



## 10.1 Introdução

A elaboração de um esquema completo de proteção para uma instalação elétrica industrial envolve várias etapas, desde o estabelecimento de uma estratégia de proteção, selecionando os respectivos dispositivos de atuação, até a determinação dos valores adequados para a calibração destes dispositivos. Para que o sistema de proteção atinja a finalidade a que se propõe, ele deve responder aos seguintes requisitos básicos.

### a) Seletividade

É a capacidade que possui o sistema de proteção de selecionar a parte danificada da rede e retirá-la de serviço sem afetar os circuitos sãos.

### b) Exatidão e segurança

Garante ao sistema uma alta confiabilidade operativa.

### c) Sensibilidade

Representa a faixa de operação e não operação do dispositivo de proteção.

Todo projeto de proteção de uma instalação deve ser feito globalmente e não setorialmente. Projetos setoriais implicam uma descoordenação do

sistema de proteção, trazendo, como consequência, interrupções desnecessárias de setores de produção, cuja rede nada depende da parte afetada do sistema.

Basicamente, um projeto de proteção é feito com três dispositivos: fusíveis, disjuntores e relés. E para que eles sejam selecionados adequadamente é necessário se proceder à determinação das correntes de curto-circuito nos vários pontos do sistema elétrico. Os dispositivos de proteção contra correntes de curto-circuito devem ser sensibilizados pelo valor mínimo dessa corrente.

A proteção é considerada ideal quando reproduz a imagem fiel das condições do circuito para a qual foi projetada, isto é, atua dentro das limitações de corrente, tensão, frequência e tempo para as quais foram dimensionados os equipamentos e materiais da instalação.

A capacidade de determinado circuito ou equipamento deve ficar limitada ao valor do seu dispositivo de proteção, mesmo que isso represente a subutilização da capacidade dos condutores ou da potência nominal do equipamento.

Os dispositivos de proteção devem ser localizados e ligados adequadamente aos circuitos, segundo regras gerais estabelecidas por normas.

## **10.2 Proteção de sistemas de baixa tensão**

Os condutores e equipamentos, de uma maneira geral, componentes de um sistema industrial de baixa tensão, são frequentemente solicitados por correntes e tensões acima dos valores previstos para operação em regime para os quais foram projetados. Essas solicitações, normalmente, vêm em forma de sobrecarga, corrente de curto-circuito, sobretensões e subtensões. Todas essas grandezas anormais devem ser limitadas no tempo de duração e

módulo.

Portanto, dispositivos de proteção encontrados nas instalações elétricas industriais devem permitir o desligamento do circuito quando este está submetido às condições adversas, anteriormente previstas. Na prática, os principais dispositivos utilizados são os fusíveis — dos tipos diazed e NH —, os disjuntores e os relés térmicos.

### **10.2.1 Prescrições básicas das proteções contra as sobrecorrentes**

Quando falamos genericamente em proteções contra sobrecorrentes estamos nos referindo às proteções contra sobrecargas e contra curtos-circuitos. No entanto, quando nos referimos às proteções contra sobrecargas estamos considerando a implementação de dispositivos capazes de proteger os condutores elétricos contra correntes moderadas resultantes da operação de cargas cuja soma das correntes supera a capacidade dos condutores que as alimentam. Quando estamos falando de proteção contra curtos-circuitos queremos nos referir à circulação de elevadas correntes nos condutores elétricos resultantes de um defeito entre fases ou entre qualquer dos condutores fase-terra.

#### **10.2.1.1 Prescrições gerais**

Genericamente, podemos fazer as seguintes considerações:

- Os dispositivos utilizados na proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos devem ser capazes de proteger os circuitos e os equipamentos a eles conectados contra os efeitos térmicos, resultantes das correntes de sobrecarga devido à elevação de temperatura nas isolações, conexões etc., e contra os efeitos mecânicos decorrentes dos esforços dinâmicos nos barramentos,

- chaves etc. provocados pelas elevadas correntes de curto-circuito.
- Os dispositivos de proteção contra curtos-circuitos não protegem termicamente os equipamentos submetidos a faltas internas.
  - Os condutores de fase (condutores vivos) devem ser protegidos por um ou mais dispositivos de seccionamento automático capaz de isolar a parte do circuito defeituoso da fonte de alimentação.
  - As proteções contra sobrecorrentes devem ser detectadas em todos os condutores de fases e provocar obrigatoriamente o seccionamento do condutor em que ocorreu a falta. Em geral, o seccionamento deve ser nas três fases.
  - As proteções contra sobrecarga e curtos-circuitos devem ser dimensionadas de forma a serem seletivas e poderem coordenar entre si.

### ***10.2.1.2 Proteção de acordo com a natureza dos circuitos***

As proteções devem ser dimensionadas de acordo com o tipo de esquema dos circuitos discriminados a seguir.

#### ***10.2.1.2.1 Esquemas TT e TN***

- No esquema TT, pode-se omitir a proteção em uma das fases, nos circuitos alimentados entre fases em que o condutor neutro não é distribuído, desde que seja utilizada uma proteção diferencial a montante ou exista uma proteção que seccione todos os condutores de fase.
- Nos esquemas TT e TN, quando a seção do condutor neutro for igual ou equivalente à do condutor fase, não é necessário utilizar uma proteção de sobrecorrente no condutor neutro nem seccioná-lo.
- Nos esquemas TT e TN, quando a seção do condutor neutro é

inferior à do condutor fase, deve-se utilizar uma proteção de sobrecorrente no neutro, devendo essa proteção seccionar os condutores fase sem necessariamente seccionar o condutor neutro. No entanto, pode-se omitir essa proteção desde que o condutor neutro esteja protegido contra curtos-circuitos pela proteção aplicada nos condutores fase ou que a capacidade de corrente do condutor neutro seja dimensionada para a maior corrente que possa fluir nesse condutor em condições de operação normal do circuito. Para que seja garantida essa última condição é necessário que a capacidade das cargas conectadas no circuito seja o máximo possível uniformemente distribuída entre as fases, de forma que a corrente que possa fluir no condutor neutro seja adequada à seção desse condutor.

#### 10.2.1.2.2 Esquemas IT

Não é recomendável distribuir o condutor neutro nos sistemas com esquema IT. No entanto, se o neutro for distribuído, deve-se utilizar uma proteção de sobrecorrente em todos os circuitos detectando sobrecorrentes no condutor neutro que deverá seccionar todos os condutores fase, incluindo o próprio condutor neutro.

#### 10.2.1.3 *Proteção contra as correntes de sobrecarga*

São as seguintes as prescrições básicas contra as correntes de sobrecarga nas instalações elétricas:

- É necessária a aplicação de dispositivos de proteção para interromper as correntes de sobrecarga nos condutores dos circuitos, de sorte a evitar o aquecimento da isolação, das conexões e de outras partes do sistema contíguas, além dos limites previstos por norma.
- Os dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga devem

ser localizados nos pontos do circuito em que haja uma mudança qualquer que caracterize uma redução do valor da capacidade de condução de corrente dos condutores. Esta mudança pode ser caracterizada por uma troca de seção, alteração da maneira de instalar, alteração no número de cabos agrupados ou na natureza da isolamento, e em todas as demais condições abordadas no Capítulo 3.

- O dispositivo que protege um circuito contra sobrecargas pode ser colocado ao longo do percurso desse circuito, se a parte do circuito compreendida entre, de um lado, a troca de seção, de natureza, de maneira de instalar ou de constituição e, do outro lado, o dispositivo de proteção não possuir qualquer derivação nem tomada de corrente e atender a uma das duas condições:
  - seu comprimento não exceder a 3 m e ser instalada de modo a reduzir ao mínimo o risco de curto-circuito;
  - não estar situada nas proximidades de materiais combustíveis.
- Os dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga em circuitos de motor não devem ser sensíveis à corrente de carga absorvida por eles, tendo, no entanto, as características compatíveis com o regime de corrente de partida, tempo admissível com rotor bloqueado e tempo de aceleração.
- Pode-se omitir a aplicação dos dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga nas seguintes condições:
  - nos circuitos situados a jusante de uma mudança qualquer que altere a capacidade de condução de corrente dos condutores, desde que haja uma proteção contra sobrecargas localizada a montante;
  - nos circuitos de cargas resistivas ligadas no seu valor máximo;
  - nos circuitos de comando e sinalização;
  - nos circuitos de alimentação de eletroímãs para elevação de carga;

- nos circuitos secundários de transformadores de corrente;
- nos circuitos secundários de transformadores de potencial destinados ao serviço de medição;
- nos circuitos de carga motriz, cujo regime de funcionamento seja classificado como intermitente;
- nos circuitos que alimentam o campo de excitação de máquinas rotativas;
- nos circuitos que alimentam motores utilizados em serviço de segurança.

#### **10.2.1.4 Proteção contra as correntes de curto-circuito**

São as seguintes as prescrições básicas contra as correntes de curto-circuito nas instalações elétricas:

- Os dispositivos de proteção devem ter sua capacidade de interrupção ou de ruptura igual ou superior ao valor da corrente de curto-circuito presumida no ponto de sua instalação.
- A energia que os dispositivos de proteção contra curtos-circuitos devem deixar passar não pode ser superior à energia máxima suportada pelos dispositivos e condutores localizados a jusante.
- O dispositivo de proteção deve ser localizado no ponto em que haja mudança no circuito que provoque redução na capacidade de condução de corrente dos condutores.
- A proteção do circuito terminal dos motores deve garantir a proteção contra as correntes de curto-circuito dos condutores e dispositivos localizados a jusante.
- Os circuitos terminais que alimentam um só motor podem ser protegidos contra curtos-circuitos utilizando-se fusíveis dos tipos NH ou diazed com retardo de tempo, ou disjuntores com dispositivos de disparo magnético.

- Pode-se omitir a aplicação dos dispositivos de proteção contra as
- correntes de curto-circuito nas seguintes condições:
    - em um ponto do circuito compreendido entre aquele em que houve a mudança de seção ou outra modificação e o dispositivo de proteção, desde que este comprimento não seja superior a 3 m e o circuito não esteja localizado nas proximidades de materiais combustíveis;
    - em um ponto do circuito situado a montante de uma mudança de seção ou outra modificação, desde que o dispositivo de proteção proteja o circuito a jusante;
    - nos circuitos que ligam geradores, transformadores, retificadores, baterias e acumuladores aos quadros de comando correspondentes, desde que nestes haja dispositivos de proteção;
    - nos circuitos que ligam os secundários dos transformadores de potencial e de corrente aos relés de proteção ou aos medidores de energia;
    - nos circuitos que, desenergizados, possam trazer perigo para a instalação correspondente.

### 10.2.2 Dimensionamento dos dispositivos de proteção

Um circuito elétrico só está adequadamente protegido contra as sobrecorrentes quando todos os seus elementos, como condutores, chaves e outros, estiverem com suas capacidades térmica e dinâmica iguais ou inferiores aos valores limitados pelos dispositivos de proteção correspondentes. Assim, torna-se importante analisar as sobrecorrentes e os tempos associados à resposta efetiva da proteção.

Quando se trata de correntes de sobrecarga, seus módulos são muito inferiores aos módulos relativos às correntes de curto-circuito. Por esta razão, as correntes de defeito costumam ser analisadas por processos mais

detalhistas, como o da integral de Joule. Este método é bastante representativo na análise matemática dos efeitos térmicos desenvolvidos pelas correntes de curto-circuito e sua formulação é dada pela Equação (10.1).

$$\int_0^t [i(t)]^2 \times dt \leq I_{cs}^2 \times T \quad (10.1)$$

$I_{cs}$  - corrente de curto-circuito que atravessa o dispositivo de proteção;

$T$  - tempo de duração da corrente de curto-circuito.

A integral de Joule de cabos e componentes, como disjuntores, fusíveis etc., é calculada normalmente a partir de ensaios de curto-circuito.

A [Figura 10.1](#) representa a curva típica da integral de Joule de um cabo de baixa tensão a qual fornece para cada valor de corrente a energia específica ou energia por unidade de resistência ( $J/\Omega = A^2 \cdot s$ ).

O valor de  $I_c$  na [Figura 10.1](#) representa a capacidade de corrente do cabo que nessas condições atinge a temperatura máxima para serviço contínuo e com a qual pode operar ao longo de sua vida útil, normalmente considerada de 20 anos. Já o valor de  $I_l$  na mesma figura representa o valor limite da corrente para a qual o aquecimento do condutor é adiabático, isto é, sem troca de calor entre o condutor e a isolação. Logo, a energia necessária para elevar a temperatura para serviço contínuo até a temperatura de curto-circuito é denominada integral de Joule.

A norma NBR 5410 estabelece que a integral de Joule a qual o dispositivo de proteção deve deixar passar não pode ser superior à integral de Joule necessária para aquecer o condutor, desde a temperatura máxima para o serviço contínuo até a temperatura limite de curto-circuito, ou seja:

$$\int_0^t [i(t)]^2 \times dt \leq K^2 \times S^2 \quad (10.2)$$

$K_2 \times S_2$  - integral de Joule para aquecimento do condutor, desde a temperatura máxima para serviço contínuo até a temperatura de curto-circuito, admitindo aquecimento adiabático.

$K = 115$  para condutores de cobre com isolamento de PVC e seção inferior ou igual a  $300 \text{ mm}^2$ ;

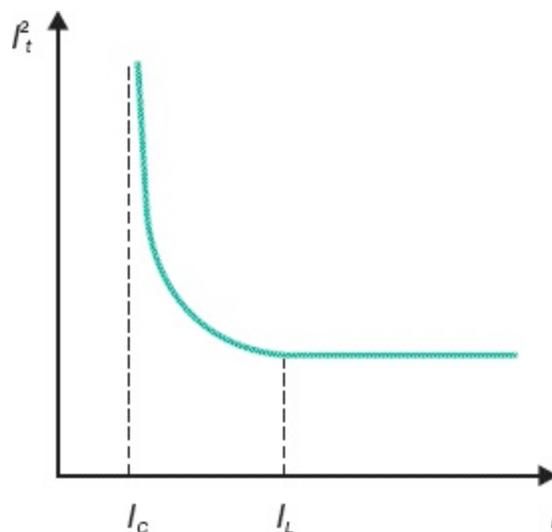
$K = 103$  para condutores de cobre com isolamento de PVC e seção superior a  $300 \text{ mm}^2$ ;

$K = 143$  para condutores de cobre com isolamento de EPR ou XLPE;

$S$  - seção do condutor, em  $\text{mm}^2$ .

Ainda da NBR 5410, podemos acrescentar que para um curto-circuito de qualquer duração, em que a assimetria da corrente não seja significativa, e para curtos-circuitos simétricos de duração igual ou superior a  $0,1 \text{ s}$  e igual ou inferior a  $0,5 \text{ s}$ , pode-se escrever:

$$I_{cs}^2 \times T \leq K^2 \times S^2 \quad (10.3)$$



**Figura 10.1** Característica  $I^2 \times t$  típica de cabos de baixa tensão.

$I_{cs}$  - corrente de curto-circuito presumida simétrica, em A;

$T$  - duração, em segundos, como .

A corrente nominal do dispositivo de proteção contra curtos-circuitos pode ser superior à capacidade de condução de corrente dos condutores do circuito.

A [Tabela 10.1](#) fornece a integral de Joule para o aquecimento adiabático dos condutores de cobre, desde a temperatura máxima de serviço até a temperatura limite suportável para correntes de curto-circuito, considerando-se as isolações de PVC, XLPE e EPR.

Como será estudado na Seção 10.2.2.4, os fabricantes dos fusíveis fornecem a integral de Joule que esses elementos de proteção deixam passar, de forma a se poder dimensioná-los adequadamente.

Da Equação (10.3), pode-se determinar o tempo máximo em que um condutor, definido por sua isolação, pode suportar determinada corrente de curto-circuito:

$$T \leq \frac{K^2 \times S^2}{I_{cs}^2} \quad (10.4)$$

Com base nesta equação, os fabricantes de cabos elétricos definem as curvas de suportabilidade térmica contra as correntes de curto-circuito em função das seções dos condutores e do tempo de duração das referidas correntes, conforme se pode observar nas Figuras 3.28 e 3.29 do Capítulo 3.

### Exemplo de aplicação (10.1)

Determinar o tempo máximo que a proteção deve atuar quando determinado circuito em condutor isolado de cobre de seção de 70 mm<sup>2</sup>, tipo de isolação PVC, é atravessado por uma corrente de curto-circuito de valor igual a 6,5 kA.

Aplicando-se a Equação (10.4), tem-se:

$$T \leq \frac{K^2 \times S^2}{I_{cs}^2} \leq \frac{115^2 \times 70^2}{(6,5 \times 10^3)^2} \leq 1,53 \text{ s} \leq 91,8 \text{ ciclos}$$

$K = 115$  (para condutor de PVC).

O mesmo valor pode ser obtido pelo gráfico da Figura 3.28.

### Exemplo de aplicação (10.2)

Um CCM é alimentado por um circuito trifásico em condutor de cobre isolado em PVC de seção de  $95 \text{ mm}^2$ . A corrente de defeito é de  $18.300 \text{ A}$  e a proteção atua nessa corrente em  $0,3 \text{ s}$ . Verificar se a isolamento do condutor suporta estas condições transitórias.

A integral de Joule vale:

$$\int_0^t [i(t)]^2 \times dt = I_{cs}^2 \times T = 18.300^2 \times 0,3 = 100.467 \times 10^3 \text{ A}^2 \times \text{s}$$

Pela Tabela 10.1, obtém-se a integral de Joule referente ao condutor de  $95 \text{ mm}^2$ :

$$K_2 \times S_2 = 119.355 \times 10^3 \text{ A}^2 \times \text{s}$$

$$T \leq \frac{K^2 \times S^2}{I_{cs}^2} \leq \frac{115^2 \times 70^2}{(6,5 \times 10^3)^2} \leq 1,53 \text{ s} \leq 91,8 \text{ ciclos (condição satisfeita)}$$

**Tabela 10.1** Integral de Joule para aquecimento adiabático para condutores de cobre

Seção $\text{mm}^2$	Integral de Joule $\text{A}^2 \times \text{s} \times 10^3$	
	Isolação PVC	Isolação EPR e XLPE
1,5	29,7	46
2,5	82,6	127

4	211,6	327
6	476,1	736
10	1.322	2.045
16	3.385	5.235
25	8.265	12.781
35	16.200	25.050
50	35.062	51.123
70	64.802	100.200
95	119.355	184.552
120	190.440	294.466
150	297.562	460.103
185	452.625	699.867
240	761.760	1.167.862

Um circuito só está adequadamente protegido quando o dispositivo de proteção contra sobrecorrentes satisfaz às seguintes condições:

- Não opera quando a corrente for inferior à capacidade de condução de corrente do condutor do circuito na sua particular condição de maneira de instalar.
- Opera normalmente, com tempo de retardo elevado, para uma corrente de sobrecarga de até 1,45 vez a capacidade de corrente do condutor.

- Opera em tempos inversamente proporcionais para correntes de sobrecarga compreendidas entre 1,45 e 8 vezes a corrente nominal.
- Opera em um tempo extremamente reduzido para as correntes de curto-circuito.
- Os dispositivos de proteção devem ser nominalmente dimensionados em função das particularidades de cada sistema, cujo estudo será definido a seguir.

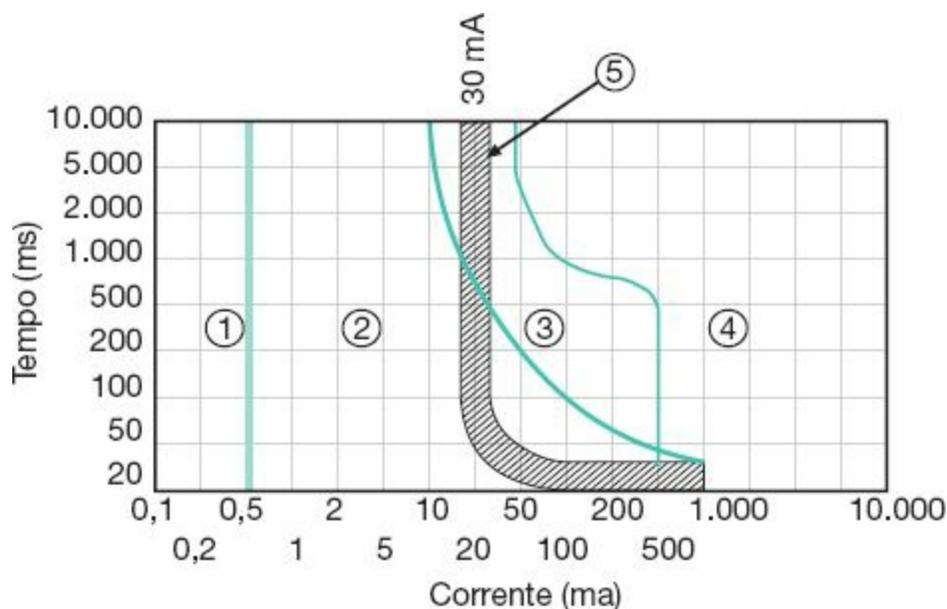
### 10.2.3 Dispositivo de proteção à corrente diferencial-residual

É cada vez mais frequente a ocorrência de acidentes envolvendo crianças e adultos que entram em contato direto ou indireto com partes vivas da instalação ou partes metálicas não energizadas em operação normal (massas).

Além de levar perigo à vida das pessoas, é comum que a propriedade possa ser profundamente prejudicada ou até destruída por uma falha na instalação que não é prontamente eliminada por um dispositivo adequado de proteção. Dessa forma, a proteção por dispositivo de proteção à corrente diferencial-residual pode prover segurança à vida dos usuários de energia elétrica, quando a instalação está protegida por um dispositivo dimensionado para uma corrente de fuga de valor não superior a 30 mA. Para a proteção da propriedade podem ser utilizados dispositivos com valor de corrente de fuga superior.

Todas as atividades biológicas desenvolvidas pelo corpo humano são resultantes de impulsos enviados pelo cérebro na forma de corrente elétrica de baixíssimo valor. Porém, quando o indivíduo entra em contato com qualquer parte viva de um circuito elétrico, uma corrente passa a circular por esse indivíduo juntamente com a corrente fisiológica própria. O resultado é uma alteração nas funções vitais do indivíduo que pode levá-lo à morte. A [Figura 10.2](#) mostra as diferentes zonas de proteção de um dispositivo DR:

- Zona 1: não provoca distúrbios perceptíveis.
- Zona 2: não provoca distúrbios fisiológicos prejudiciais.
- Zona 3: provoca distúrbios fisiológicos sérios, porém reversíveis, como parada cardíaca, parada respiratória e contrações musculares.
- Zona 4: provoca distúrbios fisiológicos severos e geralmente irreversíveis, como fibrilação cardíaca e parada respiratória.
- Zona 5: representa a faixa de atuação do dispositivo de proteção DR para a corrente de fuga de 30 mA.



**Figura 10.2** Curva *tempo × corrente* das reações fisiológicas dos seres humanos.

Esses dispositivos podem ser divididos em três partes funcionais:

- Transformador toroidal para detecção das correntes de falta fase-terra.
- Disparador que transforma uma grandeza elétrica em ação mecânica.
- Mecanismo móvel e os respectivos elementos de contato.

O princípio básico de funcionamento dos dispositivos DR leva em conta que a soma das correntes que circulam nos condutores de fase e de neutro é nula, gerando, conseqüentemente, um campo magnético nulo e não induzindo

no secundário do transformador de corrente do dispositivo nenhuma corrente elétrica.

Se, no entanto, a instalação elétrica é submetida a uma corrente de falta fase-terra, a relação de nulidade das correntes deixa de existir e surgirá um campo magnético residual que induzirá no secundário do transformador de corrente do dispositivo uma corrente elétrica que sensibilizará o mecanismo de disparo do dispositivo DR. Esse princípio básico de funcionamento poderá ser mais bem entendido a partir das análises das [Figuras 10.3\(a\) e \(b\)](#).

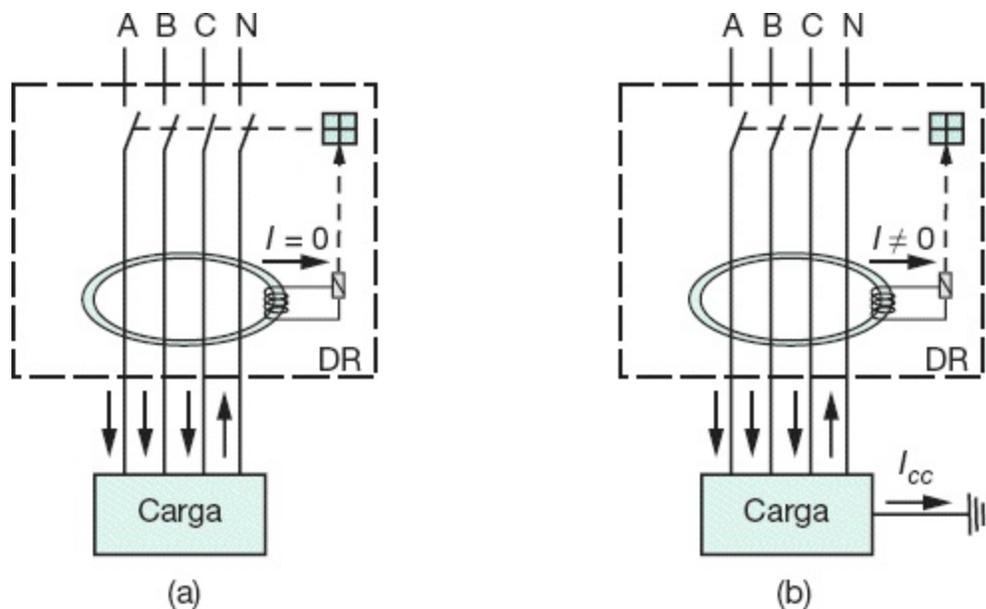
A concepção do núcleo, associada a mecanismos auxiliares, é bem mais complexa do que o esquema simplificado da [Figura 10.3](#).

Há dois tipos de dispositivos DR quanto à sensibilidade da corrente de defeito. Os dispositivos DR mais sensíveis detectam correntes de falta de até 30 mA e, portanto, asseguram a proteção contra contatos diretos e indiretos. Já os dispositivos DR com sensibilidade de corrente de falta superior a 30 mA devem ser empregados somente contra contatos indiretos e contra incêndio.

De acordo com a NBR 5410, qualquer que seja o esquema de aterramento deve ser objeto de proteção complementar contra contatos diretos por dispositivos a corrente diferencial-residual (dispositivos DR) de alta sensibilidade, isto é, com corrente diferencial-residual nominal igual ou inferior a 30 mA. A aplicação de dispositivos DR deve seguir algumas premissas básicas:

- O uso do dispositivo DR não dispensa, em qualquer hipótese, o condutor de proteção.
- Os dispositivos DR devem garantir o seccionamento de todos os condutores do circuito protegido.
- O circuito magnético do dispositivo DR deve envolver todos os condutores vivos dos circuitos protegidos, inclusive o condutor neutro.

- O circuito magnético do dispositivo DR não deve envolver, em
- nenhuma hipótese, o condutor de proteção.
  - Devem-se selecionar os circuitos elétricos e os respectivos dispositivos DR de tal forma que as correntes de fuga que possam circular durante a operação dos referidos circuitos não ocasionem a atuação intempestiva dos dispositivos.
  - Para tornar possível o uso do dispositivo DR nos esquemas TN-C, deve-se convertê-lo imediatamente antes do ponto de instalação do dispositivo no esquema TN-C-S.
  - Deve ser obrigatório o uso de dispositivos DR:
    - nos circuitos que alimentam pontos de utilização situados em locais contendo banheira ou chuveiro elétrico;
    - nos circuitos que alimentam tomadas de corrente localizadas em áreas externas à edificação;
    - nos circuitos que, em áreas de habitação, alimentam pontos de utilização situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e demais dependências internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens, cujos pontos estejam a uma altura inferior a 2,5 m;
    - nos circuitos que, em edificações não residenciais, alimentam pontos de tomada situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e, em geral, em áreas internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens.



**Figura 10.3** Dispositivo DR instalado em um circuito trifásico.

A proteção dos circuitos pode ser realizada individualmente por ponto de utilização, por circuitos ou por grupos de circuitos.

#### 10.2.4 Relés térmicos de sobrecarga

São dispositivos dotados de um par de lâminas construídas com metais de diferentes coeficientes de dilatação térmica linear que, quando atravessados por uma corrente de intensidade ajustada, aquecendo o bimetal, provocam, sob efeito da dilatação térmica de suas lâminas, a operação do contato móvel.

Os relés bimetálicos de sobrecarga são constituídos de modo a permitir ajustes da corrente dentro de determinadas faixas que podem ser escolhidas conforme o valor da corrente e da natureza da carga. Quanto maior for o valor da corrente de sobrecarga, menor será o tempo decorrido para a atuação do relé térmico. Os aspectos construtivos podem ser vistos no Capítulo 9.

Usados, particularmente, em instalações industriais para proteção de motores, os relés bimetálicos de sobrecarga são acoplados a contadores, que são os elementos de comando do circuito. Normalmente, os fabricantes de

contatores fornecem o tipo adequado dos relés. Para um mesmo tipo de contator, existem vários relés com faixas de ajuste diferentes.

A seleção da faixa de ajuste dos relés de sobrecarga deve ser função do regime de serviço do motor. Os relés bimetálicos de sobrecarga atuam com base em curvas de *tempo* × *corrente* do tipo inverso, como as que se ilustram na [Figura 10.4](#).

A determinação do tempo de atuação da unidade térmica pode ser feita pela Equação (10.5):

$$M = \frac{I_c}{I_a} \quad (10.5)$$

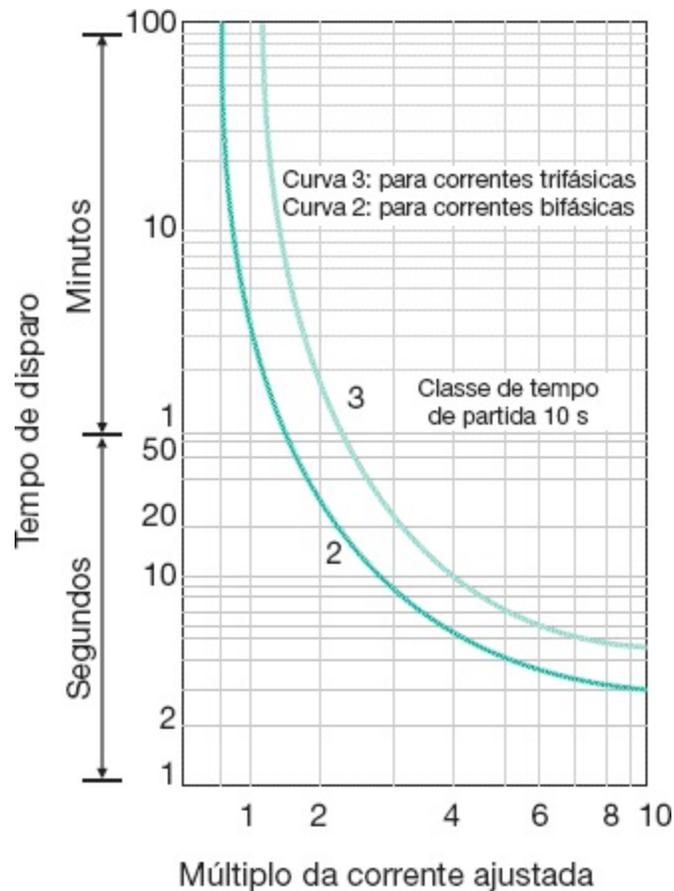
$I_a$  - corrente de ajuste da unidade térmica temporizada, em A;

$I_c$  - corrente que atravessa o relé, em A;

$M$  - múltiplo da corrente ajustada.

Com o valor de  $M$  acessa-se o gráfico do relé, como, por exemplo, o da [Figura 10.4](#), obtendo-se no eixo das ordenadas o tempo de atuação  $T_{ar}$ .

A integridade da isolação de um condutor é severamente atingida por correntes de sobrecarga que provoquem efeitos térmicos excessivos. Assim, a norma NBR 5410 considera corrente de sobrecarga de pequena intensidade quando o condutor atinge uma temperatura de regime não superior à temperatura máxima de sobrecarga relativa à natureza de sua isolação, dada na Tabela 3.5. Correntes de sobrecarga de até 1,45 vez a capacidade nominal do condutor são consideradas de pequena intensidade. Podem ser toleradas por um longo período de tempo, porém devem ser limitadas na duração para não prejudicar a isolação do condutor.



**Figura 10.4** Características do relé 3UA da Siemens.

### 10.2.4.1 Critérios para o ajuste dos relés de sobrecarga

O ajuste dos relés de sobrecarga necessita de critérios básicos a seguir definidos.

#### a) Serviço contínuo (S1)

De forma geral, um relé deve ser escolhido com uma faixa de ajuste em que esteja compreendida a corrente nominal do motor, independentemente do seu carregamento.

O valor do ajuste do relé de sobrecarga térmica deve obedecer aos requisitos relacionados a seguir.

A corrente de ajuste do relé térmico de proteção deve ser igual ou

superior à corrente de projeto ou simplesmente corrente de carga prevista, ou seja:

$$I_a \geq I_c \quad (10.6)$$

$I_a$  - corrente nominal ou de ajuste da proteção;

$I_c$  - corrente de projeto do circuito.

A corrente de ajuste do relé térmico de proteção deve ser igual ou inferior à capacidade de condução de corrente dos condutores:

$$I_a \leq I_{nc} \quad (10.7)$$

$I_{nc}$  - corrente nominal do condutor.

O tempo de partida do motor deve ser inferior ao tempo de atuação do relé,  $T_{ar}$ , para a corrente de partida correspondente, enquanto o tempo de rotor bloqueado deve ser igual ou superior ao valor da corrente ajustada, ou seja:

$$T_{rb} \geq T_{ar} > T_{pm} \quad (10.8)$$

$T_{pm}$  - tempo de acionamento do motor;

$T_{rb}$  - tempo de rotor bloqueado.

Como exemplo, o ajuste dos relés térmicos bimetálicos da série 3UA de fabricação Siemens pode ser feito a partir da [Tabela 10.2](#).

**Tabela 10.2** Características elétricas dos relés bimetálicos 3UA5/4

Potência de motores trifásicos padronizados - NBR 5432 Categoria de utilização AC3					Faixa de ajuste	Para montagem acoplado aos contactores	F m
Tipo	kW	220/230V	380/400V	440V	A	AC3	

3UA55-00-1J	2,2	3	4-5-6	5-6-7,5	6,3-10	3TF43		3TF35	
3UA55-00-2A	3-3,7	4-5	7,5-10	7-5-10	10-16	3TF44		3TF45	
3UA55-00-2B	3,7-4,5-5,5	5-6-7,5	10-12,5	10-12,5-15	12,5-20				
3UA55-00-2D	5,5-7,5-9	7,5-10-12,5	15-20	20-25	20-32	22/32A			
3UA55-00-2R	9-11	12,5-15	25	25-30	32-40			38A	
3UA58-00-2D	5,5-7,5-9	7,5-10-12,5	15-20	20-25	20-32	3TF46	3TF47	3TF48	3TF49
3UA58-00-2F	9-11-15	12,5-15-20	25-30	30	32-50	45A			
3UA58-00-2P	15-18,5	20-25	40	40-50	50-63		63A		
3UA58-00-2U	18,5-22	25-30	50	60	63-80				75A
3UA58-00-8W	22	30	50-60	60	70-88				
3UA60-	18,5-								

00-2W	22	25-30	50-60	75	63-90	3TF50
3UA60-00-3H	30-37	40-50	75	-	90-120	110A
3UA61-00-3H	30	40	75	100	90-120	3TF51
3UA61-00-3K	37-45	50-60	100	100	120-150	140A
3UA62-00-3H	30	40	75	100	90-120	3TF52
3UA62-00-3K	37-45	50-60	100	100	120-150	
3UA62-00-3M	55	75	125	125	150-180	170A
3UA45-00-8YG	55	75	150	150	160-250	3TF53/205A
3UA45-00-8YG	55-75	75-100	125-175	150-200	160-250	3TF54/250A
3UA45-00-8YH	75-90	100-125	150-200	175-250	200-320	3TF55/300A
3UA45-00-8YH	75-90	100-125	150-200	175-250	200-320	3TF56/400A

3UA45-00-8YJ	110	150	250-300	300	250-400		
3UA46-00-8YK	110-150	150-200	250-350	300-400	320-500	3TF57/475A	3TB58
3UA46-00-8YL	160-200	250	400-450	450-500	400-630		630A

### Exemplo de aplicação (10.3)

Determinar o ajuste do relé de proteção de sobrecarga térmica de um motor de 50 cv, 380 V/IV polos, em regime de funcionamento S1, alimentado por um circuito em condutor unipolar de cobre, tipo da isolação PVC de seção igual a 25 mm<sup>2</sup>, instalado em canaleta fechada embutida no piso. O tempo de partida do motor é de 2 s.

De acordo com as condições estabelecidas nas Equações (10.6) e (10.7), tem-se:

$$I_a \geq I_c \rightarrow I_a \leq I_{nc}$$

$$I_{nm} = I_c = 68,8 \text{ A (corrente nominal do motor)}$$

$I_{nc} = 89 \text{ A}$  (capacidade de corrente do condutor para o método de instalação 33 da Tabela 3.6 e método de referência B1 da Tabela 3.4).

Logo, a corrente de ajuste deve estar compreendida dentro dos seguintes limites:

$$68,8 \leq I_a \leq 89 \text{ A}$$

Será adotada, portanto,  $I_a = 68,8 \text{ A}$ .

Com base na Tabela 10.2, pode-se assim especificar o relé bimetálico: tipo 3UA60-00-2W Siemens — faixa de ajuste de (63 a 90) A.

Relativamente ao tempo de atuação do relé, tem-se:

$$T_{rb} \geq T_{ar} > T_{pm} \rightarrow T_{pm} = 2s$$

$$T_{rb} = 12 \text{ (Tabela 6.4)}$$

$R_{cpm} = 6,4$  (relação entre a corrente de partida e a corrente nominal do motor obtida da Tabela 6.4)

$$I_{pm} = R_{cpm} \times I_{nm} = 6,4 \times 68,8 = 440,3 \text{ A}$$

$$M = \frac{I_{pm}}{I_a} = \frac{440,3}{68,8} = 6,4 \rightarrow T_{ar} = 5,5 \text{ s (gráfico da Figura 10.4)}$$

Logo, (condições satisfeitas).

## b) Serviço de curta duração ou intermitente

Neste caso, pode-se omitir a proteção de sobrecarga, dependendo do regime de serviço do motor.

Quando prevista a proteção de sobrecarga, a seleção da faixa de disparo e a corrente de ajuste devem ser dimensionadas de acordo com o mesmo princípio apresentado para os motores em serviço permanente, porém os tempos de disparo dados nas curvas devem ser reduzidos em 25 % dos valores mostrados nos gráficos mencionados. É sempre importante observar que  $T_{ar} > T_{pm}$ , pois, do contrário, não é possível processar a religação do motor, operação realizada com determinada frequência.

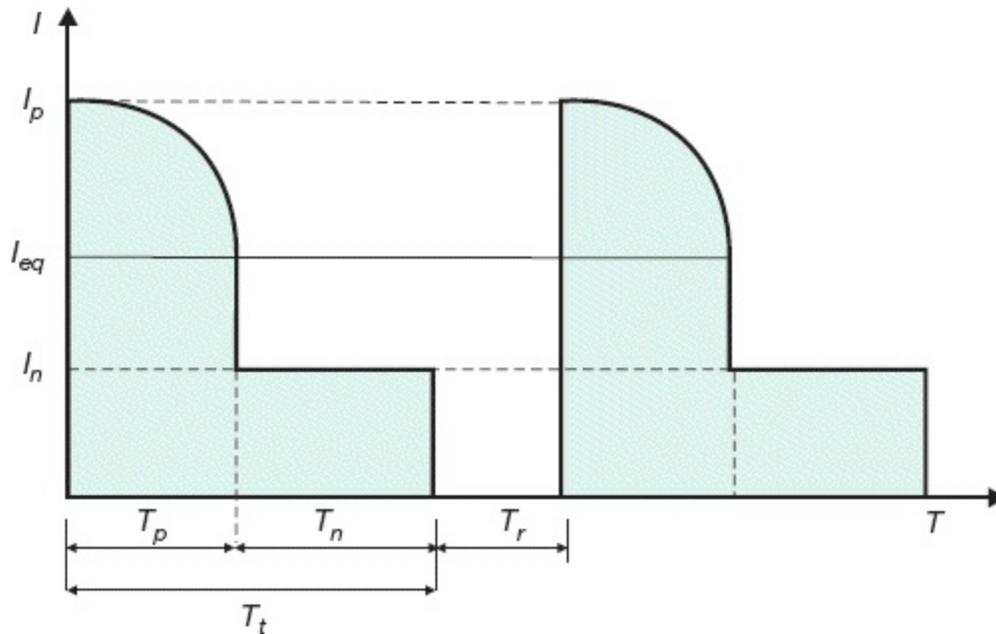
Neste caso, deve-se determinar a corrente equivalente do ciclo de carga, dada pela Equação (10.9).

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{I_{pm}^2 \times T_{pm} + I_{nm}^2 \times T_n}{T_t + \frac{1}{3} \times T_r}} \quad (10.9)$$

$I_{pm}$  - corrente de partida, em A;

$T_{pm}$  - tempo de duração da partida, em A;

$I_{nm}$  - corrente nominal do motor ou corrente de carga, em A;



**Figura 10.5** Curva de operação de um motor em regime S4.

$T_n$  - tempo de duração do regime normal de funcionamento, em s;

$T_t$  - tempo total de um ciclo de funcionamento, isto é,  $T_p + T_n$ , em s;

$T_r$  - tempo de duração do repouso, em s.

A **Figura 10.5** mostra uma curva típica do regime S4, um dos mais utilizados nas aplicações práticas.

#### Exemplo de aplicação (10.4)

Determinar o ajuste do relé bimetálico de proteção de um motor de 75 cv/IV polos, 380 V, acionado em regime intermitente tipo S4, dado na Figura 10.6. O tempo de partida do motor é de 3 s. O motor opera em condição de sobrecarga de 10 %. O condutor é do tipo unipolar, isolado em PVC, e está instalado no interior de eletroduto PVC enterrado no piso.

$$I_{nm} = 101,1 \text{ A (Tabela 6.4)} \rightarrow R_{cpm} = 6,8 \text{ (Tabela 6.4)}$$

$$I_{pm} = 6,8 \times 101,1 = 687,4 \text{ A}$$

$$I_c = 1,1 \times I_{nm} = 1,1 \times 101,1 = 111,2 \text{ A (motor em regime de sobrecarga de 10 \%)}$$

$$T_{pm} = 3 \text{ s}$$

$$T_n = 3.197 \text{ s (tempo de regime normal de operação do motor)}$$

$$T_t = T_{pm} + T_n = 3 + 3.197 = 3.200 \text{ s}$$

$$T_r = 4.800 - 3.200 = 1.600 \text{ s (tempo de repouso do motor)}$$

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{687,4^2 \times 3 + 111,2^2 \times 3197}{3200 + \frac{1}{3} \times 1.600}} = 104,7 \text{ A}$$

Da Equação (10.6), tem-se:

$$I_a \geq I_c = I_{eq} = 104,7 \text{ A}$$

Da Equação (10.7), tem-se:

$$I_a \leq I_{nc}$$

$I_{nc} = 122 \text{ A}$  (condutor de  $50 \text{ mm}^2$ , para método de instalação 61A da Tabela 3.4 e valor da corrente obtida na Tabela 3.6 para o método de referência D)

Logo,  $104,7 \leq I_a \leq 122 \text{ A}$ .

Será escolhido o relé 3UA 60-00-3H Siemens, com faixa de ajuste de 90 a 120 A. A corrente de ajuste será de 104,7 A.

Devem-se verificar as condições de partida, ou seja:

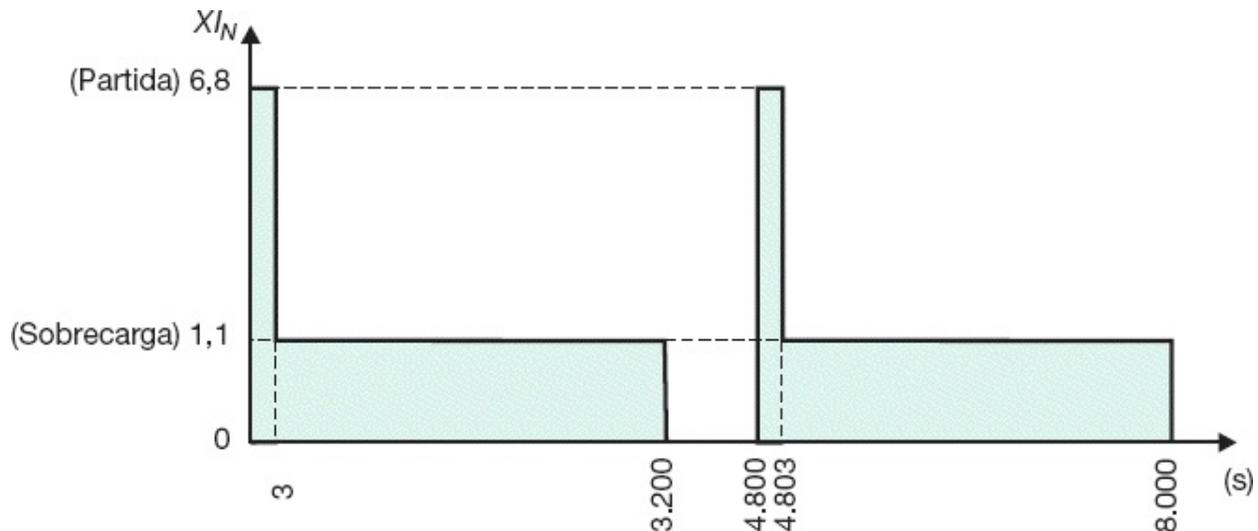
$$M = \frac{I_{pm}}{I_a} = \frac{6,8 \times 101,1}{104,7} = 6,5 \rightarrow T_{ar} = 5,5 \text{ s (Figura 10.4) s (Figura 10.4)}$$

Considerando-se o relé a quente, tem-se:

$$T_{ar} = 5,5 \times 0,25 = 1,375 \text{ s}$$

$$T_{ar} < T_{pm} \text{ (condição não satisfeita)}$$

Neste caso, pode-se dispensar a proteção contra sobrecarga. No entanto, é sempre aconselhável seguir a orientação do fabricante da máquina a ser acionada.



**Figura 10.6** Curva de operação.

### 10.2.5 Disjuntores de baixa tensão

São dispositivos destinados à proteção de circuitos elétricos, os quais devem atuar quando percorridos por uma corrente de valor superior ao estabelecido para funcionamento normal.

De acordo com sua forma construtiva, os disjuntores podem acumular várias funções:

- Proteção contra sobrecarga.
- Proteção contra curtos-circuitos.
- Comando funcional.
- Seccionamento.
- Seccionamento de emergência.
- Proteção contra contatos indiretos.
- Proteção contra quedas e ausência de tensão.

A seguir serão analisados os principais parâmetros elétricos dos disjuntores.

#### **a) Corrente nominal**

É aquela que pode circular permanentemente pelo disjuntor.

Os disjuntores ditos tropicalizados são constituídos de um bimetálico duplo que permite manter sua corrente nominal até a uma temperatura, em geral, de 50 °C, sem que o mecanismo de atuação opere. Ao contrário, os disjuntores cujos relés de sobrecarga térmica são providos de somente um bimetálico são ajustados para atuarem, em geral, a uma temperatura de 20 °C.

Considerando-se a utilização de disjuntores tropicalizados, em geral, em quadros de distribuição industriais, nos quais a temperatura pode ser elevada, não superior a 50 °C, é possível utilizar toda a capacidade de corrente nominal do disjuntor, sem a necessidade de aplicar nenhum fator de correção. Entretanto, para os disjuntores não tropicalizados calibrados para 20 °C, recomenda-se utilizar somente 70 % de sua corrente nominal. Esta é uma forma de compensar o efeito da elevação da temperatura interna do quadro de comando.

#### **b) Tensão nominal**

É aquela à qual estão referidas a capacidade de interrupção e as demais características nominais do disjuntor.

### c) Capacidade nominal de interrupção de curto-circuito

É a máxima corrente presumida de interrupção, de valor eficaz, que o disjuntor pode interromper, operando dentro de suas características nominais de tensão e frequência, e para um fator de potência determinado. Os disjuntores termomagnéticos operam de acordo com suas curvas de características térmicas (curva T) e magnéticas (curva M), conforme pode ser observado na [Figura 10.7](#).

Os disjuntores podem ser fabricados, quanto às unidades de proteção incorporadas, em quatro diferentes tipos.

- Disjuntores somente térmicos

São aqueles que dispõem de somente uma unidade de proteção térmica de sobrecarga.

- Disjuntores somente magnéticos

São aqueles que dispõem de somente uma unidade magnética de proteção contra curtos-circuitos.

- Disjuntores termomagnéticos

São aqueles que dispõem de uma unidade de proteção térmica e outra magnética de curto-circuito. É o tipo de maior utilização prática.

- Disjuntores termomagnéticos limitadores

São aqueles que dispõem das unidades de proteção térmica e magnética e de um sistema especial capaz de interromper as elevadas correntes de curto-circuito antes que elas atinjam o seu valor de pico. Esse sistema tem como princípio as forças eletrodinâmicas provocadas pela corrente de defeito.

Tanto as unidades de proteção térmica de sobrecarga como as magnéticas de curto-circuito, incorporadas aos disjuntores anteriormente classificados, podem ser fabricadas com duas diferentes características.

- Unidade sem ajuste ou regulação

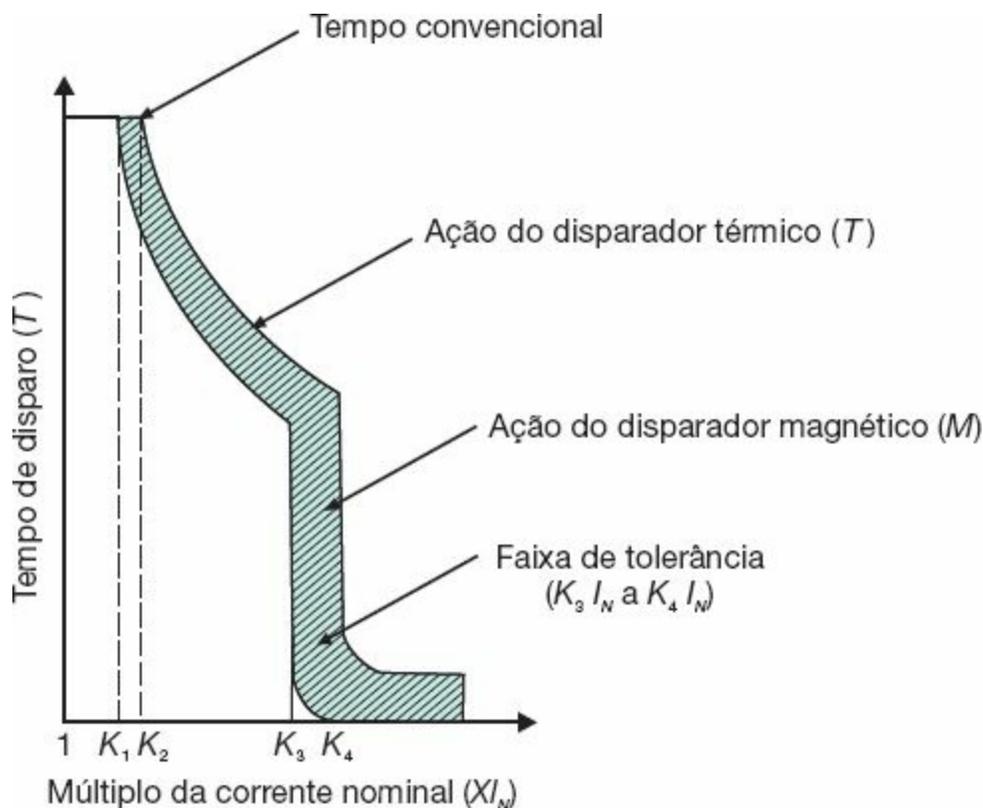
Neste caso, as correntes das unidades térmica e magnética são pré-ajustadas pelo fabricante.

- Unidades com ajuste externo

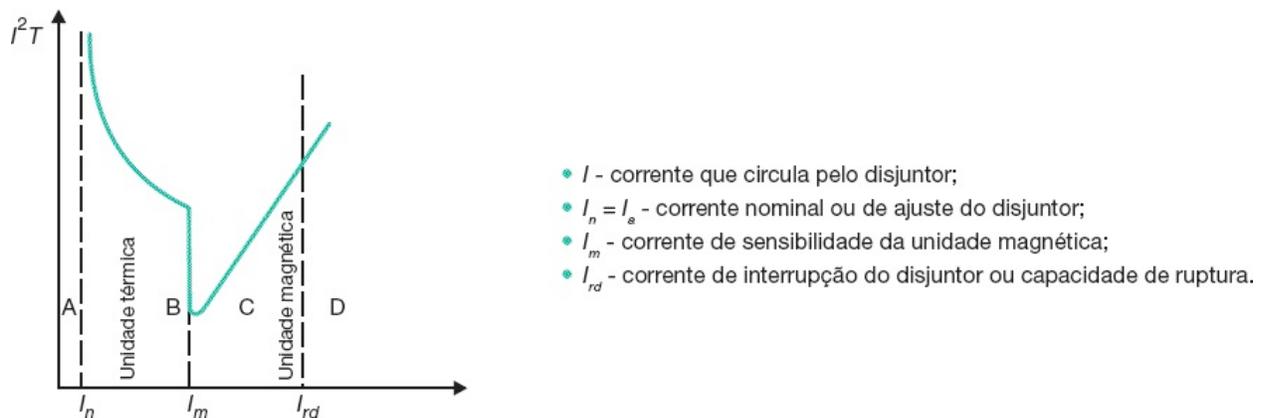
Neste caso, podem-se regular as correntes de atuação, através de seletores, tanto da unidade térmica como da magnética.

As particularidades construtivas dos disjuntores e os detalhes de operação estão descritos no Capítulo 9.

O dimensionamento de disjuntores de baixa tensão, em circuitos industriais, deve ser feito observando-se o tipo que será utilizado quanto ao comportamento de atuação em função da temperatura a que estará submetido em operação.



**Figura 10.7** Características tempo  $\times$  corrente de um disjuntor termomagnético.



**Figura 10.8** Regiões características dos disjuntores termomagnéticos.

Assim como os fusíveis, os disjuntores devem ser dimensionados pela sua característica  $I^2 \times t$ , que representa o valor máximo da integral de Joule que o dispositivo deixa passar, em função da corrente que circula por ele.

