima para o serviço contínuo até a temperatura limite de curto-circuito.

## Correntes de curto-circuito presumidas

Para 220/127 V

$$I_k = \frac{12,7}{\sqrt{\frac{162}{I_{k0}^2} + \frac{57 \times \cos \phi_{k0} \times \ell}{I_{k0} \times S} + \frac{5\ell^2}{S^2}}}$$

Para 380/220 V

$$I_k = \frac{22}{\sqrt{\frac{484}{I_{k0}^2} + \frac{100 \times \cos \phi_{k0} \times \ell}{I_{k0} \times S} + \frac{5\ell^2}{S^2}}}$$

### Onde

$I_k$  = corrente de curto-circuito presumida em kA;

$I_{k0}$  = corrente de curto-circuito presumida a montante em kA;

$\cos \phi_{k0}$  = fator de potência de curto-circuito aproximado, dado pela Tabela

$\ell$  = comprimento do circuito (m);

$S$  = seção dos condutores (mm<sup>2</sup>).

Tabela 3.12

$K_C$ (kA)	1,5 a 3	3,1 a 4,5	4,6 a 6	6,1 a 10	10,1 a 20	Acima de 20
$\text{Cos } \phi_{ks}$	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0,25

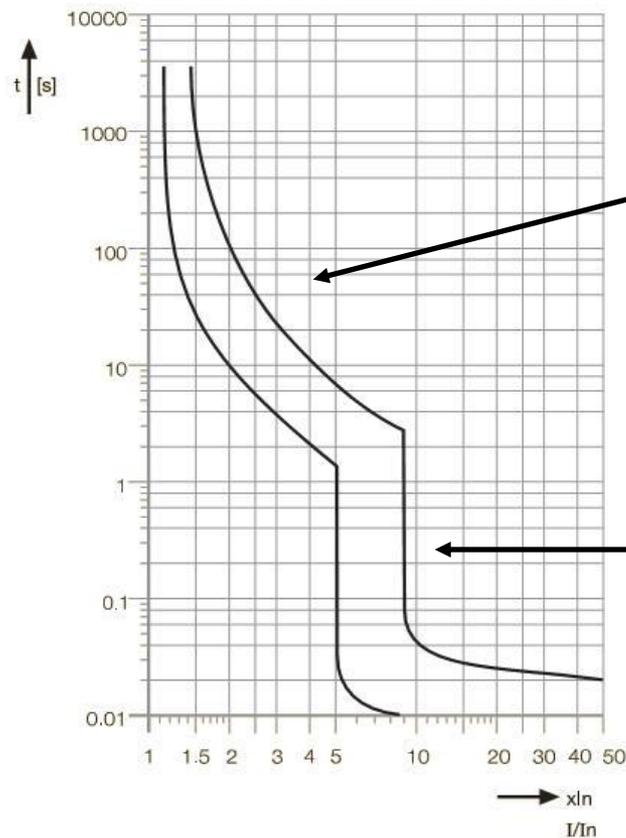
2

Correntes de curto-circuito presumidas no secundário de transformadores trifásicos

Potência do transformador (kVA)	$I_2$ (kA)	
	127/220 V	220/380 V
15	1,12	0,65
30	2,25	1,30
45	3,37	1,95
75	5,62	3,25
112,5	8,44	4,88
150	11,25	6,51
225	13,12	7,59
300	17,50	10,12
500	26,24	15,19
750-	39,36	22,78
1 000	52,49	30,37