De acordo com a [Figura 10.8](#), pode-se caracterizar o disjuntor por meio de suas quatro regiões de diferentes comportamentos quanto à integral de Joule:

- Região A:  $I \leq I_n$  — não existe limitação de corrente.
- Região B:  $I_n < I \leq I_m$  — caracterizada por tempo de disparo relativamente longo devido à temporização da unidade térmica.
- Região C:  $I_m < I \leq I_{rd}$  — caracterizada por tempo de disparo relativamente curto devido à atuação sem temporização da unidade magnética.
- Região D:  $I > I_{rd}$  — caracterizada pela impropriedade do uso do disjuntor.

A seleção e o ajuste dos disjuntores devem ser feitos com base nos seguintes requisitos previstos pela NBR 5410.

### a) Características de proteção contra sobrecarga

A corrente nominal, ou de ajuste da unidade térmica do disjuntor, deve ser igual ou superior à corrente de projeto ou simplesmente de carga prevista:

$$I_a \geq I_c \quad (10.10)$$

$I_a$  - corrente nominal ou de ajuste do disjuntor;

$I_c$  - corrente de projeto do circuito.

A corrente nominal, ou de ajuste da unidade térmica do disjuntor, deve ser igual ou inferior à capacidade de condução de corrente dos condutores.

$$I_a \leq I_{nc} \quad (10.11)$$

$I_{nc}$  - corrente nominal do condutor.

A corrente convencional de atuação do disjuntor deve ser igual ou inferior a 1,45 vez a capacidade de condução de corrente dos condutores.

$$I_{adc} \leq 1,45 \times I_{nc} \quad (10.12)$$

$I_{adc}$  - corrente convencional de atuação para disjuntor ou corrente convencional de fusão para fusíveis.

Entende-se por corrente convencional aquela que assegura efetivamente a atuação do disjuntor dentro de um intervalo de tempo  $T_{ad}$ , denominado tempo convencional.

A condição da Equação (10.12) é aplicável quando for possível assumir que a temperatura limite de sobrecorrente dos condutores, dada na Tabela 3.5, não venha a ser mantida por um período de tempo superior a 100 horas durante 12 meses consecutivos, ou 500 horas ao longo da vida útil do condutor. Quando isso não ocorrer, a Equação (10.12) toma a seguinte forma:

$$I_{adc} \leq I_{nc} \quad (10.13)$$

Por questões práticas, o valor de na Equação (10.13) pode ser substituído por  $K \times I_a$ :

$$K \times I_a \leq I_{nc} \quad (10.14)$$

$K$  é o fator de multiplicação dado na [Tabela 10.3](#).

A [Tabela 10.3](#) fornece os limites da corrente convencional de atuação e da corrente convencional de não atuação para fusíveis e disjuntores.

Tratando-se de disjuntores, segundo a NBR 5361, podem-se aplicar apenas as condições de sobrecarga previstas nas Equações (10.10) e (10.11).

Adicionalmente, os disjuntores podem ser classificados de duas diferentes formas de utilização:

- Disjuntores de características L

São aqueles adequados à proteção de circuitos de distribuição, circuitos de iluminação, de tomadas e de comando.

**Tabela 10.3** Fatores de multiplicação de corrente ( $K$ )

Tipo	Norma aplicável	Corrente nominal	Corrente convencional de não atuação (fusão)	Corrente convencional de atuação (fusão)
		A	A	A
Fusível gl	IEC-269	$I_n$ igual e inferior a 4	$1,5 \times I_n$	$2,1 \times I_n$
		$I_n$ superior a 4 e inferior ou igual a 10	$1,5 \times I_n$	$1,9 \times I_n$
		$I_n$ superior a 10 e inferior ou igual a 25	$1,4 \times I_n$	$1,75 \times I_n$
		$I_n$ superior a 25 e inferior ou igual a 100	$1,3 \times I_n$	$1,6 \times I_n$

		$I_n$ superior a 100 e igual ou inferior a 1000	$1,2 \times I_n$	$1,6 \times I_n$
Fusível gII	IEC-269	Todas	$1,2 \times I_n$	$1,6 \times I_n$
Fusível gG	IEC-269	Todas	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$
Disjuntor em caixa moldada tipo G	CEE-19	Todas	$1,05 \times I_n$	$1,35 \times I_n$
Disjuntor em geral	NBR 5361	$I_n$ igual ou inferior a 63	$1,05 \times I_n$	$1,35 \times I_n$
		$I_n$ superior a 63	$1,05 \times I_n$	$1,25 \times I_n$
Disjuntor em caixa moldada tipo L	CEE-19	$I_n$ igual ou inferior a 10	$1,5 \times I_n$	$1,9 \times I_n$
		16, 25	$1,4 \times I_n$	$1,75 \times I_n$
		$I_n$ superior a 25	$1,3 \times I_n$	$1,6 \times I_n$

- Disjuntores de características G

São aqueles adequados à proteção de aparelhos e motores sujeitos a sobrecargas.

Para aplicação das prescrições anteriores é necessário que haja coordenação entre a curva de *tempo*  $\times$  *corrente* correspondente à solicitação térmica admissível do condutor (curva C) e a curva de atuação do disjuntor (curva D), conforme a [Figura 10.9](#).

Em complementação aos critérios anteriores, tem-se que o tempo de atuação do disjuntor deve ser superior ao tempo de partida do motor, enquanto o tempo de rotor bloqueado deve ser igual ou superior ao valor da

corrente ajustada.

$$T_{rb} \geq T_{ad} > T_{pm} \quad (10.15)$$

$T_{ad}$  - tempo de atuação do disjuntor;

$T_{pm}$  - tempo de partida do motor;

$T_{rb}$  - tempo de rotor bloqueado.

## b) Características de proteção contra curtos-circuitos

A condição de proteção contra curto-circuito será atendida de diferentes formas:

- Capacidade de interrupção ou de ruptura

A capacidade de interrupção do disjuntor deve ser igual ou superior à corrente de curto-circuito trifásica no ponto de sua instalação, ou seja:

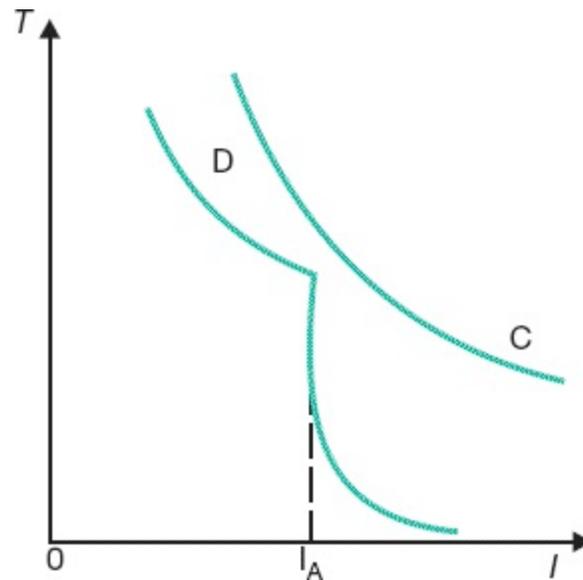
$$I_{cs} \leq I_{rd} \quad (10.16)$$

$I_{rd}$  - capacidade de interrupção do disjuntor, em A.

As correntes nominais e as capacidades de ruptura dos disjuntores variam em função do tipo e, principalmente, do fabricante. Para os disjuntores tripolares do tipo selado, as correntes nominais mais frequentes podem ser escolhidas, de maneira geral, de acordo com a [Tabela 10.4](#).

Se a corrente no ponto de instalação do disjuntor superar sua capacidade de interrupção, podem ser pré-ligados a estes fusíveis limitadores de corrente do tipo NH ou outro dispositivo de proteção com características de interrupção compatíveis com a capacidade de interrupção do disjuntor. Neste caso, as características do fusível ou outro dispositivo de retaguarda devem ser coordenadas com as do disjuntor, de forma que os condutores ou os outros dispositivos sob proteção (contatores, relés térmicos etc.) não sejam submetidos a solicitações térmicas e dinâmicas excessivas.

- Proteção contra faltas na extremidade do circuito



**Figura 10.9** Curva de coordenação.

**Tabela 10.4** Características elétricas gerais dos disjuntores em caixa moldada

Disjuntores trifásicos					Disjuntores monofásicos		
Correntes nominais	Capacidade de ruptura (A)		Correntes nominais	Capacidade de ruptura (A)		Corrente nominal (A)	Capacidade de ruptura
	220 V	380 V		A	220 V		
10			180	10.000	8.000	10	3,5
15			200	25.000	20.000	15	
20			225			20	
25			250			25	

30	10.000	4.000	300	50.000	40.000	30	6,0	
35			350			35		
40			400			40		
50			600			50		
60			800			60		
70			1.000			125.000		125.000
80			1.200			As características elétricas dos disjuntores apresentadas nesta tabela são genéricas e compreendem vários tipos e diferentes fabricantes nacionais. Para projetos específicos é necessário definir bem as características técnicas dos disjuntores.		
90			1.600					
100			2.000					
125			2.500					
150	3.000							

A corrente de atuação mínima da unidade instantânea deve ser igual ou inferior à corrente de curto-circuito presumida na extremidade do circuito correspondente à carga:

$$I_{mi} \leq I_{cs} \quad (10.17)$$

$I_{mi}$  - corrente de ajuste, valor mínimo, da unidade instantânea.

- Proteção contra rotor bloqueado

A corrente de ajuste da unidade temporizada do disjuntor para proteção do motor com rotor bloqueado deve permitir um tempo de atuação igual ou inferior ao tempo de rotor bloqueado do motor fornecido pelo fabricante ou,

neste livro, encontrado na Tabela 6.4.

- Proteção da isolamento dos condutores

Considerando a corrente de curto-circuito do sistema, o tempo de atuação do disjuntor deve ser igual ou inferior ao tempo de suportabilidade térmica da isolamento do condutor:

$$T_{ad} \leq T_{sc} \quad (10.18)$$

Essa verificação pode ser feita aplicando-se a Equação (3.19) ou por meio dos gráficos das Figuras 3.28 e 3.29, considerando, respectivamente, os condutores com isolamento PVC, XLPE ou EPR.

A verificação da integridade do condutor pode ser mais completa ao se comparar o valor da integral de Joule que deixa passar o disjuntor com a integral de Joule dos condutores. A integral de Joule que o disjuntor deve permitir passar deve ser inferior à integral de Joule suportável pelos condutores. A título de exemplificação, a [Figura 10.10](#) mostra as curvas características  $I^2 \times t$  de dois disjuntores (D1 e D2) e da isolamento de um condutor (C). Dela pode-se concluir:

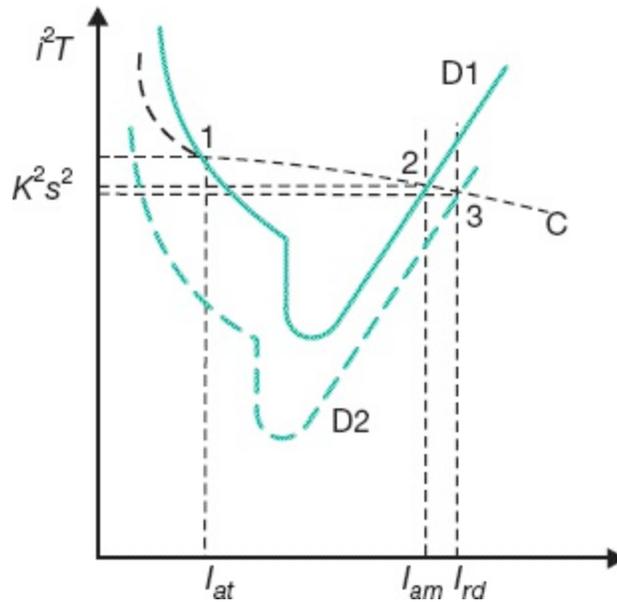
- o disjuntor D1 protege a isolamento do condutor a partir do ponto correspondente à corrente de ajuste da unidade térmica (ponto 1) até o valor da corrente de atuação ou de ajuste da unidade magnética (ponto 2);
- o disjuntor D2 protege a isolamento do condutor para todas as faixas de corrente até o valor correspondente à sua corrente de ruptura (ponto 3).

Interseção da curva de suportabilidade térmica do condutor com a

- curva de atuação do disjuntor

Para satisfazer a NBR 5410, a curva de suportabilidade térmica do condutor deve cortar a curva do disjuntor em qualquer ponto do trecho de

transição de atuação das unidades térmicas e magnéticas. A corrente de atuação do disjuntor no ponto referido deve ser inferior à mínima corrente de curto-circuito presumida, conforme mostra a [Figura 10.11](#):



**Figura 10.10** Curvas  $I^2 \times t$  de disjuntores e condutor.

$$I_a \leq I_{ccmín} \quad (10.19)$$

$I_a$  - corrente de atuação do disjuntor no ponto de transição das curvas das unidades térmicas e magnéticas;

$I_{ccmín}$  - corrente mínima de curto-circuito presumida.

Se o circuito não possuir o condutor neutro distribuído, a corrente de curto-circuito mínima deve ser a de valor trifásico simétrico no final do trecho protegido pelo disjuntor. Se o condutor neutro é distribuído, deve-se considerar a corrente fase-terra, também no final do trecho do circuito referido.

As curvas de suportabilidade térmica dos condutores devem ser fornecidas pelo fabricante dos cabos, o que nem sempre é facilmente encontrado em seus catálogos. Para atender a essa prescrição basta

determinar o tempo de suportabilidade térmica do condutor, dado na Equação (10.4), e levar esse valor ao gráfico *tempo* × *corrente* do disjuntor.

A escolha das características nominais de alguns tipos de disjuntores pode ser feita, a título de exemplo, com base nas Tabelas 10.5 e 10.6 para disjuntores de fabricação Siemens.

**Tabela 10.5** Características elétricas dos disjuntores tripolares Siemens

Tipo	Correntes nominais	Faixa de ajuste		Corrente de interrupção (kA)		
	A	Unidade térmica	Unidade magnética	220	380	500
		A	A	V	V	V
HHED6	15	Fixa	400-700	100	65	42
	20					
	25					
	30					
	40					
	50					
	60					
	70					
	80					

	90					
	100					
	125					
HFXD	150	Fixa	800-1500	100	65	42
	175		900-2000			
	200		1100-2500			
	225					
	250					
HJXD	300	Fixa	1250-2500	100	65	42
	350		2000-4000			
	400					
HLXD	450	Fixa	2000-4000	100	65	42
	500		3000-6000			
	600					
HLMXD	700	Fixa	3200-8000	100	65	42
	800					
	900					

HNXD	1000	Fixa	5000- 10000	100	65	42
	1200					
HPXD	1400	Fixa	5000- 10000	100	65	42
	1600					
HRXD	1800	Fixa	5000- 10000	100	65	42
	2000					

**Tabela 10.6** Características elétricas dos disjuntores tripolares Siemens

Tipo	Corrente nominal	Faixa de ajuste térmica	Faixa de ajuste magnética	Corrente de interrupção (kA)		
				220	380	440
				V	V	V
3VU13	25	4-6	$12 \times I_n$	100	100	5
		6-10		100	10	5
		10-16		100	10	5
		14-20		10	6	5
		18-25		10	6	5
		16-25		100	100	25

3VU16	52	22-32	$12 \times \ln$	100	35	25
		28-40		100	35	25
		36-52		100	35	25
3VF12	63	28-40	$12 \times \ln$	100	42	26
		36-50		100	30	22
		45-63		100	22	18
3VF31	100	63-80	$15 \times \ln$	100	65	50
		80-100				
3VF32	160	100-125	$15 \times \ln$	100	65	50
		125-160				
3VF42	250	160-200	$5 a 10 \times \ln$	100	80	65
		200-250				
3VF52	400	250-315	$5 a 10 \times \ln$	100	80	65
		315-400				
3VF62	630	400-500	$5 a 10 \times \ln$	100	80	50
		500-630				
3VF71	800	400, 500, 630, 800	$2 a 8 \times \ln$	65	50	42

3VF72	1250	630, 800, 1000, 1250	2 a 8 × In	65	50	42
3VF82	1600	800, 1000, 1250, 1600	2 a 8 × In	100	80	65
3VF83	2000	1000, 1250, 1600, 2000	2 a 8 × In	100	80	65
3WN6 1.600	630	252 - 630	1,5 a 12 × In	Até 500 V = 65 kA		
	800	320 - 800				
	1.000	400 - 1000				
	1.250	500 - 1.250				
	1.600	640 - 1.600				
3WN6 3.200	2.000	800 - 2.000	1,5 a 12 × In	Até 500 V = 80 kA		
	2.500	1.000 - 2.500				
		1.280 - 3.200				

Obs.: foram utilizados parcialmente os valores da tabela original. O leitor deve consultar o catálogo do fabricante para mais detalhes.

Também, a título de exemplo, as [Figuras 10.12](#) a [10.17](#) mostram as características de disparo dos disjuntores Siemens especificados nas tabelas anteriores.

### **10.2.5.1 Disjuntor-motor**

É um dispositivo de proteção que associa a proteção de sobrecarga e curto-circuito e a capacidade de manobra dos motores elétricos de indução. Na realidade, o disjuntor-motor é um disjuntor termomagnético adaptado para permitir a partida, o comando e a proteção dos motores elétricos.

O disjuntor-motor é normalmente utilizado em um circuito terminal de motor associado a um contator de potência. Existem várias associações, como será visto a seguir.

#### **10.2.5.1.1 Disjuntor termomagnético-motor + contator**

Tem como função a proteção contra sobrecarga e curto-circuito dada pelas unidades térmicas e magnéticas, o seccionamento dado pelo próprio disjuntor com capacidade adequada para permitir a partida dos motores elétricos, ficando o contator com a função de acionamento do motor.

#### **10.2.5.1.2 Disjuntor somente magnético-motor + contator + relé térmico**

Tem como função a proteção contra curto-circuito dada pelas unidades magnéticas, a proteção térmica e de falta de fase dadas pelo relé térmico do contator, o seccionamento dado pelo próprio disjuntor com capacidade adequada para permitir a partida dos motores elétricos, ficando o contator com a função de acionamento do motor.

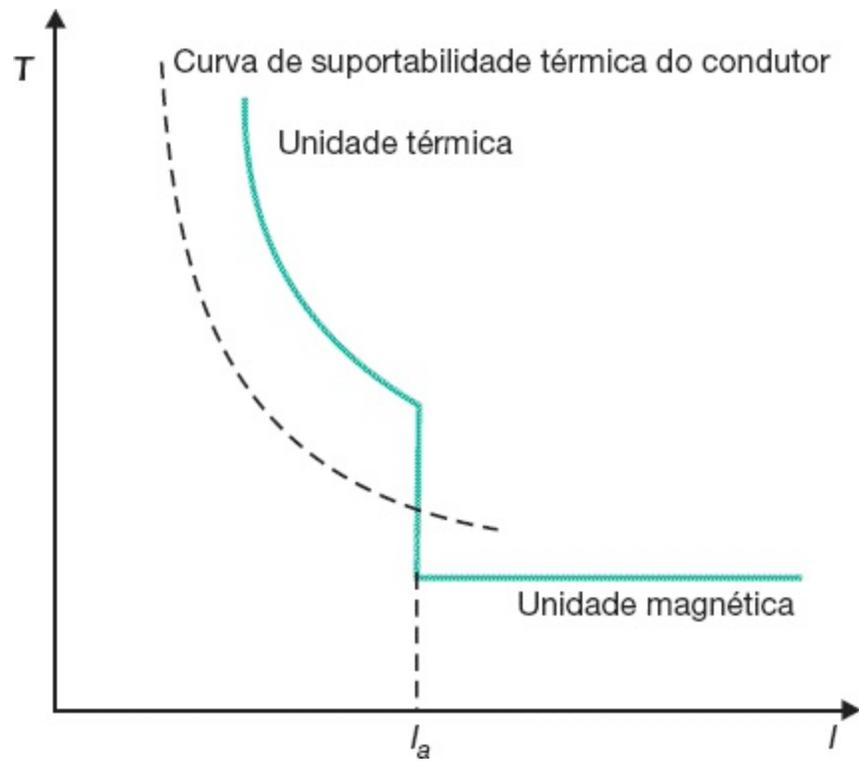


Figura 10.11 Curva do condutor/disjuntor.

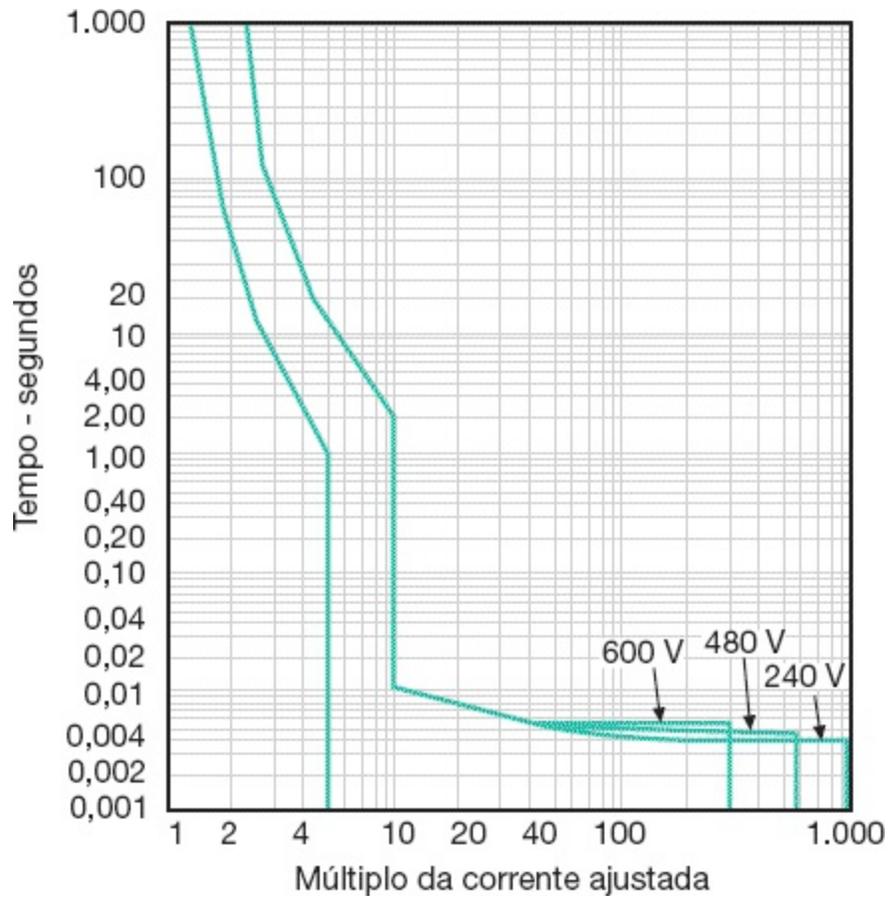


Figura 10.12 Disjuntores da série H da Siemens.

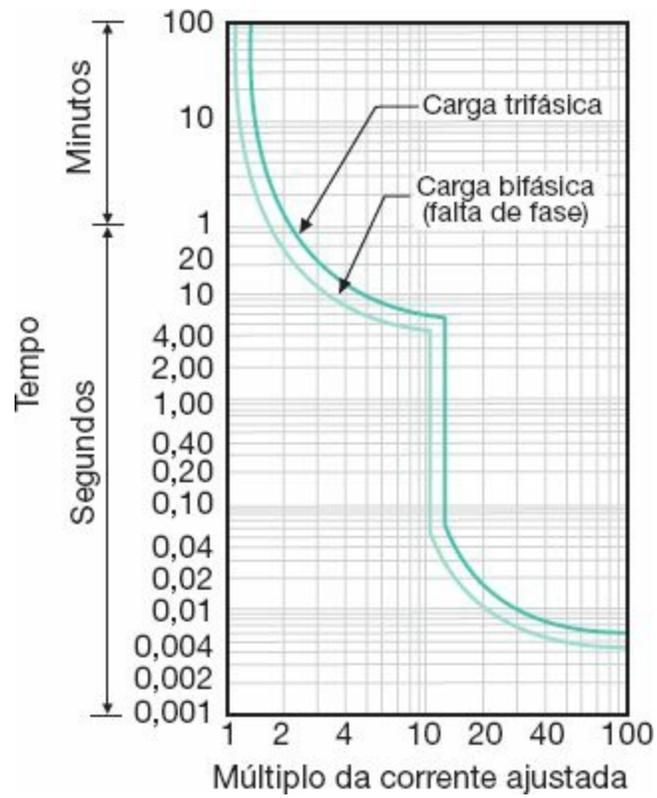
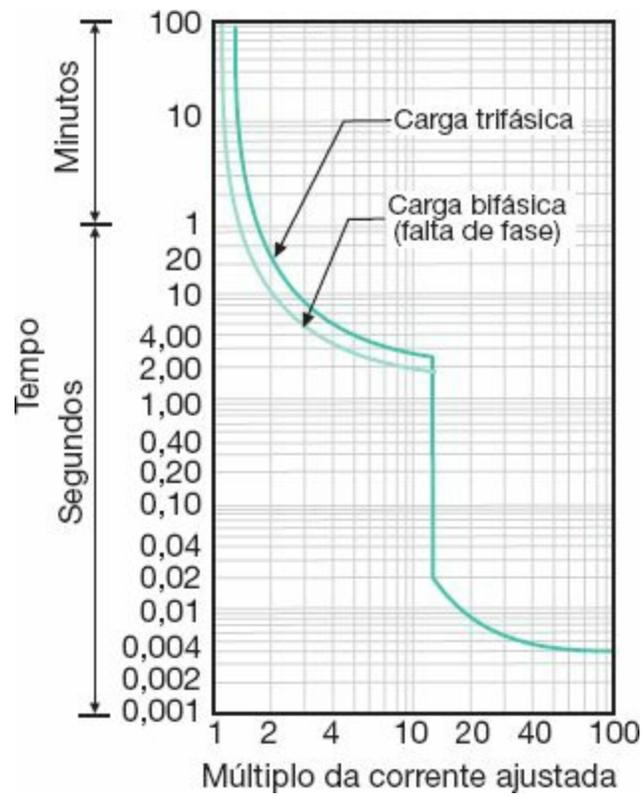
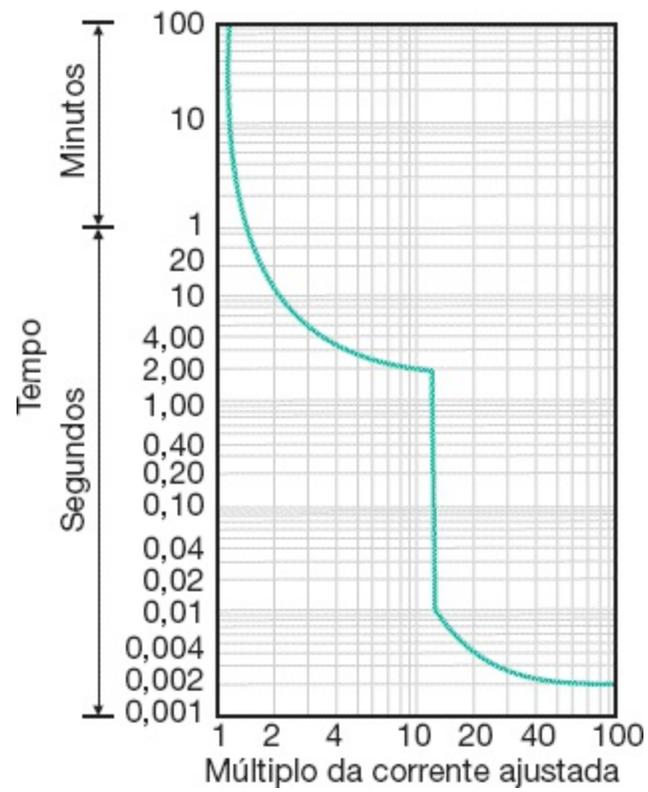


Figura 10.13 Disjuntores 3VF13 Siemens.



**Figura 10.14** Disjuntores 3VF16 Siemens.



**Figura 10.15** Disjuntores 3VF12 Siemens.

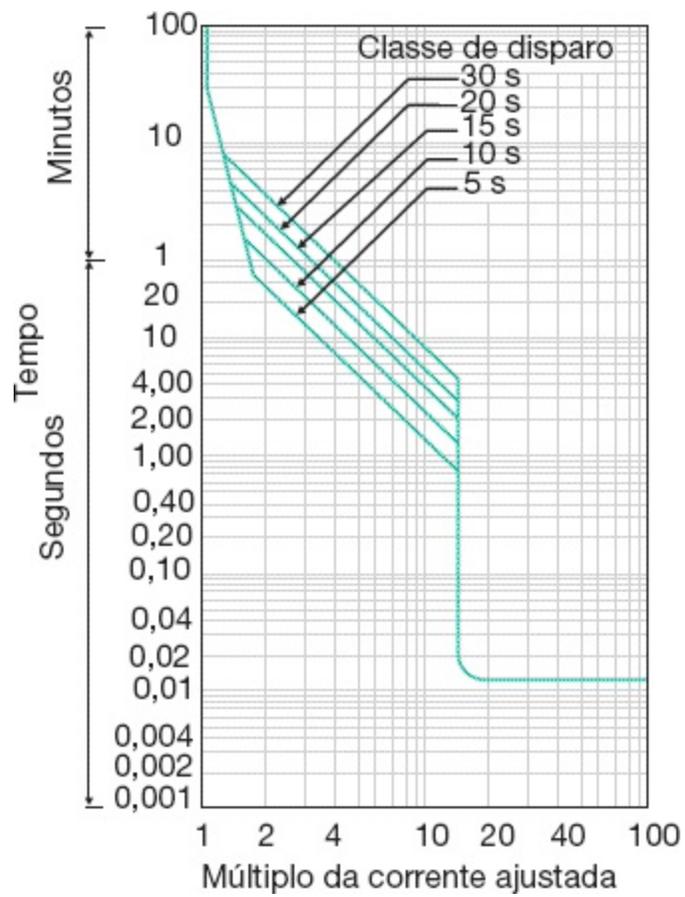
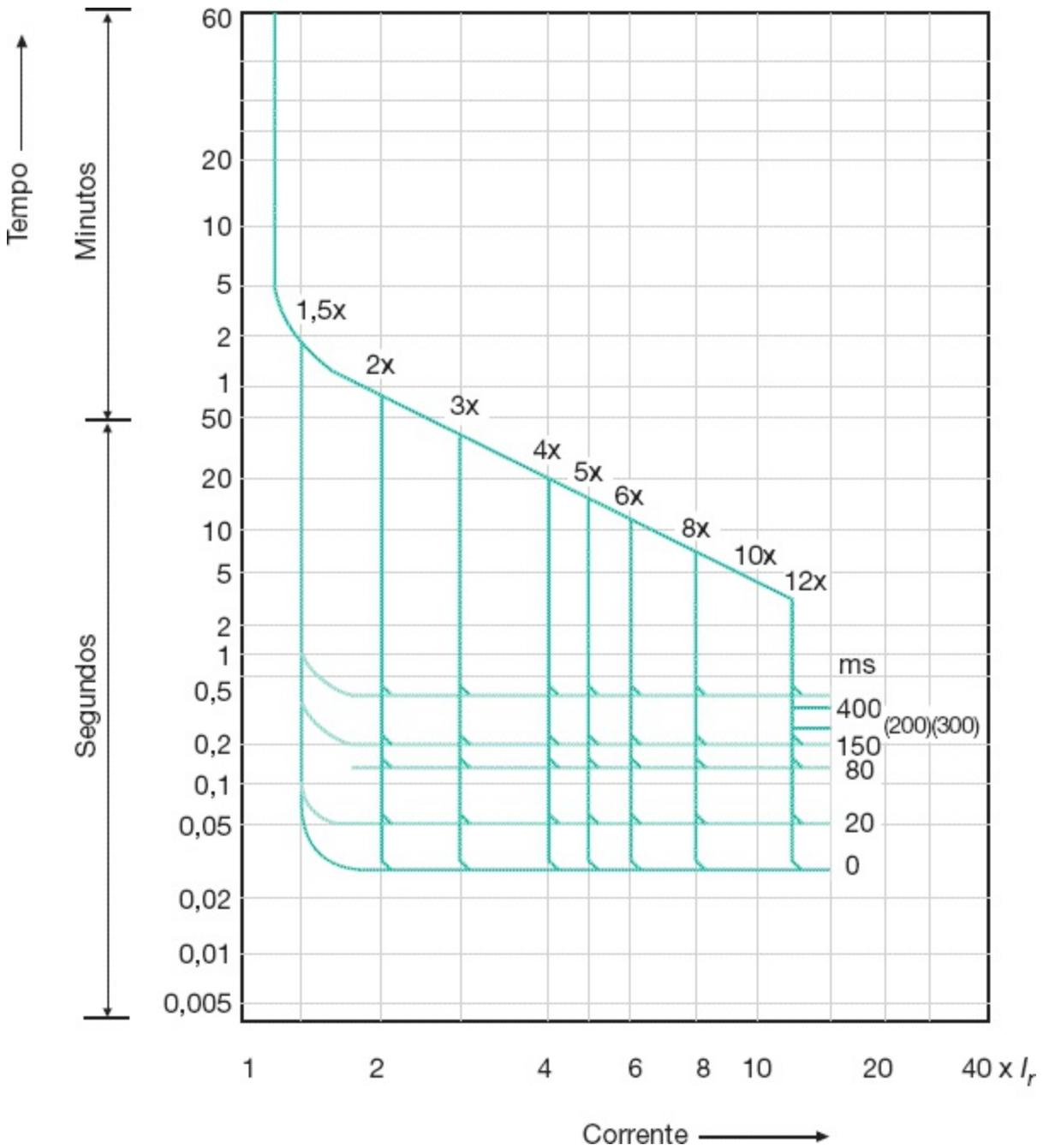


Figura 10.16 Disjuntores 3VF3/5/6 Siemens.



**Figura 10.17** Disjuntores 3WN6 Siemens.

As conexões mecânicas e as ligações elétricas entre o contator e o disjuntor permitem um dispositivo de proteção, seccionamento e comando compacto muito utilizado.

Deve-se alertar que não é aconselhável fazer as associações entre

disjuntores e contadores de forma geral para construir um dispositivo de proteção disjuntor-motor. O projetista deve acessar o catálogo de um fabricante desses dispositivos, devendo-se entender que os diversos componentes do disjuntor-motor são construídos e montados formando um só dispositivo para atender às características operacionais anteriormente mencionadas e à norma IEC 60947-6-2.

#### 10.2.5.1.3 Relés eletrônicos instantâneos

Para atender aos requisitos de proteção dos motores acoplados às máquinas com elevados conjugados resistentes de partida, grande momento de inércia e com probabilidades de se ter o rotor bloqueado foram desenvolvidos os relés eletrônicos, cujas características de funcionamento apresentam funções definidas de corrente e tempo. Alguns modelos integram um temporizador de tempo fixo de 0,50 ou 1,0 s para os eventos de rotor bloqueado e tempo de 3,0 ou 5,0 s para a proteção de falta de fase.

Alguns tipos de relés eletrônicos estão associados a contadores, formando um dispositivo de comando e proteção.

#### 10.2.5.2 Disjuntores eletrônicos

Ao contrário dos disjuntores termomagnéticos, que utilizam relés térmicos para proteção contra sobrecarga e bobinas para proteção contra curtos-circuitos, os disjuntores eletrônicos são fabricados utilizando relés eletrônicos, permitindo uma interface com o operador do sistema por meio de um módulo de comunicação e de uma conexão sem fio (tecnologia *Bluetooth*). Assim, com um computador de mesa ou um *laptop* é possível obter diversas informações do sistema para fins operacionais ou de estudo.

De forma geral, o mecanismo de operação dos disjuntores eletrônicos é do tipo “energia armazenada”, operado com molas pré-carregadas. As molas são carregadas manualmente por uma alavanca situada na parte frontal. Para

os disjuntores de elevada corrente nominal normalmente é utilizado o motor de carregamento da mola, podendo esses disjuntores ser fornecidos nas versões fixa e extraíveis.

As molas de abertura são carregadas automaticamente durante a operação de fechamento do disjuntor. Com o mecanismo de operação ligado por contatos NA/NF à bobina de abertura e fechamento e o motor inserido para carregar as molas, o disjuntor pode ser operado remotamente e, caso seja requisitado, ser monitorado por um sistema de supervisão e controle.

Um disjuntor eletrônico pode receber diversos relés eletrônicos indicados pelos fabricantes, tal e qual acontece com os disjuntores termomagnéticos, que podem receber diversos relés térmicos.

De forma geral, os relés eletrônicos apresentam as seguintes características:

- Utilizam a tecnologia microprocessada.
- Não há necessidade de uma fonte de alimentação externa para exercer suas características operacionais.
- Possuem alta sensibilidade ao valor verdadeiro RMS da corrente.
- Fornecem a indicação da causa de disparo e gravam os eventos.
- Ajustes do neutro configuráveis.

Dependendo do fabricante, os relés eletrônicos inseridos nos disjuntores eletrônicos podem ser dotados das seguintes proteções:

- Proteção contra sobrecarga atuando na curva de tempo inverso longa.
- Proteção contra curto-circuito atuando na curva de tempo inverso ou tempo definido.
- Proteção contra curto-circuito instantâneo e tempo de atuação ajustável.
- Proteção para defeitos monopolares.
- Proteção contra tensão residual.

- Proteção direcional contra curto-circuito com tempo ajustável.
- Proteção contra potência ativa reversa.
- Proteção contra desequilíbrio de tensão.
- Proteção contra sub e sobretensão.
- Proteção contra sub ou sobrefrequência.
- Memória térmica.

Além das funções de proteção anteriormente mencionadas, os disjuntores eletrônicos podem medir diversos parâmetros do sistema no qual está inserido, tais como:

- Medição de tensão, corrente, fator de potência, energia ativa, energia reativa, energia aparente e componentes harmônicos.
- Registro de eventos.
- Controle de carga, utilizando a corrente que circula pelos sensores de corrente do disjuntor.

Os disjuntores eletrônicos com as características anteriormente mencionadas são fabricados para correntes nominais iguais ou superiores a 400 A. Cada tipo de corrente nominal é fornecido com determinada quantidade de funções, cabendo ao usuário solicitar outras funções além das funções básicas.

Normalmente, a temperatura de operação dos disjuntores eletrônicos é de 40 °C. Para temperaturas superiores, deve-se reduzir a capacidade de corrente do painel a valores definidos pelo fabricante.

Os disjuntores eletrônicos também podem operar nas condições nominais apresentadas em catálogo a uma altitude de até 2.000 m. São dotados de curvas de limitação de corrente, de acordo com o modelo e o fabricante.

### Exemplo de aplicação (10.5)

Determinar os ajustes do disjuntor destinado à proteção de um motor de 50 cv, 380 V/IV polos, em regime de funcionamento S1, alimentado por um circuito em condutor unipolar de cobre, tipo da isolação PVC, de seção igual a 25 mm<sup>2</sup>, instalado em eletroduto embutido no piso. O tempo de partida do motor é de 3 s. A corrente de curto-circuito no terminal do circuito do motor é de 5,0 kA. A corrente de curto-circuito fase-terra vale 4 kA. Admite-se que a corrente de sobrecarga do condutor ao longo de sua vida útil seja controlada e não superará 100 horas durante 12 meses consecutivos, ou 500 horas ao longo da vida útil do condutor.

De acordo com as condições estabelecidas nas Equações (10.10) a (10.13), tem-se:

1ª condição

$$I_a \geq I_c \rightarrow I_c = 68,8 \text{ A}$$

2ª condição

$I_{nc} = 86 \text{ A}$  (Tabela 3.6 — método de referência D da Tabela 3.4, correspondente ao método de instalação 1)

$$I_a \leq I_{nc} \rightarrow I_{nc} = 86 \text{ A}$$

Para atender as condições anteriores, o valor da corrente de ajuste do disjuntor vale:

$$68,8 \leq I_a \leq 68,8 \text{ A} \rightarrow I_a = 73 \text{ A (valor assumido)}$$

3ª condição

Considerando o disjuntor em conformidade com a NBR 5361, pode ser dispensada esta condição. Se adotada, tem-se:

$$K \times I_a \leq 1,45 \times I_{nc}$$

$$K = 1,35 \text{ (Tabela 10.3 para disjuntores do tipo G)}$$

$$1,35 \times 73 \leq 1,45 \times 86$$

$$98,5 < 124,7 \text{ A (condição satisfeita)}$$

Com base nos limites estabelecidos nas três condições anteriores, pode-se escolher o disjuntor apropriado da Tabela 10.6, ou seja, 3VF31-100 A Siemens, faixa de ajuste da unidade térmica (63–80) A, ajustado em 73 A. O ajuste da unidade magnética é fixo em  $15 \times I_n$ .

Condição de partida do motor

É prudente verificar as condições de disparo do disjuntor durante o processo de partida do motor.

$$M = \frac{I_{pm}}{I_a} = \frac{6,4 \times 68,8}{73} = 6,03$$

$$T_{pm} = 3s$$

$$R_{cpm} = 6,4 \text{ (Tabela 6.4)}$$

A partir da curva da Figura 10.16, obtém-se o tempo de atuação do disjuntor  $T_{ad} = 5s$  para a classe de disparo de 10 s.

Logo,  $T_{ad} > T_{pm}$  (condição satisfeita).

Condição de proteção da isolação do condutor durante os processos de curto-circuito

A partir do gráfico da Figura 3.28, obtém-se, para uma corrente de curto-circuito  $I_{cs} = 5,0$  kA, um tempo de suportabilidade da isolação de PVC do condutor,  $T_{sc} = 16$  ciclos = 0,26 s, considerando-se a seção do condutor  $S_c = 25 \text{ mm}^2$ .

Já o disparo do disjuntor é efetuado no tempo de:

$$M = \frac{I_{cs}}{I_a} = \frac{5.000}{73} = 68,4 \rightarrow T_{ad} = 0,013 \text{ s (Figura 10.16)} \text{ s (Figura 10.16)}$$

Logo,  $T_{ad} < T_{sc}$ .

Verificação da capacidade de interrupção do disjuntor

$$3VF31 \rightarrow I_{rd} = 65 \text{ kA (Tabela 10.6)}$$

Da Equação (10.16), tem-se:

$$I_{cs} < I_{rd} \text{ (condição satisfeita)}$$

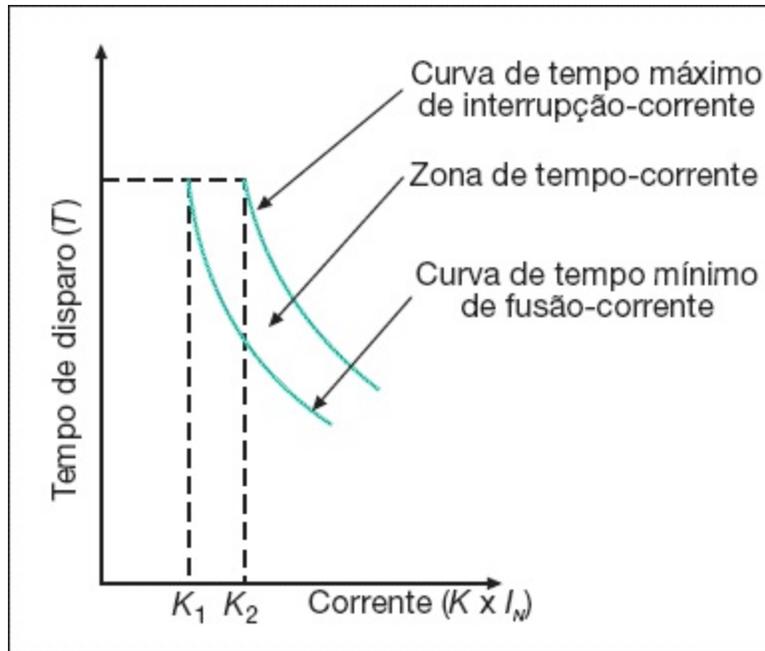
## 10.2.6 Fusíveis

São dispositivos destinados à proteção dos circuitos elétricos e que se fundem quando percorridos por uma corrente de valor superior àquela para o qual foram projetados.

A Seção 9.3.18 do Capítulo 9 trata com mais detalhes de alguns tipos de fusíveis de maior aplicação em projetos industriais. Assim, é interessante ao leitor estudar aquela seção. Neste capítulo, será dada ênfase aos fusíveis do tipo com retardo, diazed ou NH, de característica aM.

Os fusíveis atuam dentro de determinadas características de *tempo de fusão*  $\times$  *corrente*, fornecidas em curvas específicas de tempo inverso, de acordo com o projeto de cada fabricante. Os pontos fundamentais dessas curvas estão mostrados na [Figura 10.18](#).

As [Figuras 10.19](#) a [10.24](#) apresentam as curvas características de *tempo*  $\times$  *corrente* dos fusíveis dos tipos diazed e NH, enquanto as Tabelas 10.7 e 10.8 fornecem as correntes nominais padronizadas dos fusíveis dos tipos diazed e NH.



**Figura 10.18** Características *tempo × corrente* dos fusíveis do tipo aM.

Os fusíveis diazed e NH são dotados de características de limitação de corrente. Para correntes elevadas de curto-circuito, os fusíveis diazed e NH atuam em um tempo extremamente rápido que não permite que a corrente de impulso atinja seu valor máximo. Isto pode ser ilustrado na [Figura 10.25](#).

As [Figuras 10.26 e 10.27](#) mostram, respectivamente, as curvas de corte dos fusíveis diazed e NH, considerando toda a faixa de corrente de valores nominais comercializados.

Para uma corrente de curto-circuito inicial, por exemplo, de 40.000 A, de valor eficaz, o fusível NH de 224 A se romperia quando a corrente atingisse, em sua curva ascendente, o valor de 20.000 A, conforme a [Figura 10.27](#). Considerando-se uma contribuição de 50 % do componente de corrente contínua, a corrente de impulso ou de pico poderia atingir o valor de 80.000 A se o fusível de 224 A não estivesse presente no circuito.

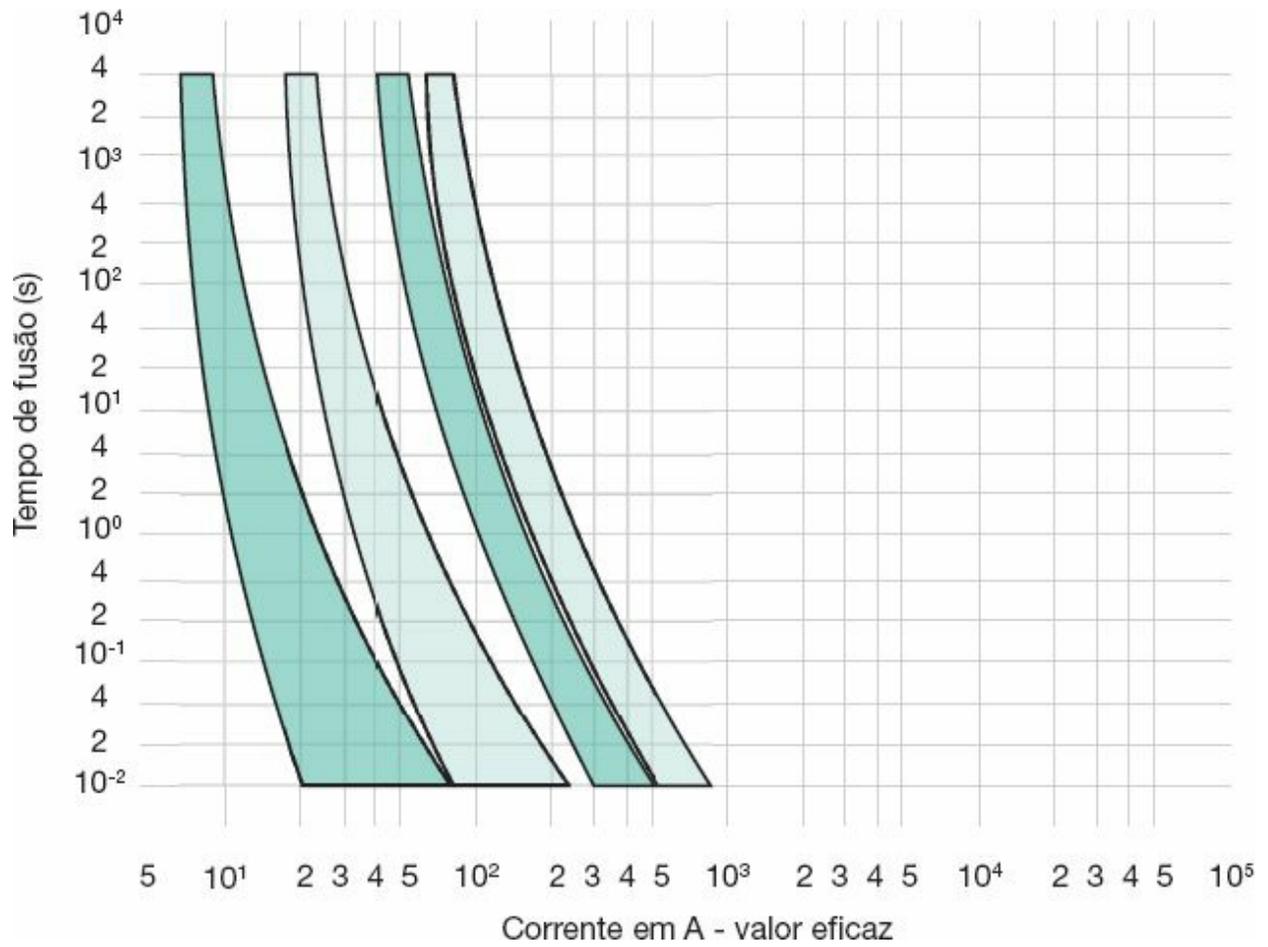
Para que um fusível atenda a todos os requisitos de proteção contra as correntes de curto-circuito é necessário que ofereça segurança a todos os elementos localizados a jusante de seu ponto de instalação. Assim, no circuito

ilustrado na [Figura 10.28](#), o fusível deve proteger a chave seccionadora, o contator, o relé térmico de sobrecarga e a isolação do condutor.

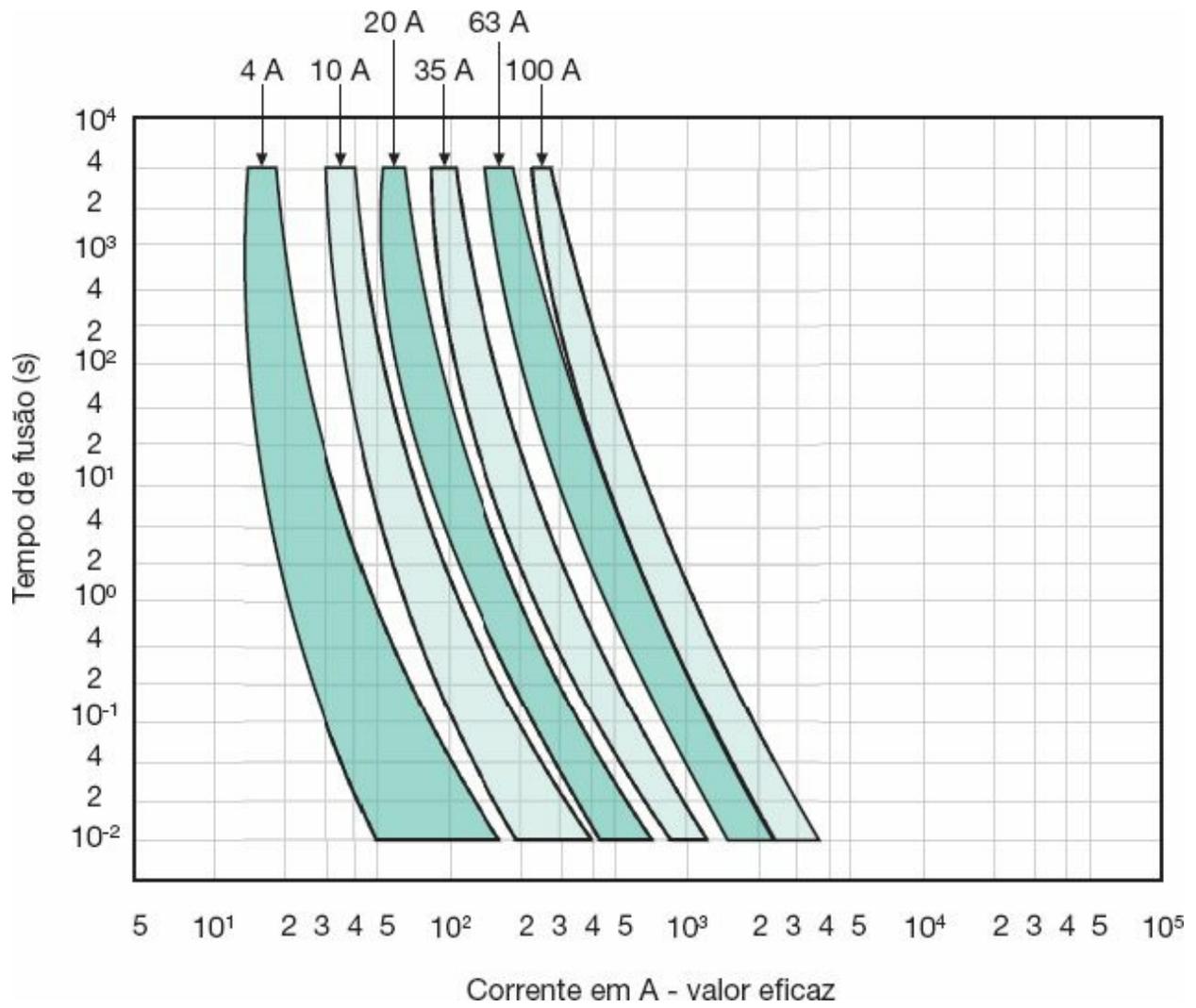
A curva de fusão do fusível deve coordenar com a curva de *tempo* × *corrente* correspondente à limitação térmica admissível para os condutores protegidos. A [Figura 10.29](#) ilustra os limites de segurança que o fusível oferece a um condutor. Neste caso, o fusível somente oferece proteção ao condutor para valores de corrente iguais ou superiores a  $I_l$ .

De acordo com a normatização internacional (IEC) e nacional (ABNT), há três diferentes tipos de fusíveis:

- Tipo gG: utilizados na proteção contra correntes de sobrecarga e curto-circuito.
- Tipos gM e aM: utilizados apenas na proteção contra correntes de curto-circuito, sendo indicados para proteção de circuitos de motores, já que se supõe que haja um dispositivo de proteção de sobrecarga instalado no mesmo circuito. Os fusíveis aM são dotados das seguintes características:
  - Um fusível aM não deve fundir para correntes menores ou iguais a  $K_1 \times I_n$ .
  - Um fusível aM pode fundir para correntes entre  $K_1 \times I_n$  e  $K_2 \times I_n$ , desde que o tempo de fusão seja superior ao valor indicado na curva de tempo mínimo de fusão.
  - Um fusível aM deve fundir para correntes maiores que  $K_2 \times I_n$ , desde que o tempo de fusão seja inferior ao valor indicado na curva de tempo máximo de interrupção-corrente.



**Figura 10.19** Zonas de atuação dos fusíveis diazed.



**Figura 10.20** Zonas de atuação dos fusíveis diazed.

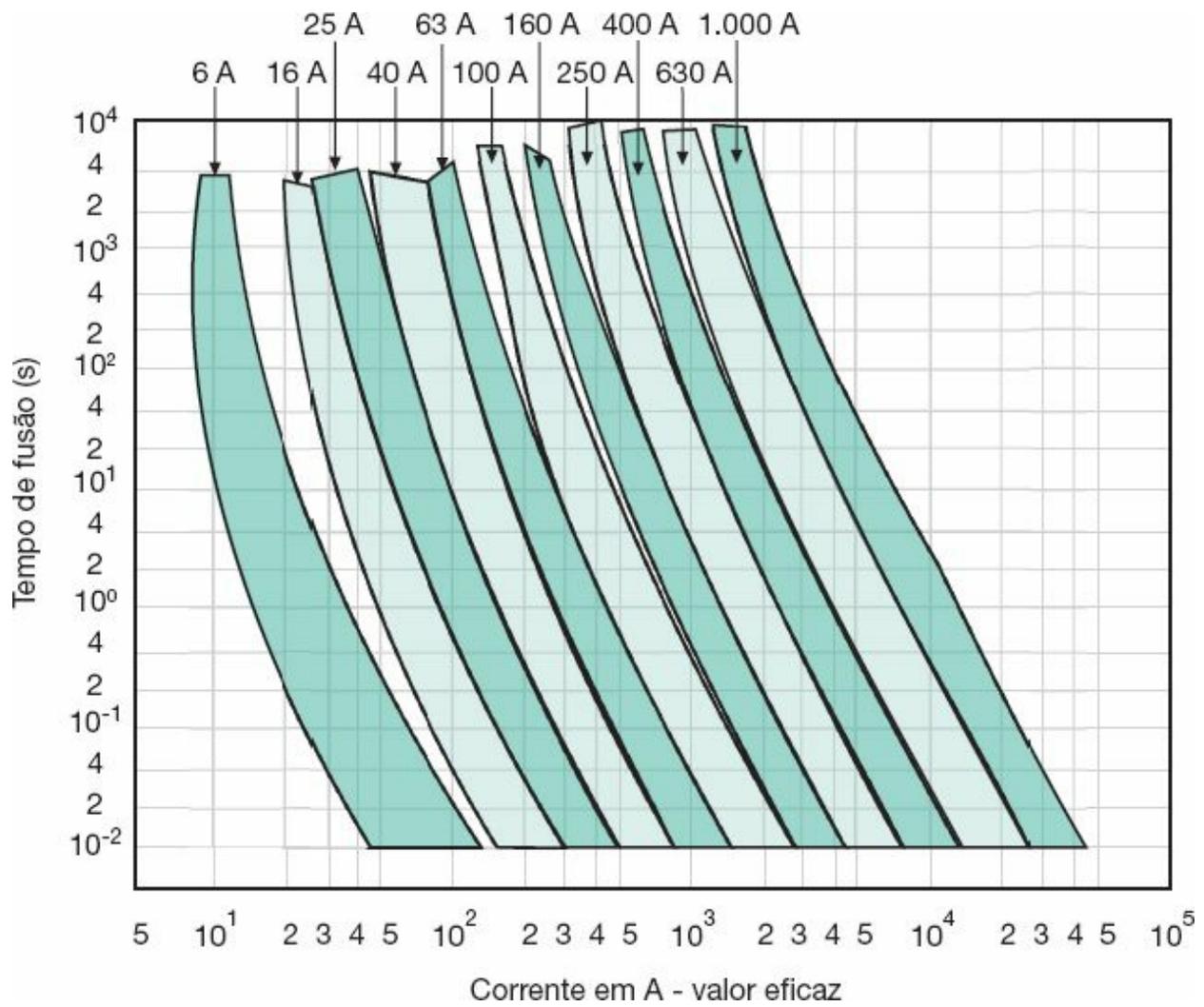
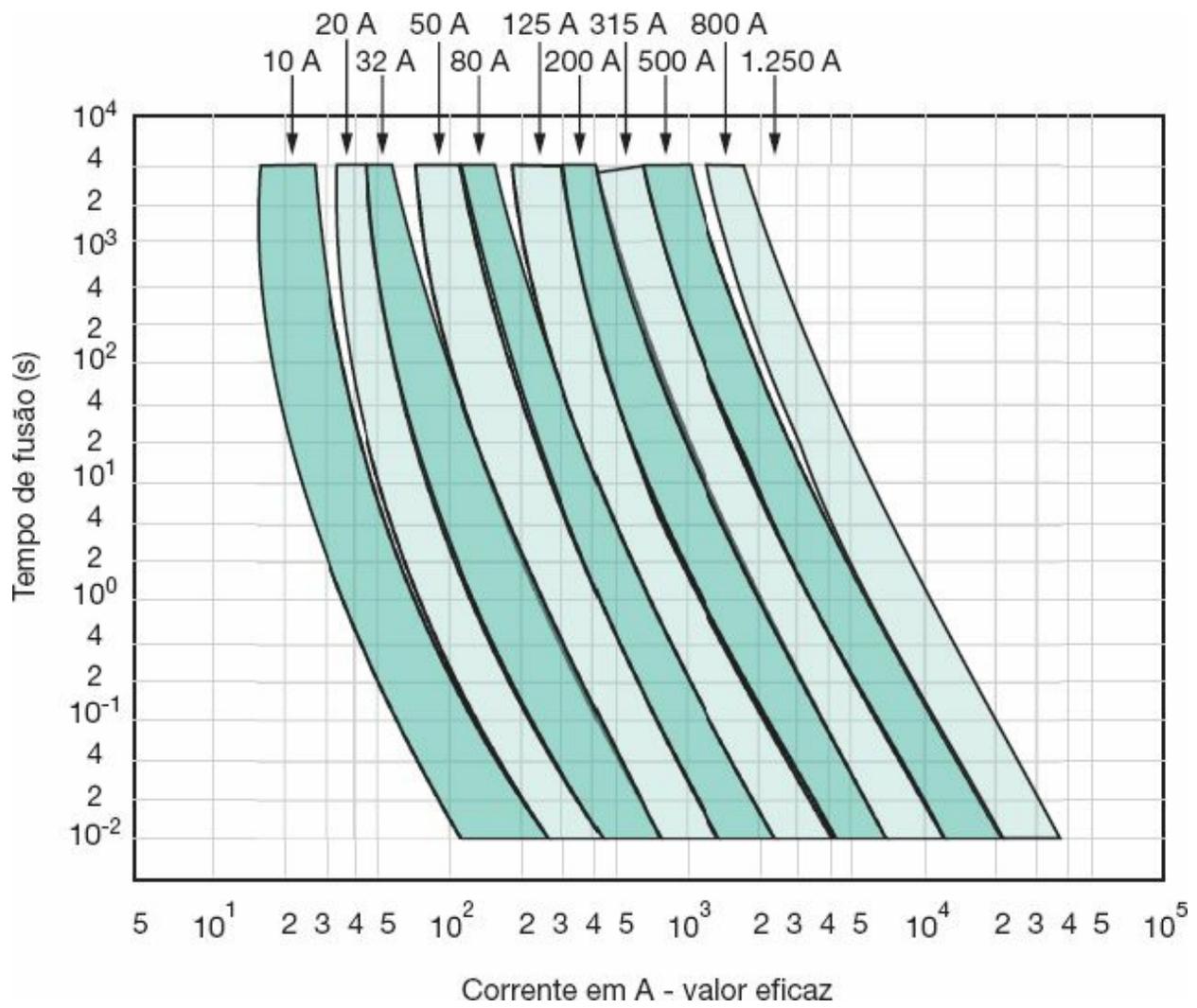


Figura 10.21 Zonas de atuação dos fusíveis NH.



**Figura 10.22** Zonas de atuação dos fusíveis NH.

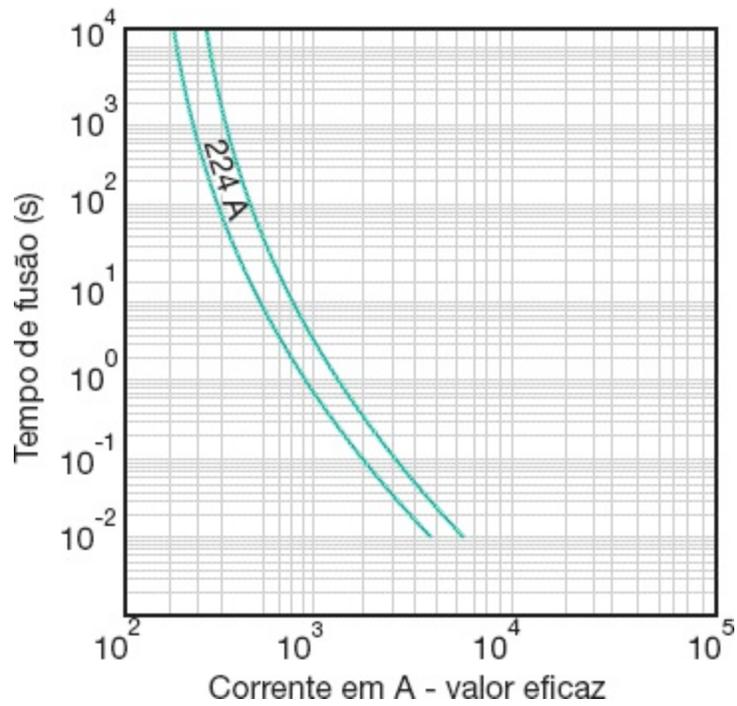


Figura 10.23 Zonas de atuação: NH 224.

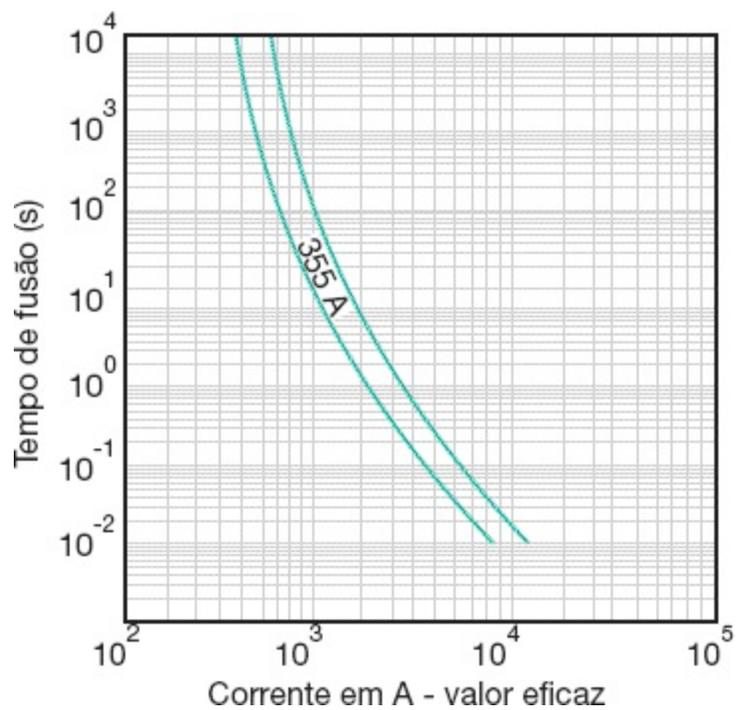


Figura 10.24 Zonas de atuação: NH 355.

Os valores de  $K_1$  e  $K_2$  estão definidos de acordo com a Figura 10.18.

Os fusíveis diazed e NH, amplamente citados neste livro, são do tipo aM, isto é, indicados para a proteção de circuito de motores.

### 10.2.6.1 Critérios para a seleção da proteção contra as correntes de curto-circuito

As proteções contra as correntes de curto-circuito devem ser selecionadas de acordo com os seguintes critérios:

#### a) Proteção de circuitos terminais de motores

A interrupção das correntes de curto-circuito para os condutores que alimentam motores deve ser garantida pelos dispositivos de proteção do circuito terminal. Neste caso, o motor deve estar provido de proteção contra sobrecarga.

Para cargas acionadas em regime S1 (veja Seção 6.3.13, item a), a corrente nominal do fusível deve ser igual ou inferior ao produto da corrente de rotor bloqueado do motor por um fator de multiplicação:

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K \quad (10.20)$$

$I_{nf}$  - corrente nominal do fusível, em A;

$I_{pm}$  - corrente de rotor bloqueado ou corrente de partida, em A;

$R_{cpm}$  - relação entre a corrente de partida e a corrente nominal dada na Tabela 6.4;

$I_{nm}$  - corrente nominal do motor, em A;

$K$  - fator de multiplicação.

$$I_{pm} = I_{nm} \times R_{cpm}$$

Para:  $I_{pm} \leq 40 \text{ A} \rightarrow K = 0,5$

Para:  $40 \text{ A} < I_{pm} \leq 500 \text{ A} \rightarrow K = 0,4$

Para:  $500 < I_{pm} \rightarrow K = 0,3$

### Exemplo de aplicação (10.6)

Determinar a proteção do fusível de um motor trifásico de 50 cv, 380 V/IV polos.

$$I_{pm} = I_{nm} \times R_{cpm}$$

$$I_{nm} = 68,8 \text{ A (Tabela 6.4)} \rightarrow R_{cpm} = 6,4 \text{ (Tabela 6.4)} \rightarrow I_{pm} = 68,8 \times 6,4 = 440,3 \text{ A}$$

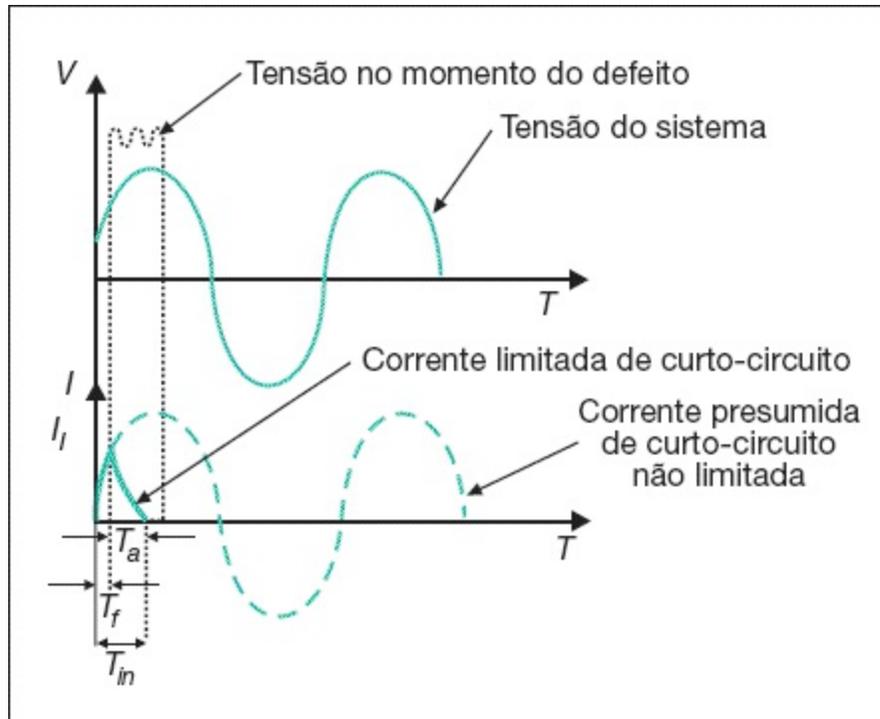
Da Equação (10.20), tem-se:

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K$$

$$K = 0,4 \rightarrow I_{nf} \leq 440,3 \times 0,4 \leq 176,1 \text{ A}$$

Da Tabela 10.8, obtém-se:

$$I_{nf} = 160 \text{ A}$$



$T_{fi}$  - tempo de fusão;  $T_n$  - tempo de interrupção;  
 $T_a$  - tempo de arco;  $I_l$  - corrente limitada.

**Figura 10.25** Ilustração das propriedades de limitação de corrente dos fusíveis diazed e NH.

### b) Proteção dos circuitos de distribuição de motores

Quando um agrupamento de motores é alimentado por um circuito de distribuição, a determinação da corrente máxima do fusível de proteção deve obedecer aos seguintes critérios:

- Cada motor deve estar provido de proteção individual contra sobrecargas.
- A proteção não deve atuar para qualquer condição de carga normal do circuito.
- A corrente nominal do fusível deve obedecer à Equação (10.21):

$$I_{nf} \leq I_{pnm} \times K + \sum I_{nm} \quad (10.21)$$

$I_{pnm}$  - corrente de partida do maior motor;

$\Sigma I_{nm}$  - soma das correntes nominais dos demais motores;

$K$  - fator de multiplicação, cujos valores foram definidos anteriormente.

**Tabela 10.7** Correntes nominais dos fusíveis diazed Siemens

Tamanho	Correntes nominais	Tamanho	Correntes nominais
	2		35
	4	DIII	50
	6		63
DII	10		80
	16		100
	20	DIVH	-
	25		-

### c) Proteção de circuitos de distribuição de aparelhos

A corrente nominal do fusível deve ser igual ou superior à soma das correntes de carga:

$$I_{nf} \geq \alpha \times \Sigma I_{na} \quad (10.22)$$

$\alpha = 1$  a  $1,15$ ;

$\Sigma I_{na}$  = soma das correntes nominais dos aparelhos.

### d) Proteção de circuitos de distribuição de cargas mistas (motores e aparelhos)

É desaconselhável a associação de carga motriz e aparelhos alimentados por um circuito de distribuição. Quando não for possível evitar esse tipo de alimentação, a corrente nominal do fusível pode ser determinada pela Equação (10.23):

$$I_{nf} \leq I_{pmm} \times K + \sum I_{nm} + \sum I_{na} \quad (10.23)$$

$K$  - valores já definidos nesta seção.

#### e) Proteção de circuitos terminais de capacitores ou banco

$$I_{nf} \leq 1,65 \times I_{nca} \quad (10.24)$$

$I_{nca}$  - corrente nominal do capacitor ou banco, em A.

#### f) Comportamento do fusível perante a corrente de partida do motor

Deve-se verificar se o fusível não atua para a corrente de partida do motor. Para isto, é necessário conhecer o tempo de duração da partida,  $T_{pm}$ , e a corrente de partida que irá atravessar o elemento fusível, a qual é função das características construtivas do motor e do tipo de acionamento empregado (chave compensadora, estrela-triângulo etc.).

Pelos gráficos das Figuras 10.19 a 10.24, pode-se determinar o tempo de atuação do fusível  $T_{af}$ , tipos diazed e NH, conhecendo-se o valor da corrente de partida do motor. Finalmente deve-se ter:

$$T_{af} > T_{pm} \quad (10.25)$$

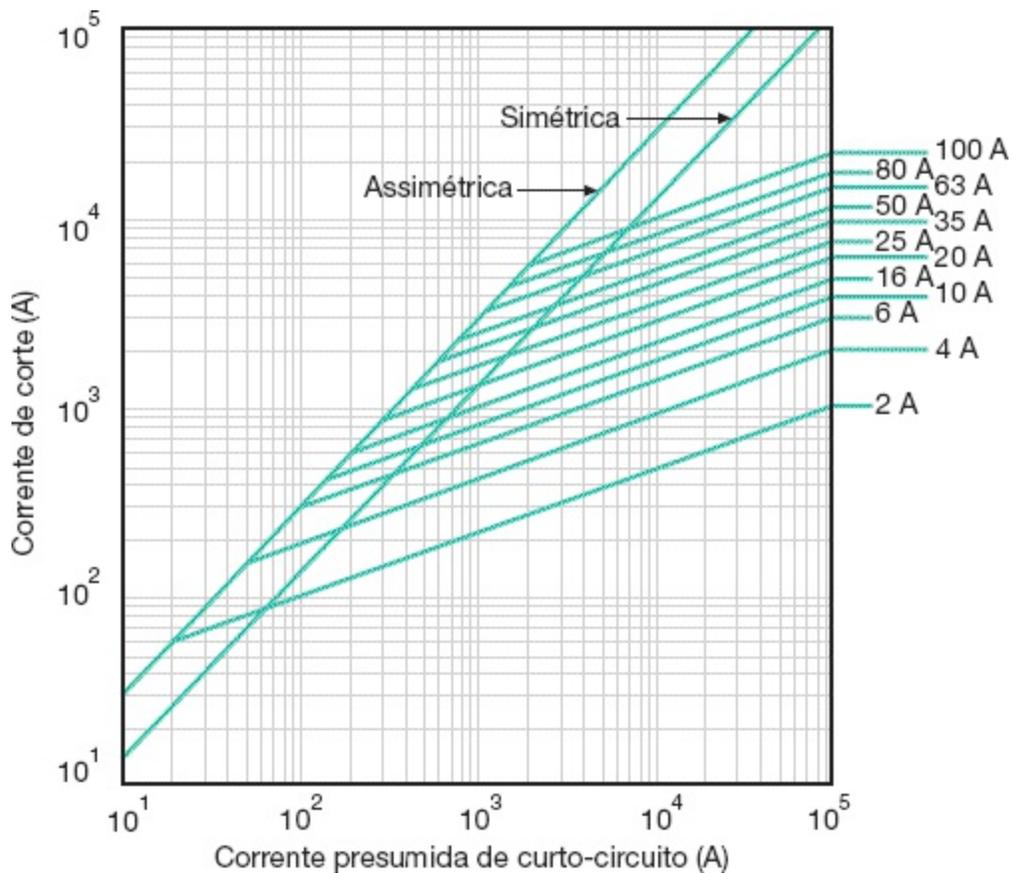
**Tabela 10.8** Correntes nominais dos fusíveis NH Siemens

Tamanho	Correntes nominais
	6
	10

	16
	20
000	25
	35
	40
	50
	60
	80
00	100
	125
	160
	40
	50
	63
	80
1	100
	125
	160
	200
	224
	250
	224
	250
2	315
	355
	400
3	400

4

500  
630  
800  
1000  
1250  
-  
-



**Figura 10.26** Características da corrente de corte dos fusíveis diazed Siemens.

### **g) Proteção da isolação dos condutores dos circuitos terminais e de distribuição**

Relativamente ao condutor, a integral de Joule que o fusível deixa passar não deve ser superior à integral de Joule necessária para aquecer o condutor,

desde a sua temperatura para serviço em regime contínuo até a temperatura limite de curto-circuito. As Tabelas 10.9 e 10.10 fornecem a integral de Joule máxima que os fusíveis deixam passar.

Conhecendo-se a intensidade da corrente de curto-circuito trifásico,  $I_{cs}$ , de valor simétrico, determina-se, pelos gráficos das Figuras 10.19 a 10.24, o tempo de atuação do fusível,  $T_{af}$ .

A partir dos gráficos das Figuras 3.26 e 3.27, respectivamente, para condutores isolados em PVC 70 °C e XLPE ou EPR, de fabricação Nexans, obtém-se o tempo máximo,  $T_{sc}$ , que a isolação dos condutores suporta, quando submetidos à corrente de defeito,  $I_{cs}$ . Deve-se assegurar que:

$$T_{af} < T_{sc} \quad (10.26)$$

## h) Proteção dos dispositivos de comando e manobra

- Contator

Os contadores devem ser protegidos contra as correntes de falta a jusante de sua instalação. Normalmente, os fabricantes desses equipamentos indicam a corrente nominal máxima dos fusíveis  $I_{nfc}$ , que devem ser pré-ligados aos contadores a fim de eliminar as correntes de curto-circuito. Deve ser garantida a relação seguinte:

$$I_{nf} \leq I_{nfc} \quad (10.27)$$

$I_{nfc}$  - corrente nominal do fusível a ser pré-ligado ao contator;

$I_{nf}$  - corrente nominal do fusível.

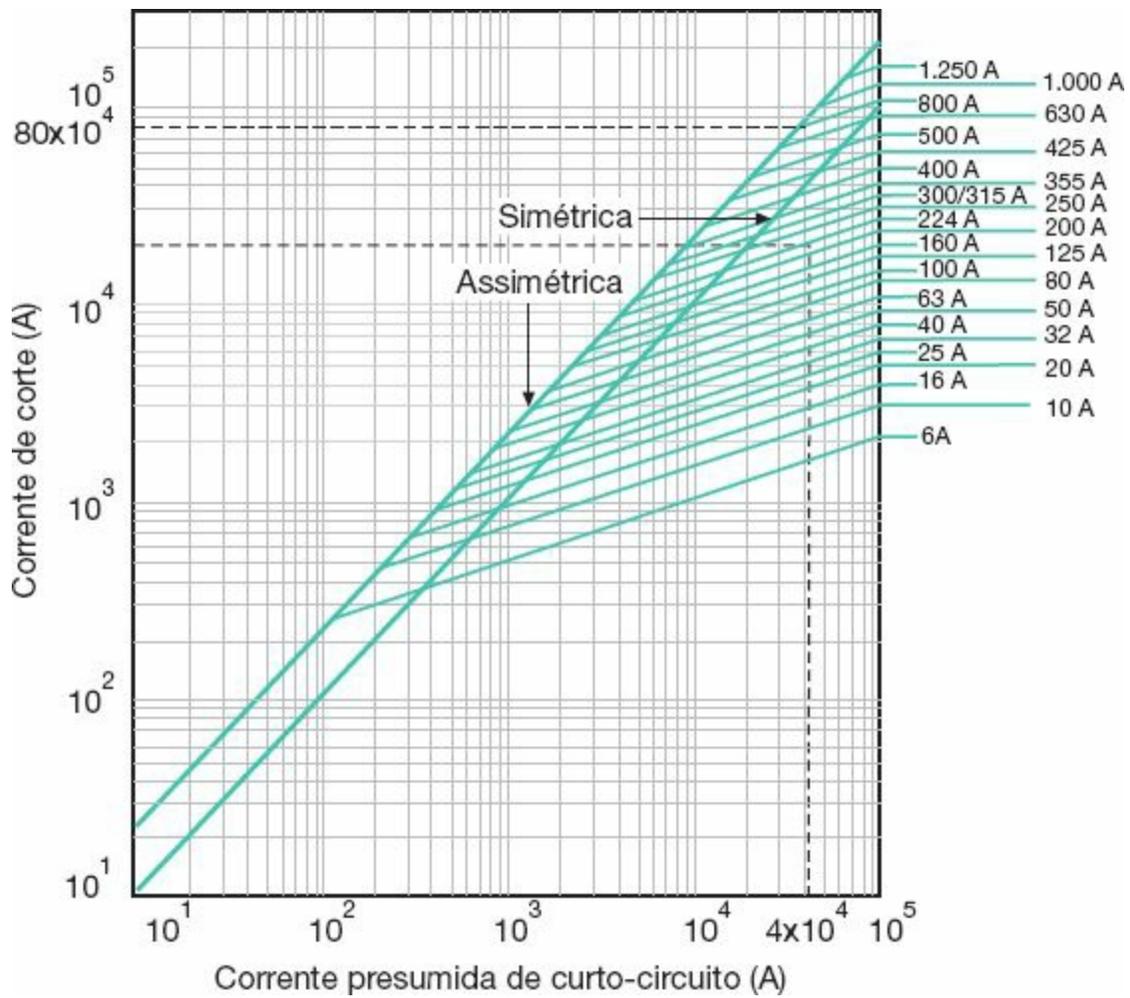


Figura 10.27 Características de corte dos fusíveis NH Siemens.

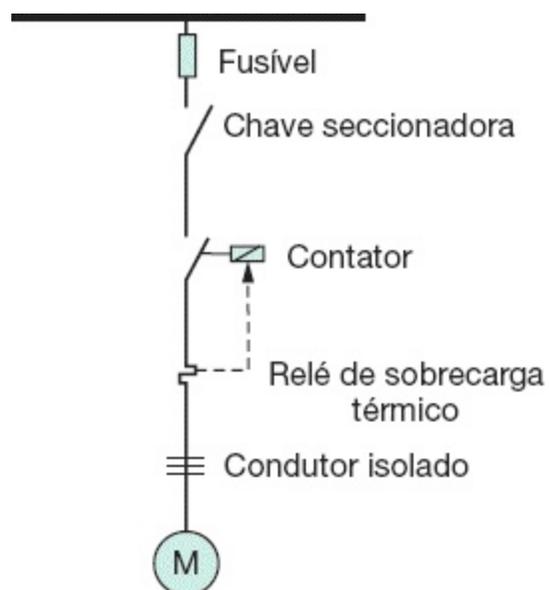


Figura 10.28 Unifilar simplificado.

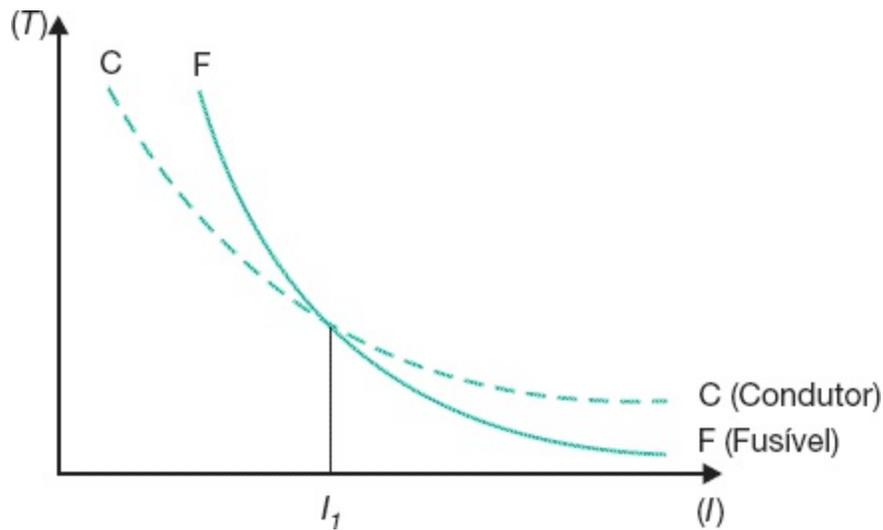


Figura 10.29 Curvas tempo  $\times$  corrente do fusível e condutor.

- Relé térmico

Os relés térmicos devem ser protegidos contra as correntes de falta a jusante do ponto de sua instalação. Normalmente, os fabricantes desses equipamentos indicam a corrente nominal máxima dos fusíveis  $I_{nfr}$ , que devem ser pré-ligados aos relés a fim de eliminar as correntes de curto-circuito. Deve ser garantida a relação seguinte:

$$I_{nf} \leq I_{nfr} \quad (10.28)$$

$I_{nfr}$  - corrente nominal do fusível a ser pré-ligado ao relé.

- Chave seccionadora interruptora

Os fabricantes de chaves seccionadoras interruptoras fornecem, normalmente, a capacidade máxima de corrente que o equipamento poderá suportar, diante da ocorrência de defeito, e/ou indicam o maior valor da corrente do fusível,  $I_{nfch}$ , que deve ser pré-ligado à chave a fim de protegê-la adequadamente dos efeitos eletromecânicos das correntes de curto-circuito. Deve ser garantida a relação seguinte:

$$I_{nf} \leq I_{nfch} \quad (10.29)$$

$I_{nfch}$  - corrente nominal do fusível a ser pré-ligado à chave.

Relativamente a esse critério, é usado, sobretudo, o poder de limitação de corrente, próprio dos fusíveis de alta capacidade de ruptura, que é o caso dos fusíveis dos tipos diazed e NH.

É interessante observar que existe uma diferença fundamental entre a atuação de fusíveis, disjuntores termomagnéticos e contatores acoplados a relés de sobrecarga. Os primeiros interrompem diretamente o circuito, atuando por destruição do seu elemento fusível, tornando-se, na prática, irrecuperáveis; os outros dois elementos atuam mecanicamente por meio da sensibilidade dos relés térmico e magnético a eles ligados, podendo voltar ao estado de operação alguns instantes depois.

**Tabela 10.9** Integral de Joule dos fusíveis diazed Siemens

Corrente nominal	Corrente de curto-circuito (mínima)	I <sup>2</sup> t de fusão	I <sup>2</sup> t de interrupção			Corrente nominal	Corrente de curto-circuito (mínima)	I <sup>2</sup> t de fusão	I <sup>2</sup> t
			Tensão						
			220 VCA	380 VCA	440 VCA				
(A)	(A)	(A <sup>2</sup> s)	(A <sup>2</sup> s)	(A <sup>2</sup> s)	(A <sup>2</sup> s)	(A)	(A)	(A <sup>2</sup> s)	(A <sup>2</sup> s)
2	36	5,6	8,4	9,8	11,1	25	650	1.690	3.000
4	90	32	41	46	51	35	900	3.610	5.500
6	150	90	138	155	170	50	1.300	6.250	9.800
10	300	336	445	495	530	63	1.600	10.800	19.900
16	350	462	890	1.100	1.300	80	1.900	15.745	27.000

20	500	1.082	1.830	2.170	2.400	100	2.800	27.040	44.500
----	-----	-------	-------	-------	-------	-----	-------	--------	--------

**Tabela 10.10** Integral de Joule dos fusíveis NH Siemens

Corrente nominal	Corrente de curto-circuito (mínima)	I <sup>2</sup> t de fusão	I <sup>2</sup> t de interrupção			Corrente nominal	Corrente de curto-circuito (mínima)	I <sup>2</sup> t de fusão
			Tensão					
			220 VCA	380 VCA	440 VCA			
(A)	(A)	(A <sup>2</sup> s)	(A <sup>2</sup> s)	(A <sup>2</sup> s)	(A <sup>2</sup> s)	(A)	(A)	(A <sup>2</sup> s)
6	210	46	80	105	150	160	7.800	60.000
10	310	90	180	250	370	200	10.500	115.000
16	620	300	460	585	880	224	12.000	146.000
20	840	565	860	1.100	1.650	250	14.000	210.000
25	1.100	980	1.500	1.900	2.900	315	19.000	290.000
32	1.450	2.200	3.400	4.300	6.400	355	21.000	475.000
40	2.100	4.000	6.000	8.200	12.100	400	23.000	590.000
50	2.500	6.000	9.000	11.000	16.000	500	29.000	1.000.000
63	2.800	7.700	14.000	18.000	27.000	630	39.000	1.900.000
80	3.500	12.900	24.000	30.000	46.000	800	54.000	3.500.000
100	4.800	24.000	45.000	57.000	85.000	1.000	72.000	6.400.000

125	6.000	36.000	69.000	86.000	130.000	1.250	96.000	11.300.000
-----	-------	--------	--------	--------	---------	-------	--------	------------

### Exemplo de aplicação (10.7)

Determinar a corrente nominal dos fusíveis de proteção dos circuitos terminais e de distribuição mostrados no diagrama da Figura 10.30. Os circuitos estão contidos em um eletroduto embutido no piso, cuja isolamento do condutor é de PVC, e são do tipo unipolar. O tempo de partida dos motores é de 2 s. A carga C é composta de 728 lâmpadas fluorescentes de 110 W com reator de alto fator de potência, 40 aparelhos de ar-condicionado de 12.000 BTU (1,90 kW) e 10 chuveiros elétricos de 3.500 W.

#### a) Corrente de carga dos aparelhos

$$P_1 = 728 \times 110 \text{ W} = 80.080 \text{ W} \approx 80 \text{ kW}$$

$$P_2 = 40 \times 1,9 \text{ kW} = 76 \text{ kW}$$

$$P_3 = 10 \times 3.500 \text{ W} = 35.000 \text{ W} = 35 \text{ kW}$$

$$P_c = 80 + 76 + 35 = 191 \text{ kW}$$

$$F_p = 1$$

$$\sum I_{na} = \frac{191}{\sqrt{3} \times 0,38} = 290,2 \text{ A}$$

$S_c = 240 \text{ mm}^2$  (Tabela 3.6 — coluna D, justificada pela Tabela 3.4, método de instalação 61A)

#### b) Corrente de carga motriz

$P_{nm1} = 30 \text{ CV} \rightarrow I_{mm1} = 43,3 \text{ A}$  (Tabela 6.4)  $\rightarrow S_c = 10 \text{ mm}^2$  (Tabela 3.6 — coluna D, justificada pela Tabela 3.4, método de instalação 61 A)

$P_{nm2} = 50 \text{ CV} \rightarrow I_{mm2} = 68,8 \text{ A}$  (Tabela 6.4)  $S_c = 25 \text{ mm}^2$  (Tabela 3.6 — coluna D, justificada pela Tabela 3.4, método de instalação 61 A)

c) Corrente total da carga

$$I_c = 290,2 + 3 \times 43,3 + 68,8 = 488,9 \text{ A}$$

d) Seção nominal do condutor de alimentação

$S_c = 2 \times 185 \text{ mm}^2$  (Tabela 3.6 — coluna D, justificada pela Tabela 3.4, método de instalação 61 A)

$$I_{nc} = 2 \times 258 \text{ A}$$

e) Corrente nominal dos fusíveis F1-F2-F3

Para atender às condições estabelecidas na Equação (10.20), tem-se:

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K$$

$$I_{pm} = I_{nm} \times I_{cpm} = 43,3 \times 6,8 = 294,4 \text{ A}$$

$$K = 0,4$$

$$I_{nf} \leq 294,4 \times 0,4 \rightarrow I_{nf} \leq 117,7 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 100 \text{ A} \text{ (Tabela 10.8)}$$

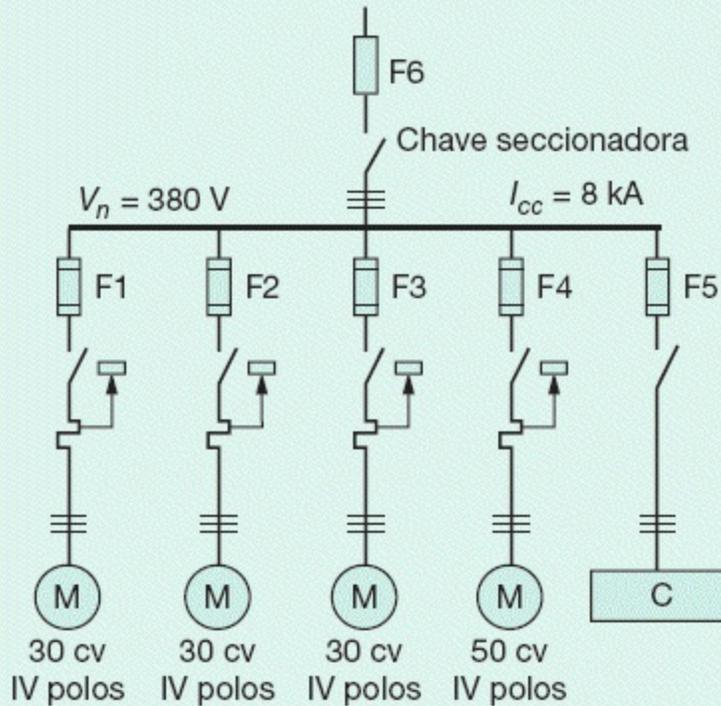
O fusível não deve atuar durante a partida do motor

Da Figura 10.21, tem-se:

$I_{pm} = 294,4 \text{ A} \rightarrow T_{af} = 10 \text{ s}$  (valor mínimo da faixa de atuação do fusível de NH 100 A, visto na Figura 10.21).

De acordo com a Equação (10.25), tem-se:

$$T_{af} > T_{pm} \text{ (condição satisfeita).}$$



**Figura 10.30** Diagrama unifilar.

O fusível deve proteger a isolação dos condutores

Da Figura 3.28, tem-se:

$$I_{cs} = 8 \text{ kA} \rightarrow S_c = 10 \text{ mm}^2 \rightarrow T_{sc} = 1 \text{ ciclo} = 0,016 \text{ s}$$

A partir do gráfico da Figura 10.21, tem-se:

$$I_{cs} = 8 \text{ kA} \rightarrow T_{af} < 0,01 \text{ s}$$

De acordo com a Equação (10.26), tem-se:

$$T_{af} < T_{sc} \text{ (condição satisfeita).}$$

De acordo com a Tabela 10.1, o condutor de  $10 \text{ mm}^2$  e com isolação PVC tem como integral de Joule o valor de  $1322 \times 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ . Na Tabela 10.10, pode-se observar que o fusível NH 100 A deixa passar, em 380 V, uma integral de Joule de  $57.000 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ , muito inferior à capacidade do condutor e, portanto, protegendo-o. Esta é outra forma de verificar a suportabilidade da

isolação do cabo protegido por determinado fusível.

O fusível deve proteger o contator

$$P_{nm} = 30 \text{ cv} \rightarrow \text{contator: 3TF46 - 45 A (Tabela 9.15)} \rightarrow I_{nfc} = 100 \text{ A}$$

De acordo com a Equação (10.27), tem-se:

$$I_{nf} = I_{nfc} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger o relé térmico

$$P_{nm} = 30 \text{ cv} \rightarrow \text{Relé térmico: 3UA58-00-2F (Tabela 10.2)} \rightarrow I_{nfr} = 100 \text{ A}$$

De acordo com a Equação (10.28), tem-se:

$$I_{nf} = I_{nfr} \text{ (condição satisfeita)}$$

#### f) Corrente nominal do fusível F4

$$R_{cpm} = 6,4 \text{ (Tabela 6.4)}$$

$$I_{nm} = 68,8 \text{ A (Tabela 6.4)}$$

$$I_{pm} = 68,8 \times 6,4 = 440,3 \text{ A}$$

$$K = 0,4$$

$$I_{nf} \leq 440,3 \times 0,4 \rightarrow I_{nf} \leq 176,1 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 160 \text{ A (Tabela 10.8)}$$

O leitor deve seguir a mesma sequência de cálculo anterior para verificar as condições operacionais do fusível.

#### g) Corrente nominal do fusível F5

$$I_{nf} \geq \alpha \times \sum I_{na}$$

$$\alpha = 1,15 \text{ (valor adotado)}$$

$$I_{nf} \geq 1,15 \times 290,2 \rightarrow I_{nf} \geq 333,7 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 355 \text{ A (Tabela 10.8)}$$

O fusível deve proteger a isolação dos condutores

Pelo gráfico da Figura 3.28, tem-se:

$$I_{cs} = 8 \text{ kA} \rightarrow S_c = 240 \text{ mm}^2 \rightarrow T_{sc} > 100 \text{ ciclos} > 1,66 \text{ s}$$

A partir do gráfico da Figura 10.24, tem-se:

$$I_{cs} = 8.000 \text{ A} \rightarrow T_{af} < 0,01 \text{ s (valor mínimo de atuação do fusível)}$$

$$T_{af} < T_{sc} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger a chave seccionadora

$$I_{nm} = \Sigma I_{na} = 290,2 \text{ A}$$

$$I_{sec} \geq 1,15 \times I_{nm} \quad 1,15 \times 290,2 \geq 333,7 \text{ A} \rightarrow I_{nch} = 382 \text{ A/380 V – tipo S32 – 630/3 (Tabela 9.14)}$$

Da Tabela 9.14, obtém-se o fusível máximo que deve ser pré-ligado à chave:

$$I_{nfch} = 630 \text{ A}$$

$$I_{nf} < I_{nfch} \text{ (condição satisfeita)}$$

#### h) Corrente nominal do fusível F6

$$I_{nf} \leq I_{pmm} \times K + \Sigma I_{nm} + \Sigma I_{na}$$

$$I_{nf} \leq 68,8 \times 6,4 \times 0,4 + 3 \times 43,3 + 290,2 \rightarrow I_{nf} \leq 596,2 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 500 \text{ A (tamanho 3, de acordo com a Tabela 10.8).}$$

O fusível deve proteger a isolação do condutor:  $2 \times 185 \text{ mm}^2$

De acordo com a Equação (3.19), tem-se:

$$\sqrt{T_{sc}} = \frac{0,34 \times 185 \times \sqrt{\log\left(\frac{234 + 160}{234 + 70}\right)}}{4} \rightarrow T_{sc} = 27,8 \text{ s}$$

A corrente de defeito por condutor/fase vale:

$$I_{cs} = \frac{8.000}{2} = 4.000 \text{ A}$$

A partir do gráfico da Figura 10.22, tem-se:

$$I_{cs} = 8.000/2 = 4.000 \text{ A} \rightarrow T_{af} = 4 \text{ s (limite superior da faixa do fusível)}$$

Da Equação (10.26), tem-se:

$$T_{af} < T_{sc} \text{ (condição satisfeita)}$$

De acordo com a Tabela 10.1, o condutor de cobre de  $185 \text{ mm}^2$  com isolação PVC tem como integral de Joule o valor de  $452.625 \times 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ . Na Tabela 10.10, pode-se observar que o fusível NH 500 A deixa passar, em 380 V, uma integral de Joule de  $2.360 \times 10^3/2 \text{ A}^2 \cdot \text{s} = 1.180 \times 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$  (por condutor), portanto, muito inferior à capacidade do condutor.

O fusível deve proteger a chave seccionadora

$$I_{sec} \geq 1,15 \times (3 \times 43,3 + 68,8 + 290,2) \leq 562,2 \text{ A}$$

$$I_{sec} = 870 \text{ A}/380 \text{ V} - \text{tipo S32} - 1250/3 \text{ (Tabela 9.14)}$$

A partir da Tabela 9.14, tem-se:

$$I_{nfch} = 1.250 \text{ A (Tabela 9.14)}$$

O fusível não deve atuar para a partida do motor de maior corrente

Do gráfico da Figura 10.22, tem-se:

$$I_{pm} = 440,3 \text{ A} \rightarrow T_{af} > 10.000 \text{ s}$$

Da Equação (10.25), tem-se:

$$T_{af} > T_{pm} \text{ (condição satisfeita)}$$

### ***10.2.6.2 Proteção de circuito com dois ou mais condutores paralelos por fase***

Quando as correntes de carga são muito elevadas, podem ser utilizados dois ou mais condutores elétricos em cada fase. Na prática, é costume dos projetistas, e notadamente dos profissionais instaladores, utilizarem cabos elétricos com seção não superior a 400 mm<sup>2</sup>, devido à pouca flexibilidade desses condutores, dificuldade de conexão dos condutores aos barramentos dos quadros de comando, necessidade de muito espaço para realizarem o raio de curvatura nas bandejas, prateleiras etc. Assim, utilizando vários condutores em cada fase, torna-se mais fácil o manuseio dos mesmos. Isso normalmente ocorre na alimentação dos QGFs, CCMs, para grande motores elétricos ou no suprimento de grandes cargas.

No entanto, o uso de condutores em paralelo por fase cria algumas situações que devem ser analisadas:

- As correntes distribuídas entre os condutores de uma mesma fase assumem valores muito diferentes, podendo essa diferença entre a menor e a maior corrente atingir cerca de 30 %, devido às reatâncias mútuas entre os condutores.
- As impedâncias dos condutores que compõem cada fase assumem valores diferentes em virtude das diferenças de temperatura entre

eles, afetando a resistência elétrica, bem como, e principalmente, devido às variações das reatâncias existentes em cada condutor de fase, em função dos efeitos mútuos do campo magnético (reatâncias mútuas).

- Dificuldades físicas de realizar medições por meio de registradores digitais dotados de alicates amperimétricos, mesmo de grande capacidade de corrente.

### 10.2.6.3 *Proteção contra sobrecargas de condutores em paralelo*

#### 10.2.6.3.1 *Corrente de carga equilibrada entre os condutores do grupo em paralelo*

Se a corrente de carga se distribui em valores praticamente iguais nos condutores em paralelo, devido à sua forma de instalação, a proteção contra sobrecarga pode ser feita por um único dispositivo de proteção contra sobrecarga protegendo todos os condutores da fase. Neste caso, basta que se estabeleçam as seguintes condições:

$$I_{ck} \leq I_{np} \leq \sum I_{nck} \quad (10.30)$$

$I_{ck}$  - corrente de carga que irá circular no conjunto de condutores;

$I_{np}$  - corrente nominal ou de ajuste do dispositivo de proteção único;

$I_{nck}$  - capacidade de corrente de cada condutor do grupo de condutores em paralelo.

Para que as correntes sejam distribuídas praticamente iguais nos condutores em paralelo de uma fase é necessário que seu arranjo na bandeja, prateleira etc. esteja em conformidade com os arranjos mostrados nas Figuras 3.24 e 3.25, respectivamente, para condutores em posição plana e em trifólio.

Assim, quando os condutores são normalmente instalados em um plano

no interior dos dutos anteriormente referidos, obedecem à seguinte formação, a fim de permitir uma distribuição de corrente uniforme: RST – TSR – RST e assim sucessivamente. No entanto, se os condutores estão em diferentes planos, deve-se arranjá-los na seguinte formação:

- 1º plano: RST – TSR.
- 2º plano: RST – TSR.
- 3º plano: RST – TSR.

### Exemplo de aplicação (10.8)

Uma subestação industrial é composta por dois transformadores de 1.000 kVA/13,80–440 V, alimentando um QGF de onde deriva um circuito com capacidade de 1.250 kVA. Determinar a seção dos condutores desse circuito limitada a 240 mm<sup>2</sup>/condutor. Sabe-se que os condutores são isolados em PVC e estão instalados em uma bandeja metálica não ventilada em camada única.

Corrente de carga nominal

$$I_c = \frac{1.250}{\sqrt{3} \times 0,44} = 1.640 \text{ A}$$

A corrente de carga que irá circular em cada um dos seis condutores, inicialmente previstos, vale:

$$I_{cpc} = \frac{1.640}{6} = 273,3 \text{ A}$$

Corrente corrigida pelo fator de agrupamento

Para a tentativa de utilizar seis condutores/fase, obtém-se da Tabela 3.15 o fator de correção de agrupamento, que vale 0,72, ou seja, seis circuitos a três condutores.

$$I_{cac} = \frac{1.640}{0,72} = 2.277 \text{ A}$$

Número de condutores em paralelo por fase

$$I_{\infty} = \frac{2.277}{6} = 379,5 \text{ A} \rightarrow S_c = 240 \text{ mm}^2 \rightarrow I_{nc} = 403 \text{ A (coluna C da Tabela 3.6)}$$

(coluna C da Tabela 3.6)

Corrente de ajuste da proteção de sobrecarga

Será adotado o disjuntor 3WN6 – 2.000 A, faixa de ajuste da unidade temporizada: 800 a 2.000, conforme a Tabela 10.6.

De acordo com a Equação (10.30), tem-se:

$$\Sigma I_{nck} = N \times I_{nc} = 6 \times 403 = 2.418 \text{ A}$$

$I_c = I_{ck} = 1.640 \text{ A}$  (correntes distribuídas praticamente uniformes entre os condutores)

$$I_{ck} \leq I_{np} \leq \Sigma I_{nck} \rightarrow 1.640 \leq I_{np} \leq 2.418 \text{ A}$$

Logo, o ajuste da unidade temporizada será .

### 10.2.6.3.2 Corrente de carga desequilibrada entre os condutores do grupo em paralelo

No entanto, se o desequilíbrio da corrente de carga for superior a 10 % entre a maior e a menor corrente entre os condutores do grupo em paralelo, podem-se utilizar as proteções individuais em cada condutor, conforme se mostra na [Figura 10.31](#). Neste caso, cada condutor assume parte da corrente. No caso, a corrente de sobrecarga divide-se de forma proporcional à corrente conduzida por cada condutor do grupo em paralelo.

Para se determinar o valor de cada corrente que circula em cada

condutor do grupo em paralelo é necessário realizar medição por meio de registradores gráficos e escolher os valores de corrente máximos que determinam o valor da carga total. No entanto, na fase de projeto, é necessário determinar os valores das impedâncias de cada condutor do grupo em paralelo e distribuir as correntes de forma inversamente proporcional aos valores das impedâncias. Esta não é uma tarefa fácil. Ainda não existem métodos normalizados de avaliação dessas impedâncias, cujos valores dependem fundamentalmente do arranjo dos cabos no interior do duto, normalmente canaleta embutida no piso, bandeja e escada para cabos.

A determinação da corrente de um condutor  $k$ , parte do grupo de condutores em paralelo, dá-se pela Equação (10.31):

$$I_{ck} = \frac{I_c}{\frac{Z_k}{Z_1} + \frac{Z_k}{Z_2} + \dots + \frac{Z_k}{Z_{k-1}} + \frac{Z_k}{Z_{k+1}} + \frac{Z_k}{Z_m}} \quad (10.31)$$

$I_{ck}$  - corrente no condutor  $k$ ;

$Z_1, Z_2, \dots, Z_k, \dots, Z_m$  - impedâncias do condutor 1 a  $m$  na condição de instalação definida em projeto e determinadas por cálculo.

Para a determinação dos dispositivos de proteção individuais para cada condutor do grupo, devem-se atender aos seguintes requisitos:

$$I_{ck} \leq I_{npk} \leq I_{cnk} \quad (10.32)$$

$I_{ck}$  - corrente de carga do condutor  $k$ ;

$I_{npk}$  - corrente nominal ou de ajuste da proteção do condutor  $k$ ;

$I_{cnk}$  - capacidade de corrente nominal do condutor  $k$ .

### Exemplo de aplicação (10.9)

Considerar o Exemplo de aplicação (10.8). Neste caso, os cabos foram arranjados de forma que as

correntes nos condutores de uma mesma fase estão desequilibradas, registrando-se os seguintes valores pela medição com registradores de demanda.

$$R_1 = 320 \text{ A}; S_1 = 330 \text{ A}; T_1 = 333 \text{ A} \rightarrow \text{disjuntor D1}$$

$$R_2 = 245 \text{ A}; S_2 = 255 \text{ A}; T_2 = 240 \text{ A} \rightarrow \text{disjuntor D2}$$

$$R_3 = 222 \text{ A}; S_3 = 225 \text{ A}; T_3 = 230 \text{ A} \rightarrow \text{disjuntor D3}$$

$$R_4 = 205 \text{ A}; S_4 = 210 \text{ A}; T_4 = 220 \text{ A} \rightarrow \text{disjuntor D4}$$

$$R_5 = 258 \text{ A}; S_5 = 252 \text{ A}; T_5 = 234 \text{ A} \rightarrow \text{disjuntor D5}$$

$$R_6 = 317 \text{ A}; S_6 = 321 \text{ A}; T_6 = 312 \text{ A} \rightarrow \text{disjuntor D6}$$

Como há diferença de correntes entre condutores que ultrapassa 10 %, deve-se instalar uma proteção individual por condutor por fase.