## ○ Curvas de Atuação.

### ■ Curvas de atuação

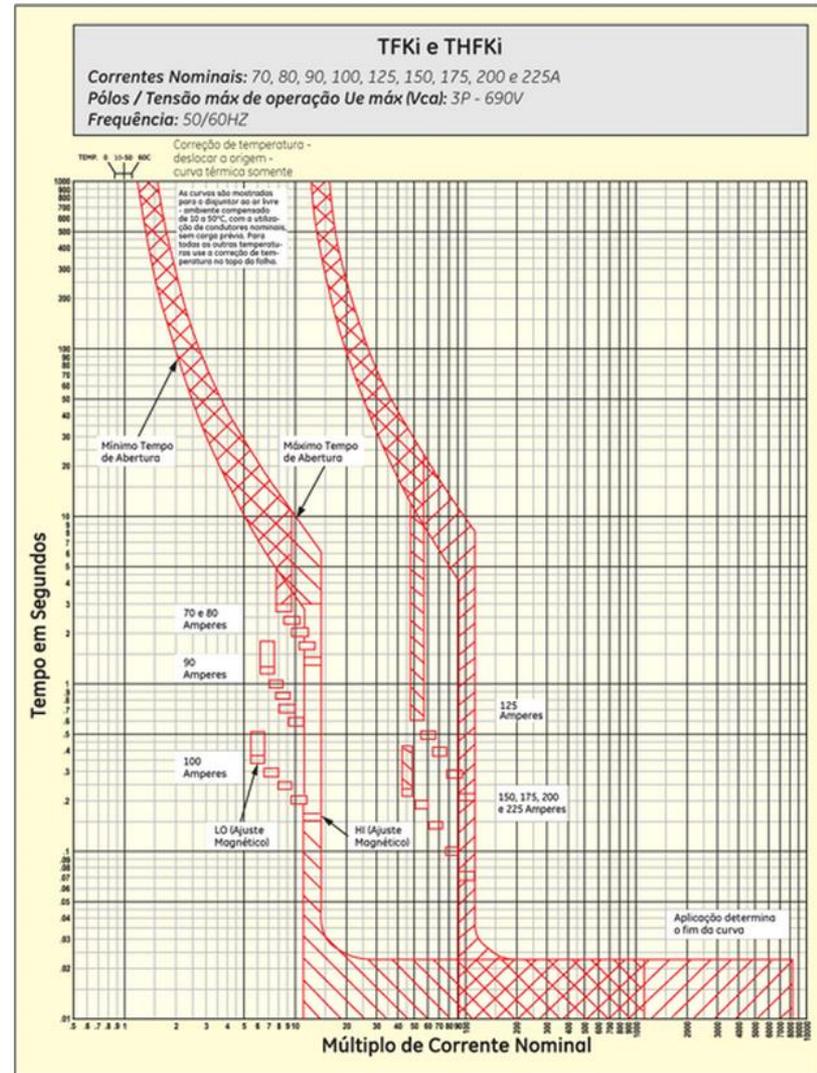


Ação do disparador térmico

Ação do disparador magnético

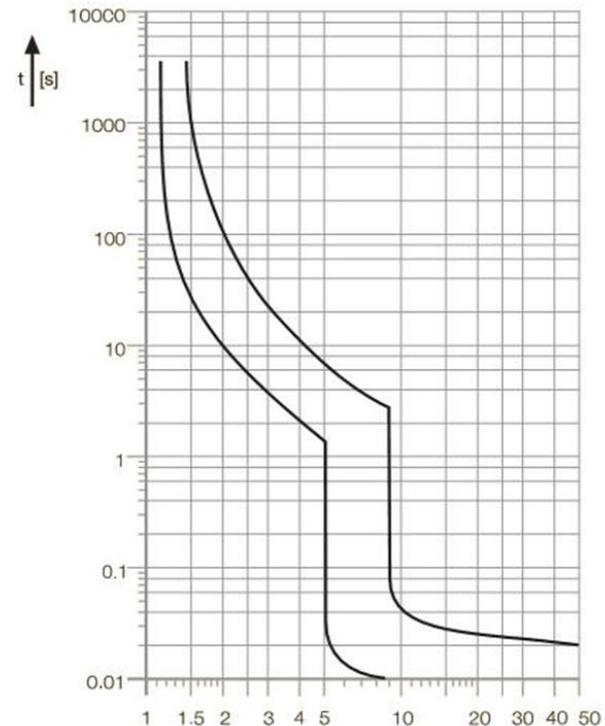
Múltiplo de  $I_N$

# Curvas de Atuação.



### Exercício 3:

Sendo a corrente nominal do disjuntor 50 A, estime o tempo de atuação para uma corrente de 150A e 300<sup>a</sup> utilizando a curva do disjuntor.



## DISJUNTORES:

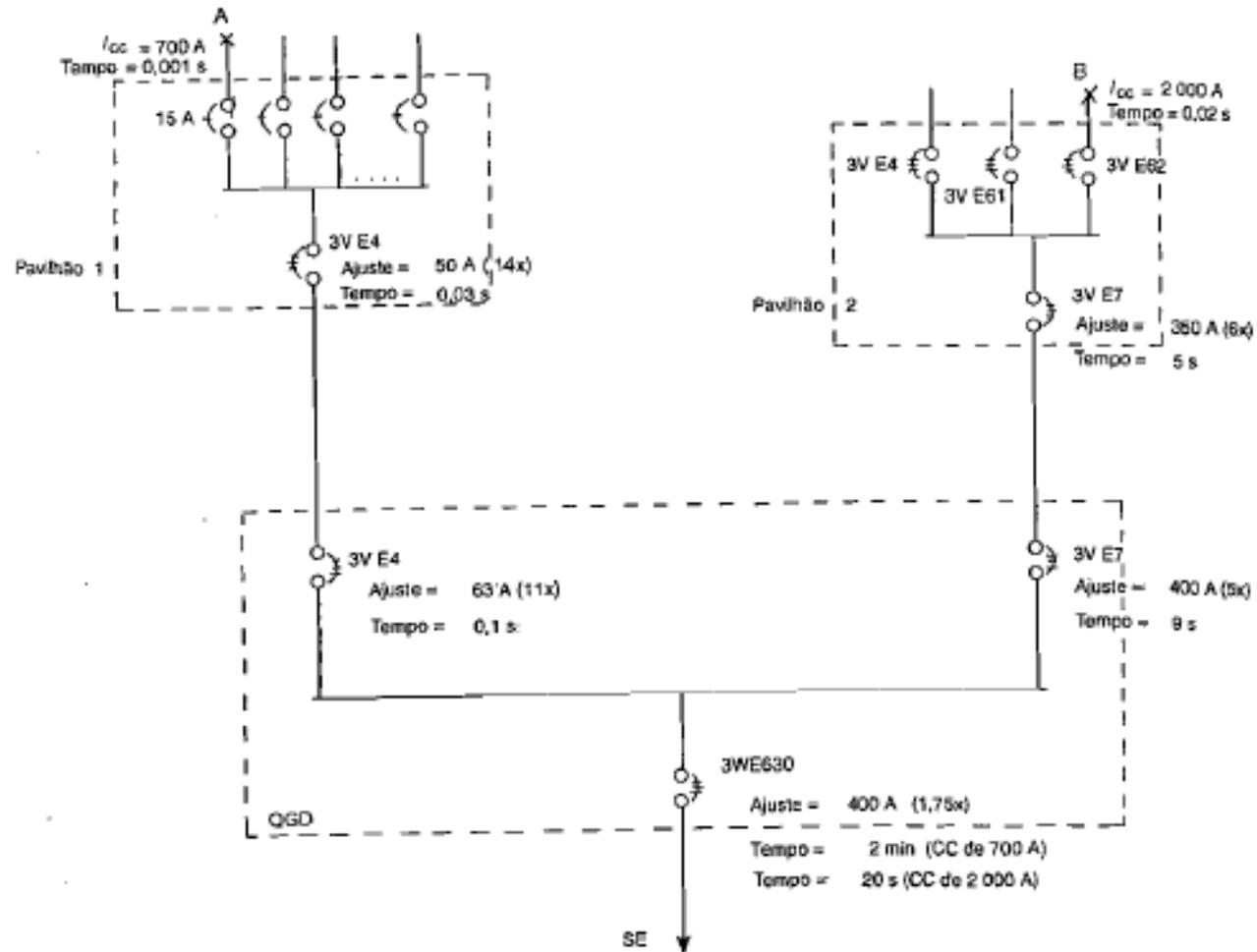
1. Atuam pela ação de disparadores, ou principalmente no caso dos de média e alta tensão, através de relés separados da estrutura principal do disjuntor.
2. Apresentam os tipos monopolares e multipolares, e no caso dos últimos, possibilitam uma proteção adequada, evitando a operação monofásica de motores trifásicos, tal como a que pode ocorrer com a queima de um único fusível.
3. Permitem melhor margem de escolha e melhor coordenação seletiva com outros dispositivos, pois em muitos tipos permitem o ajuste dos disparadores.
4. Podem ser religados após a sua atuação, sem necessidade de substituição.
5. Podem ser utilizados como dispositivo de seccionamento e, em alguns casos, como dispositivo de manobra.
6. Embora não sejam tão rápidos quanto os fusíveis (principalmente os limitadores) para correntes de curto-circuito, o são para sobrecorrentes leves e moderadas.
7. Permitem, em alguns tipos, a operação a distância.
8. São, principalmente os de corrente nominal mais elevada, mais caros que o conjunto fusível - contator - relé - botões de comando.