Capacidade máxima de corrente do cabo 240 mm<sup>2</sup>

Para sua particular condição de instalação com seis circuitos a três condutores agrupados:  $I_{mc} = 0,72 \times 403 = 290 \text{ A}$ . Logo se percebe, pelas medidas efetuadas, que alguns condutores operam acima de sua capacidade nominal. Assim, é necessário substituir os condutores atuais de 240 mm<sup>2</sup> por condutores de 300 mm<sup>2</sup>.

Capacidade máxima de corrente do cabo 300 mm<sup>2</sup>

A capacidade máxima de corrente para a condição de agrupamento de seis condutores vale:  $I_{mc} = 0,72 \times 464 = 334 \text{ A}$ .

Correntes de carga por fase

$$R_t = 1.567 \text{ A}; S_t = 1.593 \text{ A}; T_t = 1.569 \text{ A}$$

Correntes de ajuste dos dispositivos de proteção de cada condutor

Serão utilizados seis disjuntores do tipo 3VF52 – 400 A, faixa de ajuste: 315 a 400 A, em

conformidade com a Tabela 10.6. A ligação dos disjuntores é semelhante ao que se observa na Figura 10.34 (no caso, somente três disjuntores):

- Disjuntor D1:  $333 \leq I_{npk} \leq 334 \rightarrow I_{npk} = 334 \text{ A}$
- Disjuntor D2:  $255 \leq I_{npk} \leq 334 \rightarrow I_{npk} = 334 \text{ A}$
- Disjuntor D3:  $230 \leq I_{npk} \leq 334 \rightarrow I_{npk} = 334 \text{ A}$
- Disjuntor D4:  $220 \leq I_{npk} \leq 334 \rightarrow I_{npk} = 334 \text{ A}$
- Disjuntor D5:  $258 \leq I_{npk} \leq 334 \rightarrow I_{npk} = 334 \text{ A}$
- Disjuntor D6:  $321 \leq I_{npk} \leq 334 \rightarrow I_{npk} = 334 \text{ A}$

Logo, a corrente de ajuste da unidade térmica temporizada de todos os disjuntores será  $I_{npk} = 334 \text{ A}$ .

Quando se empregam vários condutores em paralelo por fase é necessário adotar medidas de proteção a fim de garantir a integridade dos condutores durante os processos de curto-circuito.

#### **10.2.6.4 Proteção contra curtos-circuitos de condutores em paralelo**

A proteção contra curtos-circuitos pode ser utilizada de duas formas, relacionadas a seguir.

##### **10.2.6.4.1 Proteção única para todos os condutores em paralelo de cada fase**

Neste caso, é necessário determinar se a proteção única é sensível a um defeito em quaisquer dos condutores do grupo. Isso pode ser realizado tomando-se a corrente de curto-circuito que circula em cada condutor em paralelo do grupo e verificar se a proteção atua em um tempo inferior ao tempo de suportabilidade térmica do cabo, conforme os gráficos das Figuras 3.28 e 3.29, ou empregar a Equação (3.19). Se essa condição não for satisfeita, é necessário utilizar a proteção individual em cada condutor em

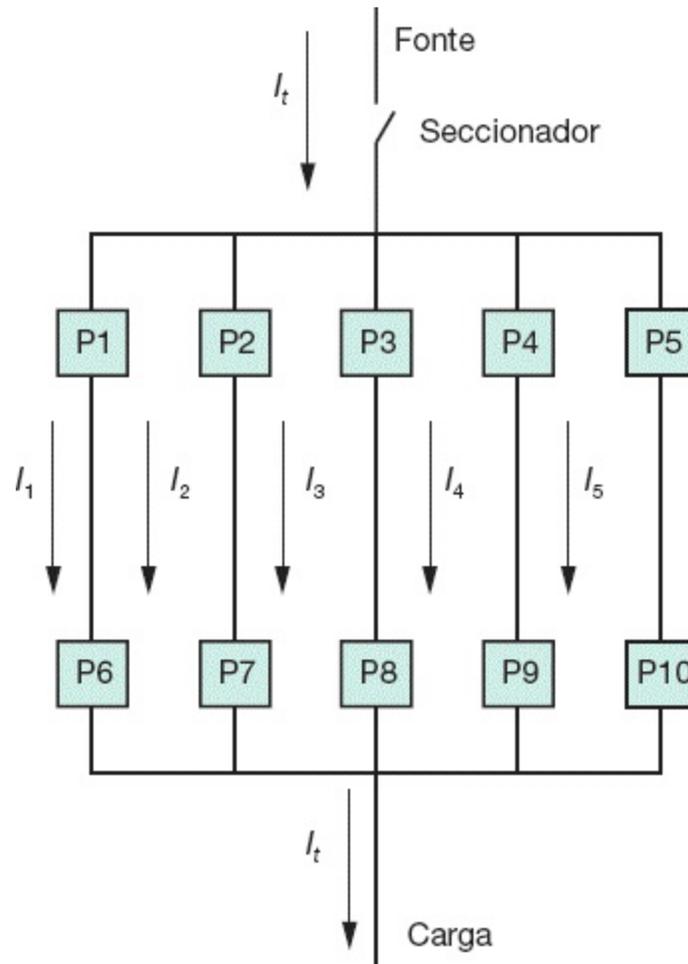
paralelo do grupo, conforme a [Figura 10.31](#).

#### 10.2.6.4.2 Proteção individual para cada condutor do grupo em paralelo

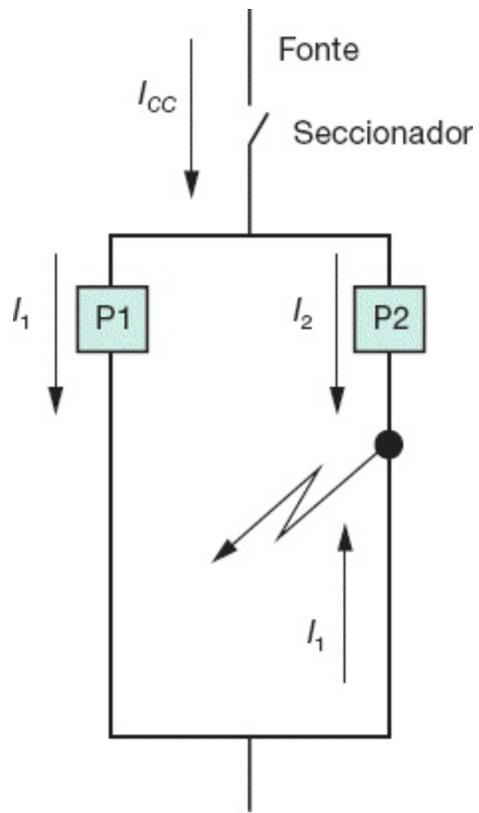
Ao se adotar a proteção individual em um projeto elétrico é necessário seguir alguns princípios:

- Para dois condutores em paralelo por fase, deve-se utilizar um dispositivo de proteção na origem de cada condutor; neste caso, há realimentação da corrente de curto-circuito pelo condutor não atingido, conforme observado na [Figura 10.32](#).
- Para três ou mais condutores em paralelo por fase, deve-se utilizar um dispositivo de proteção na origem de cada condutor e outro dispositivo na extremidade do referido condutor, ou seja, na carga, conforme mostrado nas [Figuras 10.31 e 10.33](#).
- Se considerar um curto-circuito no ponto A, mostrado na [Figura 10.33](#), a proteção P3 deve atuar sensibilizada pela corrente  $I_3$ . Porém, a corrente de curto-circuito irá alimentar o ponto de defeito por meio dos dois condutores não atingidos. Assim, a corrente irá atravessar a proteção P6, que deve também ser sensibilizada por esta corrente, isolando definitivamente o ponto defeituoso.
- Quando a proteção é feita individualmente, devem-se conectar adequadamente os condutores nos seus respectivos dispositivos de proteção, sejam eles fusíveis ou disjuntores. No caso, por exemplo, de três condutores em paralelo por fase, devem ser utilizados três disjuntores de proteção individual e os condutores devem ser conectados na seguinte forma: R1S1T1 – R2S2T2 – R3S3T3, em conformidade com a [Figura 10.34](#).
- Na maioria das situações práticas, chega-se a resultados favoráveis de instalação de uma proteção única, principalmente se são adotados condutores de seções superiores a 120 mm<sup>2</sup> e disjuntores com

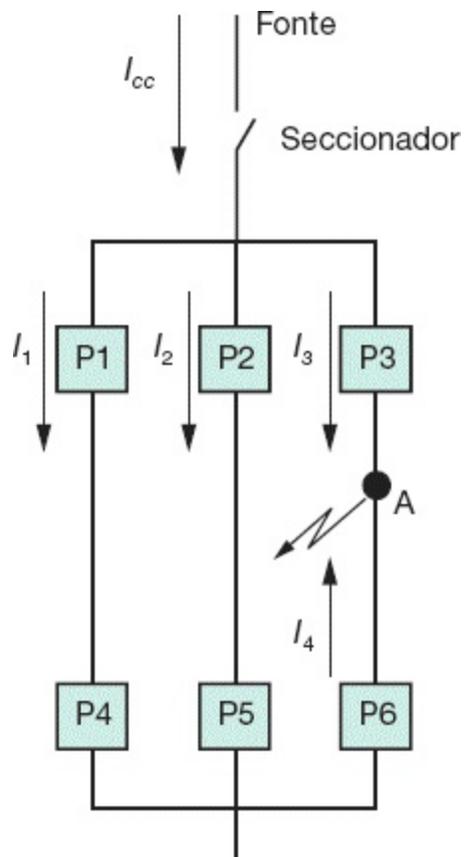
unidades magnéticas de rápida temporização.



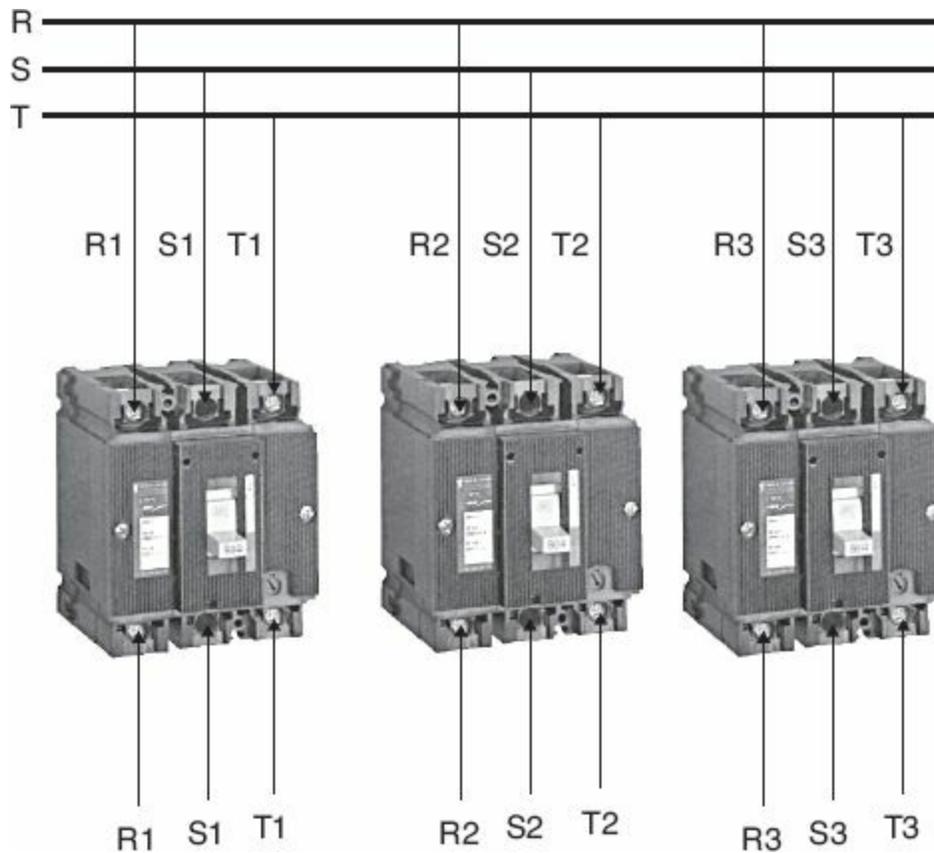
**Figura 10.31** Condutores em paralelo/fase.



**Figura 10.32** Dois condutores em paralelo em curto.



**Figura 10.33** Três condutores em paralelo em curto-circuito.



**Figura 10.34** Disposição dos cabos paralelos no disjuntor.

### Exemplo de aplicação (10.10)

Considerar o Exemplo de aplicação (10.8). Foram utilizados seis condutores por fase de seção igual a  $240 \text{ mm}^2$ . Determinar o valor da proteção, definindo se a mesma deve ser única ou individual para cada um dos seis condutores em paralelo/fase. A corrente de curto-circuito fase-terra na extremidade da carga servida pelo alimentador em questão vale  $22 \text{ kA}$ .

Determinação da proteção inicialmente única

De acordo com a Equação (3.19), e utilizando-se o disjuntor 3WN6 –  $2.000 \text{ A}$ , faixa de ajuste de  $800$  a  $2.000$ , ajustado em  $1.700 \text{ A}$ , tem-se:

$$I_{ft} = 22.000 \text{ A} \rightarrow M = \frac{22.000}{1.700} = 12,9$$

Ajuste da unidade magnética:  $10 \times I_{aj} = 10 \times 1.700 = 17.000 \text{ A}$ .

Ajuste da classe de tempo de disparo da unidade magnética: 80 ms (veja Figura 10.17).

Tempo de disparo da unidade magnética:  $I_{ft} = 22.000 \text{ A}$  ( $10 \times I_{aj}$ )  $\rightarrow T_{adm} = 0,13 \text{ s}$  (veja Figura 10.17).

Tempo de suportabilidade térmica do cabo:

$$S_c = \frac{\sqrt{T_{sc}} \times I_{cs}}{0,34 \times \sqrt{\log\left(\frac{234 + T_f}{234 + T_i}\right)}} \rightarrow 240 = \frac{\sqrt{T_{sc}} \times 22}{0,34 \times \sqrt{\log\left(\frac{234 + 160}{234 + 70}\right)}} \rightarrow T_{sc} = 1,54 \text{ s}$$

Logo,  $T_{sc} < T_{adm}$  (condição satisfeita).

Neste caso, a proteção pode ser única para todos os condutores.

### Exemplo de aplicação (10.11)

Uma subestação industrial é composta por dois transformadores de 1.000 kVA/13,80–440 V, alimentando um QGF de onde deriva um circuito com capacidade de corrente de 1.250 kVA. Determinar a seção dos condutores desse circuito, limitada a 95 mm<sup>2</sup>/condutor. Os condutores estão instalados em três bandejas metálicas não ventiladas, em camada única. A corrente de curto-circuito fase e terra na extremidade da carga servida pelo alimentador em questão vale 22 kA.

Corrente de carga nominal

$$I_c = \frac{1.250}{\sqrt{3} \times 0,44} = 1.640 \text{ A}$$

Corrente corrigida pelo fator de agrupamento

Para uma tentativa de utilizar 12 condutores/fase, obtém-se da Tabela 3.15 o fator de correção de agrupamento, que vale 0,70, ou seja, 12 circuitos a três condutores.

$$I_{cac} = \frac{1.640}{0,70} = 2.343 \text{ A}$$

Capacidade dos condutores em paralelo por fase

$$I_{co} = \frac{2.343}{12} = 195 \text{ A} \rightarrow S_c = 95 \text{ mm}^2 \rightarrow I_{nc} = 223 \text{ A (coluna C da Tabela 3.6)}$$

Determinação da proteção única: unidades térmica e magnética

De acordo com a Equação (3.19) e utilizando-se o disjuntor 3WN6 – 2.000 A, faixa de ajuste da unidade térmica de 1.000 a 2.500 A, ajustado em 1.700 A, tem-se:

$$I_{ft} = 22.000 \text{ A} \rightarrow M = \frac{22.000}{1.700} = 12,9$$

- Ajuste da classe de tempo de disparo da unidade magnética: 400 ms (veja Figura 10.17).
- Tempo de disparo do disjuntor na unidade magnética:  $I_{ft} = 12,9 \times I_n \rightarrow T_{adm} = 0,48 \text{ s}$  (classe de disparo 400 A).
- Tempo de suportabilidade térmica do cabo:

$$S_c = \frac{\sqrt{T_{sc}} \times I_{cs}}{0,34 \times \sqrt{\log\left(\frac{234 + T_f}{234 + T_i}\right)}} \rightarrow 95 = \frac{\sqrt{T_{sc}} \times 22}{0,34 \times \sqrt{\log\left(\frac{234 + 160}{234 + 70}\right)}} \rightarrow T_{sc} = 0,24 \text{ s}$$

Logo,  $T_{sc} > T_{adm}$  (condição não satisfeita).

Neste caso, podem ser adotadas três alternativas:

- Instalar proteções individuais.
- Reduzir o ajuste da classe de tempo de disparo do disjuntor para 20 ms, tendo-se por consequência  $T_{adm} = 0,05 \text{ s}$ , portanto, obtendo-se a condição satisfeita de  $T_{sc} > T_{adm}$ .
- Adotar condutores de maior seção transversal.

De todas as alternativas, a melhor seria adotar a última, pois permitiria aplicar uma única

proteção contra curtos-circuitos.

## 10.2.7 Comportamento dos condutores em regime transitório

O comportamento dos condutores em regime transitório pode ser analisado de acordo com os seguintes procedimentos:

### a) Conductor isolado com início de operação a uma temperatura ambiente de 30 °C

A limitação da duração da corrente de sobrecarga vale:

$$T_{sb} = K_t \times \ln \left( \frac{R_s^2}{R_s^2 - R_{st}} \right) \quad (10.33)$$

$T_{sb}$  - tempo necessário para que determinado condutor atinja uma temperatura de sobrecarga definida ao ser percorrido por uma corrente de sobrecarga, considerando-se o condutor a uma temperatura igual à ambiente;

$\ln$  - logaritmo neperiano;

$K_t$  - constante de tempo;

$R_s$  - relação de sobrecarga, dada na Equação (10.34):

$$R_s = \frac{I_c}{I_{nc}} \quad (10.34)$$

$R_{st}$  = relação de temperatura, dada na Equação (10.35):

$$R_{st} = \frac{T_s - T_a}{T_{mc} - T_a} \quad (10.35)$$

$I_c$  - corrente de carga, em A;

$I_{nc}$  - corrente nominal do condutor, em A;

$T_s$  - temperatura de sobrecarga térmica, em °C;

$T_a$  - temperatura ambiente, em °C;

$T_{mc}$  - temperatura máxima de serviço contínuo do condutor isolado, em °C.

Os valores das temperaturas máximas para o serviço contínuo, sobrecarga e de curto-circuito estão definidos na [Tabela 3.5](#).

O valor de  $K_t$  é dado pela Equação (10.36):

$$K_t = \frac{10^4}{\beta^2} \times (0,7 \times S_c^{0,75} + 0,8 \times S_c^{0,5} + 0,4 \times S_c^{0,25}) \quad (10.36)$$

$S_c$  - seção do condutor isolado, em mm<sup>2</sup>;

$\beta$  - coeficiente de linha, dado na [Tabela 10.11](#).

### **b) Condutor isolado com início de operação a uma temperatura máxima de regime contínuo**

A limitação da duração da corrente de sobrecarga vale:

$$T_{sb} = K_t \times \ln \left( \frac{R_s^2 - 1}{R_s^2 - R_{st}} \right) \quad (10.37)$$

Para satisfazer à condição limite de sobrecarga estabelecida na Equação (10.37), o valor  $R_s$  na Equação (10.34) vale:

$$R_s = \frac{K \times I_c}{I_{nc}} = 1,45 \quad (10.38)$$

$K$  - fator de sobrecarga.

A partir desta condição, os valores correspondentes de  $T_{sb}$  dados pelas Equações (10.33) e (10.37) valem, respectivamente:

### **a) Condutor isolado a uma temperatura inicial de trabalho de 30 °C**

$$T_{sb} = K_t \times \ln\left(\frac{2,10}{2,10 - R_{st}}\right) \quad (10.39)$$

**b) Condutor isolado a uma temperatura inicial máxima de regime**

$$T_{sb} = K_t \times \ln\left(\frac{1,10}{2,10 - R_{st}}\right) \quad (10.40)$$

**Tabela 10.11** Coeficientes de linha ( $\beta$ )

Tipo de linha	Condutor de cobre			
	Isolação de PVC		Isolação de XLPE ou EPR	
	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados
A	11,0	10,5	15,0	13,5
B	13,5	12,0	18,0	16,0
C	15,0	13,5	19,0	17,0
D	17,5	14,5	21,0	17,5
E	17,0	14,5	21,0	18,0
F	17,0	14,5	21,0	18,0

**Exemplo de aplicação (10.12)**

Determinar o tempo máximo para o condutor de isolação PVC atingir sua temperatura de sobrecarga de regime, quando alimentado por um transformador de 150 kVA–13.800/440 V em

operação e que deve ser sobressolicitado por uma carga igual a 155 % de sua potência nominal por tempo limitado. O circuito está instalado isoladamente em um eletroduto embutido no piso (tipo de linha: A) e a temperatura ambiente é de 30 °C.

Aplicando-se a Equação (10.33), tem-se:

$$T_{sb} = K_t \times \ln \left( \frac{R_s^2}{R_s^2 - R_{st}} \right) \text{ (s)}$$

$$I_{nm} = 196 \text{ A (corrente nominal do transformador)}$$

$$S_c = 120 \text{ mm}^2 \text{ (seção do condutor de fase do circuito do transformador)}$$

$$I_{nc} = 203 \text{ A (Tabela 3.6 — coluna D, justificada pela Tabela 3.4, método de instalação 61A)}$$

$$T_a = 30 \text{ °C}$$

$$T_s = 100 \text{ °C (Tabela 3.5)}$$

$$T_{mc} = 70 \text{ °C (Tabela 3.5)}$$

$$I_c = 1,55 \times 196 = 303,8 \text{ A.}$$

O valor de  $R_s$  é definido pela Equação (10.34):

$$R_s = \frac{I_c}{I_{nc}} = \frac{303,8}{203} = 1,49$$

O valor de  $R_{st}$  é definido pela Equação (10.35):

$$R_{st} = \frac{T_s - T_a}{T_{mc} - T_a} = \frac{100 - 30}{70 - 30} = 1,75$$

$$\beta = 10,5 \text{ (Tabela 10.11)}$$

$$K_t = \frac{10^4}{\beta^2} \times (0,7 \times S_c^{0,75} + 0,8 \times S_c^{0,5} + 0,4 \times S_c^{0,25})$$

$$K_t = \frac{10^4}{10,5^2} \times (0,7 \times 120^{0,75} + 0,8 \times 120^{0,5} + 0,4 \times 120^{0,25}) \rightarrow K_t = 3.217$$

$$T_{sb} = 3.217 \times \ln\left(\frac{1,49^2}{1,49^2 - 1,75}\right)$$

$$T_{sb} = 4.994 \text{ s} \rightarrow T_{sb} = 1 \text{ h } 23 \text{ min}$$

Logo, o tempo máximo de sobrecarga acima da qual prejudicará a isolação do condutor será de 1h 23 min.

## 10.2.8 Seletividade e coordenação

Seletividade é a característica que deve ter um esquema de proteção que, quando submetido a correntes anormais, possibilita a atuação do elemento de proteção mais próximo do defeito, de maneira a desenergizar somente a parte do circuito afetado. Pode ser entendida também como a discriminação entre dois dispositivos de proteção consecutivos, indicando qual deles atuará primeiro.

Já a coordenação pode ser entendida como a característica de tempo de disparo entre essas duas proteções. Se os tempos entre as duas proteções consecutivas forem muito pequenos, fazendo disparar os dois dispositivos de proteção, podemos dizer que não houve coordenação entre os tempos de disparos e, portanto, os dois elementos não estão coordenados e, por conseguinte, não há seletividade entre eles.

Existem três procedimentos de seletividade que podem ser aplicados em uma instalação elétrica:

- Seletividade amperimétrica.

- Seletividade cronométrica.
- Seletividade lógica.

### 10.2.8.1 Seletividade amperimétrica

Os procedimentos desse tipo de seletividade fundamentam-se no princípio de que as correntes de curto-circuito crescem à medida que o ponto de defeito aproxima-se da fonte de suprimento.

Esse princípio é particularmente aplicado aos sistemas de baixa tensão, em que as impedâncias dos condutores são significativas. Nos sistemas de transmissão de curta distância, as correntes de defeito não apresentam grandes variações nos diferentes pontos de falta, o que dificulta a aplicação desses procedimentos.

A seletividade amperimétrica é caracterizada pela diferença das correntes de ajuste entre duas proteções consecutivas em função dos níveis das correntes de curto-circuito.

A [Figura 10.35](#) mostra uma aplicação de seletividade. Para uma corrente de defeito no ponto A de valor igual a  $I_{cs}$  e valores de ajuste das proteções P1 e P2, respectivamente, iguais  $I_{p1}$  e  $I_{p2}$ , a seletividade amperimétrica estará satisfeita se ocorrer que:

$$I_{p1} > I_{cs} > I_{p2}$$

Para se obter êxito na seletividade amperimétrica, os ajustes das proteções envolvidas devem seguir os seguintes princípios:

A primeira proteção a montante do ponto de defeito deve ser ajustada a um valor inferior à corrente de curto-circuito ocorrida dentro da zona protegida, isto é:

$$I_{p2} \leq 0,8 \times I_{cs}$$

As proteções situadas fora da zona protegida devem ser ajustadas com valores superiores à corrente de curto-circuito, isto é:

$$I_{p1} > I_{cs}$$

A seletividade amperimétrica em baixa tensão pode ser obtida utilizando-se disjuntores termomagnéticos ou somente magnéticos, com diferentes correntes de atuação dos disparadores magnéticos. A seletividade amperimétrica pode ser obtida facilmente com a aplicação de fusíveis de diferentes correntes nominais, desde que as curvas de disparo tenham as mesmas características.

### **10.2.8.2 Seletividade cronométrica**

Os procedimentos desse tipo de seletividade fundamentam-se no princípio de que a temporização intencional do dispositivo de proteção próximo ao ponto de defeito seja inferior à temporização intencional do dispositivo de proteção a montante.

A diferença dos tempos de disparo de duas proteções consecutivas deve corresponder ao tempo de abertura do disjuntor acrescido de um tempo de incerteza de atuação das referidas proteções. Essa diferença, denominada intervalo de coordenação, é assumida com valores entre 0,3 e 0,5 s.

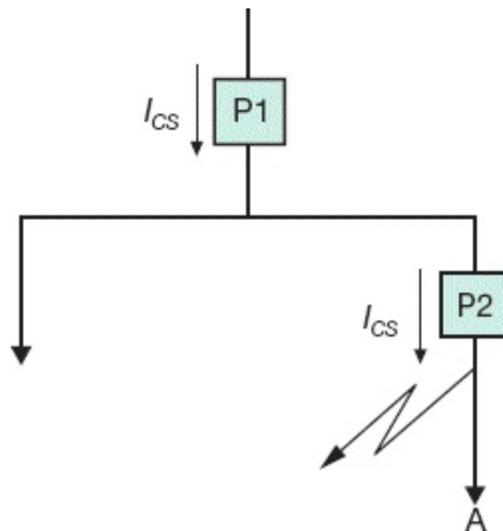
Para melhor entender essa conceituação, observar a [Figura 10.36](#), na qual se admite um intervalo de coordenação de 0,4 s. Um curto-circuito na barra D resulta em uma corrente de valor  $I_{cs}$ , que atravessa todas as proteções em série do circuito. A proteção P4 tem um retardo próprio de 0,1 s, atuando na sua unidade instantânea. Já a proteção P3 sofreu um ajuste de 0,5 s, enquanto as proteções P2 e P3 foram ajustadas, respectivamente, em 0,9 e 1,3 s para a mesma corrente.

Em função do tipo de proteção adotada na exemplificação anterior, os ajustes podem ser de forma dependente ou independente da corrente. No

primeiro caso, a proteção atua seguindo uma curva *tempo × corrente*, conhecida como curva de tempo inverso. Já na segunda hipótese, a proteção atua por tempo definido. As [Figuras 10.37 e 10.38](#) exemplificam, respectivamente, as duas formas de atuação da proteção, cada uma delas de acordo com as especificações do dispositivo adotado.

Esse tipo de seletividade é o mais usado em projetos de instalações industriais em função dos dispositivos normalmente empregados, que são os disjuntores termomagnéticos e os fusíveis NH, ambos caracterizados por curvas de tempo inverso.

Porém, há de se considerar que esse tipo de seletividade conduz a tempos de atuação da proteção muito elevados, à medida que se aproxima da fonte de suprimento, conforme pode-se observar pela [Figura 10.36](#), o que traz algumas desvantagens de projeto.



**Figura 10.35** Seletividade amperimétrica.

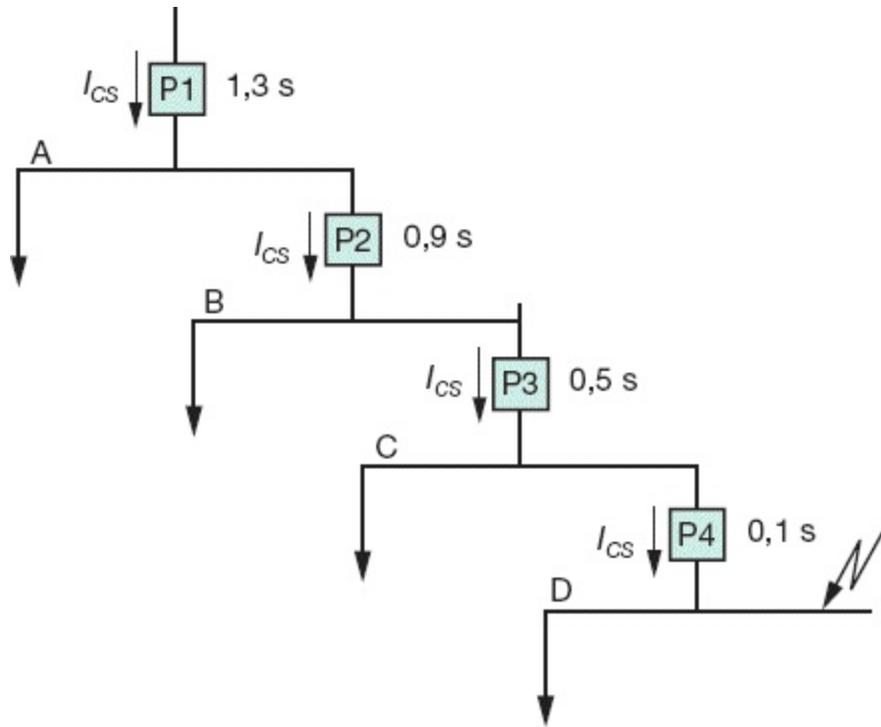


Figura 10.36 Seletividade cronométrica.

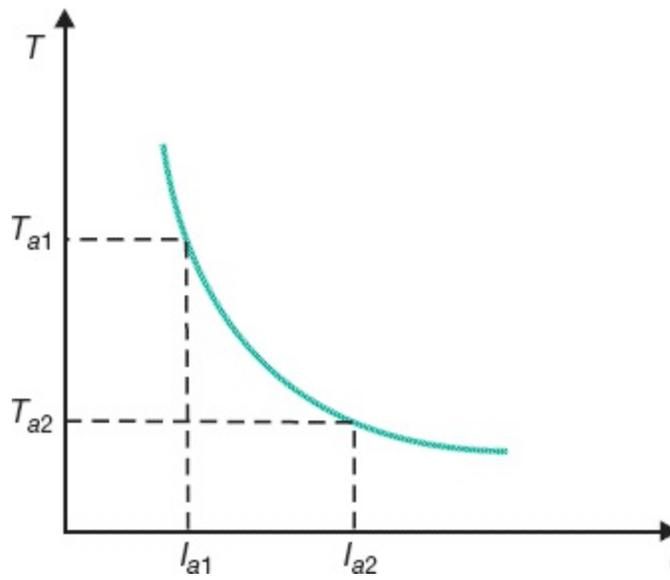
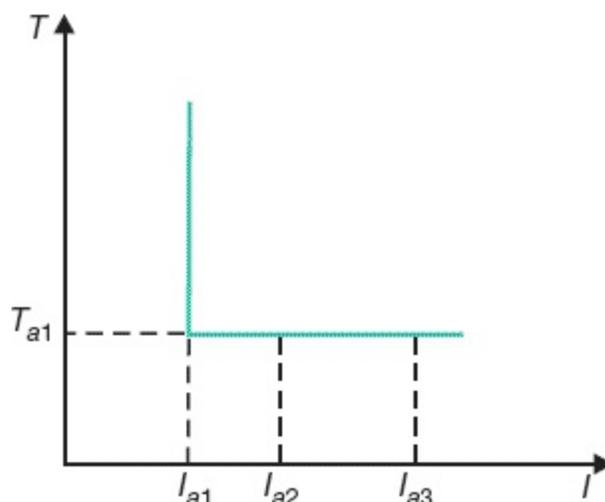


Figura 10.37 Curva de tempo inverso.



**Figura 10.38** Curva de tempo definido.

Nos projetos industriais, a concessionária impõe condições de tempo na proteção de fronteira com a planta, em função de seu esquema de seletividade. Como normalmente esse tempo é de valor reduzido, a seletividade do projeto de proteção da indústria pode ficar prejudicada, alcançando-se tempos superiores àqueles admitidos na proteção de fronteira.

Se as impedâncias acumuladas nos diferentes barramentos apresentam diferenças apreciáveis, isto é, as correntes de curto-circuito têm valores muito diferentes, pode-se superdimensionar termicamente os dispositivos de seccionamento, barramentos, cabos etc., principalmente quando se adota a solução da seletividade cronométrica do tipo tempo definido.

Por admitir a corrente de defeito por um tempo excessivo, podem-se ter quedas de tensão prejudiciais ao funcionamento das demais cargas.

Em função do tipo de dispositivo de proteção utilizado, podem ser encontradas nos sistemas elétricos as seguintes combinações de proteção:

- Fusível em série com fusível.
- Fusível em série com disjuntor.
- Disjuntor de ação termomagnética em série com fusível.
- Disjuntores em série entre si.

Cada uma dessas combinações merece uma análise individual para o dimensionamento adequado dos dispositivos que contêm o sistema de proteção.

#### 10.2.8.2.1 Fusível em série com fusível

A seletividade entre fusíveis do mesmo tipo e tamanho imediatamente subsequente pode ser natural. A fim de ficar assegurada a seletividade entre fusíveis, é necessário que a corrente nominal do fusível protegido (fusível a montante) seja igual ou superior a 160 % do fusível protetor (fusível a jusante), isto é:

$$I_{fm} \geq 1,6 \times I_{ff} \quad (10.41)$$

$I_{fm}$  - corrente nominal do fusível protegido, isto é, a montante;

$I_{ff}$  - corrente nominal do fusível protetor, isto é, a jusante.

Para melhor clareza das posições que os fusíveis ocupam no sistema, observar a [Figura 10.39](#).

A [Figura 10.40](#) mostra os tempos que devem ser obtidos na seletividade entre dois fusíveis, do tipo NH, de 80 e 160 A, instalados no circuito da [Figura 10.41](#).

Para facilitar o dimensionamento de fusíveis em série, no que tange à seletividade, podem-se empregar os valores fornecidos para os fusíveis em série DZ-DZ e NH-NH de fabricação Siemens na [Tabela 10.12](#).

A seletividade entre fusíveis dos tipos rápido e retardado deve ser feita entre elementos diferenciados de, pelo menos, uma unidade padronizada.

As unidades do tipo NH podem ficar submetidas a sobrecorrentes de curta duração, aproximadamente 75 % do tempo de fusão das mesmas, sem que haja alteração nas características do elemento fusível.

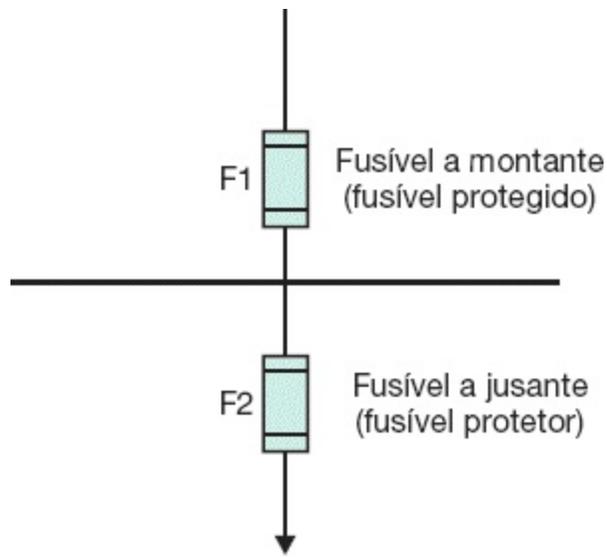


Figura 10.39 Posição dos fusíveis.

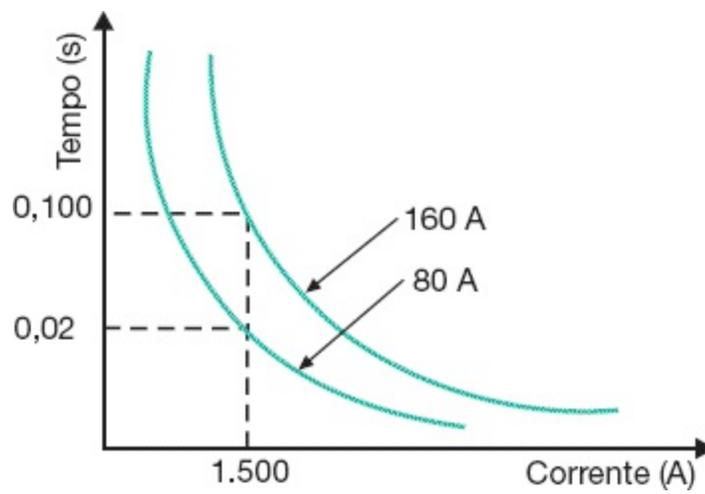
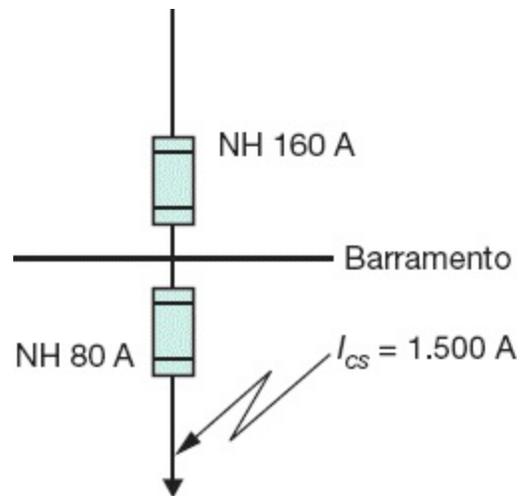


Figura 10.40 Curva de seletividade entre fusíveis.



**Figura 10.41** Fusíveis de 160 A e 80 A em série.

**Tabela 10.12** Tabela de seletividade entre fusíveis

Correntes dos fusíveis (A)					
NH			Diazed		
Montante	Jusante		Montante	Jusante	
F1	F2		F1	F2	
1.250	800		100	63	
1.000	630				
800	500		80	50	
630	400				
500	315		63	35	
400	250				
315	200		50	25	

250	160		
200	125	35	20
160	100		
125	80	25	16
100	63		
80	50	20	10
63	40		
50	32	16	6
40	25		
32	20	10	4
25	16		
20	10	6	2
16	6ADZ		
10	4ADZ		
6	2ADZ		

### 10.2.8.2.2 Fusível em série com disjuntor de ação termomagnética

#### a) Faixa de sobrecarga

A seletividade é garantida quando a curva de desligamento do relé térmico do

disjuntor não corta a curva do fusível, como se pode observar na [Figura 10.42](#), cuja proteção dos dispositivos está mostrada na [Figura 10.43](#).

### b) Faixa de curto-circuito

Na faixa característica da corrente de curto-circuito, para se obter seletividade é necessário que o tempo de atuação do fusível seja igual ou superior em 50 ms ao tempo de disparo do disjuntor por meio de sua unidade magnética, isto é:

$$T_{af} \geq T_{ad} + 50 \text{ ms} \quad (10.42)$$

$T_{af}$  - tempo de atuação do fusível, em ms;

$T_{ad}$  - tempo de atuação do disjuntor, em ms.

Um caso particular de fusível em série com disjuntor, e muito frequentemente empregado, é aquele em que se deseja proteger o disjuntor contracorrentes elevadas de curto-circuito, cujo valor seja superior à sua capacidade de ruptura. Utiliza-se, neste caso, a propriedade dos fusíveis, dos tipos diazed e NH, de limitação da corrente de crista. Pelos gráficos das [Figuras 10.26](#) e [10.27](#), pode-se observar, entretanto, que para correntes muito elevadas o fusível não mais responde a esta característica.

### 10.2.8.2.3 Disjuntor de ação termomagnética em série com fusíveis

#### a) Faixa de sobrecarga

Considerando a faixa de sobrecarga, a seletividade é garantida quando a curva de desligamento do relé térmico do disjuntor não corta a do fusível, como se pode observar na [Figura 10.44](#), cuja posição dos dispositivos está mostrada na [Figura 10.45](#).

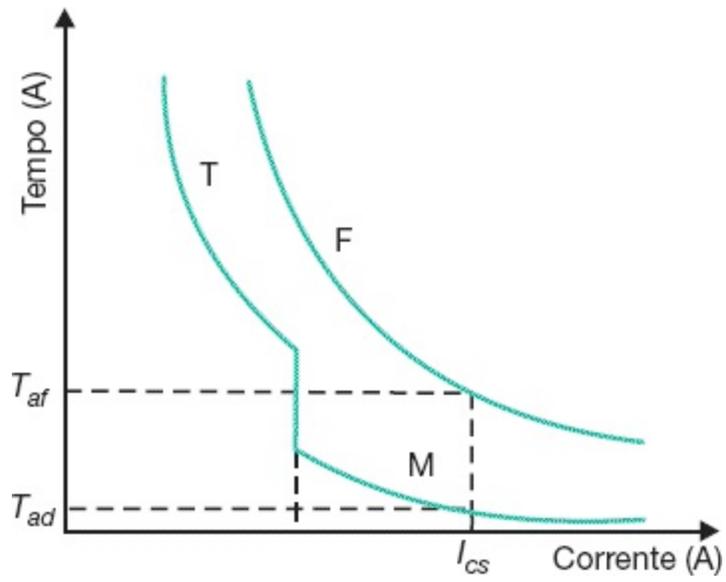


Figura 10.42 Fusível em série com o disjuntor.

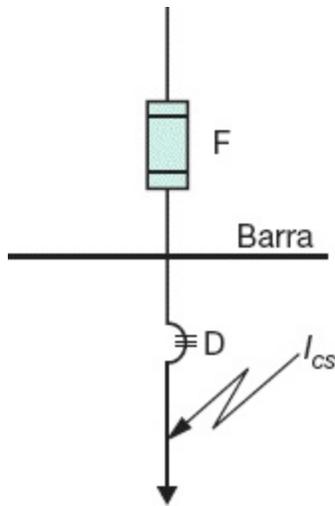
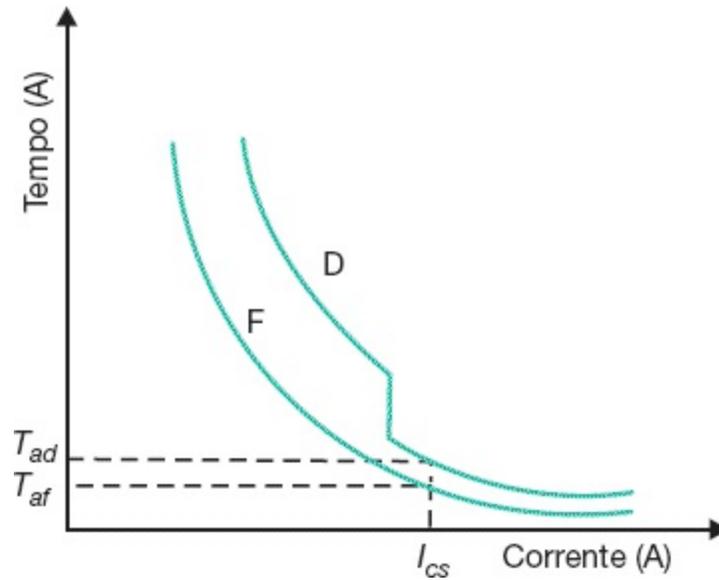
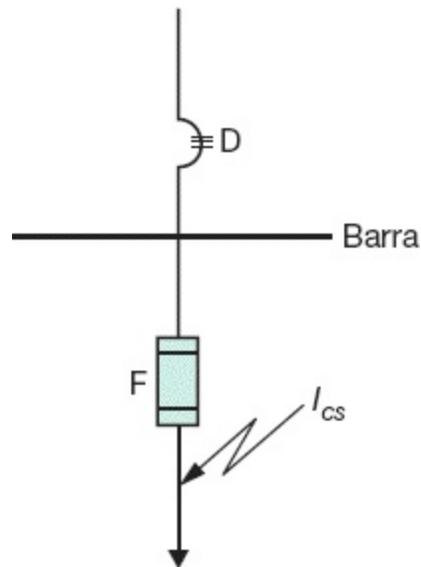


Figura 10.43 Posições do fusível e disjuntor.



**Figura 10.44** Disjuntor em série com fusível.



**Figura 10.45** Posições do disjuntor e do fusível.

### b) Faixa de curto-circuito

Na faixa característica de corrente de curto-circuito, para se obter seletividade, é necessário que o tempo de atuação do relé eletromagnético do disjuntor seja igual ou superior em 100 ms ao tempo de disparo do fusível, ou seja:

$$T_{ad} \geq T_{af} + 100 \text{ ms} \quad (10.43)$$

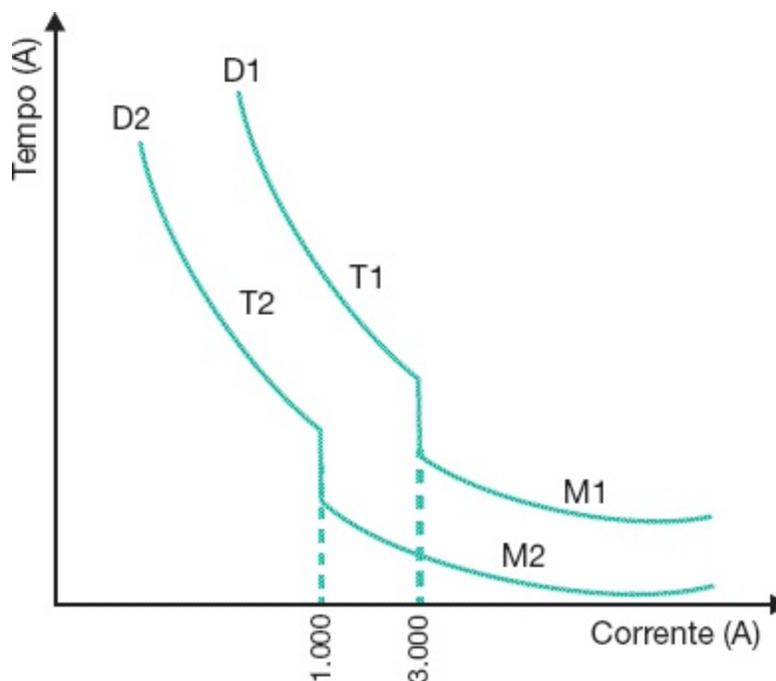
#### 10.2.8.2.4 Disjuntor em série com disjuntor

##### a) Faixa de sobrecarga

Considerando a faixa de sobrecarga, a seletividade é garantida quando as curvas dos dois disjuntores não se cortam, conforme pode ser visto na [Figura 10.46](#), cuja posição dos dispositivos está mostrada na [Figura 10.47](#).

##### b) Faixa de curto-circuito

Cuidados devem ser tomados quanto à posição que os disjuntores ocupam no sistema em função das correntes de curto-circuito. Deste modo, deve-se garantir que a capacidade de ruptura dos disjuntores seja compatível com as correntes de defeito, sob pena de eles serem afetados térmica e dinamicamente, durante a operação de disparo. Na prática, para que se tenha garantia de seletividade perante as correntes de curto-circuito, é necessário que se estabeleçam as seguintes condições, conforme pode ser observado na [Figura 10.48](#).



**Figura 10.46** Disjuntor em série com disjuntor.

O tempo de atuação do relé eletromagnético do disjuntor, instalado no ponto mais próximo da fonte, deve ser igual ou superior em 150 ms ao tempo de atuação do relé eletromagnético do disjuntor instalado a jusante, ou seja:

$$T_{ad1} \geq T_{ad2} + 150 \text{ (ms)} \quad (10.44)$$

$T_{ad1}$  - tempo de atuação do disjuntor D1, em ms;

$T_{ad2}$  - tempo de atuação do disjuntor D2, em ms.

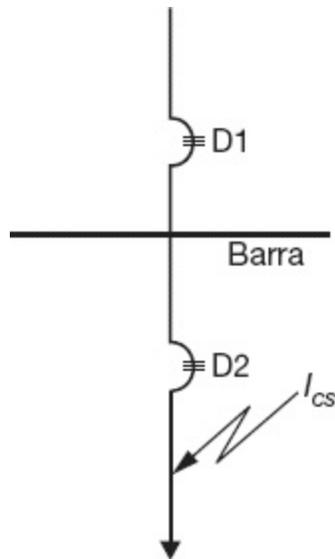
As correntes que caracterizam as ações das unidades térmicas e magnéticas dos disjuntores devem satisfazer as seguintes condições:

$$I_{ad1} \geq 1,25 \times I_{ad2} \quad (10.45)$$

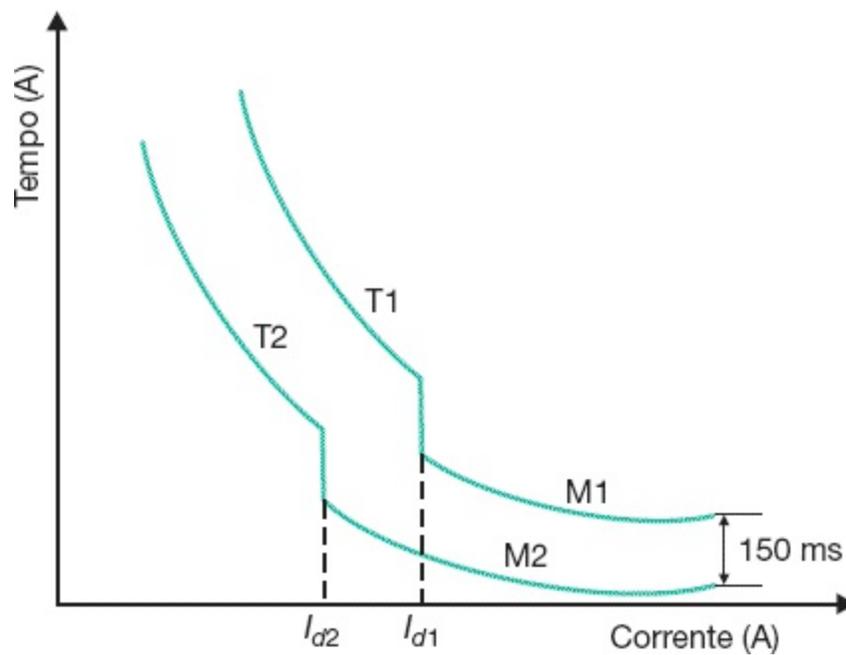
$I_{ad1}$  - corrente de atuação do relé eletromagnético do disjuntor D1;

$I_{ad2}$  - corrente de atuação do relé eletromagnético do disjuntor D2.

Quando as correntes de curto-circuito nos pontos de instalação dos disjuntores são bastante diferentes, de tal modo que a corrente de acionamento do disjuntor a montante do circuito seja superior à corrente de defeito no ponto de instalação do disjuntor a jusante (o mais próximo da carga), obtém-se uma boa seletividade por escalonamento de correntes, não sendo mais necessárias as verificações anteriormente explanadas.



**Figura 10.47** Posição dos disjuntores.



**Figura 10.48** Disjuntor em série com disjuntor.

Além do que já foi visto em termos de seletividade, deve-se estudar o caso particular de dois ou mais circuitos de distribuição em paralelo. Esta condição é favorável, já que as correntes de curto-circuito se dividem igualmente entre os ramos, quando estes apresentam impedâncias iguais.

Podem ser analisados dois casos mais conhecidos na prática:

**a) Duas alimentações iguais e simultâneas**

As curvas características dos disjuntores D1 e D2 não devem cortar a curva do disjuntor D3, conforme pode ser observado na [Figura 10.49](#), relativa à configuração da [Figura 10.50](#).

Como a corrente de curto-circuito é dividida pelos dois transformadores, as curvas dos relés D1 e D2 devem ser multiplicadas por dois somente na escala das correntes.

**b) Três alimentações iguais e simultâneas**

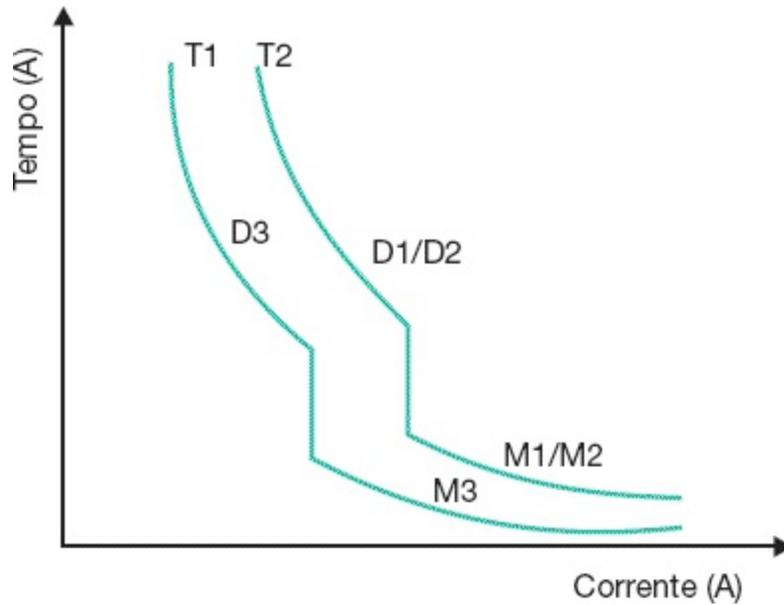
Conforme visto na [Figura 10.51](#), as mesmas considerações anteriores podem ser aplicadas adequadamente no caso.

### **10.2.8.3 Seletividade lógica**

Esse conceito de seletividade é mais moderno e surgiu em função dos novos dispositivos de proteção que o mercado oferece. Os relés digitais multifunção possibilitaram a aplicação desse novo conceito de seletividade. É aplicada em unidades de sobrecorrente de fase e de neutro ou terra, tanto em sistemas primários como secundários.