- Coordenação e Seletividade.
- Os dispositivos de proteção são especificados pelos fabricantes com determinada capacidade de ruptura, de acordo com a tensão de serviço.
- Essas capacidades de rupturas são ditadas pelas correntes de curto-circuito presumíveis, capazes de suportar sem sofrer avarias.
- Na figura vemos um exemplo levantado pela Siemens, num local afastado do centro de São Paulo, de distribuição em rede aérea. Foi escolhido um transformador de 45 kVA e fixadas as distâncias médias.

Alta/média tensão	Transformador 45 kVA, 127/220 V monofásico $U_k = 3\%$ $J_n = 204 \text{ A}$	Rede aérea	Ramal do consumidor	Alimentador do quadro de luz	Ramal de carga
Cabo/fio		70 mm <sup>2</sup> (213 A)	4 mm <sup>2</sup> (35 A)	4 mm <sup>2</sup> (35 A)	1,5 mm <sup>2</sup> (17,5 A)
Comprimento		50 m	15 m	20 m	20 m
Corrente de curto-circuito					
127 V	$I_{kT} = 4,4 \text{ kA}$	$I_{k_{ra}} = 2,1 \text{ kA}$	$I_{k_{rc}} = 0,85 \text{ kA}$	$I_{k_a} = 0,33 \text{ kA}$	$I_{k_r} = 0,14 \text{ kA}$
220 V	$I_{kT} = 6,5 \text{ kA}$	$I_{k_{ra}} = 3,5 \text{ kA}$	$I_{k_{rc}} = 1,2 \text{ kA}$	$I_{k_a} = 0,63 \text{ kA}$	$I_{k_r} = 0,27 \text{ kA}$



## Exemplo seletividade



## Exemplo seletividade

Curva característica de disparo

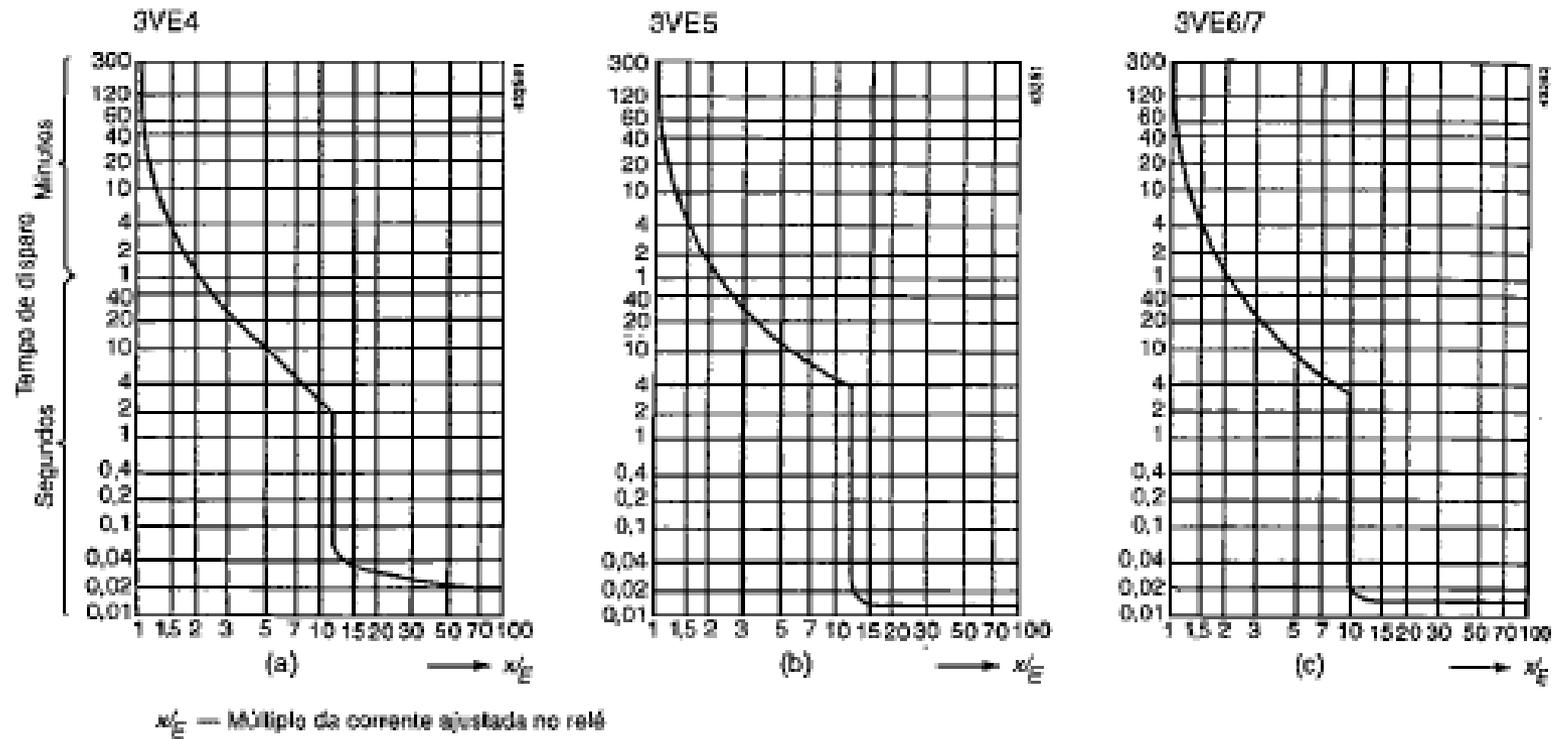


Fig. 3.15

## 4. Proteção Contra Choque Elétrico

- Definição de choque elétrico:
- “É a perturbação de natureza e efeitos diversos que se manifesta no organismo humano ou animal quando este é percorrido por uma corrente elétrica”.

G. Kindermann, “Choque Elétrico”, Ed. do Autor, Fpolis,2005.

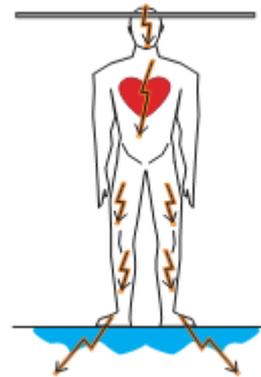
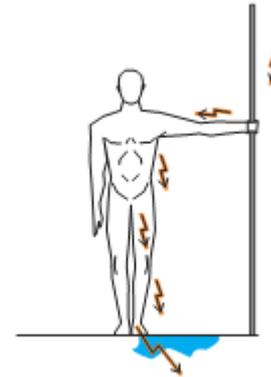
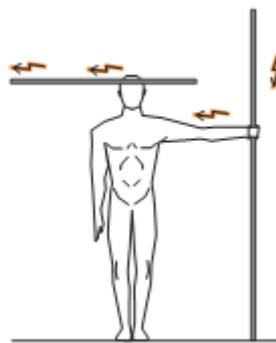
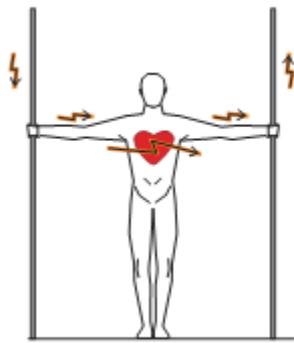
- 
- A proteção contra choques elétricos é regulamentada nas normas:
    - NBR 5410-2004 da ABNT
    - Normas regulamentadoras 10 e 18 do Ministério do Trabalho

## Classificação do Choque Elétrico:

- Contato direto
  - Contato de pessoas e animais diretamente com partes energizadas de uma instalação elétrica.
- Contato indireto
  - Contato de pessoas ou animais com estruturas metálicas ou condutores que, acidentalmente, tornaram-se energizadas.