A seletividade lógica é mais facilmente aplicada em sistemas radiais, podendo ser desenvolvida em sistemas em anel, quando são utilizados relés de sobrecorrentes direcionais.

Para que se possa melhor entender o princípio da seletividade lógica, observar a [Figura 10.52](#) na qual são utilizadas unidades de sobrecorrentes digitais em diferentes níveis de barramento. Cada relé digital se conecta a outro por meio de um fio piloto, que tem função de conduzir o sinal lógico de bloqueio.



**Figura 10.49** Disjuntores para alimentação dupla.

Os princípios básicos de funcionamento da seletividade lógica podem ser resumidos a seguir com a ajuda da [Figura 10.52](#):

- A primeira proteção a montante do ponto de defeito é a única responsável pela atuação do dispositivo de abertura do circuito.
- As proteções situadas a jusante do ponto de defeito não receberão sinal digital de mudança de estado.

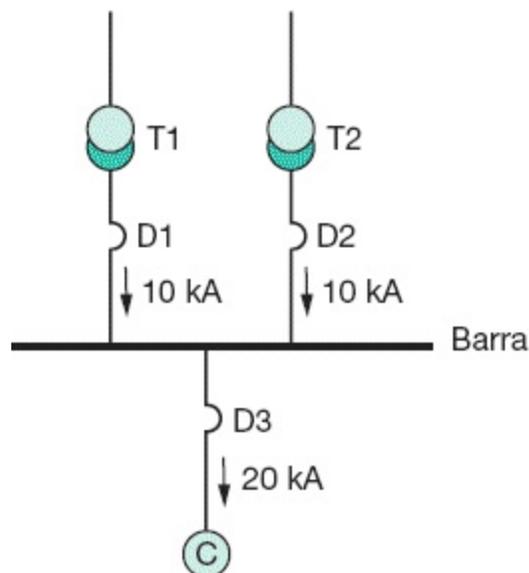


Figura 10.50 Alimentação dupla.

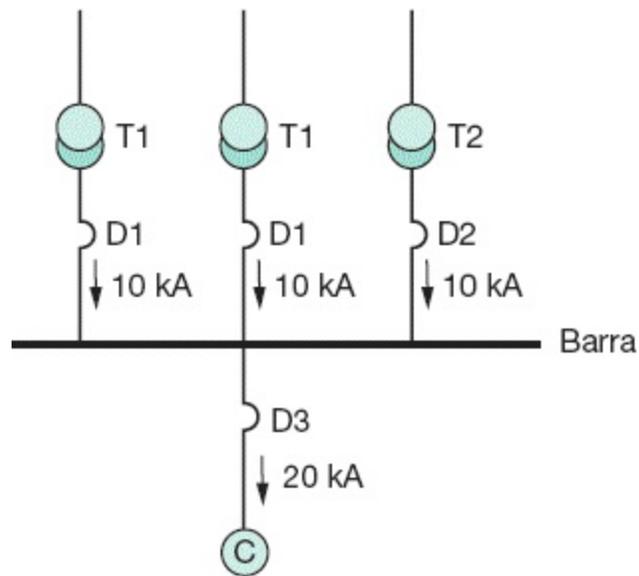


Figura 10.51 Alimentação tripla.

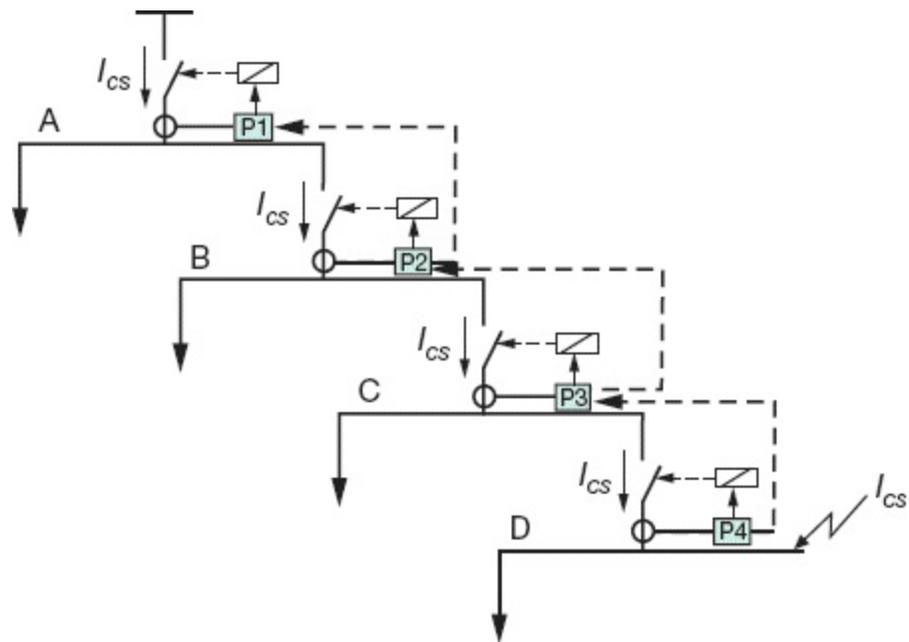


Figura 10.52 Seletividade lógica.

- As proteções situadas a montante do ponto de defeito receberão os sinais digitais de mudança de estado, para bloqueio ou para atuação.

- Cada proteção deve ser capaz de receber um sinal digital da proteção a sua jusante e enviar um sinal digital à proteção a montante e, ao mesmo tempo, acionar o dispositivo de abertura do circuito.
- As proteções são ajustadas com tempo de 50 a 100 ms.
  - Cada proteção é ajustada para garantir a ordem de bloqueio durante um tempo definido pelo procedimento da lógica da seletividade, cuja duração pode ser admitida entre 150 e 200 ms.

Adotando os princípios dos fundamentos anteriores e observando a [Figura 10.52](#), podem-se desenvolver os seguintes procedimentos para um curto-circuito na barra D, ou seja:

- A proteção P4 ordena o bloqueio da proteção P3 por meio do fio piloto de comunicação.
- Ao receber a ordem de bloqueio, a proteção P3 ordena o bloqueio da proteção P2 que, por sua vez, ordena o bloqueio da proteção P1.
- A proteção P4 faz atuar o dispositivo de abertura do circuito após um tempo de disparo  $T_{p4}$ , que deve ser igual ao tempo de abertura do dispositivo de interrupção mais o tempo desejado para ajuste da proteção P4, que normalmente varia entre 50 e 100 ms.
- Adota-se normalmente o tempo de 50 ms para a proteção mais próxima do ponto de defeito, ajustando-se as demais proteções para um tempo de 100 ms.
- Para uma eventual falha da proteção P4, a abertura do dispositivo de proteção de retaguarda seria solicitada a atuar — no caso, a proteção P3 —, após o tempo de duração da ordem de bloqueio emitido por P4, normalmente fixado entre 150 e 200 ms, cujo valor é ajustado na proteção responsável que envia o sinal de ordem de bloqueio.

Ainda analisando a [Figura 10.52](#), para uma falta na barra C, a seletividade lógica assume as seguintes condições:

- A proteção P4 não recebe nenhuma informação das demais

unidades.

- A proteção P2 recebe ordem de bloqueio da proteção P3, que ordena o bloqueio de P1.
- Com a ordem de bloqueio da proteção P2, a proteção P3 faz atuar o dispositivo de abertura correspondente em um tempo dado pelo tempo de abertura do dispositivo de interrupção.

### 10.2.9 Proteção de motores elétricos

Os motores elétricos, peças fundamentais de um projeto de instalação elétrica industrial, devem merecer cuidados especiais quanto à proteção individual ou em grupo a eles aplicada.

Os motores elétricos, quando submetidos a condições anormais, durante o período de funcionamento devem ser imediatamente separados do circuito de alimentação. Assim, essas anormalidades podem ser divididas em diferentes tipos, sendo cada uma delas prejudicial à máquina, conforme o tempo de duração:

- sobrecarga contínua;
- sobrecarga intermitente;
- redução da tensão de alimentação;
- tensão de alimentação elevada;
- rotor bloqueado;
- temperatura ambiente elevada;
- circulação deficiente do meio circulante;
- variação da frequência da rede;
- funcionamento com correntes desequilibradas;
- funcionamento com ausência de uma fase.

Como já foi estudada anteriormente, a proteção dos motores tinha por base o uso dos relés de sobrecarga bimetálicos. Apesar de ser a proteção mais empregada em motores de utilização industrial, o mercado oferece várias

outras opções a seguir analisadas.

### **a) Relé falta de fase**

Esse dispositivo deve ser aplicado sempre após qualquer outro dispositivo que possa operar de forma monopolar, já que ele é sensível à ausência de fase do sistema, desde a fonte até o seu ponto de instalação. Normalmente, atua sobre o contator de manobra do motor.

### **b) Relé digital de proteção multifunção**

São relés numéricos ligados a transformadores de corrente conectados à rede de alimentação do motor. A corrente de entrada é constantemente monitorada por um microprocessador. Oferecem proteção ao motor contra sobrecorrente, falta de fase, inversão de fase, desbalanceamento de fase e rotor travado.

### **c) Sondas térmicas e termistores**

São detectores térmicos dependentes da temperatura, constituídos de lâminas bimetálicas que acionam um contato normalmente fechado. São ligadas em série com o circuito de comando do contator. Os termistores são também detectores térmicos, compostos de semicondutores, cuja resistência varia em função da temperatura, podendo ser ligados em série ou em paralelo com o circuito de comando do contator. São localizados internamente ao motor, embutidos nos enrolamentos. Podem ser do tipo PTC ou NTC.

Os protetores PTC apresentam coeficientes positivos de temperatura muito elevados e são instalados nas cabeças dos bobinados correspondentes, ao lado da saída do ar refrigerante. Quando a temperatura do enrolamento ultrapassa a temperatura máxima permitida para o nível de isolamento considerado, os detectores aumentam abruptamente sua resistência elétrica, provocando a atuação de um relé auxiliar responsável pela abertura da chave de manobra do motor.

Os protetores NTC apresentam coeficientes de temperatura negativa,

isto é, quando aquecidos a uma temperatura superior à máxima permitida, sua resistência reduz-se abruptamente, provocando a atuação de um relé auxiliar responsável pela abertura da chave de manobra do motor.

Os detectores PTC são utilizados em motores de fabricação seriada quando é conhecida previamente a imagem térmica do motor antes de sua fabricação (motores de fabricação sob encomenda).

Apesar de aparentemente serem elementos de proteção de alta confiabilidade, não são eficientes quando os motores estão submetidos a determinadas condições de trabalho, tais como rotor travado, desequilíbrio de corrente e partidas prolongadas.

Como os termistores são instalados no estator, o fluxo de ar refrigerante que passa no entreferro impede a transferência do calor do rotor para o lado do estator, mascarando a avaliação dos termistores. Desta forma, o rotor pode sofrer aquecimento elevado sem que o termistor seja sensibilizado. A eficiência dos termistores está associada à supervisão da temperatura do estator de longa duração.

### **10.2.9.1 Sobrecarga contínua**

Nos motores elétricos, geralmente o estado de aquecimento estacionário é atingido depois de algumas horas de funcionamento contínuo, o que lhes garante uma vida útil de pelo menos 20 anos. Para 10 % de aquecimento adicional, a vida do motor pode cair de 20 para 10 anos.

A proteção com relés térmicos de sobrecarga é apropriada para esse tipo de comportamento operacional dos motores, desde que a temperatura ambiente seja a mesma para o relé térmico e o motor.

### **10.2.9.2 Sobrecarga intermitente**

Caracteriza-se por partidas e frenagens com frequência demasiada, como no caso dos guindastes.

A proteção com relés térmicos torna-se adequada à medida que se conheça exatamente o regime de sobrecarga do motor, ajustando-se seu valor de atuação de forma a não interferir na operação da máquina e observando-se que a temperatura do enrolamento do motor não seja excedida pela sobrecarga que o relé térmico permitiria.

Se não há informações seguras do regime de operação do motor, o uso da proteção térmica tenderia a prejudicar operacionalmente a máquina, sendo, neste caso, mais conveniente suprimir a referida proteção, evitando-se, assim, desligamentos intempestivos.

### **10.2.9.3 Redução da tensão de alimentação**

Considerando a instalação do motor em um ponto do circuito em que a tensão está abaixo das condições nominais previstas, as características destes são alteradas de acordo com os seguintes itens:

- O conjugado de partida diminui com o quadrado da tensão aplicada.
- A corrente de partida cai proporcionalmente à redução de tensão.
- A corrente a plena carga aumenta.
- A corrente rotórica aumenta na mesma proporção.
- O fator de potência aumenta.
- As perdas estatóricas e rotóricas, em geral, também aumentam, aquecendo o enrolamento.
- A velocidade diminui, acarretando deficiências indesejáveis de ventilação.

Devido ao aumento da corrente de carga, o relé térmico pode ser sensibilizado e proteger adequadamente o motor, desde que não haja interferência da temperatura do meio ambiente. A proteção com sonda térmica e termistor também é eficaz. Uma alternativa recomendada é o uso de relés de subtensão comandando o dispositivo de abertura do motor.

#### **10.2.9.4 Tensão de alimentação elevada**

Considerando a instalação do motor em um ponto do circuito em que a tensão está acima das condições nominais previstas, as características deste são alteradas de acordo com os seguintes itens:

- O conjugado de partida aumenta com o quadrado da tensão.
- A corrente de plena carga diminui.
- O conjugado máximo aumenta com o quadrado da tensão.
- O fator potência diminui.
- As perdas rotóricas, em geral, e as perdas estatóricas diminuem.
- A velocidade aumenta ligeiramente, melhorando as condições de troca de calor.

Os esquemas de proteção convencionais não são suficientes para desligar o motor da rede. Neste caso, é utilizado frequentemente o relé de sobretensão, o que só se justifica em motores de potência elevada.

Quanto aos motores recuperados sem resguardar as características originais, e dentro de técnicas inadequadas, esta e outras condições podem ser drasticamente alteradas, não mais o motor respondendo às condições previstas em norma, o que é muito comum ocorrer em motores recuperados nas oficinas de reparo em instalações industriais.

#### **10.2.9.5 Rotor bloqueado**

Embora o fusível do tipo limitador de corrente (diazed e NH) não seja designado para esta tarefa, pode oferecer a proteção desejada. Os relés térmicos são bastante eficientes, condicionados à temperatura ambiente, como anteriormente mencionado. As sondas térmicas e os termistores não são proteções seguras para o rotor.

#### **10.2.9.6 Temperatura ambiente elevada**

A proteção que oferece mais segurança é o uso das sondas térmicas e dos termistores. A proteção com relés térmicos depende da localização dos relés, isto é, se estão no mesmo ambiente do motor ou em outro ambiente.

#### **10.2.9.7 Circulação deficiente do meio refrigerante**

Caracteriza-se, normalmente, pela falta de ventilação natural ou forçada do ambiente em que o motor está operando. A proteção adequada é dada por meio de sondas térmicas e termistores.

#### **10.2.9.8 Variação da frequência da rede**

Apesar de pouco comum nos sistemas de distribuição das concessionárias de energia elétrica em regime normal de operação, as variações de frequência originam as seguintes alterações nas características dos motores:

- A potência praticamente não varia.
- O conjugado varia inversamente com a frequência.
- A velocidade angular e as perdas variam na mesma proporção.

Se o motor for submetido a uma frequência inferior à sua nominal, como a velocidade diminui, conseqüentemente diminui a taxa de dissipação de calor, sobreaquecendo os enrolamentos, perante carga nominal. Nestas condições, podem ser empregadas as sondas térmicas e termistores. Se a frequência for superior à nominal, então o motor não sofrerá nenhum prejuízo de ordem térmica.

#### **10.2.9.9 Funcionamento com correntes desequilibradas**

Como já foi explanado no Capítulo 6, o desequilíbrio das correntes de fase provoca efeitos térmicos danosos ao motor, quando este opera com carga próxima ao seu valor nominal ou superior. Neste caso, o campo de sequência negativa induz correntes nas barras do rotor com a frequência duas vezes

superior ao valor nominal, ou seja, 120 Hz. Devido ao efeito pelicular da corrente nas barras do rotor, este sofre um aquecimento devido à dissipação térmica correspondente. Nesta condição, o estator não seria afetado. A proteção com relés térmicos ou de imagem térmica acoplada aos terminais do estator não seria sensibilizada, enquanto a temperatura do rotor poderia ultrapassar os limites de sua classe de isolamento. Nem mesmo as lâminas térmicas e os termistores seriam sensibilizados, expondo o motor a riscos de danos irrecuperáveis, iniciando o processo no rotor e se desenvolvendo no estator.

A proteção que satisfaz a essa condição operacional se restringe ao uso do relé de reversão de fase ou balanceamento de fase, que corresponde a função 46 ANSI.

#### **10.2.9.10 Funcionamento com ausência de uma fase**

A ausência de uma fase nas instalações elétricas industriais pode trazer sérias consequências aos motores em operação, desde que os dispositivos de proteção não atuem adequadamente. Embora alguns tipos de relés bimetálicos sejam responsáveis pela proteção dos motores submetidos a esta condição, em algumas circunstâncias a proteção é falha, não oferecendo a segurança necessária.

Em geral, a falta de fase afeta consideravelmente os enrolamentos, não importando se os motores estejam ligados em estrela ou triângulo. A seguir, serão analisados os dois tipos possíveis de ligação dos motores de indução, relacionando-os ao evento de falta repentina de uma das fases do circuito.

##### **a) Ligação em estrela**

A [Figura 10.53](#) representa um motor ligado em estrela, operando em condições normais. A [Figura 10.54](#) mostra a ligação do mesmo motor, sem uma das fases de alimentação.

Como se sabe, nos motores ligados em estrela a corrente que circula em cada um dos enrolamentos é a mesma que percorre cada uma das fases de alimentação. Rompendo-se a fase S, esta situação se altera: a corrente nos enrolamentos aumenta de valor, correspondendo à mesma elevação nas fases de alimentação.

A proteção mais eficiente do motor pode ser feita por meio de sondas térmicas e termistores.

### **b) Ligação em triângulo**

A [Figura 10.55](#) representa um motor ligado em triângulo, operando em condições normais. A [Figura 10.56](#) mostra a ligação do mesmo motor, quando uma das fases de alimentação é desconectada.

Comparando-se as duas configurações, pode-se perceber que a corrente que circula em quaisquer das bobinas do motor, ligado em estrela, é a mesma que atravessa o dispositivo de proteção instalado no circuito alimentador, proporcionando condições mais favoráveis de atuação do referido dispositivo, enquanto na configuração em triângulo, a distribuição das correntes nos bobinados, durante uma falta de fase, é mais complexa e depende essencialmente da porcentagem do conjugado de carga nominal com que o motor trabalha neste instante.

Uma maneira mais eficaz de proteger o motor ligado em triângulo contra falta de fase, utilizando dispositivos térmicos, é instalá-los de modo que fiquem em série com cada bobinado. Neste caso, o motor deverá ter os seis terminais de ligação acessíveis.

Os relés de proteção para falta de fase são de largo uso e dão segurança adequada ao motor, independentemente do tipo de ligação adotada. Devido ao seu preço, porém, somente devem ser empregados em unidades de maior potência ou em agrupamentos de motores.

Conforme já foi analisado no Capítulo 6, se o motor está operando a uma carga igual ou inferior a 57,76 %, não será afetado pela ausência de fase.

Para carregamentos superiores, o motor deve estar protegido adequadamente por relés térmicos, sondas térmicas etc. Na primeira condição, isto é, a 57,76 % da carga nominal, a corrente que irá circular pelo relé e pelas bobinas do motor será igual à corrente nominal. A partir deste valor, a corrente de linha inicia seu processo de sensibilização do relé de proteção.

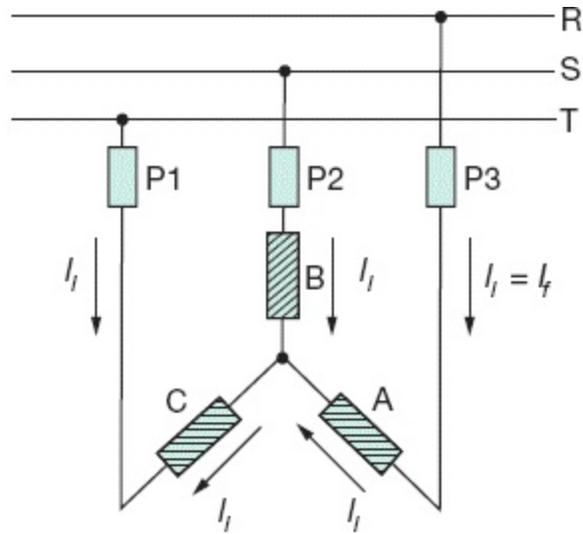
### 10.3 Proteção de sistemas primários

Segundo a NBR 14039, é considerado proteção geral de uma instalação de média tensão o dispositivo situado entre o ponto de entrega de energia e a origem da instalação.

A norma estabelece duas condições básicas:

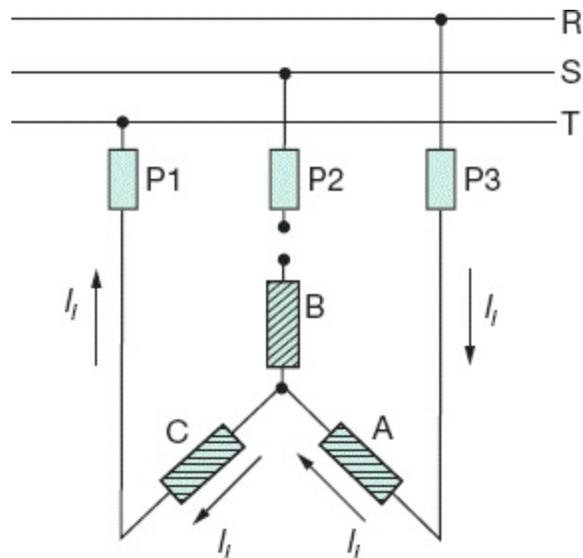
#### a) Instalação com capacidade instalada igual ou inferior a 300 kVA

Se a capacidade da subestação unitária for igual ou inferior a 300 kVA, a proteção geral na média tensão deve ser realizada por meio de um disjuntor acionado por relés secundários dotados de unidades instantâneas (50) e temporizadas (51) de fase e de neutro. Pode também ser empregada chave seccionadora e fusível, sendo, neste caso, obrigatória a utilização de disjuntor como proteção geral do lado de baixa tensão. Não são aceitos relés com funcionamento com retardo a líquido.



$I_f$  = corrente de fase do enrolamento do motor;  $I_l$  = corrente de linha.

**Figura 10.53** Ligação em estrela.



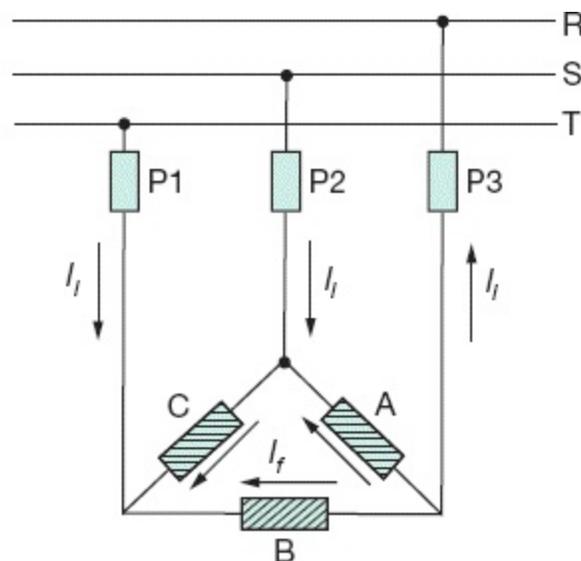
**Figura 10.54** Ligação em estrela com ausência de uma fase.

### b) Instalação com capacidade superior a 300 kVA

Se a capacidade da subestação for superior a 300 kVA, a proteção geral na média tensão deve ser realizada exclusivamente por meio de um disjuntor acionado por relés secundários dotados de unidades instantâneas (50) e temporizadas (51) de fase e de neutro.

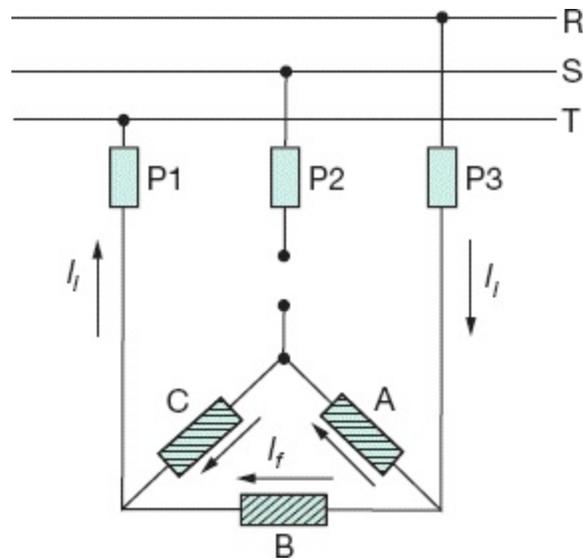
Dessa forma, fica vedada, pela NBR 14039, a utilização de relés de ação direta na proteção geral da subestação. No entanto, o projetista pode utilizar relés de ação direta, bem como chave seccionadora acionada por fusível incorporada à proteção de média tensão em ramais que derivam do barramento primário da subestação após a proteção geral. Atualmente, existem milhares de relés de ação direta com retardo fluidodinâmico e eletrônico instalados em subestações de consumidor.

A seguir, será realizado um estudo dos dispositivos de proteção de média tensão utilizando tanto relés primários de ação direta, devido ainda à sua existência em grande escala, como relés secundários em instalações industriais existentes. Aconselha-se que esses relés sejam substituídos por relés digitais, obtendo-se uma proteção de melhor qualidade. Deve-se alertar também que a substituição dos relés primários de ação direta, em geral, implica a substituição dos disjuntores de média tensão, acarretando custos nem sempre entendidos pela administração da indústria.



$I_f$  = corrente de fase do enrolamento do motor;  $I_l$  = corrente de linha.

**Figura 10.55** Ligação em triângulo.



**Figura 10.56** Ligação em triângulo com ausência de uma fase.

### 10.3.1 Relé primário de ação direta

São empregados mais frequentemente dois tipos:

#### 10.3.1.1 Relé fluidodinâmico

Consiste em um dispositivo provido de uma bobina formada de grossas espiras de condutores de cobre, pela qual passa a corrente do circuito primário.

O relé atua pelo deslocamento vertical de uma âncora móvel, liberando uma alavanca que provoca o desengate do mecanismo do disjuntor e sua abertura. O rearmamento do relé é automático, em geral. A intervenção do relé se dá segundo o gráfico da [Figura 10.57](#), no qual são mostradas as curvas características do relé RM2F. A [Tabela 10.13](#) fornece suas faixas de regulação e os valores nominais da corrente.

Cabe alertar que esses relés possuem, na parte inferior, um recipiente contendo fluido que provoca sua temporização. Se, por esquecimento, o disjuntor for energizado sem o devido fluido no recipiente do relé, não há

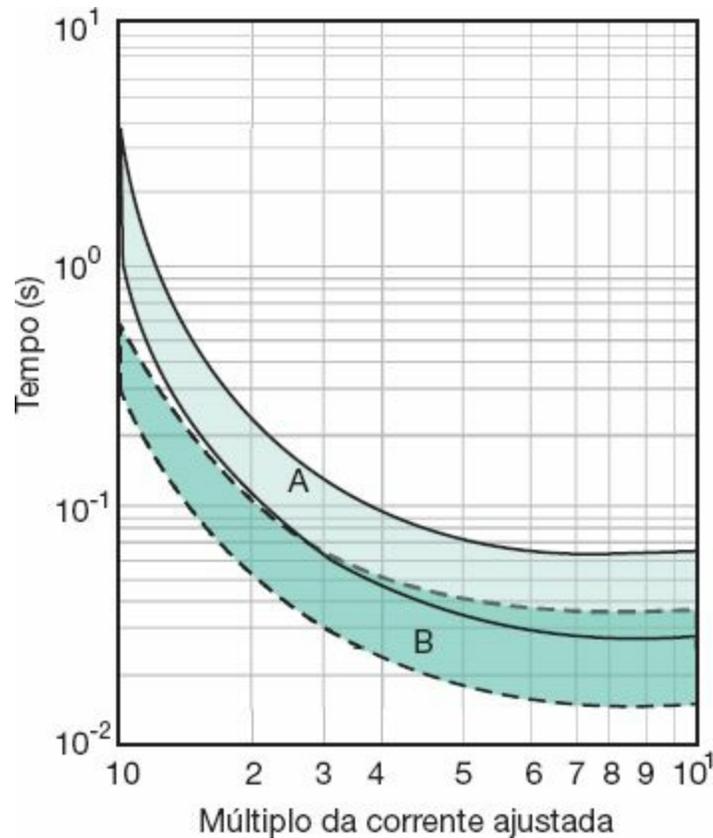
como sustentar a ligação, pois a corrente de magnetização do transformador sensibiliza o relé, provocando o desligamento do disjuntor.

Pode-se notar, pelo gráfico da [Figura 10.57](#), que existem duas faixas de atuação, correspondendo às curvas A e B, respectivamente, para diafragmas fechado e aberto.

Deve-se esclarecer que, na base do pistão acoplado à âncora móvel do relé, existe uma arruela contendo alguns orifícios (diafragma). A partir da rotação desta arruela, em torno do seu eixo, os orifícios podem ficar abertos ou fechados, coincidindo ou não com orifícios idênticos na base do pistão, o que corresponde a uma menor ou maior temporização.

#### 10.3.1.1.1 Regulação

Os relés fluidodinâmicos possuem uma chapinha que contém os diversos valores de corrente da faixa de regulação. O ponto de regulação é feito ajustando-se o cilindro que contém o fluido temporizador até que a marca, nesta indicada, coincida com o valor da corrente desejada, contida na escala.



**Figura 10.57** Curvas de atuação do relé RM2F

A corrente de regulação desses relés, quando utilizados no disjuntor geral da subestação, é normalmente ajustada pela Equação (10.46):

$$I_a = (1,3 \text{ a } 1,5) \times I_{tr} \text{ (A)} \quad (10.46)$$

$I_a$  - corrente de regulação, em A;

$I_{tr}$  - soma das correntes nominais primárias dos transformadores da subestação, em A.

Os relés fluidodinâmicos são aparelhos de custo relativamente baixo e mecanicamente robustos. Para maiores detalhes, consultar a Seção 9.3.10.

### 10.3.1.2 Relés de sobrecorrente estáticos

São dispositivos fabricados de componentes estáticos montados em caixa

metálica blindada para evitar a interferência do campo magnético dos condutores de alta tensão, em cujos bornes dos disjuntores esses dispositivos são instalados.

Esses relés dispensam alimentação auxiliar, o que torna sua aplicação muito prática. O relé RPC-1 é um exemplo desse tipo de relé, cujas características técnicas são exibidas na [Tabela 10.14](#). O ajuste de suas funções é efetuado por seletores localizados em seu painel frontal, cada um deles contendo uma escala adequada. Para melhor entendimento, observar a [Figura 9.30](#), que mostra o relé em perfil.

**Tabela 10.13** Valores de ajustes dos relés RM2F

Corrente nominal	Faixa de ajuste	Corrente nominal	Faixa de ajuste
(A)	(A)	(A)	(A)
0,83	0,5-1,0	42,00	25,0-50,0
1,70	1,0-2,0	70,00	40,0-80,0
2,50	1,5-3,0	100,00	60,0-120,0
4,20	2,5-5,0	167,00	100,0-200,0
7,00	4,0-8,0	250,00	150,0-300,0
10,00	6,0-12,0	420,00	250,0-500,0
17,00	10,0-20,0	500,00	300,0-600,0
25,00	15,0-30,0		

A norma NBR 14039 também veda a utilização desses relés como proteção geral de subestações de média tensão. Porém, existem milhares

desses relés instalados em subestações industriais, no Brasil.

### 10.3.1.2.1 Características construtivas

Basicamente, esses relés são constituídos de três módulos, tal como se apresenta o relé RPC-1:

**Tabela 10.14** Características elétricas dos relés RPC-1

Características elétricas	Unidade	Valores nominais						
Corrente nominal	A	5	10	20	40	80	160	320
Corrente térmica	kA	2,0	3,5	7,5	15	15	15	15
Corrente dinâmica (crista)	kA	9,0	16	34	68	79	79	79
Tensão máxima	kV	38						
Frequência	Hz	40-65						
Temperatura de operação	°C	-5 + 50						
Consumo	VA	2						
Energia para desarme	Nm	0,2						
Sobrecurso de	mm	3						

### a) Transformadores de corrente

Cada unidade possui um transformador de corrente que determina a corrente nominal do relé, que deve ser compatível com a corrente máxima do circuito a ser protegido.

### b) Circuitos eletrônicos

São compostos de um conjunto de placas de elementos estáticos, onde se processa toda a lógica de atuação do relé.

### c) Dispositivos de saída

São formados por um sistema mecânico que atua mediante um sinal elétrico enviado pelo processador lógico do relé.

Esses relés são montados em cada polo do disjuntor, de preferência um conjunto de três unidades, podendo, no entanto, ser instaladas, no mínimo, duas unidades. Devido à vibração do disjuntor no momento da desconexão de seus terminais, é aconselhável fixar o relé fora dos terminais do disjuntor, mas próximo a estes, fazendo a conexão elétrica por meio de um condutor flexível.

A característica de atuação dos relés RPC-1 não é afetada pela umidade, poeira e temperatura do meio ambiente no mesmo nível em que é afetado o relé fluidodinâmico, em virtude da semiexposição do líquido de temporização que sofre aquela unidade.

#### 10.3.1.2.2 Características elétricas

Esses relés são dotados de unidades de atuação instantânea (50) e

temporizada (51). A grande vantagem de sua utilização é a ausência de qualquer fonte de alimentação auxiliar, como o conjunto retificador-banco de baterias, indispensável aos relés de ação indireta. Alia-se a esta vantagem o bom grau de precisão de que são dotados no desempenho de suas funções. O relé RPC-1 possui duas características básicas de proteção:

#### a) Curva de tempo definido

Se a corrente supera o valor ajustado no relé, é acionado um contador que define um tempo de retardo no sistema de desligamento. Se a corrente de defeito cessa antes de ser alcançado o tempo ajustado, o relé retorna ao seu estado de repouso e fica preparado para um novo evento. Logo, o relé atua com base em uma curva de tempo definido.

Com base no ajuste dessas funções, torna-se fácil executar um projeto de coordenação de um sistema utilizando vários relés em série. Isto é muito útil em instalações industriais de médio porte, nas quais são construídas várias subestações de alta tensão, uma em cada centro de carga de importância, todas alimentadas de um único ponto de carga, no caso o posto de medição e de proteção geral.

Para se ajustar o relé RPC-1, devem-se seguir estes passos:

- Corrente nominal do relé

Com base na corrente máxima admitida para o sistema, adota-se o relé com corrente nominal de acordo com as seguintes faixas:

- entre 6 e 10 A:  $I_n = 5$  A;
- entre 11 e 20 A:  $I_n = 10$  A;
- entre 22 e 40 A:  $I_n = 20$  A;
- entre 43 e 80 A:  $I_n = 40$  A;
- entre 88 e 160 A:  $I_n = 80$  A;
- entre 176 e 320 A:  $I_n = 160$  A.

- Corrente de ajuste da unidade temporizada

É o valor da corrente ajustada no potenciômetro do relé e acima da qual este deverá atuar. O tempo para o disparo da unidade temporizada independe do valor do módulo da corrente de defeito, desde que supere o nível de ajuste realizado. Além disso, para que se efetue o disparo, a corrente de defeito deve perdurar por um tempo superior ao valor ajustado no relé. Quando se utiliza a unidade temporizada, normalmente se bloqueia a unidade instantânea ou se ajusta seu valor a um nível acima daquele previsto no sistema. O ajuste da unidade temporizada é dado pela Equação (10.47):

$$I_{at} = K_r \times I_{nr} \quad (10.47)$$

$I_{at}$  - corrente de acionamento da unidade temporizada;

$K_r$  - constante de multiplicação ajustada no potenciômetro do relé, variando de 1 a 2, em incrementos de 0,2;

$I_{nr}$  - corrente nominal do relé, em A.

- Corrente de ajuste da unidade instantânea

Esta unidade efetua sua atuação sem nenhum retardo de tempo intencional, a não ser o da própria inércia peculiar a qualquer dispositivo de proteção. O seu valor de ajuste é dado pela Equação (10.48):

$$K_i = \frac{I_{cs}}{K_r \times I_{nr}} \quad (10.48)$$

O valor da corrente de ajuste vale:

$$I_{ai} = K_i \times I_{at} \quad (10.49)$$

$I_{at}$  - corrente de ajuste da unidade instantânea.

As Equações (10.50) e (10.51) fornecem os valores limites de ajuste da corrente instantânea.

$$\text{Valor m\u00ednimo: } I_{imi} \geq 4 \times I_{at} \quad (10.50)$$

$$\text{Valor m\u00e1ximo: } I_{ima} < I_{cs} \quad (10.51)$$

$I_{imi}$  - ajuste m\u00ednimo da corrente da unidade instant\u00e2nea;

$I_{ima}$  - ajuste m\u00e1ximo da corrente da unidade instant\u00e2nea;

$I_{cs}$  - corrente de curto-circuito sim\u00e9trico, valor eficaz.

A corrente de acionamento da unidade instant\u00e2nea \u00e9 dada em m\u00faltiplos da corrente ajustada para a unidade temporizada. O valor de  $I_{ima}$  n\u00e3o deve ser superior a  $18 \times I_{at}$ .

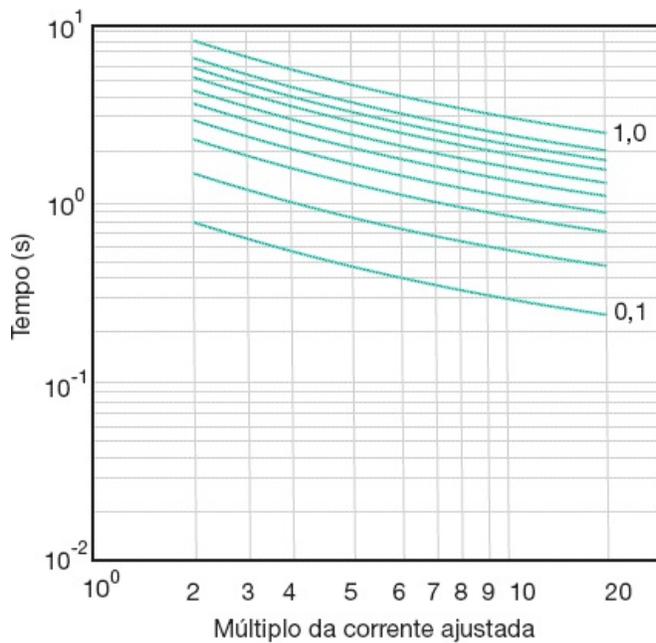
- Ajuste da temporiza\u00e7\u00e3o

O ajuste do tempo de disparo \u00e9 fun\u00e7\u00e3o do estudo de coordena\u00e7\u00e3o que se deseja com os demais dispositivos de prote\u00e7\u00e3o localizados a jusante ou a montante. Conforme se observa na [Figura 9.30](#), h\u00e1 dois seletores para se ajustar o tempo, sendo um para ajustes inteiros e o outro para as fra\u00e7\u00f5es.

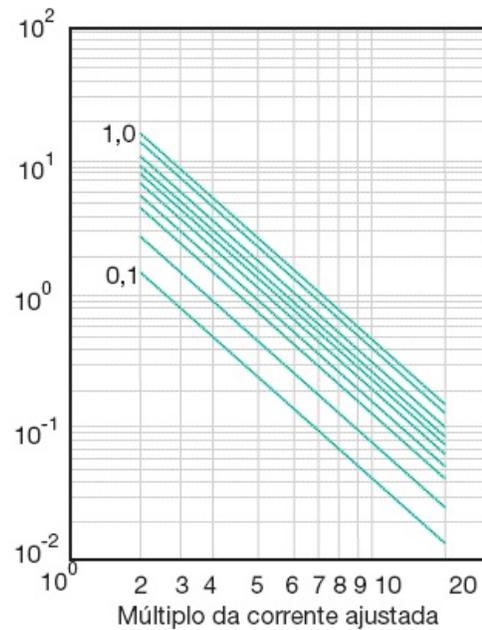
## **b) Curva de temporiza\u00e7\u00e3o inversa**

Nos rel\u00e9s de temporiza\u00e7\u00e3o inversa, quando se define o valor da corrente de ajuste, conseq\u00fcentemente o tempo de disparo do rel\u00e9 fica tamb\u00e9m definido para cada corrente que flui pelo rel\u00e9.

Existem v\u00e1rios tipos de curva de temporiza\u00e7\u00e3o inversa com diferentes n\u00edveis de inclina\u00e7\u00e3o, o que define o n\u00edvel de temporiza\u00e7\u00e3o do rel\u00e9, conforme pode ser visto na [Figura 10.58\(a\)](#) e (b).



(a) Normal inversa



(b) Extremamente inversa

**Figura 10.58** Característica tempo  $\times$  corrente do relé RPC-1.

### Exemplo de aplicação (10.13)

Dimensionar e ajustar os relés RPC-1 instalados em uma indústria mostrada no esquema elétrico simplificado da Figura 10.59, cujos dados são:

Tensão primária: 13,8 kV.

Tensão secundária: 380 V.

Potência simétrica de curto-circuito no ponto de entrega de energia: 31 MVA.

Os relés estão montados nos polos dos disjuntores D1 e D2, em número de três para cada disjuntor. Será empregado o relé de tempo definido.

#### a) Corrente de carga do transformador de 1.500 kVA

Deve-se considerar que a corrente máxima seja 150 % da carga nominal do transformador.

Corrente nominal do relé acoplado ao disjuntor D2

Considerando a corrente da carga:

$$I_{tr} = \frac{1.500}{\sqrt{3} \times 13,80} = 62,7 \text{ A}$$

Considerando a corrente de curto-circuito:

$$I_{cs} = \frac{31.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 1.297 \text{ A}$$

Corrente de ajuste da unidade temporizada

$$I_{at} = 1,5 \times 62,7 = 94,05 \text{ A} \quad \rightarrow \quad I_{nr} = 80 \text{ A}$$

$$K_r = \frac{I_{at}}{I_{nr}} = \frac{94,05}{80} = 1,17 \quad \rightarrow \quad K_r = 1,2$$

Logo, a corrente de ajuste vale:

$$I_{at} = I_{nr} \times K_r = 80 \times 1,2 = 96 \text{ A}$$

O ajuste do tempo deve ser função dos tempos de coordenação do sistema, não expressos neste exemplo. Se se optar pelo ajuste da unidade temporizada, pode-se fazer  $K_i = \infty$ , que corresponde a  $I_{ima} = \infty$ . Adota-se, neste exemplo, o valor da temporização do relé de  $T_{ar} = 0,5 \text{ s}$ .

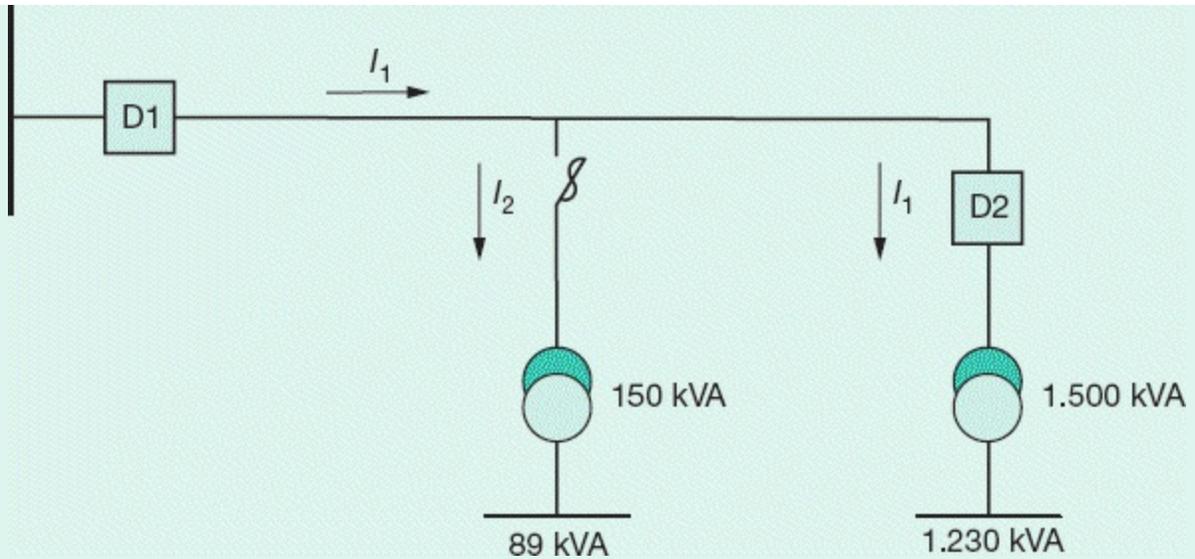
Corrente de ajuste da unidade instantânea

Se não for considerada a hipótese anterior, tem-se:

$$K_i = \frac{1.296}{1,2 \times 80} = 13,5 \quad \rightarrow \quad K_i = 11 \text{ valor ajustado, em geral, entre 15 e 30 \%}$$

Logo, a corrente de ajuste vale:

$$I_{ima} = 11 \times 96 = 1.056 \text{ A}$$



**Figura 10.59** Esquema elétrico.

$$I_{ima} < I_{cs} \text{ (condição satisfeita)}$$

$$I \geq 4 \times I_{at} \text{ (valor mínimo)}$$

$$I_{imi} \geq 4 \times 96 \geq 384 \text{ A}$$

$$I_{ima} < 18 \times 96 < 1.728 \text{ A}$$

Verificação da capacidade de curto-circuito do relé

Para verificar se o relé suporta térmica e dinamicamente a corrente de curto-circuito, tem-se:

$$I_{cs} = I_{te} = 1.296 \text{ kA (para } I_s)$$

$$I_{ter} = 15 \text{ kA (Tabela 10.14)}$$

Logo,  $I_{ter} > I_{te}$  (condição satisfeita)

$$I_{di} = \sqrt{2} \times F_a \times I_{cs}$$

$$F_a = 1,3 \text{ (fator de assimetria admitido)}$$

$$I_{di} = \sqrt{2} \times 1,3 \times 1.296 = 2.382 \text{ A} = 2,38 \text{ kA}$$

$$I_{din} = 79 \text{ kA (Tabela 10.14)}$$

Logo,  $I_{din} > I_{di}$  (condição satisfeita).

Deixa-se para o leitor o ajuste da proteção do disjuntor D1.

### 10.3.2 Relés secundários de sobrecorrente digitais

Com o advento da inteligência artificial nas diferentes atividades da sociedade atual, foram utilizados no Brasil, em meados da década de 1980, os primeiros relés concebidos com memória de dados.

O relé deixou apenas de ser um elemento que exerce sua atividade de proteção e passou a armazenar informações e ser capaz de se interligar com um computador programado para receber essas informações e remeter ordens baseadas nelas.

Essa tecnologia permitiu que os sistemas elétricos, antes operando de forma *burra*, fossem dotados de programas *inteligentes*, que substituíssem muitas atividades operacionais desenvolvidas pelo homem. É o caso prático das subestações digitalizadas.

Aqui, é necessário explicar o que significa sistema automatizado e sistema digitalizado. Diz-se que um sistema elétrico de uma subestação está *automatizado*, por exemplo, quando os relés de proteção são do tipo eletromecânico, eletrônico e até mesmo relés digitais e aos quais (somente os relés eletromecânicos e eletrônicos) são acoplados transdutores que se conectam a um computador que tem a responsabilidade de processar as informações de estado e as grandezas elétricas que chegam aos referidos

relés, podendo o computador retornar com uma ordem de disparo para os disjuntores correspondentes ou sinalização luminosa e/ou sonora no quadro de comando. O conjunto relé-transdutor não tem capacidade de armazenar informação. O transdutor apenas transforma valores de corrente, tensão potência etc. (valores analógicos) em sinais elétricos reconhecíveis pelo computador (sinais digitais). Quando se diz que um sistema elétrico está *digitalizado*, entende-se que todos os relés aplicados são do tipo numérico e que os disjuntores e, em geral, as chaves de abertura têm comando motorizado submetido a um programa operacional dedicado.

As vantagens dos relés digitais sobre os eletromecânicos podem assim ser resumidas:

- Conexão com um sistema de informação central que pode controlar remotamente diferentes partes do sistema elétrico, como, por exemplo, várias subestações e as linhas de transmissão associadas.
- Armazenamento de informações antes, durante e após cada evento do sistema elétrico.
- Reduzido espaço ocupado nos painéis de comando.
- Ajuste das características operacionais dos relés sem desligá-los do sistema.
- Ajuste das características operacionais dos relés de pontos remotos.
- Alta confiabilidade proporcionada por um sistema de autossupervisão.

A seguir, serão avaliados os vários aspectos técnicos e características operacionais desses equipamentos:

#### **a) Aspectos construtivos**

Cada relé é constituído de uma unidade extraível, no interior da qual estão acomodados todos os componentes para:

- Aquisição e avaliação das medidas.

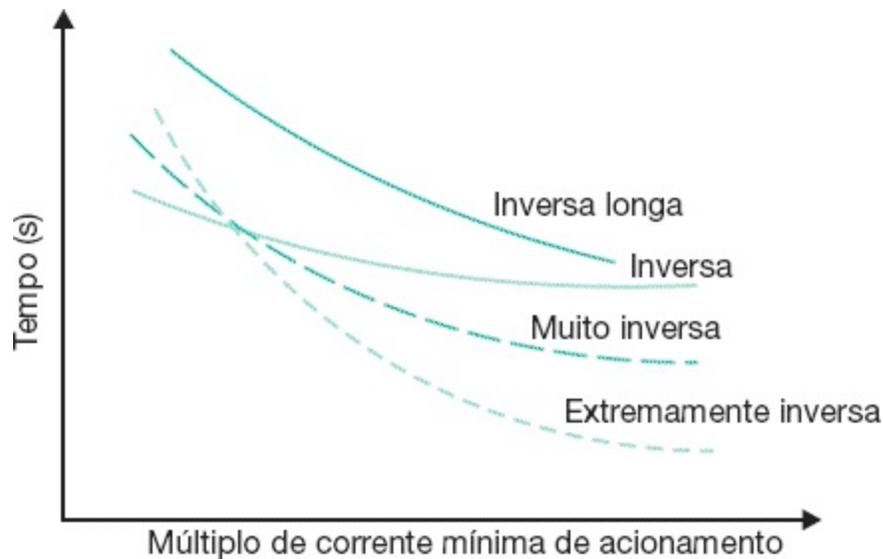
- Saídas de eventos, alarmes e comandos.
- Interface serial.
- Conversor de alimentação.

A unidade de proteção é instalada no interior de uma caixa metálica, cujos bornes de ligação podem ser fixados atrás ou na sua parte frontal, dependendo do uso que o cliente deseja fazer.

## **b) Características técnicas e operacionais**

Os relés digitais são, em geral, dotados das seguintes características:

- Proteção de sobrecorrente de fase e de neutro integrada em uma só unidade.
- Proteção contra falha do disjuntor.
- Proteção trifásica de sobrecorrente instantânea e temporizada.
- Proteção de sobrecorrente de neutro instantânea e temporizada.
- Registro dos valores de vários parâmetros relativos aos últimos eventos.
- Curvas de tempo inverso e características de tempo disponíveis.
- Reajuste dos parâmetros sem alterar o ajuste existente durante o período do reajuste.
- Ajuste duplo quando da mudança do ajuste principal para o ajuste alternativo.
- Comunicação serial por fibra ótica ou fio metálico, que possibilita a troca de informação entre o relé e o sistema hierarquicamente superior.



**Figura 10.60** Tipos de curvas de acionamento dos relés de sobrecarrega.

A partir de informações obtidas do relé, o computador pode avaliar as últimas três faltas ocorridas no sistema e analisar a forma de onda da corrente referente ao último defeito.

Os ajustes dos relés são realizados diretamente no seu painel frontal, conforme se pode observar na [Figura 10.69](#), ou por meio da comunicação com a unidade de processamento vinculada.

Os valores das correntes fase-terra são ajustados separadamente, bem como as características de tempo de desligamento. O valor do tempo de atuação da proteção de sobrecorrente de tempo definido é ajustado diretamente.

Na proteção geral de média tensão e demais pontos das instalações industriais de maior importância, é comum o uso dos chamados relés secundários, em virtude de seu excelente desempenho funcional e de sua superioridade de operação, comparados aos relés de ação direta. São aplicados também na proteção de máquinas elétricas girantes de grande porte, transformadores, rede de distribuição etc., proporcionando elevada segurança à instalação.

Os relés secundários atualmente utilizados são digitais, incorporando em

muitos modelos outras funções, além das funções 50 e 51.

Existem muitos relés digitais de fabricação nacional e outros de procedência estrangeira operando nas mais diversas instalações elétricas, sejam em aplicação em sistemas de distribuição, transmissão, geração, instalações industriais e comerciais. Para cada tipo de relé é necessário que o projetista disponha de um catálogo com todas as informações do produto, já que as instruções de aplicação, ajuste, comunicação etc. são significativamente diferentes. Neste livro, será indicado apenas um fabricante nacional para efeito de estudo e aplicação.

### 10.3.2.1 *Curvas características de temporização*

Os relés apresentam curvas características de temporização que os habilitam para determinados tipos de aplicação. A seguir, serão definidas as principais curvas que normalmente acompanham os relés digitais, de acordo com a norma IEC 255-4, cujas declividades podem ser mostradas, de forma geral, na [Figura 10.60](#).