- O efeito da corrente depende:
  - Intensidade da corrente;
  - Tempo de exposição;
  - Percurso através do corpo humano;
  - Condições orgânicas do indivíduo.

- Passagem da corrente elétrica pelo corpo



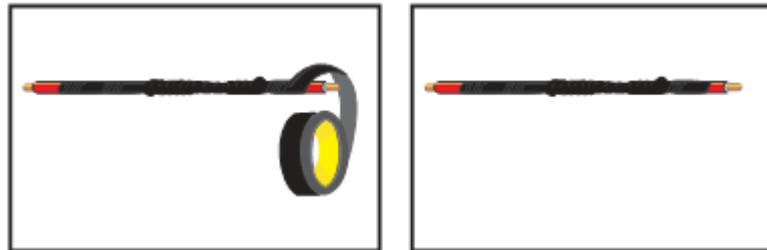
## ○ Passagem da corrente elétrica pelo corpo

### Efeitos fisiológicos diretos da eletricidade

INTENSIDADE	EFEITO	CAUSAS	
1 a 3 mA	Percepção	A passagem da corrente provoca formigamento. Não existe perigo.	
3 a 10 mA	Eletrização	A passagem da corrente provoca movimentos.	
10 mA	Tetanização	A passagem da corrente provoca contrações musculares, agarramento ou repulsão.	
25 mA	Parada Respiratória	A corrente atravessa o cérebro.	
25 a 30 mA	Asfixia	A corrente atravessa o tórax.	
60 a 75 mA	Fibrilação Ventricular	A corrente atravessa o coração.	

## Proteção contra contato direto:

- A proteção deve ser assegurada por:
  - Isolação das partes vivas;
  - Barreiras ou invólucros;
  - Obstáculos
  - Colocação fora de alcance.
- Isolação das partes vivas:
  - Deve impedir o contato com as partes vivas da instalação através de uma isolação que somente possa ser removida com a sua destruição.

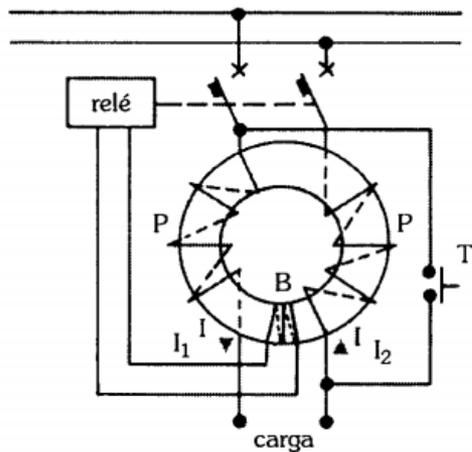


## Proteção contra contato indireto:

- Os dispositivos à corrente diferencial-residual (**DR**) constituem-se no meio mais eficaz de proteção das pessoas e animais contra choques elétricos.
- Não dispensam o uso de disjuntores e fusíveis.
- DRs também diminuem consumo de energia.

## ○ Princípio de funcionamento

Atuam quando há uma corrente residual (de fuga) circulando na instalação.



- Dispositivos a DR podem ser:
  - Interruptores DR
  - Disjuntores de proteção
  - Tomadas com interruptores DR incorporadas
  - Blocos avulsos
  
- Deve-se observar as características técnicas:
  - Corrente nominal
  - Corrente diferencial residual nominal
  - Tensão nominal
  - Capacidade de interrupção
  - Frequência
  - Número de pólos

- A norma exige DRs em:
  - Tomadas em todo local molhado ou sujeito a lavagem;
  - Tomadas em áreas externas;
  - Tomadas internas que alimentam equipamentos na área externa da instalação;
- Nesta aplicações a NBR 5410 obriga o uso de DRs de alta sensibilidade ( $I_f \leq 30 \text{ mA}$ ).

- Devem ser utilizados para proteção:
  - De pessoas e animais contra contatos acidentais com partes vivas da instalação elétrica;
  - Contra perigos de incêndio devido a faltas à terra;
  - Contra presença de faltas à terra por equipamentos em más condições;
  - Em locais de grande concentração de umidade.