- Curvas de temporização normalmente inversa

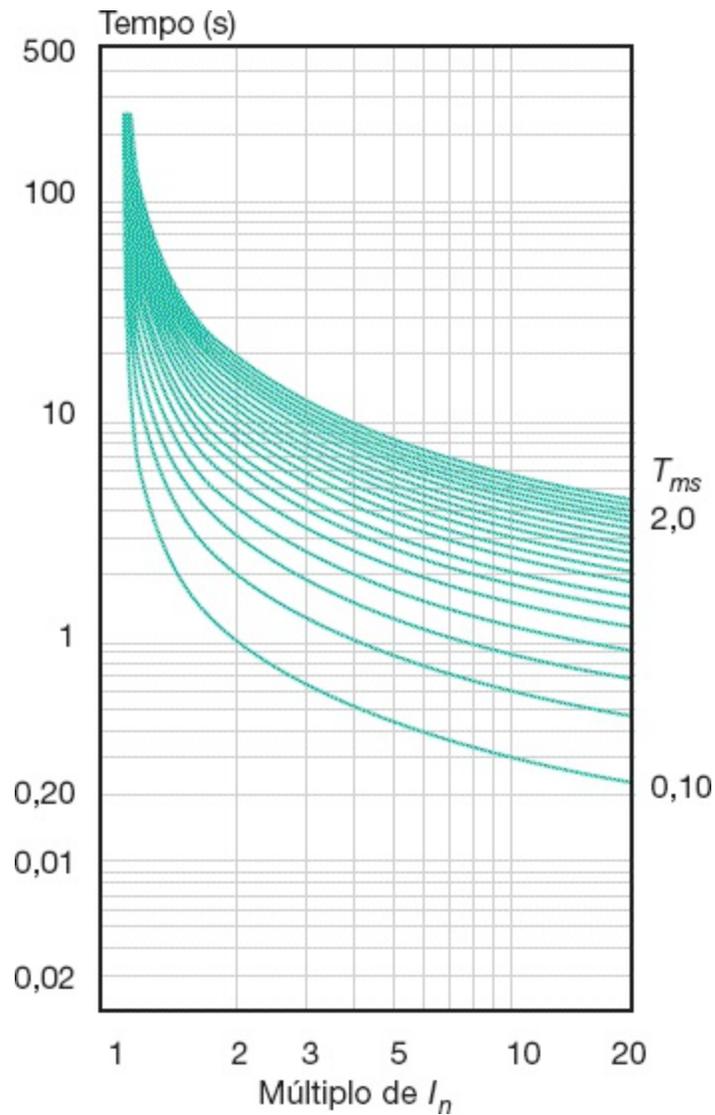
São caracterizadas por uma temporização inferior à temporização inversa longa, sendo aplicadas em sistema de potência em que as correntes de curto-circuito variam consideravelmente com a capacidade de geração. Sua curva está definida na [Figura 10.61](#) e pode ser determinada pela Equação (10.52):

$$T_{ni} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{ms} \quad (10.52)$$

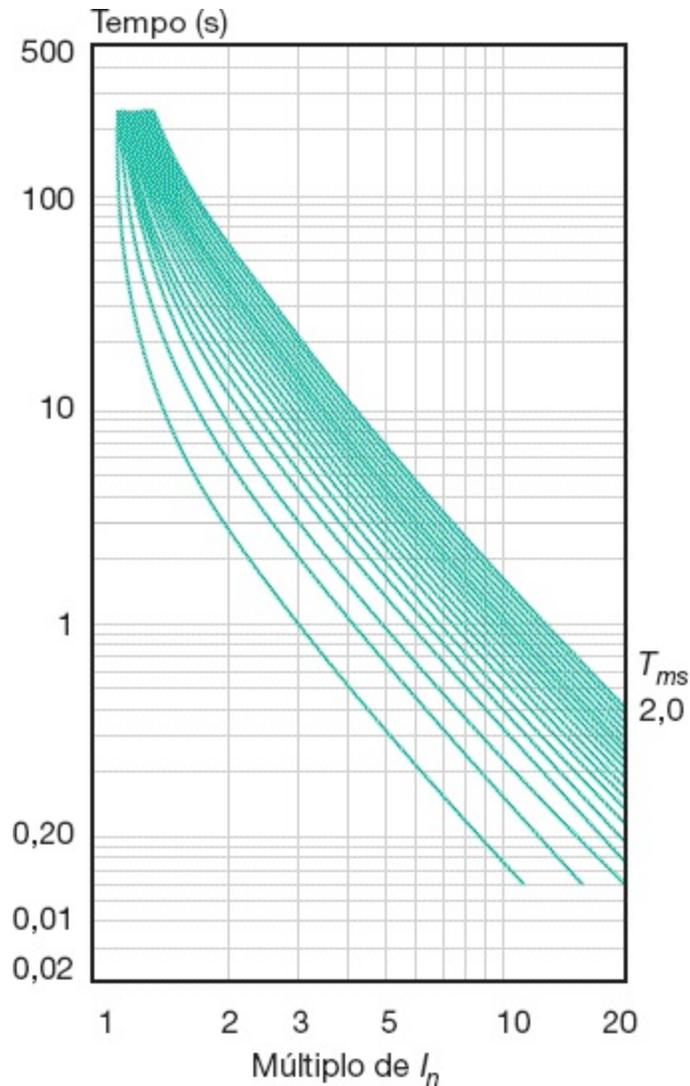
- Curvas de temporização extremamente inversa

São caracterizadas por uma temporização inferior à temporização muito

inversa, sendo aplicadas particularmente em sistemas de distribuição de redes públicas, particularmente em redes rurais, já que se adequam às curvas de temporização dos elos fusíveis. Sua curva está definida na [Figura 10.62](#) e pode ser determinada pela Equação (10.53):



**Figura 10.61** Curva de tempo normalmente inversa.



**Figura 10.62** Curva de tempo extremamente inversa

$$T_{ei} = \frac{80}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^2 - 1} \times T_{ms} \quad (10.53)$$

- Curvas de temporização inversa longa

São caracterizadas pela longa temporização, o que torna seu emprego adequado para proteção de motores, devido à corrente de partida. Sua curva está definida na [Figura 10.63](#) e pode ser determinada pela Equação (10.54):

$$T_{ei} = \frac{120}{\left(\frac{I_{ma}}{I_s}\right)^{-1}} \times T_{ms} \quad (10.54)$$

- Curvas de temporização muito inversa

São caracterizadas por uma temporização inferior à temporização normalmente inversa, sendo aplicadas particularmente em sistemas de distribuição que alimentam centros urbanos e industriais, onde as correntes de curto-circuito variam consideravelmente em função do ponto de defeito. Sua curva está definida na [Figura 10.64](#) e pode ser determinada pela Equação (10.55):

$$T_{mi} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{-1}} \times T_{ms} \quad (10.55)$$

Além das curvas anteriormente apresentadas, muitos relés digitais executam as curvas IT e I<sup>2</sup>T, respectivamente, definidas pelas Equações (10.56) e (10.57) e representadas pelas Figuras 10.65 e 10.66:

- Curvas de temporização representativa de IT

$$T_{mi} = \frac{60}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{-1}} \times T_{ms} \quad (10.56)$$

- Curvas de temporização representativa de I<sup>2</sup>T

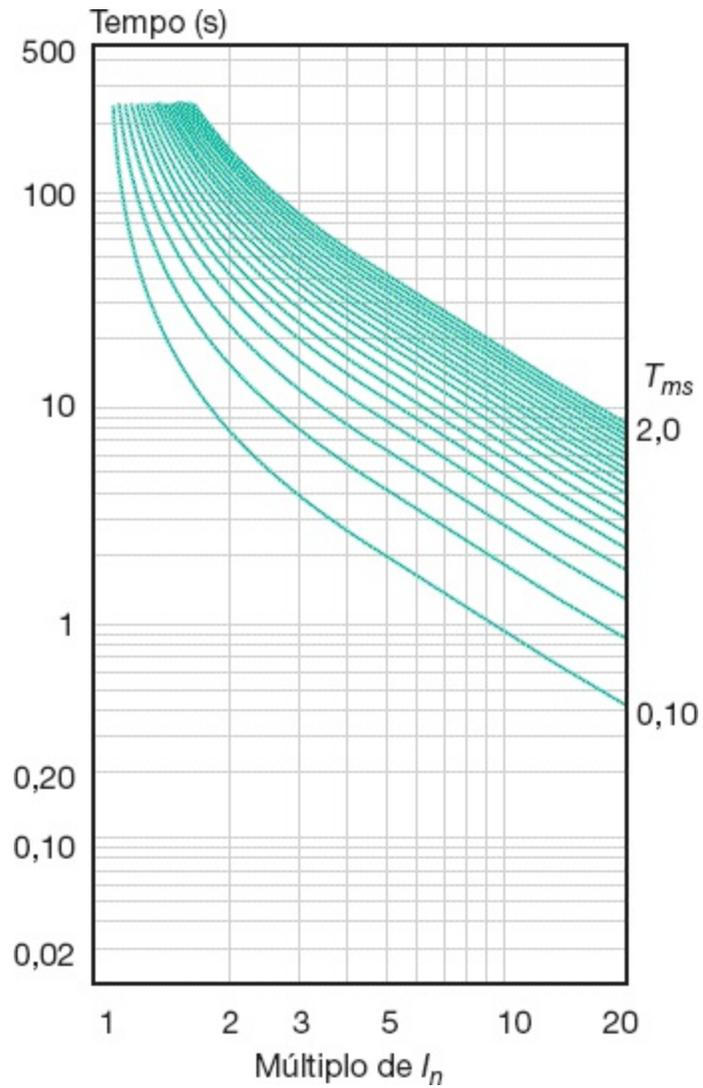
$$T_{mi} = \frac{540}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^2 - 1} \times T_{ms} \quad (10.57)$$

$T_{mi}$  - tempo de operação do relé;

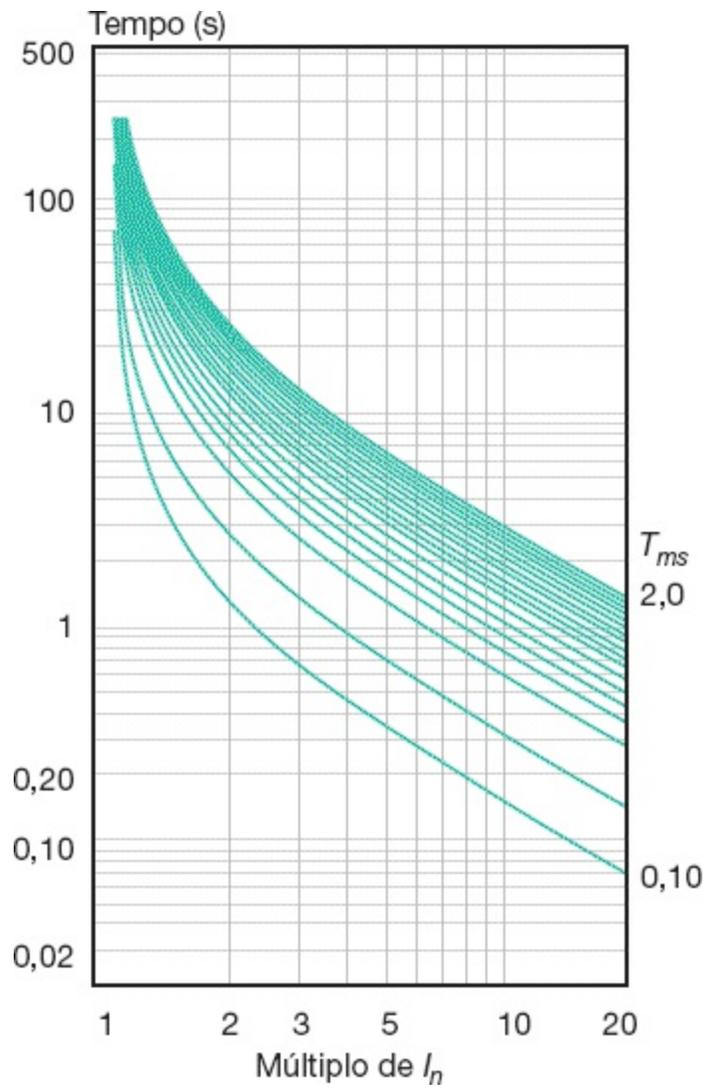
$T_{ms}$  - multiplicador de tempo (representa as curvas anteriormente apresentadas);

$I_{ac}$  - corrente de acionamento;

$I_{ma}$  - sobrecorrente máxima admitida, em A.



**Figura 10.63** Curva de tempo inversa longa.



**Figura 10.64** Curva de tempo muito inversa.

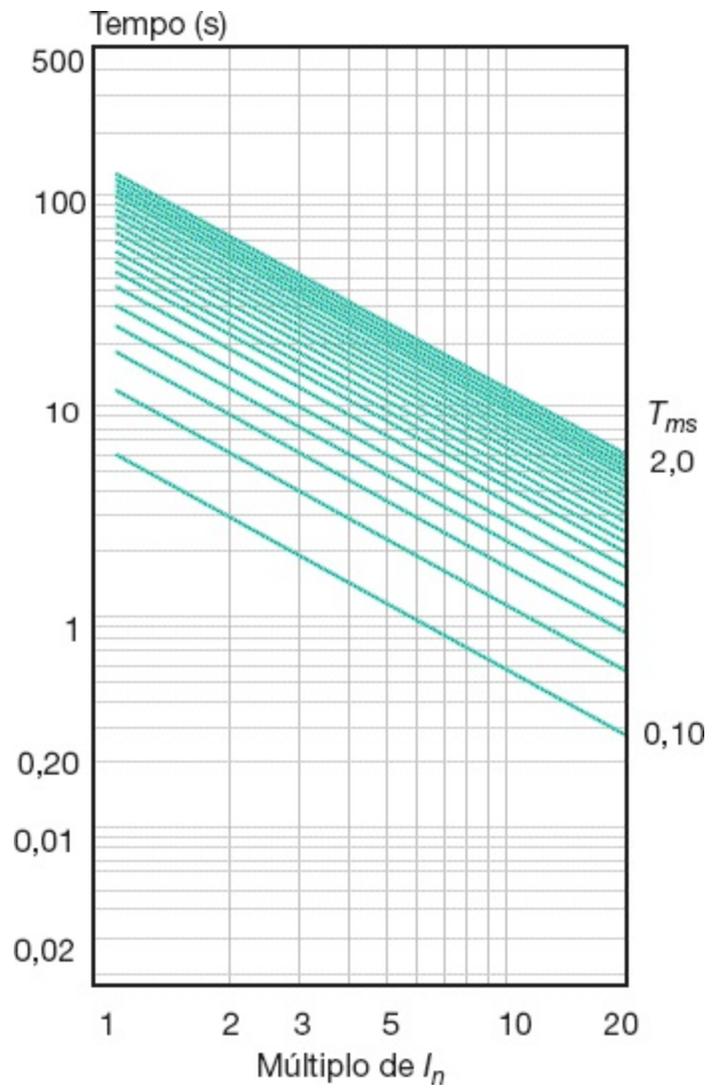


Figura 10.65 Curva IT.

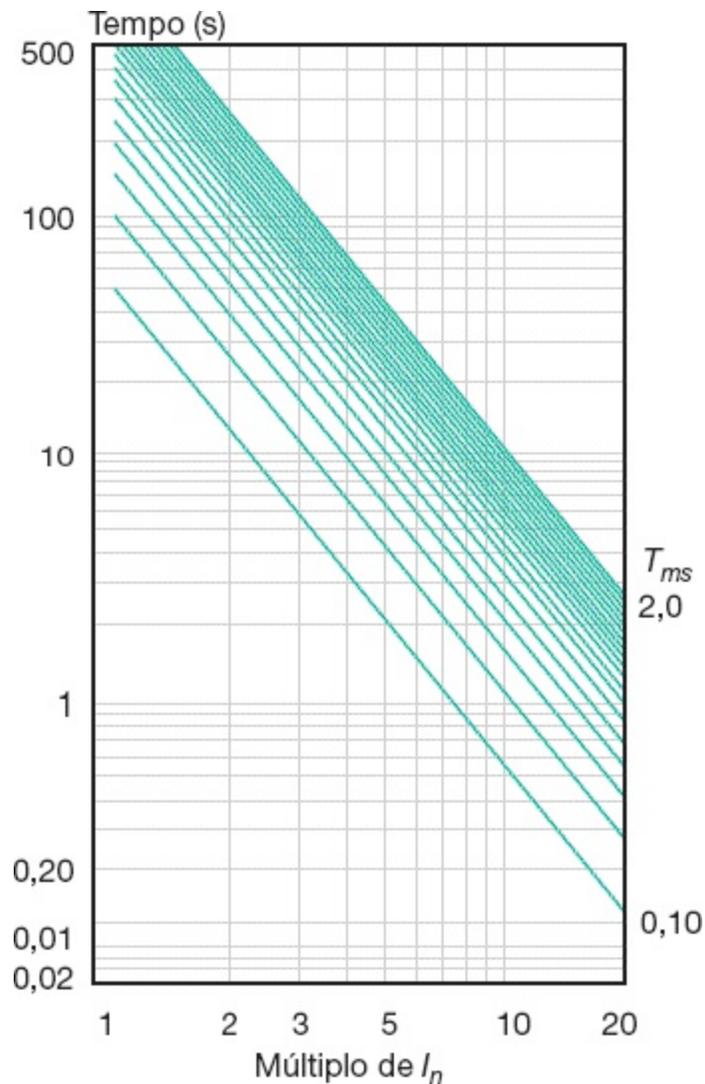


Figura 10.66 Curva I<sup>2</sup>T.

### 10.3.2.2 Funções ANSI

A norma ANSI (American National Standards Institute) estabelece uma codificação das funções dos diferentes dispositivos empregados na proteção, comando e sinalização dos sistemas elétricos e internacionalmente utilizados por fabricantes, projetistas e montadores. Aqui, reproduziremos as principais funções inerentes ao assunto deste livro e aplicação nos sistemas elétricos afins:

- Função 21: relé de distância.

- Função 25: dispositivo de sincronização.
- Função 27: relé de subtensão.
- Função 30: relé anunciador.
- Função 32: relé direcional de potência.
- Função 38: dispositivo de proteção de mancal.
- Função 43: dispositivo de transferência manual.
- Função 47: relé de sequência de fase.
- Função 49: relé térmico para máquina ou transformador.
- Função 50: relé de sobrecorrente instantâneo.
- Função 51: relé de sobrecorrente temporizado.
- Função 59: relé de sobretensão.
- Função 63: relé de pressão de nível ou e fluxo de líquido ou gás.
- Função 64: relé de proteção de terra.
- Função 67: relé direcional de sobrecorrente em corrente alternada.
- Função 68: relé de bloqueio.
- Função 79: relé de religamento em corrente alternada.
- Função 81: relé de frequência.
- Função 86: relé de bloqueio de segurança.
- Função 87: relé de proteção diferencial.

### 10.3.2.3 Conexão dos relés

Os relés digitais são dispositivos que necessitam de informações do sistema para exercerem suas funções de proteção. Os relés de aplicação mais comum nos sistemas elétricos necessitam dos valores de tensão, corrente e frequência. O valor de tensão é normalmente obtido pelos transformadores de potencial (TPs); já a corrente elétrica é fornecida ao relé pelos transformadores de corrente (TCs). No entanto, os relés necessitam de uma fonte externa independente, CA ou CC, para poder funcionar. Para pequenas instalações, essa fonte pode ser obtida por meio de um *nobreak*. Para instalações de médio e grande porte, é utilizado um banco de baterias

alimentado por um retificador-carregador.

Os relés de sobrecorrente são conectados ao sistema de acordo com o esquema simplificado da [Figura 10.67](#) e só necessitam de TCs para sua operação, porém devem ser alimentados por uma fonte de tensão. Já a [Figura 10.68](#) mostra a ligação básica de um relé de fase.

#### 10.3.2.4 Ajuste de corrente dos relés

Para se determinar os ajustes dos relés digitais de sobrecorrente de fase e de neutro podem ser utilizados os seguintes procedimentos:

- Unidades temporizadas de fase (51) e de neutro (51N)

Devem ser ajustadas de forma que o relé não opere para a carga máxima presumida e de acordo com a Equação (10.58):

$$I_a = \frac{K \times I_{ma}}{RTC} \quad (10.58)$$

$I_a$  - corrente de ajuste da unidade temporizada, em A;

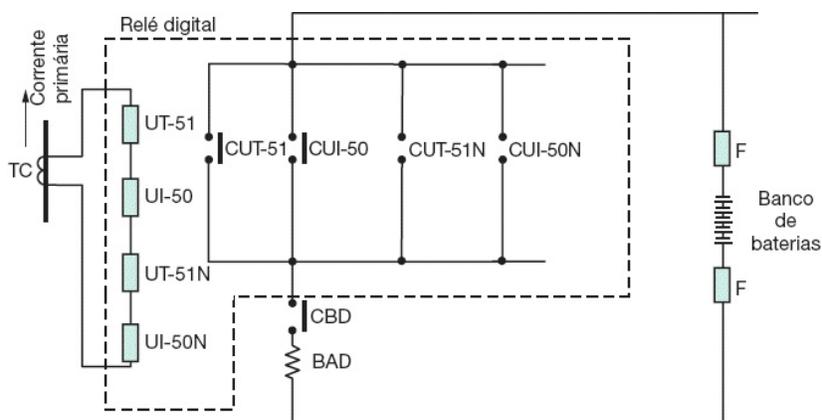
$I_{ma}$  - corrente máxima presumida do sistema, em A. No caso da proteção do transformador da subestação,  $I_{ma}$  corresponde à sua corrente nominal;

$K$  - fator de sobrecarga do sistema. Para os relés de fase o valor de  $K$ , pode variar de 1,2 a 1,5. Para os relés de neutro, o valor de  $K$  pode variar de 0,20 a 0,30;

RTC - relação de transformação da corrente do transformador de corrente.

No caso da representação do relé digital da [Figura 10.67](#), podemos observar que, quando uma ou mais unidades instantâneas de fase (UI-50) e de neutro (UI-50N) e as unidades temporizadas de fase (UT-51) e de neutro (UT-51N) são ativadas, correspondentemente, os contatos das unidades instantâneas de fase (CUI-50) e de neutro (CUI-50N) e os contatos das unidades temporizadas de fase (CUT-51) e de neutro (CUT-51N) são

fechados, fazendo o disjuntor operar por meio do contato fechado (CBA) do disjuntor, já que este contato auxiliar está fechado para o disjuntor fechado.



UT-51 – unidade temporizada de fase; UI-50 – unidade instantânea de fase; UT-51N – unidade temporizada de neutro; UI-50N – unidade instantânea de neutro; CUT-51 – contato digital da unidade temporizada de fase; CUI-50 – contato digital da unidade instantânea de fase; CUT-51N – contato digital da unidade temporizada de neutro; CUI-50N – contato digital da unidade instantânea de neutro; CBD – contato da bobina de abertura do disjuntor; BAD – bobina de abertura do disjuntor; F – fusível.

**Figura 10.67** Esquema básico de ligação dos relés de fase e de neutro ao sistema.

Já a [Figura 10.68](#) constitui outra representação do relé digital em que, quando qualquer contato das unidades instantâneas e temporizadas de fase e de neutro é fechado, energiza a bobina auxiliar (BA) do disjuntor que fecha seu contato (CBA), estabelecendo a tensão do banco de baterias nos terminais da bobina do disjuntor, observando-se que o contato auxiliar da bobina do disjuntor (CBA) está fechado para o disjuntor ligado. Assim, a [Figura 10.68](#) é um detalhe da [Figura 10.67](#).

Para se determinar o tempo de atuação da unidade temporizada, utiliza-se a Equação (10.59):

$$M = \frac{I}{RTC \times I_a} \quad (10.59)$$

$M$  - múltiplo da corrente de acionamento da unidade temporizada;

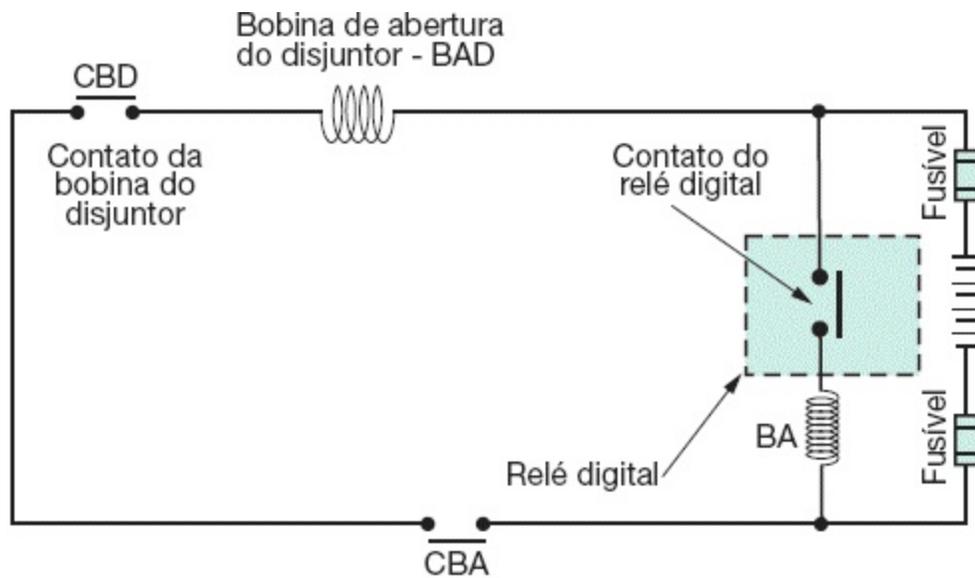
$I$  - corrente para a qual se deseja conhecer o tempo de atuação do relé; pode ser de curto-circuito, sobrecorrente etc.

Com o valor de  $M$  e com o tempo de retardo da proteção que se deseja, acessa-se a família de curvas do relé escolhido e determina-se a curva específica de acionamento, que é ajustada na tecla de membrana do respectivo relé ou por um computador do tipo pessoal.

- Unidades instantâneas de fase (50) e de neutro (50N)
  - Ajuste da unidade instantânea de fase (50) para a corrente de defeito

Deve ser ajustada segundo a Equação (10.60):

$$I_i \leq \frac{I_{ca}}{RTC} \times F \text{ (A)} \quad (10.60)$$



CBD – contato da bobina do disjuntor; BAD – bobina de abertura do disjuntor; F – fusível; CBA – contato da bobina do relé auxiliar do disjuntor; BA – bobina auxiliar do disjuntor.

**Figura 10.68** Esquema básico de ligação de um relé digital.

$I_{ca}$  - corrente de curto-circuito trifásica, valor assimétrico eficaz, em A (para o relé de neutro,  $I_{ca}$  corresponde à corrente de curto-circuito fase-terra, em A);

$F$  - fator de multiplicação que pode ser considerado entre 0,6 e 0,9 (para

valores inferiores a 0,6, o relé pode atuar para a corrente de energização do transformador; para valores superiores a 0,9, pode inibir a atuação do relé, pois a corrente de acionamento fica muito próxima à corrente de curto-circuito).

- Ajuste da unidade instantânea de fase (50) para a corrente de energização do transformador

O relé não deve atuar para a corrente de magnetização do transformador, ou seja, a corrente de ajuste deve ser superior à corrente de magnetização do transformador e inferior à corrente de curto-circuito assimétrica. Deve ser ajustada segundo a Equação (10.61):

$$I_i < \frac{I_{etr}}{RTC} \text{ (A)} \quad (10.61)$$

$I_{etr}$  - corrente de energização do transformador, em A.

A corrente de magnetização do transformador pode ser determinada pela Equação (10.62), que expressa quantas vezes a corrente de magnetização é superior à corrente nominal do transformador ou a soma das correntes nominais dos transformadores que são energizados simultaneamente.

$$I_{mg} = 8 \times I_{tr} \quad (10.62)$$

Logo, a corrente de acionamento vale:

$$I_{ac} = I_a \times RTC \quad (10.63)$$

Para assegurar que o disjuntor não irá atuar durante a energização, deve-se ter:

$$I_{ac} > I_{mg} \quad (10.64)$$

$I_{mg}$  - corrente de magnetização do transformador, em A;

$I_{tr}$  - corrente nominal do transformador, em A;

$I_{ac}$  - corrente de acionamento do relé, em A.

Os ajustes de sobrecorrente definidos anteriormente são empregados para todos os tipos de relés digitais. Algumas particularidades devem ser respeitadas para cada fabricante.

- Ajuste da unidade instantânea de neutro (50N) para a corrente de defeito fase-terra

Deve ser ajustada segundo a Equação (10.65):

$$I_i < \frac{I_{ft}}{RTC} \times F(A) \quad (10.65)$$

$I_{ft}$  - corrente de curto-circuito fase-terra, em A.

$I_i$  - corrente de ajuste para defeito fase-terra, em A. Deve ser inferior à corrente de curto-circuito fase-terra. Utilizar a faixa inferior de  $F$ , anteriormente mencionada.

#### 10.3.2.4.1 Conceito do ponto ANSI

O ponto ANSI é o maior valor de corrente que um transformador pode suportar durante período definido de tempo sem ser danificado. Para defeitos fase e terra, o valor do ponto ANSI para transformadores de distribuição, ligação triângulo-estrela, é de 58 % do ponto ANSI.

Com a finalidade de localizar os pontos ANSI nos diagramas de coordenação, normalmente se utilizam os valores constantes na [Tabela 10.15](#).

**Tabela 10.15** Correntes típicas do ponto ANSI

Impedância da fonte	Ponto ANSI	Tempo máximo de duração
Ohms	A	s

4	$25 \times I_{nt}$	2
5	$20 \times I_{nt}$	3
6	$16,6 \times I_{nt}$	4

---

Para garantir a proteção do transformador contra defeitos trifásicos e fase-terra, o ponto ANSI deve ficar acima da curva de atuação do relé.

#### 10.3.2.4.2 Coordenograma

Para que seja possível a avaliação da atuação da proteção, deve-se utilizar uma folha de papel log-log, também conhecida como papel bilog, com eixos tempo  $\times$  corrente, na qual são traçadas as curvas dos dispositivos de proteção utilizados, a partir das quais se verificam a coordenação e a seletividade para qualquer valor de corrente que possa circular nos pontos em que estão instalados os referidos dispositivos de proteção. Devem ser plotados nesse gráfico os seguintes pontos e curvas:

- O valor da corrente de curto-circuito no ponto de conexão da instalação industrial.
- A curva dos elos fusíveis, curvas inferior e superior, da proteção do ramal de ligação a ser fornecida pela concessionária local.
- Curva de atuação da proteção para as unidades de proteção do relé de fase e de fase-terra; aconselha-se empregar o tipo de curva exigido pela concessionária local (inversa, extremamente inversa etc.).
- Curva do ajuste da proteção instantânea de fase e de terra; normalmente, se caracteriza por uma reta paralela ao eixo dos tempos.
- Curva de tempo definido.
- Ponto ANSI de cada transformador; em geral, as concessionárias

definem em suas normas o ponto ANSI e o tempo de duração, situando-se, respectivamente, entre  $(16,6 \times I_n$  a  $25 \times I_n)$  para o valor da corrente e de (2 a 4) s o valor do tempo.

- Corrente de magnetização dos transformadores considerando o tempo de 100 ms.
- Corrente de partida dos motores de grande porte, considerando toda a carga dimensionada no cálculo de demanda; o tempo de duração da partida do motor deve ser calculado ou medido, considerando o tipo de chave utilizado nessa operação.
- O valor do ajuste da unidade instantânea de fase (50) e de neutro (51N) deve ser inferior à corrente de curto-circuito trifásico e de fase-terra, respectivamente, e do valor da proteção requerido pelo transformador de menor capacidade com relação ao ponto ANSI.

### **10.3.2.5 Características gerais dos relés digitais**

Existem muitos fabricantes de relés digitais no mercado nacional, tais como Siemens, Schneider, Schweitzer, ABB, Efasec, Pextron e outros. Em decorrência da grande penetração nos projetos de subestações industriais de média tensão, iremos dar ênfase aos relés de sobrecorrente da Pextron.

A Pextron fabrica diversos tipos de relés largamente utilizados em instalações industriais, comerciais, residenciais, bem como de distribuição, transmissão e geração de pequeno porte. No entanto, para atender ao nível de aplicação deste livro, será estudado apenas o relé de sobrecorrente URP 1439 Pextron.

É um relé de proteção microprocessado, com quatro entradas de medição de corrente trifásica (A, B, C, N) independentes e três tensões trifásicas conectadas em delta. Pode substituir de 1 a 4 relés de sobrecorrente dos tipos eletromecânicos e estáticos.

Além da proteção contra sobrecorrentes, o relé URP 1439 oferece

proteção contra sobretensões (função 59) e subtensões (função 27), completando, assim, as exigências normalmente prescritas na grande maioria das concessionárias brasileiras para aprovação de projetos industriais a serem conectados em suas redes elétricas de média tensão.

A seguir, serão descritas, sumariamente, as principais partes componentes do relé URP 1439. No entanto, o usuário do relé deve ter acesso ao catálogo específico do fabricante a partir do qual pode se obter as informações completas do relé.

O URP 1439 pode executar as seguintes funções:

- Função 27: relé de subtensão.
- Função 27-0: relé de subtensão para supervisão da alimentação auxiliar.
- Função 47: relé de sequência de fase de tensão.
- Função 50: relé de sobrecorrente instantâneo de fase.
- Função 51: relé de sobrecorrente temporizado de fase.
- Função 51N-GS: relé de sobrecorrente temporizado de neutro ou sensor de terra (GS).
- Função 59: relé de sobretensão.

Os sinais de corrente e tensão são convertidos para valores digitais por conversores A/D (analógico/digital) e processados numericamente. O relé possui comunicação serial, padrão RS 485 e RS 232, que pode transmitir dados supervisionados a um computador. Se o sinal é transmitido pelo RS 485, é possível conectar até 30 relés a um microcomputador. O canal de comunicação RS 232 permite a operação dos relés até uma distância de 1.200 m. Podem ser fornecidas as seguintes informações:

- corrente e tensão atuais;
- corrente e tensão de desligamento;
- acionamento dos relés a distância;
- programação dos relés a distância;

- leitura da programação do relé.

Na parte frontal do relé, conforme mostra a Figura 10.69, existe um *display* de quatro dígitos que indica por meio de varredura (amperímetro) a corrente secundária ou primária circulando nas fases e no neutro. O relé registra o último maior valor de corrente que circulou na fase e no neutro antes da operação de desligamento do disjuntor. O relé permite o ajuste de uma constante amperimétrica, que multiplica a corrente secundária lida no relé. Esta constante é a relação do TC utilizado na instalação. Assim, se for utilizado um TC de 500-5 A, cuja RTC vale 100, ao programar esta relação no relé (parâmetro 01) o amperímetro do relé passa a exibir a corrente primária da instalação.

Ainda na parte frontal do relé, conforme mostra a Figura 10.69, existe um *display* com quatro dígitos que indica por meio de varredura (voltímetro) a tensão secundária ou primária nas fases. O relé registra o último maior valor de tensão de fase e o último menor valor da tensão de fase antes da operação de desligamento do disjuntor. O relé permite o ajuste de uma constante voltimétrica, que multiplica a tensão secundária lida no relé. Esta constante é a relação do TP utilizado na instalação. Assim, se for utilizado um TP de 13.800–115 V, cuja RTP vale 120, ao programar esta relação no relé (parâmetro 04) o voltímetro do relé passa a exibir a tensão primária da instalação.



**Figura 10.69** Vista frontal do relé digital Pextron.

O relé pode ser alimentado por fonte auxiliar de tensão em corrente alternada ou contínua, de acordo com o pedido. Possui uma fonte capacitiva incorporada que lhe permite funcionar após a interrupção da fonte auxiliar. O intervalo de tempo em que a energia armazenada suporta garantir seu funcionamento é função do valor da tensão auxiliar. Assim, se a tensão auxiliar é de 125 Vcc, o intervalo de tempo vale 0,62 s. Já para uma fonte de tensão de 220 Vca, o intervalo de tempo vale 4,39 s.

O relé possui quatro entradas de corrente independentes. Cada entrada é dotada de um dispositivo que fecha em curto-circuito os bornes do relé quando é extraído.

O relé possui um circuito lógico com temporização interna, que ativa a função de *autocheck* no instante de sua energização. Esse programa realiza a supervisão completa dos vários blocos que compõem o relé em intervalos de 50 ms. Se algum de seus principais componentes apresenta falha, automaticamente a função de *autocheck* envia um aviso. É prudente que o

contato de *autocheck* seja conectado ao relé anunciador ou a uma sinalização sonora ou visual.

O relé possui um teclado com microchaves utilizadas somente para acionamento de rotinas de testes, parametrização e configuração atual. Além disso, possui um conjunto de *leds*, que permite uma visualização total da atuação da proteção, indicando as fases em que a corrente ou a tensão provocou o desligamento.

O relé é dotado de um *display* superior com quatro dígitos, utilizado como amperímetro trifásico e voltímetro, indicando os valores registrados e os valores ajustados na sua parametrização. O *display* inferior apresenta funções de dois dígitos, utilizado para indicar a grandeza elétrica que está sendo apresentada no *display* superior. O relé mede a corrente e tensão eficaz de cada ciclo. Seus principais parâmetros técnicos são:

#### a) Proteção de sobrecorrente

- Impedância de entrada para fase:  $8 \text{ m}\Omega$ .
- Impedância de entrada de neutro:  $\leq 16 \Omega$ .
- Consumo da unidade de fase para corrente de 5 A: 0,2 VA.
- Consumo da unidade de neutro para corrente de 5 A: 0,4 VA.
- Corrente nominal de fase: 5 A.
- Corrente nominal de neutro: 2,5.
- Corrente permanente de fase: 15 A.
- Corrente permanente de neutro: 15 A.
- Capacidade térmica de curto-circuito da unidade de fase para 1 s: 300 A.
- Capacidade térmica de curto-circuito da unidade de neutro para 1 s: 300 A.
- Capacidade dinâmica de curto-circuito da unidade de fase: 1.000 A.
- Capacidade dinâmica de curto-circuito da unidade de neutro: 1.000

A.

- Faixa de ajuste de corrente da unidade instantânea ou de tempo definido de fase (50): 1,0 a 100 A, em passos de 0,1 A.
- Faixa de ajuste de corrente da unidade instantânea ou de tempo definido de neutro GS (50N-GS): 0,15 a 50 A, em passos de 0,1 A.
- Faixa de ajuste de corrente da unidade temporizada de fase (51): 1,0 a 16 A, em passos de 0,1 A.
- Faixa de ajuste de corrente da unidade temporizada de neutro (50N-GS): 0,15 a 6,5 A, em passos de 0,1 A.
- Tipos de curva de atuação da unidade temporizada de fase: NI – MI – EI – LONG – IT – I<sup>2</sup>T.
- Tipos de curva de atuação da unidade temporizada de neutro: NI – MI – EI – LONG – IT – I<sup>2</sup>T.
- Faixa de ajuste de corrente de tempo definido de fase (51): 0,25 a 100 A, em passos de 0,1 A.
- Faixa de tempo definido de fase (51): 0,05 a 240 s, em passos de 0,1 s.
- Faixa de tempo definido de neutro GS (51N-GS): 0,05 a 240 s.
- Faixa de ajuste de corrente de tempo definido de neutro GS (51N-GS): 0,15 a 50 A, em passos de 0,1 A.

Se o valor da corrente do circuito ultrapassar  $1,02 \times I_{aj}$ , o relé inicia o processo de atuação de sua unidade temporizada de fase. Se a corrente permanece tempo suficiente para a unidade temporizada atuar, o relé libera o *comando trip* e permanece atuado até o valor de corrente retornar a valores abaixo do valor de rearme (*drop-out*), que é fixo e aproximadamente igual a 75 % da corrente ajustada.

## **b) Proteção de sobretensão $V \gg (59)$**

O tempo de atuação do relé é constante para qualquer valor da tensão de entrada superior ao valor da tensão de ajuste de tempo definido de

sobretensão ( $V \gg$ ). Os parâmetros de ajuste são:

- Faixa de ajuste da tensão de tempo definido de sobretensão  $V \gg$ : 10,0 a 600 Vac.
- Faixa de ajuste de tempo definido de sobretensão  $V \gg$ : 0,05 a 240 s.

Quando a tensão de entrada do relé torna-se superior ao valor ajustado na unidade de sobretensão, o relé inicia o processo de atuação. Se a tensão permanece tempo suficiente para a unidade temporizada de sobretensão atuar, o relé libera o *comando trip* e permanece atuado até o valor da tensão retornar a valores abaixo do valor de rearme (*drop-out*), que é fixo e aproximadamente igual a 75 % da tensão ajustada.

### c) Proteção de subtensão $V \ll$ (27)

O tempo de atuação do relé é constante para qualquer valor da tensão de entrada inferior ao valor da tensão de ajuste de tempo definido de subtensão ( $V \ll$ ). Os parâmetros técnicos são:

- Tensão nominal de fase: 220 V.
- Capacidade térmica permanente: 500 A.
- Consumo da unidade de fase com corrente de 5 A: 0,2 VA.
- Faixa de ajuste da tensão de tempo definido de subtensão  $V \ll$ : 2,0 a 600 Vac.
- Faixa de ajuste de tempo definido de subtensão  $V \ll$ : 0,05 a 240 s.
- Faixa da tensão mínima auxiliar (27-0): 1,0 a 99 %.

Quando a tensão de entrada do relé torna-se inferior ao valor ajustado na unidade de subtensão, o relé inicia o processo de atuação. Se a tensão permanece tempo suficiente para a unidade temporizada de subtensão atuar, o relé libera o *comando trip* e permanece atuado até o valor da tensão retornar a valores abaixo do valor de rearme (*drop-out*), que é fixo e aproximadamente igual a 75 % da tensão ajustada.

### Exemplo de aplicação (10.14)

Calcular o ajuste de corrente das unidades temporizadas e instantâneas dos relés de fase e de neutro instalados em conformidade com a Figura 10.70. Determinar também os ajustes das unidades de sobretensão e subtensão do sistema. Utilizar o relé UPR 1439 da Pextron. Admitir a curva de temporização muito inversa. Utilizar um transformador de potencial com RTP de 13.800–115 V: 120. A soma das potências dos transformadores do alimentador mais carregado é de 10.000 kVA. A demanda máxima da subestação é de 7 MVA. Ajustar os valores de sub e sobretensão, respectivamente, em 80 % e 110 % da tensão nominal. O tempo de atuação da proteção de fase e de neutro deve ser de 0,90 s para coordenar com o relé a montante (não mostrado).

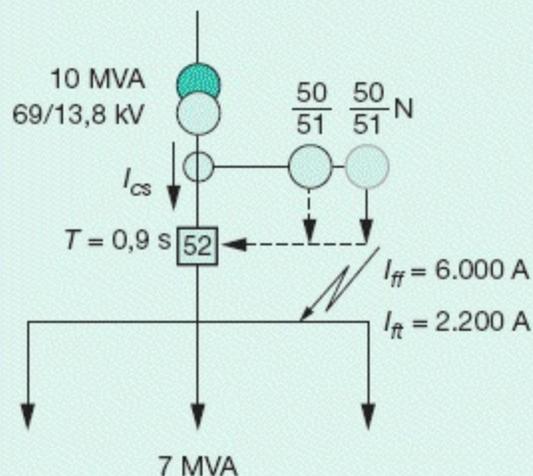


Figura 10.70 Diagrama unifilar.

Corrente nominal do transformador de força

$$I_{mt} = \frac{10.000}{\sqrt{3} \times 13,8} = 418,3 \text{ A}$$

RTC do transformador de corrente para um fator de sobrecorrente  $F = 20$

$$I_{tc} \geq \frac{I_{ff}}{F} \geq \frac{6.000}{20} = 300$$

RTC = 500–5: 100 (selecionar o maior dos valores de  $I_{mt}$  e  $I_{tc}$ )

Seleção do tape da unidade temporizada de fase (51)

De acordo com a Equação (10.58), o valor do tape vale:

$$I_a = \frac{K \times I_{ma}}{RTC} = \frac{K \times I_{tr}}{RTC} = \frac{1,2 \times 418,3}{100} = 5,0 \text{ A}$$

Corrente nominal do relé

$$I_n = 5 \text{ A (valor do fabricante)}$$

- faixa de ajuste da corrente: (1,0 a 16) A
- corrente ajustada na unidade temporizada de fase:  $I_{tf} = 5 \text{ A}$

Seleção da curva de unidade temporizada de fase (51)

De acordo com a Equação (10.59), tem-se:

$$M = \frac{I}{RTC \times I_a} = \frac{I_{ff}}{RTC \times I_{tf}} = \frac{6.000}{100 \times 5} = 12$$

Pelo gráfico da Figura 10.64 (curva de tempo  $\times$  corrente muito inversa)  $\rightarrow T = 0,9 \text{ s} \rightarrow M = 12 \rightarrow$  curva de acionamento escolhida: 0,7.

Aplicando a Equação (10.55), pode-se encontrar o mesmo valor.

$$I_{ac} = RTC \times I_{tf} = 100 \times 5 = 500 \text{ A (corrente de acionamento)}$$

$$T_{mi} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{-1}} \times T_{ms} \rightarrow T_{ms} = \frac{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{-1}}{13,5} \times T_{mi} = \frac{\left(\frac{6.000}{500}\right)^{-1}}{13,5} \times 0,9 = 0,7 \text{ s}$$

Seleção do ajuste da unidade temporizada de neutro (51N)

Da Equação (10.58), tem-se:

$$I_a = \frac{K \times I_{ma}}{RTC} = \frac{0,3 \times 418,3}{100} = 1,25$$

- faixa de ajuste do relé: (0,15 a 6,5) A
- corrente ajustada:  $I_{an} = 1,25$  A

Seleção da curva da unidade temporizada de neutro (51N)

Da Equação (10.59), tem-se:

$$M = \frac{I}{RTC \times I_a} = \frac{I_{ft}}{RTC \times I_{an}} = \frac{2.200}{100 \times 1,25} = 17,6$$

Pelo gráfico da Figura 10.64 (curva de tempo  $\times$  corrente muito inversa)  $\rightarrow T = 0,9 \text{ s} \rightarrow M = 17,6 \rightarrow$  curva de acionamento escolhida:  $T_{ms} = 1,1$ .

Aplicando a Equação (10.55), tem-se:

$$I_{ac} = RTC \times I_{af} = 100 \times 1,25 = 125 \text{ A}$$

$$T_{ms} = \frac{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{-1}}{13,5} \times T_{mi} = \frac{\left(\frac{2.200}{125}\right)^{-1}}{13,5} \times 0,9 = 1,1 \text{ s}$$

### Seleção do ajuste da unidade instantânea de fase (50)

De acordo com a Equação (10.60), tem-se:

$$I_i < \frac{I_{ca}}{RTC} \times F \quad \rightarrow \quad I_i = \frac{6.000}{100} \times 0,6 = 36 \text{ A}$$

- faixa de ajuste do relé: (1 a 100) A
- corrente ajustada: 36 A

Logo, a corrente de acionamento vale:

$$I_{ac} = I_a \times RTC = 36 \times 100 = 3.600 \text{ A}$$

É necessário verificar se quando for ligado o disjuntor de média tensão do alimentador mais carregado, o mesmo atue para a corrente de magnetização dos transformadores do referido alimentador, cuja soma das potências nominais é de 10.000 kVA. Aplicando a Equação (10.62), tem-se:

$$I_{mg} = 8 \times \sum I_{tr} = 8 \times \frac{10.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 3.346,4 \text{ A}$$

Logo,  $I_{ac} > I_{mg}$  (condição atendida)

### Determinação da corrente de ajuste da unidade instantânea de neutro (50N)

De acordo com a Equação (10.60), tem-se:

$$I_{in} < \frac{I_{cs}}{RTC} \times F < \frac{I_{ft}}{RTC} \times F < \frac{2.200}{100} \times 0,6 < 13,2 \cong 14 \text{ A}$$

- faixa de ajuste do relé: (0,15 a 50) A
- corrente ajustada: 14 A

A corrente de acionamento vale:

$$I_{ac} = I_{in} \times RTC = 14 \times 100 = 1.400 \text{ A}$$

Logo, a corrente de acionamento deve ser inferior à corrente de defeito fase-terra:

$$I_{ac} < I_{ft} \text{ (condição atendida)}$$

Determinação do valor de ajuste do valor da subtensão (27)

$$\text{RTP: } 13.800 - 115: 120 \text{ V}$$

$$V_{aj} = 80 \% \times V_n = \frac{80}{100} \times 13.800 = 11.040 \text{ V}$$

Os valores ajustados no relé são:

- faixa de ajuste da tensão de atuação: 2,0 a 600 Vca
- faixa de ajuste do tempo de atuação: 0,05 a 240 s

$$V_{ajr} = \frac{11.040}{120} = 92 \text{ V}$$

- tensão de ajuste de atuação: 92 V
- tempo de atuação ajustado: 3 s (valor assumido)

Determinação do valor de ajuste da sobretensão (59)

$$V_{aj} = 110 \% \times V_n = \frac{110}{100} \times 13.800 = 15.180 \text{ V}$$

Os valores ajustados no relé são:

- faixa de ajuste da tensão de atuação: 10,0 a 600 Vca

- faixa de ajuste do tempo de atuação: 0,05 a 240 s

$$V_{ajr} = \frac{15.180}{120} = 126 \text{ V}$$

- tensão de ajuste de atuação: 126 V
- tempo de atuação ajustado: 3 s (valor assumido)

### Exemplo de aplicação (10.15)

Conhecido o diagrama unifilar da Figura 10.71, no qual está conectado um motor de 1.000 cv/2,2 kV, cuja tensão no momento da partida vale 12.320 V, determinar os ajustes das unidades de sobrecorrente temporizada de fase e neutro e das unidades instantâneas de fase e neutro. O tempo mínimo de atuação do relé para a corrente de defeito deve ser de 0,50 s para efeito de coordenação. Utilizar o relé UPR 1439 da Pextron. Adotar a curva de temporização inversa longa. O tempo de partida do motor é de 4 s. Utilizar um transformador de potencial com RTP de 13.800–115 V: 120. A sobretensão não deverá ser superior a 15 % da tensão nominal e a subtensão não deverá ser inferior à queda de tensão na partida do motor. Utilizar a curva de temporização inversa longa.

#### a) Corrente nominal do transformador de força

$$I_{tr} = I_{ma} = \frac{1.500}{\sqrt{3} \times 2,2} = 393,6 \text{ A}$$

#### b) RTC do transformador de corrente

$$I_{cc} \geq \frac{10.500}{20} \geq 525 \text{ A}$$

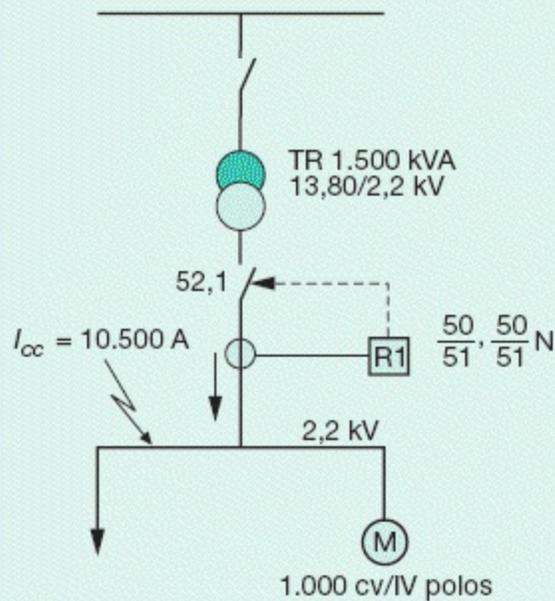
RTC : 600 – 5 : 120

**c) Determinação da corrente de ajuste da unidade de sobrecorrente de fase (I >>)**

De acordo com a Equação (10.58), tem-se:

$$I_a = I_s = \frac{K \times I_{ma}}{RTC} = \frac{1,2 \times 393,6}{120} = 3,93 \text{ A}$$

$K = 1,2$  (valor da sobrecarga admitida para o transformador)



**Figura 10.71** Diagrama unifilar.

A corrente nominal do relé vale:

$$I_n = 5 \text{ A (valor do fabricante)}$$

- Faixa de ajuste da corrente: (1,0 a 16) A
- Corrente ajustada na unidade temporizada de fase:  $I_{af} = 3,9$  A

A corrente de acionamento vale:

$$I_{acp} = RTC \times I_a = 120 \times 3,93 = 471,6 \text{ A}$$

Verificação da atuação do relé durante a partida do motor

A corrente nominal do transformador vale:

$$I_{nm} = \frac{P_{nm} \times 0,736}{\sqrt{3} \times V_{nm} \times \eta \times F_p} = \frac{1.000 \times 0,736}{\sqrt{3} \times 2,20 \times 0,98 \times 0,96} = 205,3 \text{ A}$$

$$\eta = 0,98 \text{ (valor fornecido pelo fabricante do motor)}$$

$$F_p = 0,96 \text{ (valor fornecido pelo fabricante do motor)}$$

$$\frac{I_p}{I_n} = 7,6 \text{ (valor fornecido pelo fabricante do motor)}$$

$$T_{pm} = 4 \text{ s (valor calculado ou determinado — veja Capítulo 6)}$$

$$I_p = I_{ma} = \frac{7,6 \times I_{nm}}{RTC} = \frac{7,6 \times 205,3}{120} = 13,0 \text{ A}$$

Deve-se ajustar o tempo de atuação do relé em um valor um pouco superior ao tempo de partida do motor, a fim de evitar atuação intempestiva do relé, ou seja,  $T_{mi} > T_{pm} = 5 \text{ s}$ , que é superior a 4 s. A partir da Equação (10.54), tem-se:

$$T_{mi} = \frac{120}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} \rightarrow T_{ms} = \frac{T_{mi} \times \left[\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1\right]}{120} = \frac{5 \times \left[\left(\frac{7,6 \times 205,3}{471,6}\right) - 1\right]}{120} = 0,096$$

Ou ainda:

$$T_{ms} = \frac{5 \times \left[\left(\frac{13,0}{3,93}\right) - 1\right]}{120} = 0,096 \rightarrow T_{ms} = 0,10 \text{ (curva mínima do relé)}$$

Utilizando a curva da Figura 10.63 (curva inversa longa), pode-se comprovar:

$$\frac{I_{ma}}{I_{ac}} = \frac{13,0}{3,9} = 3,3 \rightarrow T_{ms} = 0,10$$

Deve-se ajustar o valor da curva para  $T_{ms} = 0,1$ , a fim de evitar o desarme intempestivo do relé durante a partida do motor. Isto pode ser comprovado pela curva da Figura 10.63 ou pela Equação (10.54).

$$T_{mi} = \frac{120}{\left(\frac{13}{3,9}\right) - 1} \times 0,10 = 5,14 \text{ s} > T_{pm} \text{ (condição satisfeita)}$$

#### d) Ajuste da unidade instantânea de fase ( $I \gg$ )

De acordo com a Equação (10.60), tem-se:

$$F = 0,60$$

$$I_i \leq \frac{I_{cs}}{RTC} \times F \leq \frac{10.500}{120} \times 0,60 \leq 52,5 \text{ A} \rightarrow I_i = 53 \text{ A}$$

- faixa de ajuste da unidade instantânea de fase: 1,0 a 100 A
- valor de ajuste de corrente da unidade instantânea de fase: 53 A

Tempo de atuação do relé para a corrente de curto-circuito

$$T_{mi} = \frac{120}{\left(\frac{10.500}{120 \times 3,9}\right) - 1} \times 0,10 = 0,56 \text{ s}$$

O leitor pode continuar a resolver o exercício para ajustar as unidades temporizadas de fase e de neutro seguindo a mesma metodologia.

Determinação do valor de ajuste do valor da subtensão (27)

$$\text{RTP: } 13.800 - 115: 120 \text{ V}$$

$$V_{aj} = 12.320 \text{ V (tensão no momento da partida do motor – valor assumido)}$$

A queda de tensão na partida do motor vale:

$$\Delta V = \frac{13.800 - 12.320}{12.320} \times 100 = 12,01 \%$$

Os valores que devem ser ajustados no relé são:

- faixa de ajuste da tensão de atuação: 2,0 a 600 Vca
- faixa de ajuste do tempo de atuação: 0,05 a 240 s

$$V_{ajr} = \frac{12.320}{120} = 102,6 \text{ V}$$

- tensão de ajuste de atuação: 103 V
- tempo de atuação ajustado: 5 s (valor superior ao tempo de partida do motor que é de 4 s)

Determinação do valor de ajuste da sobretensão

$$V_{aj} = 105 \% \times V_n = \frac{105}{100} \times 13.800 = 14.490 \text{ V}$$

$$V_{ajr} = \frac{14.490}{120} = 120,7 \text{ V}$$

- tensão de ajuste de atuação: 120 V (valor assumido)
- tempo de atuação ajustado: 3 s (valor assumido)

Os valores ajustados no relé são:

- faixa de ajuste da tensão de atuação: 10,0 a 600 Vca
- faixa de ajuste do tempo de atuação: 0,05 a 240 s

### Exemplo de aplicação (10.16)

Seja o diagrama unifilar industrial simplificado da Figura 10.72. São conhecidas as correntes de curto-circuito simétricas para faltas trifásicas. Os condutores unipolares de PVC serão instalados em canaletas fechadas não ventiladas enterradas no solo. O tempo de partida dos motores é de 3 s.

Ponto 0: kA.

Ponto 1: kA.

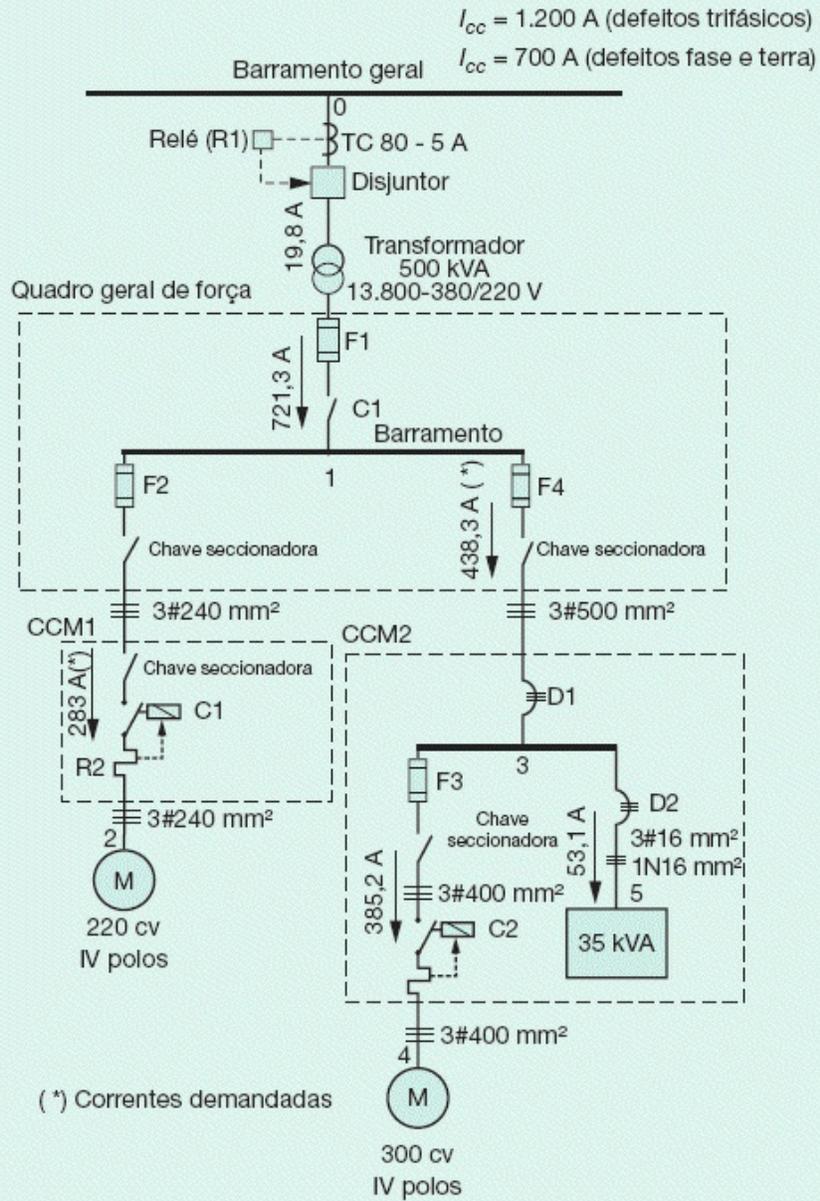
Ponto 2: kA.

Ponto 3: kA.

Ponto 4: kA.

Ponto 5: kA.

Determinar os valores das proteções indicadas e suas respectivas calibrações. Para tal, serão utilizados os valores tabelados dos dispositivos e equipamentos de proteção e comando de fabricação Siemens. Estudar a coordenação e seletividade de todos os elementos de proteção. Não será exercido nenhum controle de sobrecarga dos condutores. O tempo máximo estabelecido pela concessionária é 0,6 s para o ajuste temporizado do relé digital de proteção geral do sistema primário da subestação industrial, considerando o defeito trifásico de 1.200 A. Para defeito fase-terra de 700 A, o tempo permitido pela concessionária é 0,8 s. Os pontos onde foram calculadas as correntes de curto-circuito estão indicados na Figura 10.72.



**Figura 10.72** Diagrama unifilar industrial.

a) Motor de 220 cv

a1) Proteção contra curto-circuito (fusível)

Corrente nominal do fusível F2

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K$$

$$I_{pm} = I_{nm} \times R_{cpm}$$

$$I_{nm} = 283 \text{ A (Tabela 6.4)}$$

$S_c = 240 \text{ mm}^2$  (Tabela 3.6 — coluna D, justificada pela Tabela 3.4, método de instalação 61)

$$I_{nc} = 297 \text{ A (Tabela 3.6 — coluna D)}$$

$$R_{cpm} = 6,5 \text{ (Tabela 6.4)}$$

$$I_{pm} = 283 \times 6,5 = 1.839,5 \text{ A}$$

$$K = 0,3 \text{ (para } I_{pm} > 500 \text{ A)}$$

$$I_{nf} \leq 6,5 \times 283 \times 0,3 \rightarrow I_{nf} = 551,8 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 500 \text{ A (Tabela 10.8)}$$

## a2) Proteção contra sobrecarga do relé R2

1ª condição

Da Equação (10.6), tem-se:

$$I_a \geq I_c \rightarrow I_c = I_{nm} = 283 \text{ A}$$

2ª condição

Da Equação (10.7), tem-se:

$$I_a \leq I_{nc} \rightarrow I_{nc} = 297 \text{ A}$$

$$283 \text{ A} \leq I_a \leq 297 \text{ A}$$

- Ajuste adotado:  $I_a = 283 \text{ A}$
- Relé adotado: 3UA45-00-8YJ (Tabela 10.2)
- Faixa de ajuste: (250 a 400) A

## a3) Verificação das condições de proteção

O relé térmico não deve atuar durante a partida do motor

$$I_{pm} = 6,5 \times 283 = 1.839,5 \text{ A}$$

A partir da Equação (10.5) e da Figura 10.4, tem-se:

$$M = \frac{I_{pm}}{I_a} = \frac{1.839,5}{283} = 6,5 \rightarrow M = 6,5 \rightarrow T_{ar} = 7 \text{ s}$$

Da Equação (10.8), tem-se:

$$T_{rb} = 15 \text{ s (tempo de rotor bloqueado — Tabela 6.4)}$$

$$T_{rb} \geq T_{ar} > T_{pm} \text{ (condição satisfeita)}$$

Observar que o relé garante a proteção contra rotor bloqueado.

O fusível não deve atuar durante a partida do motor

Da Figura 10.22, tem-se:

$$I_{pm} = 1.839,5 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 500 \text{ A} \rightarrow T_{af} = (15 \text{ a } 150) \text{ s} \rightarrow T_{af} = 15 \text{ s}$$

De acordo com a Equação (10.25), tem-se:

$$T_{af} < T_{pm} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger termicamente a isolação dos condutores

Do gráfico da Figura 3.28, tem-se:

$$I_{cc} = 8 \text{ kA} \rightarrow S_c = 240 \text{ mm}^2 \rightarrow T_{sc} > 100 \text{ ciclos} = 1,6 \text{ s}$$

A partir do gráfico da Figura 10.22, tem-se:

$$I_{cs} = 8 \text{ kA} \rightarrow I_{nf} = 500 \text{ A} \rightarrow I_{af} = (0,04 \text{ a } 0,20 \text{ s}) = 0,20 \text{ s}$$

Da Equação (10.26), tem-se:

$$T_{af} < T_{sc} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger o contator

Da Tabela 9.15, tem-se:

$$P_{nm} = 220 \text{ cv} \rightarrow \text{contator: 3TF56.22} \rightarrow I_{nfc} = 400 \text{ A (250 cv)}$$

De acordo com a Equação (10.27), tem-se:

$$I_{nf} \leq I_{nfc} \rightarrow I_{nf} > I_{nfc} \text{ (condição não satisfeita)}$$

Neste caso, deve-se utilizar o contator 3TF57.22, cujo fusível protetor é de 500 A; logo,  $I_{nf} = I_{nfc}$ . Para que o relé térmico seja adequado ao contator devemos adotar o relé térmico 3UA46-00-8YK (Tabela 10.2), ou seja:

$$I_{nf} = I_{nfc} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger o relé térmico

A partir da Tabela 10.2, tem-se:

$$P_{nm} = 220 \text{ cv} \rightarrow \text{relé térmico: 3UA45-00-8YK} \rightarrow I_{nfr} = 500 \text{ A}$$

De acordo com a Equação (10.28), tem-se:

$$I_{nf} = I_{nfr} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger a chave seccionadora

Da Equação (9.18), tem-se:

$$I_{sec} = 1,15 \times I_{nm} = 1,15 \times 283 = 325,4 \text{ A}$$

$$I_{sec} = 382 \text{ A}/380 \text{ V} - S32 - 630/3 \text{ (Tabela 9.14)}$$

Da Tabela 9.14, tem-se:

$$I_{sec} = 382 \text{ A} \rightarrow I_{nfch} = 630 \text{ A}$$

Da Equação (10.29), tem-se:

$$I_{nf} < I_{nfch} \text{ (condição satisfeita)}$$

## b) Motor de 300 cv

### b1) Proteção contra curto-circuito (fusível)

Corrente nominal do fusível F3

$$I_{nf} \times I_{pm} \times K$$

$$I_{nm} = 385,2 \text{ A (Tabela 6.4)}$$

$S_c = 400 \text{ mm}^2$  (Tabela 3.6 — coluna D, justificada pela Tabela 3.4, método de referência 61)

$$I_{nc} = 394 \text{ A (Tabela 3.6)}$$

$$R_{cpm} = 6,8 \text{ (Tabela 6.4)}$$

$$I_{pm} = 385,2 \times 6,8 = 2.619 \text{ A}$$

$$K = 0,3 \text{ (para } I_{pm} > 500 \text{ A)}$$

$$I_{nf} \leq 6,8 \times 385,2 \times 0,3$$

$$I_{nf} \leq 785,8 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 630 \text{ A (Tabela 10.8)}$$

### b2) Proteção contra sobrecarga

1ª condição

Da Equação (10.6), tem-se:

$$I_a \geq I_c \rightarrow I_c = I_{nm} = 385,2 \text{ A}$$

2ª condição

Da Equação (10.7), tem-se:

$$I_a \geq I_{nc} \rightarrow I_{nc} = 394 \text{ A}$$

$$385,2 \leq I_a \leq 394 \text{ A}$$

- Ajuste adotado:  $I_a = 385,2 \text{ A}$
- Relé adotado: 3UA46-00-8YK (Tabela 10.2)
- Faixa de ajuste: (320-500) A

### b3) Verificação das condições de proteção

O relé térmico não deve atuar durante a partida do motor

$$I_{pm} = 6,8 \times 385,2 = 2.619,3 \text{ A}$$

A partir da Figura (10.4), tem-se:

$$M = \frac{I_{pm}}{I_a} = \frac{2.619,3}{385,2} = 6,8 \rightarrow M = 6,70 \rightarrow T_{ar} = 5 \text{ s}$$

$$T_{rb} = 24 \text{ s (Tabela 6.4)}$$

Da Equação (10.8), tem-se:

$$T_{rb} \geq T_{ar} > T_{pm} \text{ (condições satisfeitas)}$$

O fusível não deve atuar durante a partida do motor

Da Figura 10.21, tem-se:

$$I_{pm} = 2.619,3 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 630 \text{ A} \rightarrow T_{af} = (6 \text{ a } 70) \text{ s} \rightarrow T_{af} = 6 \text{ s} > T_{pm} = 3 \text{ s}$$

De acordo com a Equação (10.25), tem-se:

$$T_{af} < T_{pm} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger a isolação dos condutores

Do gráfico da Figura 3.28, tem-se:

$$I_{cs} = 6 \text{ kA} \rightarrow S_c = 400 \text{ mm}^2 \rightarrow T_{sc} < 100 \text{ ciclos} = 1,6 \text{ s}$$

A partir do gráfico da Figura 10.21, tem-se:

$$I_{cc} = 6 \text{ kA} \rightarrow I_{nf} = 630 \text{ A} \rightarrow T_{af} = (0,2 \text{ a } 2) \text{ s}$$

Da Equação (10.26), tem-se:

$$T_{af} < T_{sc} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger o contator

Da Tabela 9.15, tem-se:

$$P_{nm} = 300 \text{ cv} \rightarrow \text{contator: 3TF 5722 (475 A)} \rightarrow I_{nfc} = 500 \text{ A} < 630 \text{ A (condição não satisfeita)}$$

Logo, deve-se adotar o contator 3TF6544 (630 A)  $\rightarrow I_{nfc} = 1.000 \text{ A}$

$$I_{nf} < I_{nfc} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger o relé térmico

A partir da Tabela 10.2, tem-se:

$$P_{nm} = 300 \text{ cv} \rightarrow \text{relé térmico: 3UA45-00-8YJ} \rightarrow I_{nfr} = 500 \text{ A}$$

De acordo com a Equação (10.28), tem-se:

$$I_{nf} > I_{nfr} \text{ (condição não satisfeita)}$$

Logo, deve-se adotar o relé térmico 3UA46-00-8YL  $\rightarrow I_{nfr} = 630 \text{ A}$

Neste caso, deve-se adotar também o contator 3TB58-630 A (Tabela 10.2):

$$I_{nf} = I_{nfr} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger a chave seccionadora

Da Equação (9.18), tem-se:

$$I_{sec} = 1,15 \times I_{nm} = 1,15 \times 385,2 = 442,9 \text{ A}$$

$$I_{sec} = 447 \text{ A}/380 \text{ V} - \text{tipo S32} - 1.000/3 \text{ (Tabela 9.14)}$$

A partir da Tabela 9.14, tem-se:

$$I_{sec} = 447 \text{ A}/380 \text{ V} \quad I_{nfch} = 1.000 \text{ A}$$

Da Equação (10.29), tem-se:

$$I_{nf} < I_{nfch} \text{ (condição satisfeita).}$$

### c) Proteção geral (F1)

De acordo com a Equação (10.23), tem-se:

$$I_{nf} \leq I_{pmm} \times K + \sum I_{nm} + \sum I_{na}$$

$$I_{na} = \frac{35}{\sqrt{3} \times 0,38} = 53,1 \text{ A}$$

$$I_{nf} \leq 385,2 \times 6,8 \times 0,3 + 283 + 53,1 \leq 1.121,9 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 1.000 \text{ A}$$

No item “h” deste Exemplo de aplicação vamos observar que será necessário elevar a corrente nominal do fusível para 1.250 A, por questões de seletividade.

O fusível não deve atuar para a corrente de partida do maior motor

Considerar ligados o motor de 220 cv e a carga de 35 kVA e acionar o motor de 300 cv. Logo, a corrente circulará no fusível F1 (1.250 A) vale:

$$I_c = I_{nm} + \sum I_{na} + I_{pm}$$

$$I_c = 283 + 53,1 + 2.619,3 = 2.955,4 \text{ A}$$

Da Figura 10.21, tem-se:

$$I_c = 2.955,4 \text{ A} \rightarrow T_{af} = (37 \text{ a } 400) \text{ s} \rightarrow T_{af} = 37 \text{ s}$$

De acordo com a Equação (10.25), tem-se:

$$T_{af} > T_{pm} \text{ (condição satisfeita)}$$

O fusível deve proteger a chave seccionadora

Da Equação (9.18), tem-se:

$$I_{sec} \geq 1,15 \times I_{nm}$$

Será tomada a corrente nominal do transformador, que é de 500 kVA, cuja capacidade está calculada no item (g).

$$I_{tr} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 0,38} = 759,6 \text{ A}$$

$$I_{sec} = 1,15 \times 759,6 = 873,5 \text{ A}$$

Podemos utilizar a chave seccionadora com essas características:

$$I_{sec} = 870 \text{ A}/380 - \text{tipo S32} - 1.250/3 \text{ (Tabela 9.14)} \rightarrow I_{nfch} = 1.250 \text{ A}$$

Da Equação (10.29), tem-se:

$$I_{nf} = I_{nfch} \text{ (condição satisfeita)}$$

#### d) Proteção com o disjuntor D2

1ª condição:

$$I_a \geq I_c \rightarrow I_c = 53,1 \text{ A}$$

2ª condição:

$$I_a \leq I_{nc} \rightarrow S_c = 16 \text{ mm}^2 \text{ (Tabela 3.6 — coluna D, justificada pela Tabela 3.4, método de referência 61 A)}$$

$$I_{nc} = 67 \text{ A (Tabela 3.6)}$$

Logo, tem-se:  $53,1 \text{ A} \leq I_a \leq 67 \text{ A} \rightarrow I_a = 53,1 \text{ A}$  (valor adotado)

3ª condição:

$$K \times I_a \leq 1,45 \times I_{nc}$$

Como foi definido que não haveria controle ou supervisão de sobrecarga que poderia ocorrer nos condutores, esta condição fica eliminada. Dessa forma, os condutores não poderiam ser submetidos a sobrecargas em regime transitório, conforme definido na Seção 10.2.5.

As características elétricas nominais do disjuntor obtidas da Tabela 10.6 são:

- Tipo: 3VF12 63 A  $\rightarrow I_{nd} = 63 \text{ A}$
- Faixa de ajuste do relé temporizado: (45–63) A
- Corrente ajustada:  $I_a = 53,1 \text{ A}$

O disjuntor deve proteger o condutor

$I_{cs} = 13 \text{ kA}$  (ponto 3)  $\rightarrow S_c = 16 \text{ mm}^2 \rightarrow T_{sc} = 1,0 \text{ ciclo} = 0,016 \text{ s}$  (Figura 3.28)

$$M = \frac{I_{cs}}{I_a} = \frac{13.000}{53,1} = 245$$

Da Figura 10.15, tem-se:

$$M = 245 \rightarrow T_{ad} = 0,002 \text{ s}$$

$$T_{ad} < T_{sc} \text{ (condição satisfeita)}$$

Verificação da capacidade de interrupção do disjuntor

$$3VF12 63 \text{ A} \rightarrow I_{rd} = 22 \text{ kA}$$

Da Equação (10.16), tem-se:

$$I_{cs} < I_{rd} \text{ (condição satisfeita)}$$

### e) Proteção com o disjuntor D1

$$I_a \geq I_c$$

$$I_c = 53,1 + 385,2 = 438,3 \text{ A} \rightarrow I_a \geq 500 \text{ A}$$

Serão admitidas as características do disjuntor do tipo 3WN6-1600/630 A (Tabela 10.6), faixa de ajuste da unidade temporizada de (252 a 630) A. Será adotada a curva 0,0 ms para a unidade instantânea, cuja faixa de ajuste é de 1,5 a  $12 \times I_n$  (Figura 10.17).

$I_a \leq I_{nc}$  (o disjuntor está diretamente ligado à barra, não havendo cabo a proteger)

$$I_a = 500 \text{ A (valor adotado)}$$

$$I_{nd} = 630 \text{ A (Tabela 10.17)}$$

## Verificação da capacidade de curto-circuito

Para a corrente de curto-circuito no ponto 4 (6.000 A), o tempo de atuação do disjuntor vale:

$$M = \frac{I_{cs}}{I_a} = \frac{6.000}{500} = 12 \quad \rightarrow \quad T_{ad} = 0,023 \text{ s}$$

### f) Fusível F4

De acordo com a Equação (10.23), tem-se:

$$I_{nf} \leq I_{pmn} \times K + \sum I_{nm} + \sum I_{na}$$
$$I_{nf} \leq 6,8 \times 385,2 \times 0,3 + 53,1 \leq 838,9 \text{ A} \quad \rightarrow \quad I_{nf} = 800 \text{ A}$$

Como a corrente do fusível F4 é superior à do fusível F3, que não atua na partida do motor, não há necessidade de verificar as condições de partida do motor para o fusível F4.

### g) Proteção primária (relé digital R1)

A potência nominal do transformador vale:

$$P_{tr} = \frac{220 \times 0,736}{0,87 \times 0,95} \times 0,87 + \frac{300 \times 0,736}{0,88 \times 0,96} \times 0,87 + 35 = 432,8 \text{ kVA}$$

Logo, será adotado um transformador com a potência nominal de 500 kVA.

Corrente nominal primária do transformador de força

$$I_{tr} = I_{ma} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 13,8} = 20,9 \text{ A}$$

$I_{cc} = 1.200 \text{ A}$  (corrente de defeito tripolar — veja Figura 10.72)

$I_{ct} = 700 \text{ A}$  (corrente de defeito a terra — veja Figura 10.72)

### g1) Proteção temporizada de fase 51 ( $I >$ )

Será utilizado o relé de sobrecorrente digital Pextron URP 1439, curva normalmente inversa.

RTC do transformador de corrente

$$I_{tc} \geq \frac{1.200}{20} \geq 60 \text{ A}$$

RTC: 80–5:16

Determinação da corrente de ajuste da unidade de sobrecorrente de fase ( $I >$ )

$K = 1,2$  (valor da sobrecarga admitida para o transformador)

$I_n = 5 \text{ A}$  (corrente nominal do relé)

$T_{ni} = 0,60 \text{ s}$  (tempo máximo estabelecido pela concessionária local para o ajuste do relé de proteção geral da indústria)

Logo, a corrente de ajuste vale:

$$I_{af} = \frac{K \times I_{ma}}{RTC} = \frac{1,2 \times 20,9}{16} = 1,56 \text{ A}$$

Determinação da corrente de acionamento

$$I_{ac} = RTC \times I_{af} = 16 \times 1,56 = 24,9 \approx 25 \text{ A}$$

$I_{ac} > I_{ma}$  (condição satisfeita)

Determinação da curva de operação do relé

Será adotada a curva normalmente inversa, conforme a Equação (10.52).

$$T_{mi} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{ms} \rightarrow T_{ms} = \frac{T_{mi} \times \left[\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14} = \frac{0,60 \times \left[\left(\frac{1.200}{25}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14} = 0,34$$

- Ajuste da unidade temporizada de fase: 1,56 A
- Faixa de ajuste da corrente do relé: (1,0 a 16) A
- Curva de operação do relé: 0,34
- Tempo de atuação da unidade temporizada de fase: 0,60 s

Verificação da atuação do relé durante a partida do maior motor

$$I_{nm} = 385,2 \text{ A (corrente nominal do motor)}$$

$$T_{pm} = 3 \text{ s}$$

$$I_p = I_{ma} = R_{cpm} \times I_{nm} \times \frac{V_s}{V_p} = 6,8 \times 385,2 \times \frac{380}{13.800} = 72,1 \text{ A (corrente de partida refletida no}$$

lado de 13,80 kV)

O relé não deve operar durante a partida do motor. A partir da Equação (10.52), tem-se:

$$T_{mi} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{ms} = \frac{0,14}{\left(\frac{72,1}{25}\right)^{0,02} - 1} \times 0,34 = 2,2 \text{ s (tempo de atuação do relé}$$

durante a partida o motor)

Como  $T_{mi} = 2,2 \text{ s} < 3,0 \text{ s}$ , o relé vai operar durante a partida do motor. Neste caso, devemos subir o valor numérico da curva de operação do relé para  $T_{ms} = 0,60$ , cuja resposta do relé é de 3,9 s, vista no gráfico da Figura 10.61, ou pela Equação (10.52).

$$T_{mi} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{ms} = \frac{0,14}{\left(\frac{72,1}{25}\right)^{0,02} - 1} \times 0,60 = 3,9 \text{ s}$$

Logo,  $T_{mi} > T_{mp}$  (condição satisfeita).

Verificação da atuação do relé pela corrente de magnetização do transformador

$$I_{mg} = 8 \times I_{tr} = 8 \times \frac{500}{\sqrt{3} \times 13,8} = 167 \text{ A}$$

Logo,  $I_{ac} < I_{mg}$  (condição não satisfeita).

O tempo de atuação do relé é de 2,1 s:

$$T_{mi} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{ms} = \frac{0,14}{\left(\frac{167}{25}\right)^{0,02} - 1} \times 0,60 = 2,1 \text{ s}$$

Como o tempo de duração da corrente de magnetização do transformador é de 0,10 s, o relé não irá operar.

## g2) Proteção de tempo definido de fase 50 (I >>)

$$F = 0.40 \text{ (valor adotado)}$$

$$I_{if} < \frac{I_{cs}}{RTC} \times F < \frac{1200}{16} \times 0,40 = 30 \text{ A}$$

A corrente de acionamento vale:

$$I_{ac} = RTC \times I_{if} = 16 \times 30 = 480 \text{ A}$$

$$I_{ac} < I_{ft} \text{ (condição satisfeita)}$$

- Ajuste da unidade de tempo definido de fase: 30 A
- Faixa de ajuste da unidade de tempo definido de fase: (1,0 a 100) A
- Tempo de ajuste da unidade de tempo definido de fase: 0,0 s
- Faixa de ajuste de tempo da unidade de tempo definido de fase: (0,05 a 240) s

### g3) Proteção temporizada de neutro 51N (I >)

$$I_{an} = \frac{K \times I_{ma}}{RTC} = \frac{0,3 \times 20,9}{16} = 0,39 \text{ A}$$

A corrente de acionamento vale:

$$I_{ac} = RTC \times I_{an} = 16 \times 0,39 = 6,24 \text{ A}$$

$$I_{ac} < I_{ft} \text{ (condição atendida)}$$

Seleção da curva da unidade temporizada de neutro (51N)

Será adotada a curva normalmente inversa. Aplicando a Equação (10.52), tem-se:

$$T_{mi} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{ms} \rightarrow T_{ms} = \frac{T_{mi} \times \left[\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14} = \frac{0,80 \times \left[\left(\frac{700}{6,24}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14} = 0,56$$

- Ajuste da unidade temporizada de neutro: 0,39 A
- Faixa de ajuste da corrente do relé: (0,15 a 6,5) A
- Curva de operação do relé: 0,56
- Tempo de atuação da unidade temporizada de neutro: 0,80 s

### g4) Proteção de tempo definido de neutro 50N (I >>)

Determinação da corrente de ajuste da unidade instantânea de neutro (50N)

$$F = 0,60 \text{ (valor adotado)}$$

$$I_{in} < \frac{I_{ft}}{RTC} \times F < \frac{700}{16} \times 0,60 < 26,2 \text{ A} \rightarrow I_m = 26 \text{ A}$$

$$I_{ac} = I_m \times RTC = 26 \times 16 = 416 \text{ A}$$

$$I_{ac} = I_{ft} \text{ (condição atendida)}$$

- Ajuste da unidade de tempo definido de neutro: 26 A
- Faixa de ajuste da unidade de tempo definido de neutro: (0,15 a 50) A
- Tempo de atuação da unidade de tempo definido de neutro: 0,05 s
- Faixa de ajuste de tempo da unidade de tempo definido de neutro: (0,05 a 240) s

Do modo como foram ajustadas as funções 50/51 e 50/51N, para os defeitos na barra de média tensão da subestação da indústria, a atuação do relé de sobrecorrente sempre será realizada pelas unidades temporizadas de fase e de neutro, cabendo às unidades de tempo definido de fase e de neutro a função de proteção de retaguarda (*back-up*), permitindo, assim, a coordenação com os relés de proteção a montante instalados no terminal de saída do alimentador de distribuição da subestação da concessionária.

Cabe esclarecer que os tempos fornecidos pela concessionária correspondem aos tempos de atuação dos relés de proteção de sobrecorrente de fase e de neutro do alimentador de distribuição da concessionária, considerando as correntes de defeito no barramento de média tensão (13,80 kV) da subestação da indústria. Logicamente, os ajustes dos relés de proteção do alimentador da concessionária, em geral, são realizados com base nos valores de corrente de curto-circuito no barramento de média tensão da subestação cujas correntes são superiores às correntes de defeito no barramento de média tensão da indústria.

É comum, quando solicitadas, as concessionárias fornecerem ao projetista uma folha de dados do relé do alimentador ao qual será conectado o estabelecimento industrial, denominada OAP - Ordem de Ajuste da Proteção, com todos os valores ajustados (curvas temporizadas,

tempos das unidades de tempo definido, faixas de ajustes das correntes e dos tempos etc.).

Garantidas as coordenações com os relés da concessionária, o projetista deverá buscar a coordenação e seletividade com os disjuntores e fusíveis do sistema de baixa tensão, a partir das curvas e das correntes nominais dos respectivos disjuntores e fusíveis.

Algumas vezes não se obtêm as condições de coordenação entre os elementos de proteção do sistema de baixa tensão ou entre esses elementos com os relés do sistema de média tensão da subestação da indústria. Nesse caso, devem-se desconsiderar as condições de coordenação do sistema de baixa tensão, privilegiando a coordenação do disjuntor de baixa tensão com a proteção de sobrecorrente de média tensão, porém mantendo os ajustes de proteção calculados que garantam a integridade física e as condições operacionais dos equipamentos, cabos, dispositivos do sistema etc.

#### h) Coordenação das proteções

Coordenação entre F1 ( $I_{fm} = I_{nf1} = 1.250$  A) e F2 ( $I_{fi} = I_{nf2} = 500$  A)

$I_{fm}$  = corrente de ajuste do fusível a montante;

$I_{fi}$  = corrente de ajuste do fusível a jusante (F4).

Da Equação (10.41), tem-se:

$$I_{fm} \geq 1,6 \times I_{fi}$$

$$I_{fi} = 500 \text{ A}$$

$$I_{fm} \geq 1,6 \times 500 \rightarrow I_{fm} \geq 1.250 \text{ A (condição satisfeita)}$$

O mesmo resultado pode ser obtido da Tabela 10.12.

Coordenação entre F1 ( $I_{fm} = I_{nf1} = 1.250$  A) e F4 ( $I_{fi} = I_{nf4} = 800$  A)

$$I_{fm} \geq 1,6 \times I_{fi}$$

$$I_{fi} = 800 \text{ A}$$

$$I_{fm} \geq 1,6 \times 800 \geq 1.280 \approx 1.250 \text{ A (condição satisfeita, segundo Tabela 10.12)}$$

### h1) Coordenação entre F4 ( $I_{fm} = I_{nf4} = 800 \text{ A}$ ) e F3 ( $I_{fj} = I_{nf3} = 630 \text{ A}$ )

Observa-se pela Tabela 10.12 que os fusíveis F4 e F3 não são seletivos. Para que ocorra seletividade, uma das alternativas será reduzir a corrente do fusível F3 para 500 A. Para isso, devemos nos certificar se o fusível de 500 A não atuará durante a partida do motor de 300 cv. Observando-se o item b3 e a Figura 10.22, teremos:

$$I_{pm} = 2.619,3 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 500 \text{ A} \rightarrow T_{af} = (2,5 \text{ a } 18) \text{ s} \rightarrow T_{af} = 2,5 \text{ s} < T_{pm} = 3 \text{ s}$$

Dessa forma, não se pode garantir que o fusível de 500 A permita a partida do motor sem atuar. Como isso não é desejável, do ponto de vista operacional, é preferível que os fusíveis F4 e F3 não sejam seletivos, já que não se pode elevar mais ainda o valor do fusível F1 (limitado pelo máximo fusível de proteção da chave seccionadora C1) para que o mesmo permita coordenar com o fusível F4 majorado.

### h2) Coordenação entre F4 e DI

Condição de sobrecarga (partida do motor)

A coordenação pode ser constatada pelo gráfico da Figura 10.73, em que a curva do fusível corta a curva do disjuntor no ponto de 3.500 A. Como a corrente de partida do motor vale 2.619,3 A, que é inferior a 3.500 A, não haverá atuação nem do fusível nem do disjuntor.

Condição de defeito trifásico

Para um defeito no ponto 3, tem-se uma corrente de curto-circuito de 13.000 A que, levada ao gráfico da Figura 10.73, pode-se observar que o disjuntor D1 atua em 0,006 s, tempo muito inferior à atuação do fusível, que é de aproximadamente 0,10 s.

### h3) Coordenação entre os disjuntores D1 (3WN6–630A) e D2 (3VF12–63A)

Faixa de sobrecarga

A Figura 10.73 mostra as curvas dos disjuntores D1 e D2 que não se tocam e estão afastadas dos pontos de transição de térmico para magnético, de 700 a 6.000 A.

**Tabela 10.16** Curva do relé normalmente inversa

### Curva do relé R1

Nº de pontos	Ima	Iac	Tms	Tempo encontrado
1	50,0	25	0,34	3,41
2	100,0	25	0,34	1,69
3	150,0	25	0,34	1,30
4	200,0	25	0,34	1,12
5	250,0	25	0,34	1,01
6	300,0	25	0,34	0,93
7	350,0	25	0,34	0,88
8	400,0	25	0,34	0,83
9	450,0	25	0,34	0,80
10	500,0	25	0,34	0,77
11	550,0	25	0,34	0,75
12	600,0	25	0,34	0,73
13	650,0	25	0,34	0,71
14	700,0	25	0,34	0,69
15	750,0	25	0,34	0,68

16	800,0	25	0,34	0,66
17	850,0	25	0,34	0,65
18	900,0	25	0,34	0,64
19	950,0	25	0,34	0,63
20	1000,0	25	0,34	0,62
21	1050,0	25	0,34	0,61
22	1100,0	25	0,34	0,61
23	1150,0	25	0,34	0,60
24	1200,0	25	0,34	0,59
25	1250,0	25	0,34	0,58
26	1300,0	25	0,34	0,58
27	1350,0	25	0,34	0,57
28	1400,0	25	0,34	0,57
29	1450,0	25	0,34	0,56
30	1500,0	25	0,34	0,56

---

#### Faixa de curto-circuito

Os disjuntores são seletivos até o valor da corrente de curto-circuito de 5.800 A. Como a corrente de curto-circuito no ponto 5 é de 9.000 A, os disjuntores atuarão, respectivamente, em 0,006 e 0,004 s, portanto não satisfazendo a Equação (10.44) e, assim, não sendo seletivos.

#### h4) Coordenação entre D1 e F3

Devem obedecer às mesmas condições anteriores, porém a curva do disjuntor D1 está acima da curva do fusível F3, a partir da corrente de 700 A, conforme a Figura 10.73. Para defeitos trifásicos no ponto 4 (6.000 A) não se pode garantir a seletividade entre o disjuntor D1 e o fusível F3.

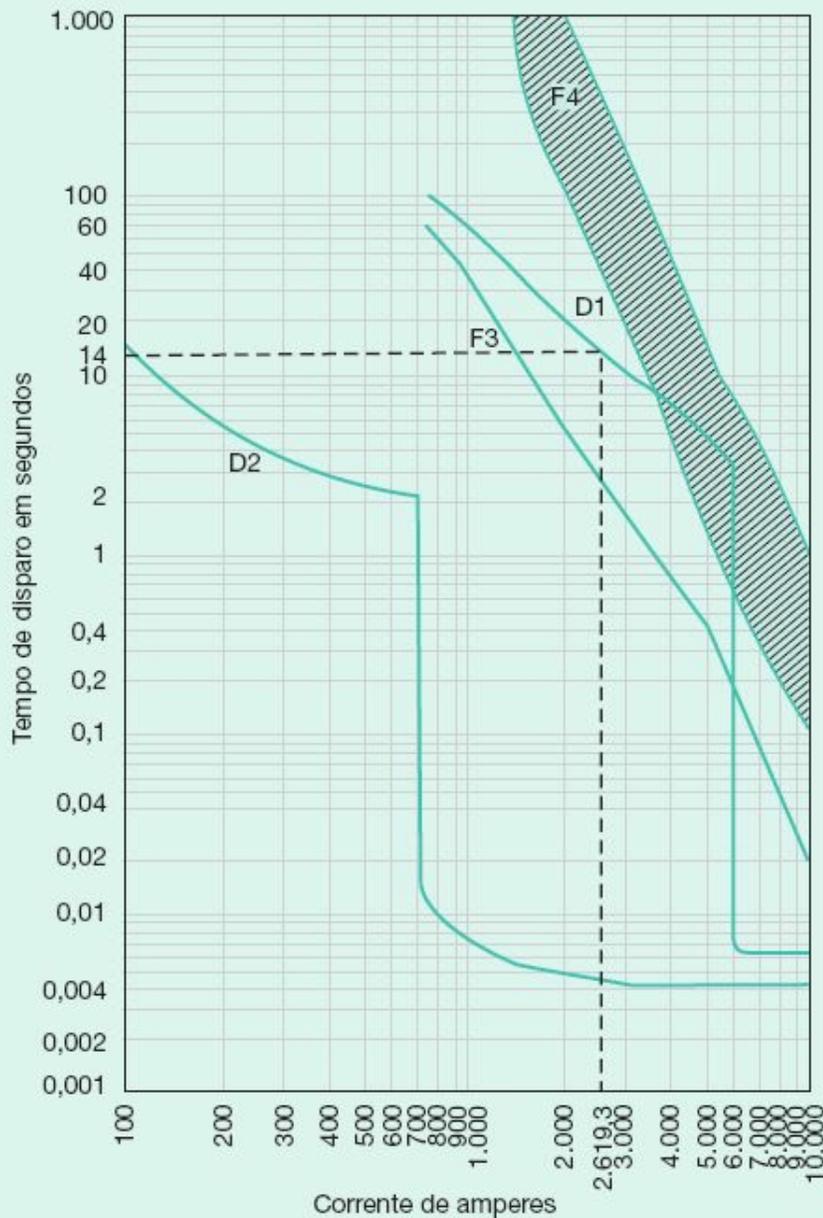


Figura 10.73 Curvas de coordenação entre F4(800 A) —

## D1(3WN6–630A) e D1–D2(3VF12–63A).

### h5) Coordenação entre o relé R1 (Pextron) e o fusível F1 (1.250 A)

A coordenação está contida na Figura 10.74.

$I_{csp} = 1.200 \text{ A}$  (corrente de curto-circuito trifásico no ponto de entrega de energia);

$I_{cs} = 700 \text{ A}$  (corrente de curto-circuito fase-terra no ponto de entrega de energia).

Para se determinar a curva do relé R1, basta aplicar a Equação (10.52):

$$T_{mi} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{ms} \text{ (s)}$$

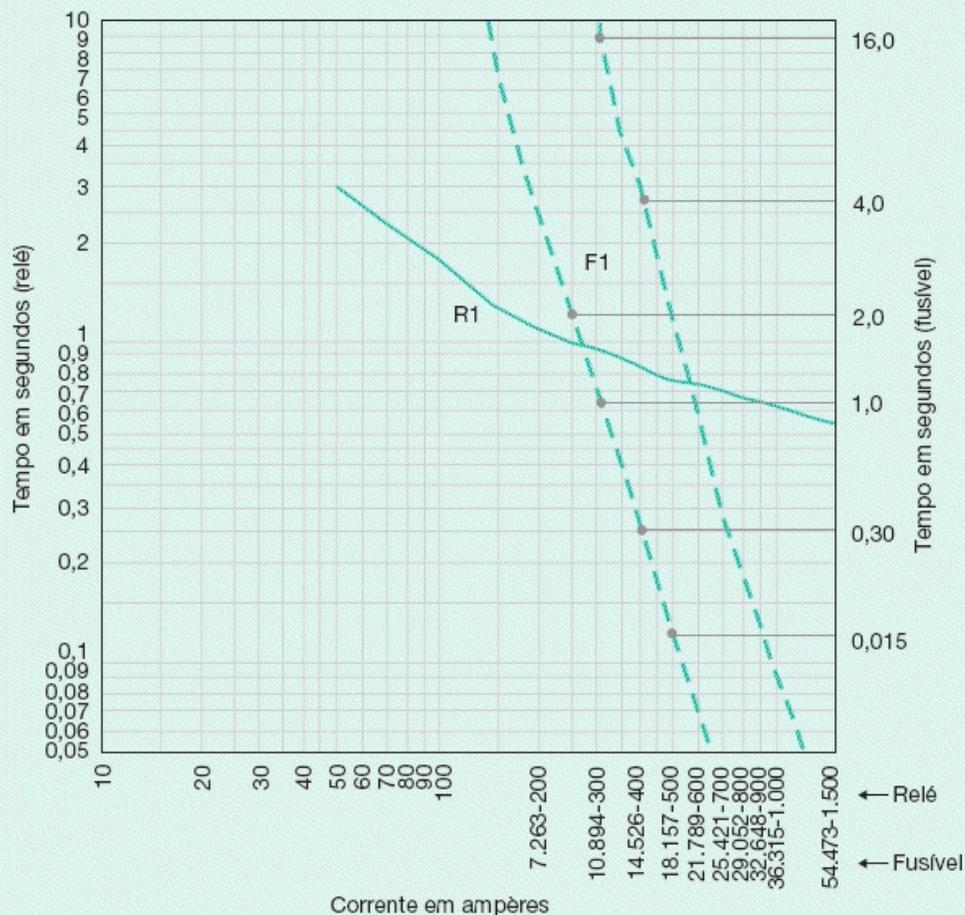
Substituindo  $T_{ms} = 0,34$  e de  $I_{ac} = 25 \text{ A}$ , anteriormente calculados, obteremos os valores da curva *tempo*  $\times$  *corrente*, em conformidade com a Tabela 10.16, variando-se o valor de  $I_{ma}$  de 50 a 1.500 A. Para o ponto 10 da curva, por exemplo, em que o valor de  $I_{ma} = 500 \text{ A}$ , obteremos o tempo de 0,77:

$$T_{mi} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{ms} = \frac{0,14}{\left(\frac{500}{25}\right)^{0,02} - 1} \times 0,34 = 0,77 \text{ s}$$

Como se percebe pela Figura 10.74, para uma corrente de curto-circuito no ponto 1 — que é de 15.000 A e que, se refletida para o lado de média tensão, vale 413 A —, não podemos garantir que haja seletividade, pois o fusível pode atuar na sua curva máxima. Entre a curva mínima do fusível e a curva do relé, há uma diferença de tempo entre elas de 0,60 s (0,25–0,85) s.

Observar que existem dois valores de corrente no eixo da abscissa, sendo um valor para a

corrente de curto-circuito no secundário (fusível) e outro valor para a corrente de curto-circuito no secundário refletida do primário (relé).



**Figura 10.74** Curvas de coordenação (coordenograma) entre R1 e F1(1.250 A).

### Exemplo de aplicação (10.17)

Determinar os ajustes do relé de proteção geral de uma indústria em cuja subestação estão instalados dois transformadores a seco, com capacidade nominal de 750 kVA, cada unidade, sendo que apenas um transformador está ligado. O segundo transformador somente será utilizado quando ocorrer a expansão do empreendimento. A impedância do transformador vale

6 %. A proteção geral da subestação é realizada por um disjuntor SF6 de 630 A da GE, associado a um relé digital Pextron URPE 7104, que recebe informações de corrente por um TC 10B200, com relação de transformação ajustada em 200-5 A.

O ponto de conexão da SE Indústria está distante da SE Concessionária, aproximadamente 15,81 km, assim distribuídos e em conformidade com a Figura 10.75. A ordem de ajuste da SE Concessionária está mostrada na Tabela 10.17.

Alimentador principal: 12,65 km em cabo de alumínio 266,8 MCM.

Ramal: 1,468 km em cabo de alumínio 1/0 AWG.

Sub-ramal: 1,699 km em cabo de cobre 16 mm<sup>2</sup>.

Ramal de entrada: 28 m em cabo isolado de 35 mm<sup>2</sup> de cobre.

#### a) Cálculo da tensão no circuito dos TCs ligados ao relé Pextron URPE 7104

De acordo com o projeto, o relé está localizado a uma distância de 2,0 m dos transformadores de corrente e é alimentado por um circuito em cabo  $2 \times 1,5$  mm<sup>2</sup>. As principais características técnicas dessa ligação são:

Impedância de um cabo de 1,5 mm<sup>2</sup>:  $Z_{cabo} = 14,81 \Omega/\text{km}$  (Tabela 3.22)

Impedância do relé:  $Z_{relé} = 0,070 \Omega$  (Tabela 10.19)

Corrente nominal do relé:  $I_{nr} = 5$  A

Distância entre o relé e os TCs:  $L = 2$  m

Transformador de corrente para proteção: 200/400/600/800-5 A

Relação de transformação: 200-5 A = 40

Fator de sobrecorrente do TC: 20

A tensão nos terminais dos TCs vale:

$$E_s = F \times I_{stc} \times \left( \frac{Z_{cabo}}{1.000} \times L + Z_{relé} \right)$$

$$E_s = 20 \times 5 \times \left( \frac{14,81}{1.000} \times 2 + 0,070 \right) = 9,9 \text{ V}$$

Como a tensão no secundário do TC 10B200 é de 200 V para uma corrente  $I_{cc} = 20 \times I_{nr}$  está garantido que o TC não irá saturar.

As características técnicas do relé Pextron 7104 estão contidas nas Tabelas 10.18 e 10.19.

## b) Cálculo da corrente de magnetização do transformador de força

**Tabela 10.17** Ordem de ajuste da SE Concessionária

Proteção do alimentador 0112 da SE Concessionária - SEL351-6D4E642X2					
Proteção de sobrecorrente de fase (50/51)			Proteção de sobrecorrente de neutro (50/51N)		
Item	Tipo	Ajuste	Item	Tipo	Ajuste
1	Pick-up	500 A	1	Pick-up	26
2	Curva	0,26	2	Curva	0,64
3	Tipo de curva	Muito inversa	3	Tipo de curva	Muito inversa
4	Instantâneo (1)	5000 A	4	Instantâneo	3500 A
5	Temp do Inst. (1)	0,10 s	5	Temp do Inst.	0,10 s
6	Instantâneo (2)	3.500 A	-	-	-
7	Temp do Inst. (2)	0,20 s	-	-	-

A corrente de magnetização do transformador de 750 kVA pode ser considerada igual  $I_{mg} = 8 \times I_{tr}$  com o tempo de duração da ordem de 100 ms. No presente caso, há somente um transformador em operação.

$$I_{mg} = 8 \times I_{tr} = 8 \times \frac{750}{\sqrt{3} \times 13,8} = 251 \text{ A}$$

$$T_{magt} = 100 \text{ ms} = 0,10 \text{ s}$$

A corrente ANSI, levando em conta a impedância do transformador em operação, vale:

$$I_{ansi} = \frac{I_{nt}}{Z_{tr}} = \left( \frac{750}{\sqrt{3} \times 13,8} \right) \times \frac{1}{0,06} = 523 \text{ A}$$

$I_{nt}$  - corrente nominal do transformador de 750 kVA;

$Z_{nt}$  - 6 % impedância nominal do transformador de 750 kVA;

$T_{ansit} = 3,5 \text{ s}$  (valor atribuído para o tempo do ponto ANSI).

**Tabela 10.18** Características do relé Pextron URPE 7104

Funções ANSI: 50/51/50N/51N/51GS Fase (A-B-C)			
Parâmetro	Curva vermelha	Descrição do parâmetro	Faixa de ajuste recomendada
		<b>Fase</b>	
TC	VM	Relação do transformador de corrente (TC)	1...250 (degrau de 1) ou 10...1250 (degrau de 100) ou seleção através da chave dip (vide figura 2)

I partida	VM	Corrente de partida da unidade de temporização curva inversa de fase	$(0,25...16,0 A) \times TC$
Curva	VM	Tipo de curva de atuação para fase	NI-MI-EI-LONG-IT-I2T
D.T.	VM	Ajuste do dial de tempo para fase	0,10...2,00 S
I def.	VM	Corrente de partida da unidade de tempo definido de fase	$(0,25...100 A) \times TC$
T def.	VM	Tempo de unidade definido de fase	0,10...2,00 s
I inst.	VM	Corrente da unidade instantânea de fase	$(0,25...100 A) \times TC$
<b>Neutro (D)</b>			
Parâmetro	Curva verde	Descrição do parâmetro	Faixa de ajuste recomendada
I partida	VD	Corrente de partida da unidade de temporização curva inversa de neutro	$(0,15...6,50 A) \times TC$
Curva	VD	Tipo de curva de atuação para neutro	NI-MI-EI-LONG-IT-I2T
D.T.	VD	Ajuste do dial de tempo para neutro	0,10...2,00 S

I def.	VD	Corrente de partida da unidade de tempo definido de neutro	$(0,15...50 \text{ A}) \times \text{TC}$
T def.	VD	Tempo de fase definido de neutro	0,10...240 s
I inst.	VD	Corrente da unidade instantânea de neutro	$(0,15...50 \text{ A}) \times \text{TC}$

### c) Cálculo das impedâncias

Impedâncias equivalentes da concessionária [Ponto (A)]

Observar inicialmente a Figura 10.75, que mostra os vários trechos do alimentador 0112 da SE Concessionária que atende ao empreendimento, de acordo com a informação técnica do ponto de conexão fornecido pela concessionária.

Os valores das impedâncias equivalentes para sequência positiva e zero na base de 100 MVA fornecidos pela concessionária no barramento da SE Concessionária são:

$$- R_{eq} = 0,0138 \text{ pu}$$

**Tabela 10.19** Tabela de especificações técnicas do relé Pextron URPE 7104

Tabela de especificação técnica	
Grandeza	Corrente alternada
Característica	
Quantidade	3 fases + 12 neutros
Consumo de entrada de medição de corrente para a fase com	
5 A = 0,175 VA	

Entrada de Medição	Consumo de entrada de medição de corrente para a fase com $5 A = 0,175 VA$			
	Impedância de entrada da fase ( $Z_{IN}$ )	7	mΩ	
	Impedância de entrada de neutro ( $Z_{IN}$ )	7	mΩ	
	Ajuste TAP	A, B, C < AJ acima 5,0 (vide item 3.2.a)	0,25 a 16,00	A
	0,01 A em 0,01 A	D/N < AJ acima 2,50 (vide item 3.2.a)	0,15 a 6,50	A
	Capacidade Térmica Fase e neutro	Permanente	15	A
		Tempo de curto-circuito (1 s)	300	A
		Dinâmica (0,1s)	1.000	A
Frequência de entrada: $60 \pm Hz$ (Padrão) $50 Hz \pm 2 Hz$ (Sob encomenda)				
Unidade Temporizada 51- 51 N/GS	Tempo independente – Dial de tempo D.T. (Curvas: NI-MI-EI-LONG-IT-I2T)	0,10 a 2,00		
	Tempo definido (independente)	0,05 a 240		
	Relação de rearme (DROP-OUT)	99 %		

Unidade Instantânea 50-50 N	Entrada de fase A-B-C		0,25 a 100	A	
	Entrada de neutro (D)		0,15 a 50	A	
	Tempo de operação		< 50	ms	
	Relação de rearme (DROP-OUT)		99	%	
Entradas Lógicas	Nível	Nível baixo (desligado)	0 a 20	Vca/Vcc	
	Tensão	Nível alto (ligado)	80 a 250	Vca/Vcc	
	Faixa 1				
	Nível	Nível baixo (desligado)	0 a 10	Vca/Vcc	
	Tensão	Nível alto (ligado)	20 a 80	Vca/Vcc	
	Faixa 2				
	Funções de bloqueio	XB1 Bloqueio relê de neutro 50N-51N/GS			
		XB2 Bloqueio unidade instantânea fase 50			
XB2 Bloqueio unidade temporizada fase 51					
XB4 Registro de corrente e rearme bandeirola					

#### Cálculo das impedâncias da rede aérea entre o Ponto (A) e o Ponto (B)

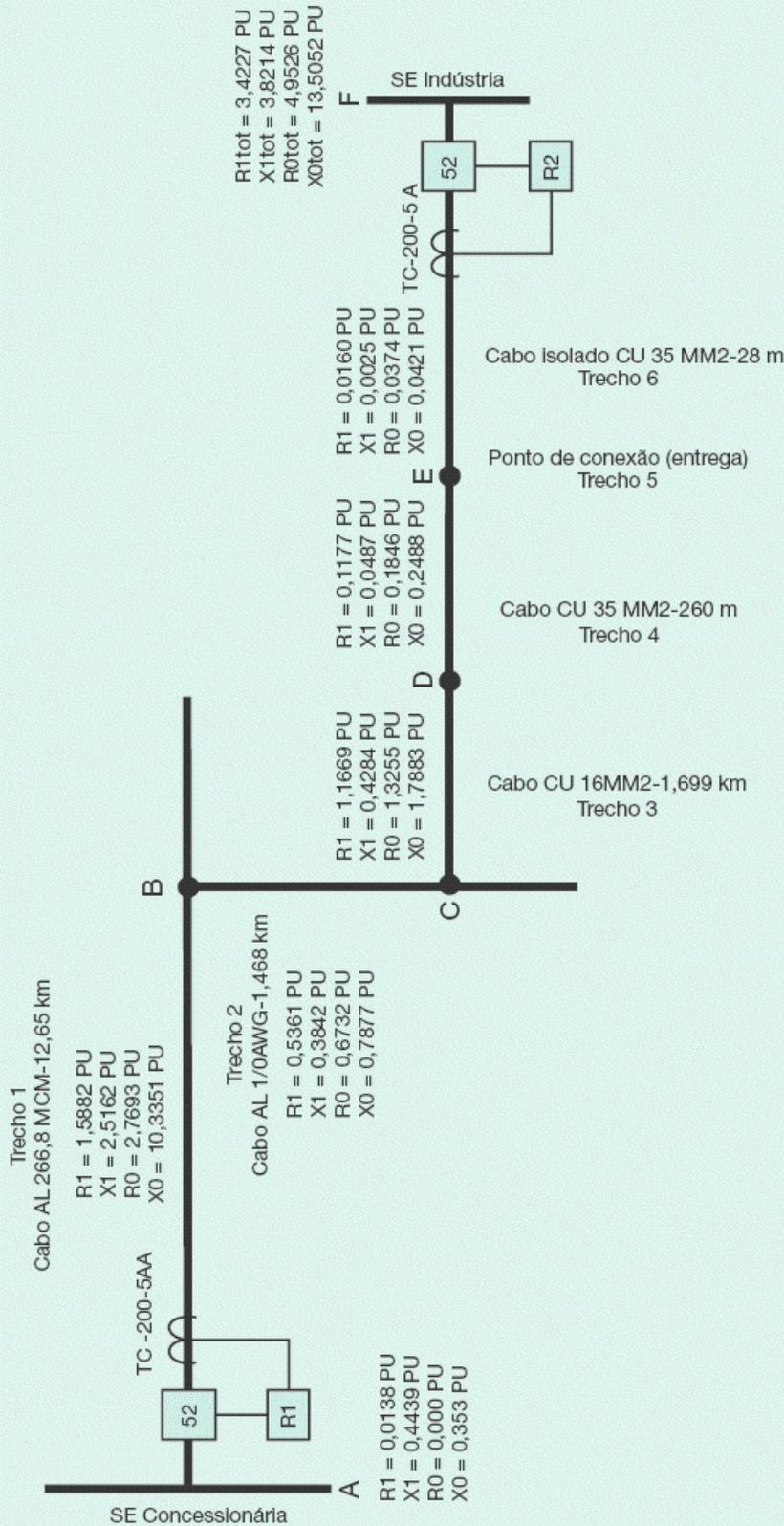
Corresponde às impedâncias do trecho 1 em cabo 266,8 MCM (CAA), com comprimento de 12,65 km, e que liga a subestação de distribuição da SE Concessionária, no Ponto (A), com o

poste de derivação, no Ponto (B), de acordo com a Figura 10.75. Os valores de impedância valem:

- $R_{pcc1} = 0,2391 \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência positiva do cabo)
- $X_{pcc1} = 0,2391 \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência positiva do cabo)
- $R_{pcc1} = 0,2391 \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência zero do cabo)
- $X_{pcc1} = 0,2391 \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência zero do cabo)

Logo, a impedância do trecho 1, vale:

$$Z_{c1} = Z_{ec1} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right)$$



**Figura 10.75** Diagrama das impedâncias do sistema.

$$R_{pc1} = R_{pcc1} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,2391 \times 12,65 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 1,5882 \text{ pu}$$

$$X_{pc1} = X_{pcc1} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,3788 \times 12,65 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 2,5162 \text{ pu}$$

$$R_{zc1} = R_{zcc1} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,4169 \times 12,65 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 2,7693 \text{ pu}$$

$$X_{zc1} = X_{zcc1} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 1,5559 \times 12,65 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 10,3351 \text{ pu}$$

Cálculo das impedâncias da rede aérea entre o Ponto (B) e o Ponto (C)

Corresponde às impedâncias do trecho 2 em cabo 1/0 AWG (CAA), com comprimento de 1,468 km. Os valores de impedância valem:

- $R_{pcc2} = 0,6955 \text{ } \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência positiva do cabo)
- $X_{pcc2} = 0,4984 \text{ } \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência positiva do cabo)
- $R_{pcc2} = 0,8733 \text{ } \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência zero do cabo)
- $X_{pcc2} = 1,0219 \text{ } \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência zero do cabo)

Logo, a impedância do trecho 2, vale:

$$Z_{c2} = Z_{cc2} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right)$$

$$R_{pc2} = R_{pcc2} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,6955 \times 1,468 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,5361 \text{ pu}$$

$$X_{pc2} = X_{pcc2} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,4984 \times 1,468 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,3842 \text{ pu}$$

$$R_{zc2} = R_{zcc2} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,8733 \times 1,468 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,6732 \text{ pu}$$

$$X_{zc2} = X_{zcc2} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 1,0219 \times 1,468 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,7877 \text{ pu}$$

Cálculo das impedâncias da rede aérea entre o Ponto (C) e o Ponto (D) — trecho 3

Corresponde às impedâncias do trecho 3 em cabo de cobre 16 mm<sup>2</sup> AWG, com comprimento de 1,699 km. Os valores de impedância valem:

- $R_{pcc3} = 1,3080 \text{ } \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência positiva do cabo)
- $X_{pcc3} = 0,4802 \text{ } \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência positiva do cabo)
- $R_{zcc3} = 1,4858 \text{ } \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência zero do cabo)
- $X_{zcc3} = 2,0045 \text{ } \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência zero do cabo)

Logo, a impedância do trecho 3, vale:

$$Z_{c3} = Z_{cc3} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right)$$

$$R_{pc3} = R_{pcc3} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 1,3080 \times 1,699 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 1,1669 \text{ pu}$$

$$X_{pc3} = X_{pcc3} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,4802 \times 1,699 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,4284 \text{ pu}$$

$$R_{zc3} = R_{zcc3} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 1,4858 \times 1,699 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 1,3255 \text{ pu}$$

$$X_{zc3} = X_{zcc3} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 2,0045 \times 1,699 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 1,7883 \text{ pu}$$

Cálculo das impedâncias da rede aérea entre o Ponto (D) e o Ponto (E) — trecho 4

Corresponde às impedâncias do trecho 4 em cabo de cobre 35 mm<sup>2</sup>, com comprimento de 0,260 km. Os valores de impedância valem:

- $R_{pc4} = 0,8620 \text{ } \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência positiva do cabo)
- $X_{pc4} = 0,3567 \text{ } \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência positiva do cabo)
- $R_{zc4} = 1,3522 \text{ } \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência zero do cabo)
- $X_{zc4} = 1,8222 \text{ } \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência zero do cabo)

Logo, a impedância do trecho 4, vale:

$$Z_{c4} = Z_{cc4} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right)$$

$$R_{pc4} = R_{pcc4} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,8620 \times 0,260 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,1177 \text{ pu}$$

$$X_{pc4} = X_{pcc4} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,3567 \times 0,260 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,0487 \text{ pu}$$

$$R_{zc4} = R_{zcc4} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 1,3522 \times 0,260 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,1846 \text{ pu}$$

$$X_{zc4} = X_{zcc4} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 1,8222 \times 0,260 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,2488 \text{ pu}$$

Cálculo das impedâncias da rede subterrânea entre o Ponto (E) e o Ponto (F) — trecho 6

Corresponde às impedâncias do trecho 6 em cabo de cobre isolado de 35 mm<sup>2</sup>, com comprimento de 0,028 km. Os valores de impedância valem:

- $R_{pc5} = 1,0912 \text{ } \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência positiva do cabo)
- $X_{pc5} = 0,1692 \text{ } \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência positiva do cabo)
- $R_{zc5} = 2,5460 \text{ } \Omega/\text{km}$  (resistência de sequência zero do cabo)
- $X_{zc5} = 2,864 \text{ } \Omega/\text{km}$  (reatância de sequência zero do cabo)

Logo, a impedância do trecho 5, vale:

$$Z_{c5} = Z_{cc5} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right)$$

$$R_{pc5} = R_{pcc5} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 1,0912 \times 0,028 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,0160 \text{ pu}$$

$$X_{pc5} = X_{pcc5} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 0,1692 \times 0,028 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,0025 \text{ pu}$$

$$R_{zc5} = R_{zcc5} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 2,5460 \times 0,028 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,0374 \text{ pu}$$

$$X_{zc5} = X_{zcc5} \times L_c \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 2,8640 \times 0,028 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 0,0421 \text{ pu}$$

Cálculo da impedância do transformador de 750 kVA na base de 100 MVA

$$Z_{tr} \cong X_{tr} = 6,0 \% = 0,060 \text{ pu}$$

$$Z_{tr} = 750 \text{ kVA}$$

Logo, a impedância em *pu* do transformador na base de 100 MVA vale:

$$Z_{tr} = Z_n \times \frac{P_b}{P_{tr}} = 0,06 \times \frac{100}{0,75} = 8 \text{ pu}$$

Cálculo da impedância de contato com a terra

Será considerado o valor indicado pela concessionária, que é 100  $\Omega$ :

$$Z_c = Z_{\Omega} \times \left( \frac{P_b}{V_b^2} \right) = 100 \times \left( \frac{100}{13,80^2} \right) = 52,51 \text{ pu}$$

#### d) Cálculo das correntes de curto-circuito

No ponto de conexão

A soma das resistências e reatâncias até o ponto de conexão vale:

$$R_{\text{ptot}} = 0,0138 + 1,5882 + 0,5361 + 1,1669 + 0,1177 = 3,4227 \text{ pu}$$

$$X_{\text{ptot}} = 0,4439 + 2,5162 + 0,3842 + 0,4284 + 0,0487 = 3,8214 \text{ pu}$$

$$R_{\text{ztot}} = 0,0 + 2,7693 + 0,6732 + 1,3255 + 0,1846 = 4,9526 \text{ pu}$$

$$X_{\text{ztot}} = 0,3453 + 10,3351 + 0,7877 + 1,7883 + 0,2488 = 13,5052 \text{ pu}$$

Logo, a impedância a até o ponto de conexão vale:

$$Z_{\text{ppc}} = 3,4227 + j3,8214 = 5,1301 \angle 48,15^\circ \text{ pu}$$

$$Z_{\text{zpc}} = 4,9526 + j13,5052 = 14,3486 \angle 69,86^\circ \text{ pu}$$

- Curto-circuito trifásico no ponto de conexão

$$I_{c3f} = \frac{1}{Z_{\text{ppc}}} \times I_b = \frac{1}{5,1301 \angle 48,15^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 815 \angle -48,15^\circ \text{ A}$$

- Corrente de curto-circuito fase-terra máxima

$$I_{\text{ftmá}} = \frac{3}{Z_{\text{zpc}}} \times I_b = \frac{3}{2 \times 5,1301 \angle 48,15^\circ + 14,3486 \angle 69,86^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80}$$

$$I_{\text{ftmá}} = \frac{3}{24,22 \angle 60,84^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 518,21 \angle -60,84^\circ \text{ A}$$

- Corrente de curto-circuito fase-terra mínima

$$I_{fmi} = \frac{3}{Z_{tot}} \times I_b = \frac{3}{2 \times 5,1301 \angle 48,15^\circ + 24,22 \angle 60,84^\circ + 3 \times 52,51} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80}$$

$$I_{fmi} = \frac{3}{178,5140 \angle 9,28^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80} \cong 70 \angle -9,28^\circ \text{ A}$$

Corrente de curto-circuito no barramento da SE Indústria

A impedância até o transformador vale:

$$R_{ptot} = 3,4227 + 0,016 = 3,4387 \text{ pu}$$

$$X_{ptot} = 3,8214 + 0,0025 = 3,8239 \text{ pu}$$

$$R_{ztot} = 4,9526 + 0,0374 = 4,9900 \text{ pu}$$

$$X_{ztot} = 13,5052 + 0,0421 = 13,5473 \text{ pu}$$

Logo, a impedância a até o barramento primário da SE Indústria:

$$Z_{ppc} = 3,4387 + j3,8239 = 5,1410 \angle 48,04^\circ \text{ pu}$$

$$R_{zpc} = 4,9900 + j13,5473 = 14,4370 \angle 69,77^\circ \text{ pu}$$

– Curto-circuito trifásico no barramento da SE Indústria

$$I_{c3f} = \frac{1}{Z_{tr500}} \times I_b = \frac{1}{5,1410 \angle 48,01^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 813 \angle -48,01^\circ \text{ A}$$

– Corrente de curto-circuito fase e terra máxima

$$I_{ftmá} = \frac{3}{Z_{tr500}} \times I_b = \frac{3}{2 \times 5,1410 \angle 48,01^\circ + 14,4370 \angle 69,77^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80}$$

$$I_{ftmá} = \frac{3}{24,2873 \angle 60,74^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 516 \angle -60,74^\circ \text{ A}$$

– Corrente de curto-circuito fase e terra mínima

$$I_{ftmí} = \frac{3}{Z_{tr500}} \times I_b = \frac{3}{2 \times 5,1410 \angle 48,01^\circ + 14,4370 \angle 69,77^\circ + 3 \times 52,51} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80}$$

$$I_{ftmí} = \frac{3}{170,7209 \angle 7,13^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 73 \angle -7,13^\circ \text{ A}$$

Cálculo da corrente de curto-circuito nos terminais secundários do transformador de 750 kVA

A impedância até o secundário do transformador vale:

$$R_{ppc} = 5,1410 \angle 48,01^\circ + 0 + 8,0 \angle 90^\circ = 3,4393 + j11,8211 \text{ pu} = 12,3113 \angle 73,77^\circ \text{ pu}$$

$$R_{zpc} = 14,4370 \angle 69,77^\circ \text{ pu}$$

– Corrente de curto-circuito trifásico

$$I_{c3f} = \frac{1}{Z_{tr750}} \times I_b = \frac{1}{12,3113 \angle 73,77^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 0,38} = 12.341 \angle -73,77^\circ \text{ A}$$

– Corrente de curto-circuito fase-terra

$$I_{ft} = \frac{3}{Z_{tot}} \times I_b = \frac{3}{2 \times 12,3113 \angle 73,77^\circ + 8 \angle 90^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 0,38}$$

$$I_{ft} = \frac{3}{32,3811 \angle 77,73^\circ} \times \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 0,38} = 14.076 \angle -77,73^\circ \text{ A}$$

Os valores das correntes de curtos-circuitos estão mostrados na Figura 10.76.

### e) Determinação dos ajustes da proteção em média tensão

A concessionária forneceu os principais dados de ajuste de sua proteção referente ao alimentador de distribuição 0112 da SE Concessionária que atenderá a SE Indústria.

Os valores de ajuste do relé do alimentador 0112 da SE Concessionária fornecidos pela concessionária estão na Tabela 10.17.

Os dados de catálogo do relé Pextron 7104 estão contidos nas Tabelas 10.18 e 10.19.

Determinação dos ajustes das proteções de sobrecorrente instantânea e temporizada de fase (50/51)

- Determinação do tempo de resposta do relé temporizado de fase (51) da SE Concessionária para defeito na barra da SE Indústria

Como a curva do relé do alimentador da 0112 da SE Concessionária que suprirá a SE Indústria é de característica muito inversa, seu tempo de atuação para a corrente de curto-circuito na barra da SE Indústria vale:

$$T_{rc} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} = \frac{13,5}{\left(\frac{813}{500}\right) - 1} \times 0,26 = 5,6 \text{ s}$$

- Determinação da corrente de atuação da unidade temporizada de fase do relé da SE Indústria (51)

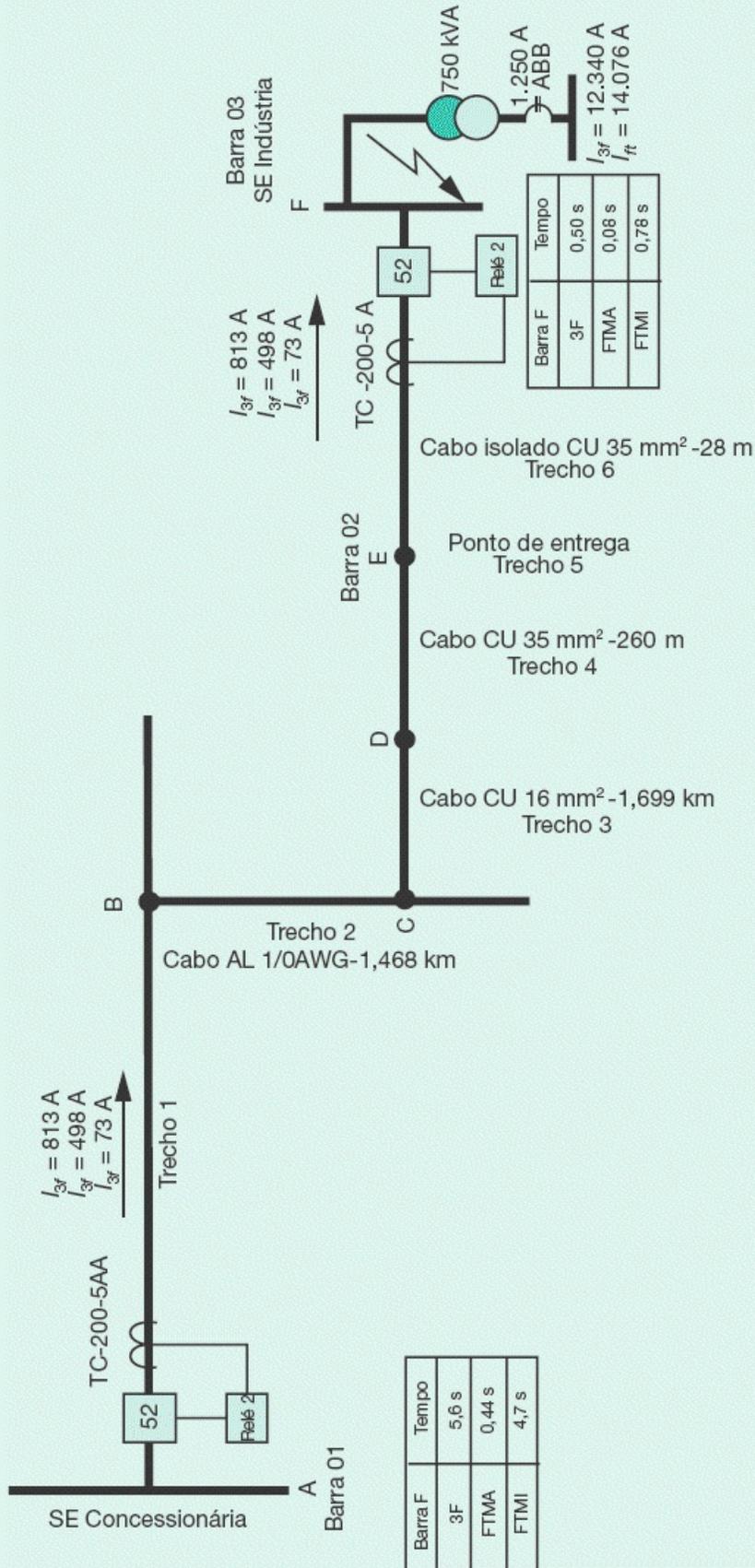
$$I_{ntr} = \frac{750}{\sqrt{3} \times 13,80} = 31,3 \text{ A (corrente nominal do transformador da SE Indústria)}$$

Para um fator de sobrecarga permitido de 20 % ( $K = 1,2$ ), tem-se:

$$I_{at} = K \times I_{ntr} = 1,2 \times 31,3 = 37,5 \cong 38 \text{ A}$$

Logo, o ajuste da corrente de atuação do relé vale:

$$I_{a51} = \frac{38}{RTC} = \frac{38}{40} = 0,95 \text{ A}$$



**Figura 10.76** Diagrama das correntes de defeito e ajustes.

- Determinação do tempo e curva de atuação da unidade temporizada de fase do relé da SE Indústria (51)

O tempo de atuação do relé da SE Indústria vale:

$$T_{rc} = T_{ri} + \Delta T_{co}$$

$T_{ri}$  - tempo de atuação do relé digital da SE Indústria;

$T_{rc} = 5,6$  - tempo de atuação do relé digital da SE Concessionária;

$\Delta T_{co}$  - intervalo de coordenação; neste caso, será considerado o intervalo de coordenação igual a 0,30 s.

$$5,6 = T_{ri} + 0,30 \rightarrow T_{ri} = 5,6 - 0,30 = 5,3 \text{ s (tempo de atuação do relé da SE Indústria)}$$

Tratando-se de um tempo muito elevado, iremos considerar o tempo de atuação do relé da SE Indústria no valor de 0,50 s.

Neste caso, o intervalo de tempo de coordenação será de:

$$\Delta T_{\infty} = T_{ri} + T_{ri} \rightarrow T_{ri} = 5,6 - 0,50 = 5,1 > 0,30 \text{ s (condição satisfeita)}$$

Iremos utilizar para o relé de proteção geral da SE Indústria a curva de tempo muito inversa, igual à curva do relé da SE Concessionária. Assim, pode-se selecionar a curva de atuação do relé da SE Indústria, em função da corrente de curto-circuito nos terminais primários do transformador da SE Indústria, ou seja:

$$T_{ri} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} \rightarrow T_{ms} = \frac{0,50 \times \left(\frac{813}{38}\right) - 1}{13,5} = 0,72$$

- Determinação da corrente de atuação da unidade tempo definido de fase do relé

da SE Indústria (50)

Será habilitada a função 50 de tempo definido (TD) para uma corrente duas vezes superior à corrente de energização do transformador, garantindo, assim, que o relé não atuará durante a energização desse equipamento, ou seja:

$$I_{51} = 2 \times I_{mg} = 2 \times \cong 500 \text{ A}$$

O valor do ajuste da corrente de TD do relé será:

$$I_{a50} = \frac{500}{RTC} = \frac{500}{40} = 12,5 \text{ A} \rightarrow T_{aj} = 0,10 \text{ s (valor assumido)}$$

Determinação dos ajustes das proteções de sobrecorrente instantânea e temporizada de neutro (50/51N)

- Determinação do tempo de atuação da unidade temporizada de neutro do relé da SE Concessionária (51N) para defeito fase-terra mínimo na SE Indústria

Para a corrente de curto-circuito fase-terra mínima na barra da SE Indústria, temos:

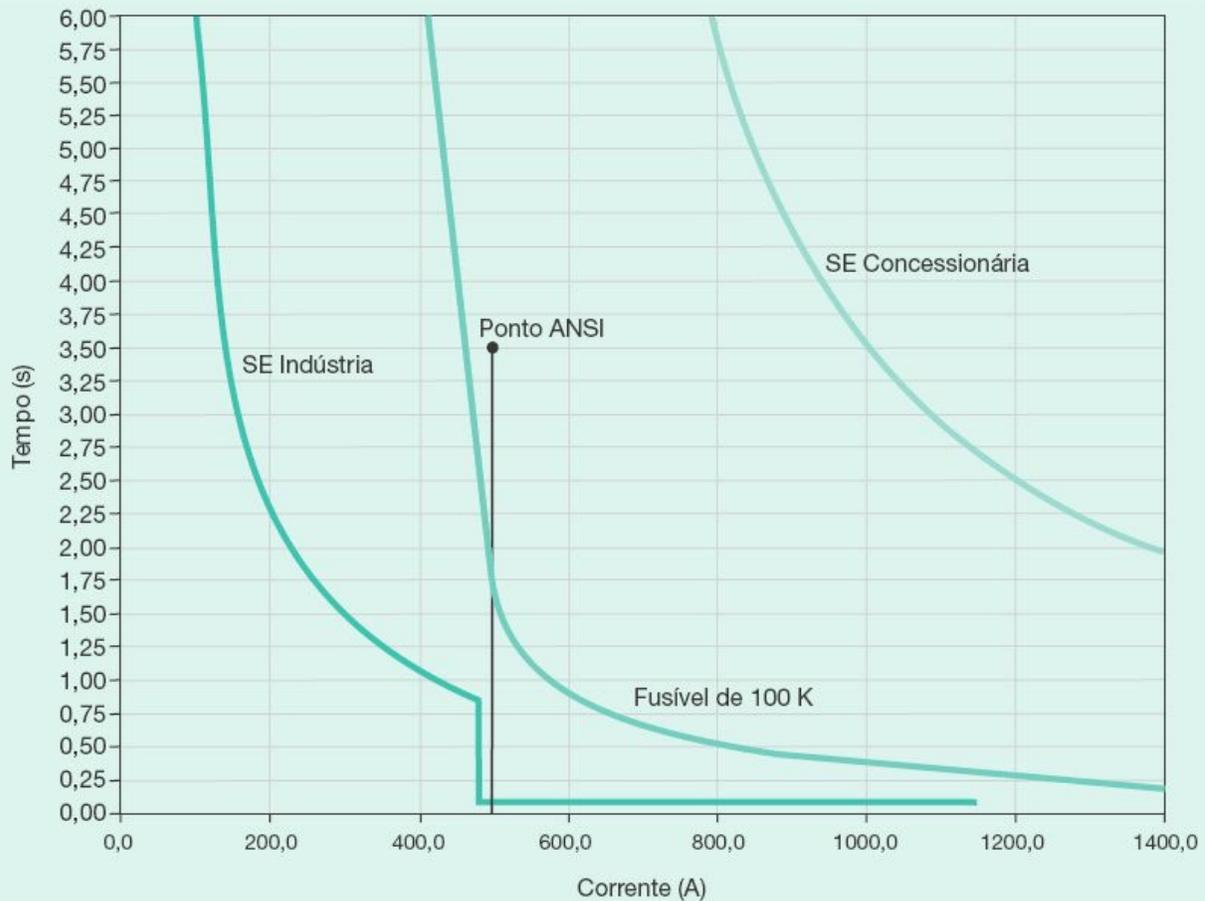
$$T_{rc} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} = \frac{13,5}{\left(\frac{73}{26}\right) - 1} \times 0,64 = 4,7 \text{ s}$$

**Tabela 10.20** Ajustes das proteções do relé da SE Indústria

Proteção do relé da SE Indústria - URPE 7104					
Proteção de sobrecorrente de fase (50/51)			Proteção de sobrecorrente de neutro (50/51N)		
Item	Tipo	Ajuste	Item	Tipo	Ajuste
1	Pick-up	0,95 A	1	Pick-up	0,50 A

2	Curva	0,72	2	Curva	0,15
3	Tipo de curva	Muito inv.	3	Tipo de curva	Muito inv.
4	Instantâneo	12,5 A	4	Instantâneo	0,50 A
5	Tempo do TD	0,10 s	5	Temp do Inst.	0

- Determinação da corrente de atuação da unidade temporizada de neutro do relé da SE Indústria (51N)



**Figura 10.77** Curvas de coordenação para defeitos trifásicos.

Serão consideradas duas condições:

## Corrente de desequilíbrio do alimentador

Será considerada uma corrente de desequilíbrio de 20 % da corrente de carga máxima da SE Indústria

$$I_{des} = 0,20 \times I_{at} = 0,20 \times 38 = 7,6 \text{ A}$$

## Corrente mínima de operação do relé

A corrente mínima de operação do relé digital vale 10 % da corrente primária do transformador de corrente (informação do catálogo do fabricante e válida praticamente para todos os relés digitais).

$$I_{imin} = 0,10 \times I_{pr} = 0,10 \times 200 = 20 \text{ A}$$

Logo, será adotada a corrente mínima de operação do relé:

$$I_{a50n} = \frac{20}{RTC} = \frac{20}{40} = 0,50 \text{ A (ajuste do relé)}$$

- Determinação do tempo e curva de atuação da unidade temporizada de neutro do relé da SE Indústria (51N) para defeito fase-terra mínimo.

Será adotada a curva de característica muito inversa, o mesmo tipo de curva do relé da SE Concessionária.

Para a corrente de curto-circuito fase-terra mínima na barra da SE Indústria podemos determinar o tempo de atuação do relé (51N) da SE Indústria.

$$T_{ri} = T_{rc} + \Delta T_{co}$$

$T_{rc} = 4,7\text{s}$  - tempo de atuação do relé digital da SE Concessionária

$T_{ri}$  - tempo de atuação do relé digital da SE Indústria

$\Delta T_{co}$  - intervalo de coordenação.

$$4,7 = T_{ri} + 0,30 \rightarrow T_{ri} = 4,7 - 0,30 = 4,4 \text{ s (tempo de atuação do relé da SE Indústria).}$$

Tratando-se de um tempo muito alto para atuação do relé da SE Indústria e uma corrente de curto-circuito muito baixa, ajustaremos o relé para na sua curva mínima disponível (0,15) para se obter o menor tempo de atuação do mesmo. Neste caso, o ajuste da curva de atuação do relé vale:

$$T_{ri} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} = \frac{13,5}{\left(\frac{73}{20}\right) - 1} \times 0,15 = 0,76 \text{ s}$$

A curva e o tempo de ajuste do relé temporizado de neutro da SE Indústria valem:

- Determinação do tempo de atuação da unidade temporizada de neutro do relé da SE Concessionária (51N) para defeito fase-terra máximo na SE Indústria

Para a corrente de curto-circuito fase e terra máxima na barra da SE Indústria, podemos determinar o tempo de atuação do relé (51N) da SE Concessionária:

$$T_{ri} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} = \frac{13,5}{\left(\frac{518,21}{26}\right) - 1} \times 0,64 = 0,46 \text{ s}$$

- Determinação do tempo de atuação da unidade temporizada de neutro do relé da SE Indústria (51N) para defeito fase-terra máximo

Para a corrente de curto-circuito fase-terra máxima na barra da SE Indústria, o tempo de atuação do relé (51N) vale:

$$T_{ri} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} = \frac{13,5}{\left(\frac{518,21}{20}\right) - 1} \times 0,15 = 0,08 \text{ s}$$

- Determinação da corrente de atuação da unidade instantânea de neutro do relé da SE Indústria (50N) para a corrente de curto-circuito fase-terra mínima

A corrente mínima de operação do relé digital vale 10 % da corrente primária do transformador de corrente:

$$I_{imin} = 0,10 \times I_{pr} = 0,10 \times 200 = 20 \text{ A}$$

Logo, a corrente de ajuste da unidade instantânea de neutro será de 20 A. O ajuste no relé vale:

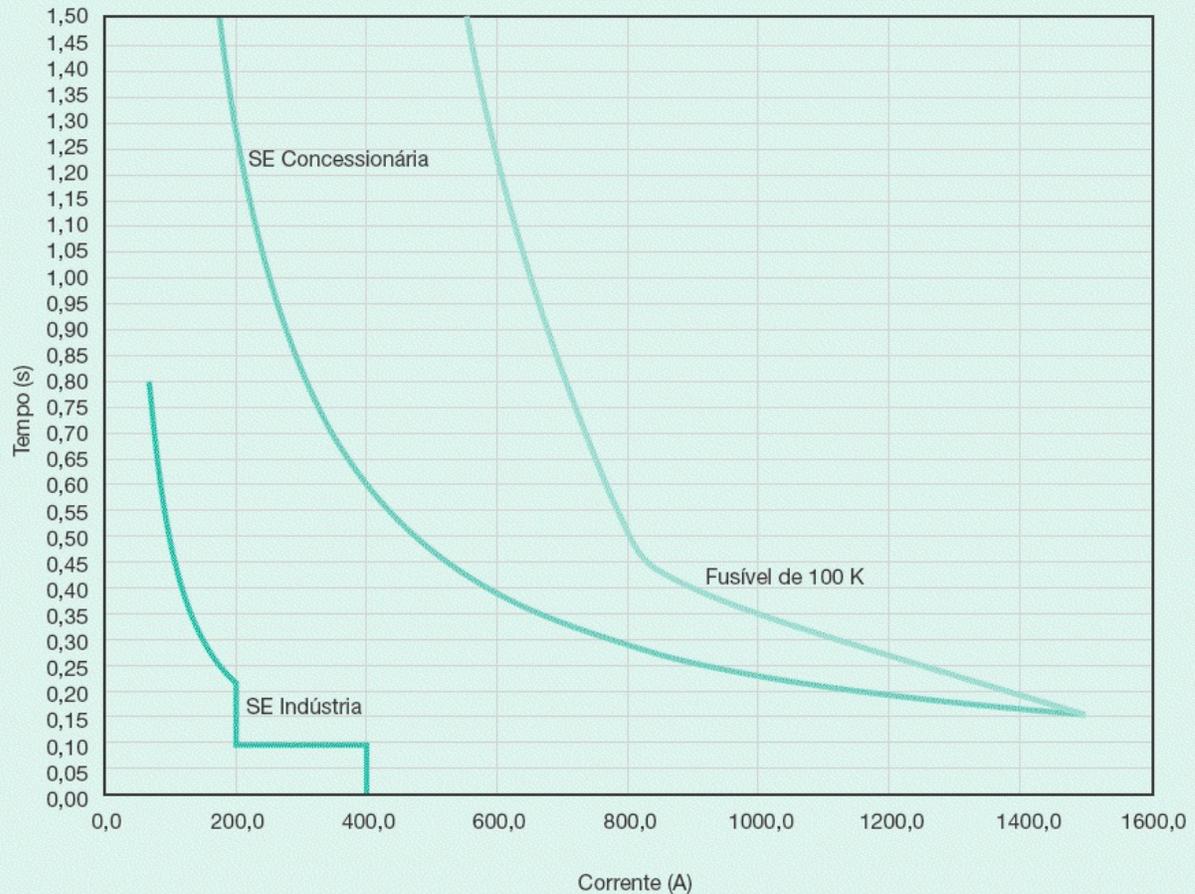
$$I_{a50} = \frac{20}{RTC} = \frac{20}{40} = 0,50 \text{ A} \rightarrow T_{aj} = 0,0 \text{ s (valor assumido)}$$

Os valores de ajuste do relé digital Pextron 7401 estão contidos na Tabela 10.20.

**f) Determinação da corrente nominal do fusível de proteção da rede de distribuição na barra da SE Indústria**

A corrente máxima de carga vale:

$$I_{nt} = \frac{750}{\sqrt{3} \times 13,8} = 31,3 \text{ A}$$



**Figura 10.78** Curvas de coordenação para defeitos monopolares.

Logo, a corrente nominal do fusível vale:

$$I_{nf} = 1,5 \times I_{nt} = 1,5 \times 31,3 \cong 47 \text{ A}$$

Foi adotado o fusível de 100 K para permitir seletividade com o relé da SE Indústria.

As curvas dos relés e do fusível estão contidas no gráfico da Figura 10.77.

**g) Determinação dos ajustes de tempo e corrente para defeitos na barra de baixa tensão da SE Indústria**

Dados do sistema

- Corrente de curto-circuito trifásica: 12.341 A.
- Corrente de curto-circuito fase e terra: 14.076 A.

### Dados do disjuntor

- Fabricante ABB.
- Modelo: Sace Emax.
- Microprocessador: Sace PR111.
- Corrente nominal do disjuntor: 1.250 A.
- Capacidade de interrupção: 65 kA.
- Corrente térmica de curto-circuito (1 s): 55 kA.

### Ajustes do disjuntor

- Corrente de ajuste

$$I_{nt} = \frac{750}{\sqrt{3} \times 0,38} = 1.139 \text{ A} \rightarrow I_{aj} = 1.250 \text{ A}$$

### h) Múltiplo da corrente ajustada para defeitos trifásicos

$$M = \frac{12.340}{1.250} \cong 10$$

**Tabela 10.21** Funções de proteção do microprocessador do disjuntor de baixa tensão

Funções de Proteção e Valores de Ajuste do SACE PR 111 (ABB)				
Função	Faixas de correntes	Tempo de atuação	Pode ser excluída	Relação $t = t(I)$
Proteção de	$I1 = 0,4 \times I_n$	Com corrente		
	$0,5 \times I_n$	$I = 6 \times I1$		
	$0,6 \times I_n$	$t1 = 3 \text{ s (curva A)}$		

sobrecarga (L)	$0,7 \times I_n$	6 s (curva B)	Não	$t = k/I^2$
	$0,8 \times I_n$	12 s (curva C)		
	$0,9 \times I_n$	18 s (curva D)		
	$0,95 \times I_n$			
	$1 \times I_n$			
Proteção seletiva de curto-circuito (S)	$I_2 = 1 \times I_n$	Com corrente	Sim	$t = k/I^2$ (curva tempo $\times$ corrente)
	$2 \times I_n$	$I = 8 \times I_n$		
	$3 \times I_n$	$t_2 = 0,05$ s (curva A)		
	$4 \times I_n$	0,10 s (curva B)		
	$6 \times I_n$	0,25 s (curva C)		
	$8 \times I_n$	0,5 s (curva D)		
	$10 \times I_n$			
	$I_2 = 1 \times I_n$	Com corrente	Sim	$t = k$ (curva tempo $\times$ corrente)
	$2 \times I_n$	$I > I_2$		
	$3 \times I_n$	$t_2 = 0,05$ s (curva A)		
$4 \times I_n$	0,10 s (curva B)			

	$6 \times I_n$	0,25 s (curva C)		
	$8 \times I_n$	0,5 s (curva D)		
	$10 \times I_n$			
Proteção de falta a terra (I)	$I_3 = 1,5 \times I_n$	Atuação instantânea	Sim	$t = k$
	$2 \times I_n$			
	$4 \times I_n$			
	$6 \times I_n$			
	$8 \times I_n$			
	$10 \times I_n$			
	$12 \times I_n$			
Proteção de curto-circuito instantâneo (G)	$I_4 = 0,2 \times I_n$	Com corrente	Sim	$t = k/I^2$
	$0,3 \times I_n$	$I = 4 \times I_4$		
	$0,4 \times I_n$	$t_4 = 0,1$ s (curva A)		
	$0,8 \times I_n$	0,2 s (curva B)		
	$0,9 \times I_n$	0,4 s (curva C)		
	$1 \times I_n$	0,8 s (curva D)		

## i) Ajuste das curvas no microprocessador

Para sobrecarga e curto-circuito — temporizada

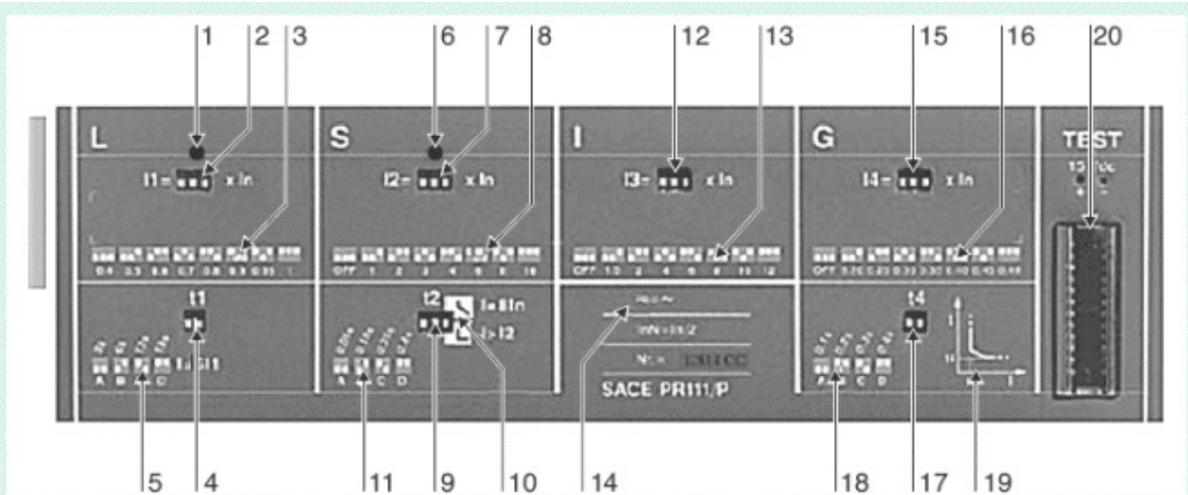
Temos os seguintes ajustes no disjuntor (veja gráfico da Figura 10.80).

- Ajuste da função de proteção: L
- Ajuste da corrente:  $I1 = 0,4 \times I_n$
- Ajuste do tempo  $T1 = \text{Curva A}$
- Desabilitar a função de proteção S (veja frontal do relé)

Para corrente de curtos-circuitos — instantânea

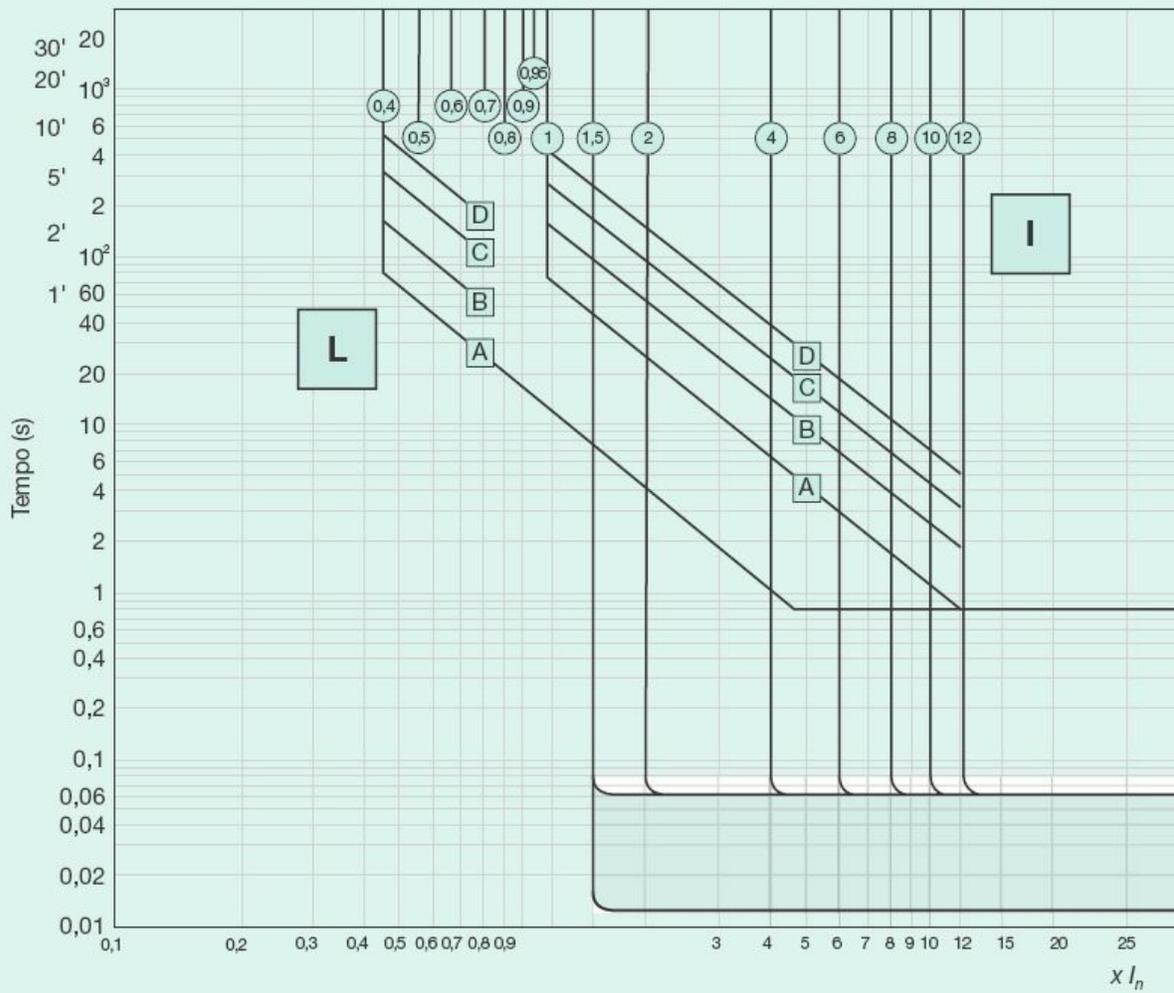
- Ajuste da função de proteção: I
- Ajuste da corrente:  $I3 = 1,5 \times I_n$

Temos os seguintes ajustes no disjuntor (veja o gráfico da Figura 10.80).

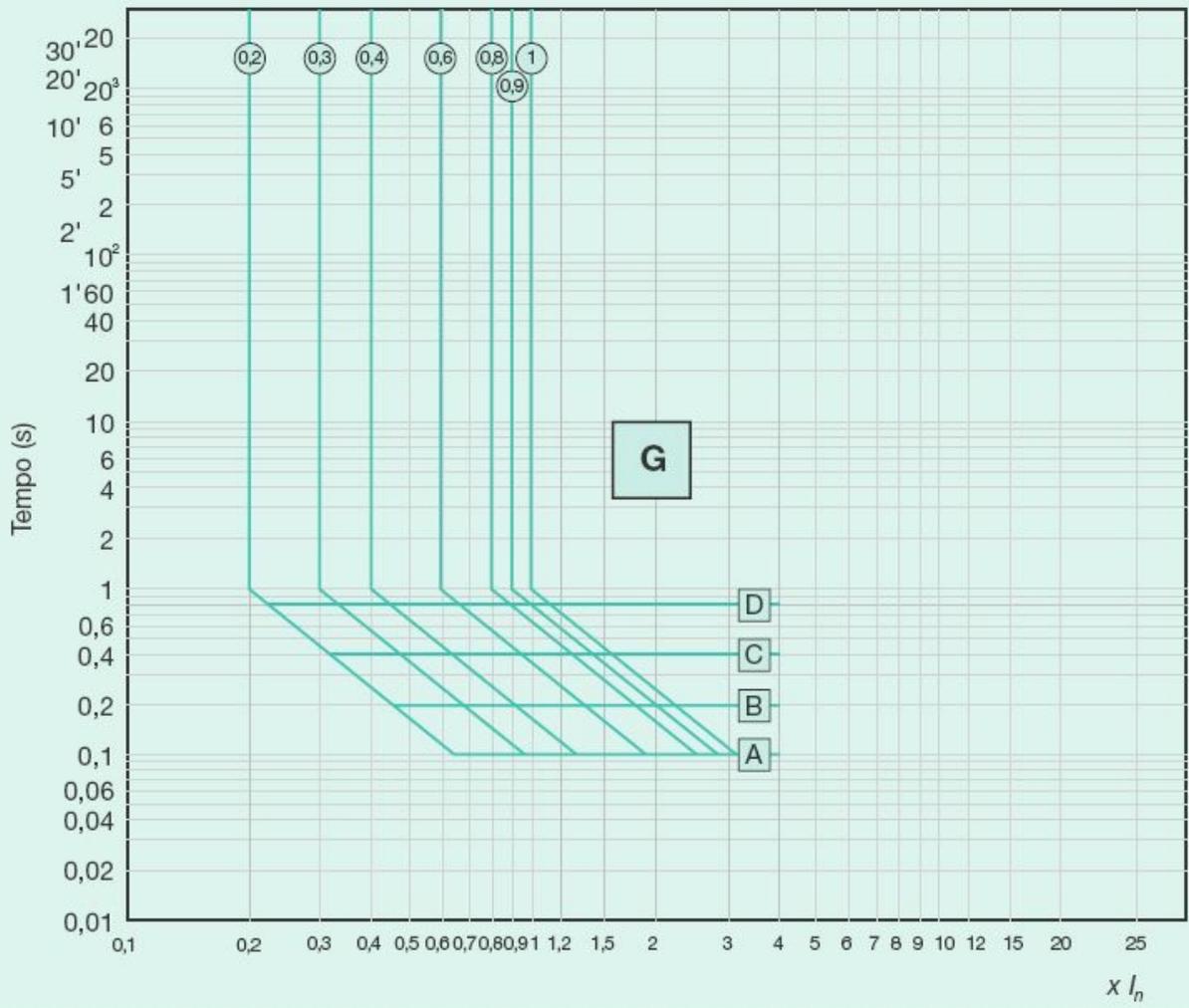


1 – LED de sinal de alarme para a função de proteção L; 2 – DIP – chaves para ajustar a faixa de proteção I1; 3 – indicação da posição da chave DIP para os valores de faixa de corrente; 4 – chaves DIP para ajustar o tempo de atuação t1 (tipo de curva); 5 – indicação da posição da chave DIP para os valores de faixas de corrente; 6 – LED de sinal de alarme para a função de proteção S; 7 – chaves DIP par ajustar a faixa de corrente I2; 8 – indicação da posição da chave DIP para os valores de faixa de corrente; 9 – chaves DIP para ajustar o tempo de atuação T2; 10 – chaves DIP para estabelecer as características de tempo definido; 11 – indicação da posição da chave DIP para o ajuste de tempo; 12 – chaves DIP para ajustar a faixa de corrente I3; 13 – indicação da posição da chave DIP para os valores de faixa de corrente I3; 14 – placa mostrando a taxa de corrente de neutro e o número de série do transformador de corrente; 15 – chaves DIP para ajuste da faixa de corrente I4; 16 – indicação da posição da chave DIP para os valores da faixa de corrente I4; 17 – chave DIP para ajuste do tempo de atuação t4 (tipo de curva); 18 – indicação da posição da chave DIP para ajuste do tempo; 19 – diagrama simbólico mostrando a operação da função G; 20 – módulo de conexão com unidade externa para teste de atuação.

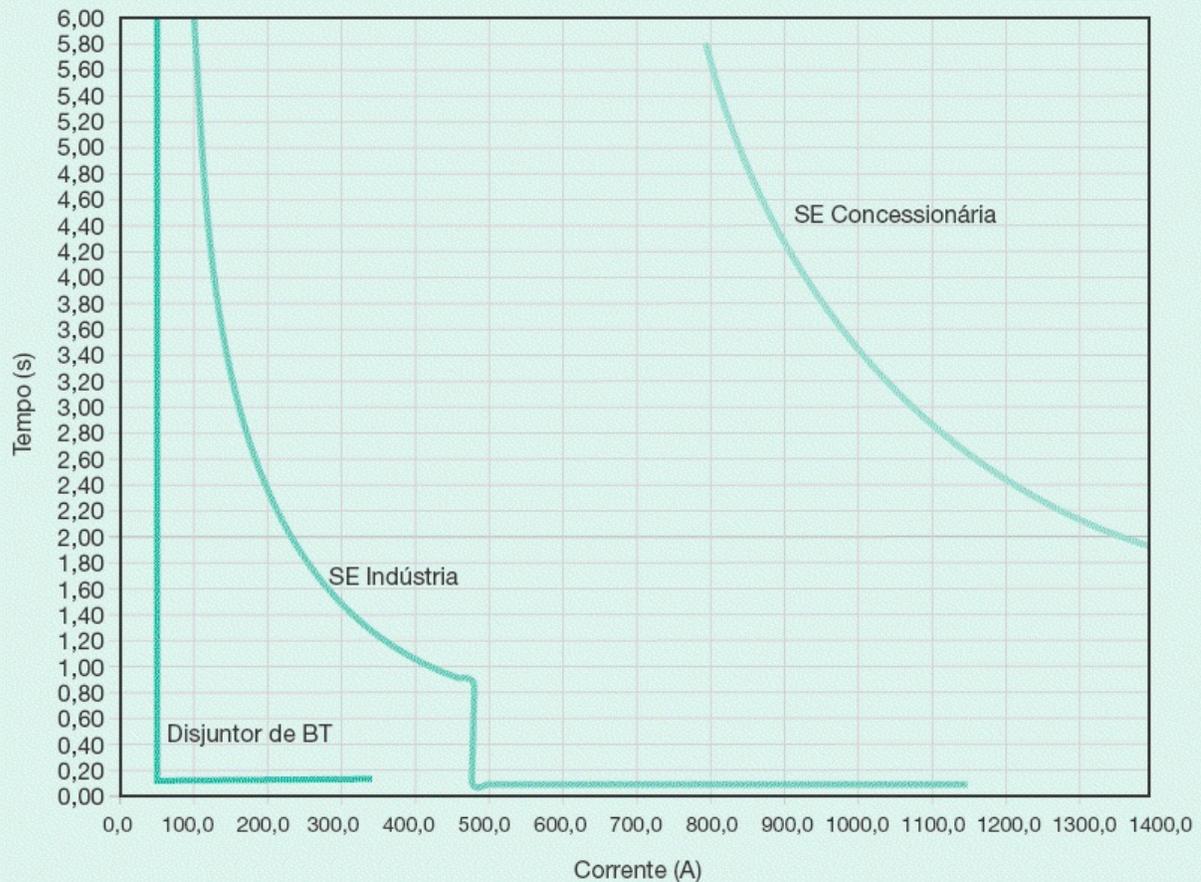
**Figura 10.79** Vista frontal do microprocessador do disjuntor de baixa tensão.



**Figura 10.80** Curva de atuação da proteção de fase do disjuntor de baixa tensão.



**Figura 10.81** Curva de atuação da proteção de terra do disjuntor de baixa tensão.



**Figura 10.82** Curvas de coordenação do disjuntor de baixa tensão e relés primários.

Para defeitos a terra — instantânea

- Ajuste da função de proteção: G
- Ajuste da corrente:  $I_4 = 0,2 \times I_n$
- Ajuste do tempo  $T_4 = \text{Curva A}$

### j) Principais conclusões

Para curtos-circuitos trifásicos na barra da SE Indústria — Unidade 51

Há plena coordenação entre a cadeia de proteções: SE Indústria → Fusível → SE Concessionária para qualquer valor da corrente de curto-circuito trifásico na barra da SE Indústria. Veja o gráfico da Figura 10.77.

Para curtos-circuitos trifásicos na barra da SE Indústria — Unidade 50

Há plena coordenação entre a cadeia de proteções: SE Indústria → Fusível → SE Concessionária até o valor da corrente de curto-circuito trifásico na barra da SE Indústria (813 A). Veja o gráfico da Figura 10.77.

Para curtos-circuitos monopolares na barra da SE Indústria — Unidade 51N

- Há coordenação entre o relé da SE Indústria e o relé da SE Concessionária até o valor da corrente de curto-circuito na barra da SE Indústria. Veja o gráfico da Figura 10.78.
- O fusível coordena com o relé da SE Indústria e não coordena com a SE Concessionária.
- Para curtos-circuitos monopolares na barra da SE Indústria — Unidade 50N — valor mínimo (alta impedância): a proteção atua no tempo igual a zero.
- Não há coordenação entre a cadeia de proteções: SE Indústria → SE Concessionária. O fusível não coordena com o relé da SE Concessionária.

Para curtos-circuitos na barra de baixa tensão do transformador

Há coordenação entre o disjuntor geral de proteção baixa tensão do transformador de 750 kVA e o relé primário da SE Indústria até o valor da maior corrente de defeito na barra que o curto-circuito monopolar. Veja o gráfico da Figura 10.81.

### 10.3.3 Fusíveis primários

São elementos de proteção para sistemas primários, aplicados na interrupção de correntes de curto-circuito. É desaconselhável seu uso na proteção de sobrecarga de transformadores de subestação.

A proteção com fusíveis primários pode ser obtida utilizando-se um dos dois elementos mais conhecidos, ou seja:

#### 10.3.3.1 Fusíveis limitadores de corrente

Já descritos na Seção 9.3.12, os fusíveis primários limitadores de corrente são elementos importantes na proteção geral de pequenas subestações industriais ou na proteção de unidades de transformação que podem compor uma subestação industrial de pequeno porte.

Os fusíveis limitadores atuam segundo curvas de tempo inverso, conforme mostra a [Figura 10.83](#).

### 10.3.3.2 Elos fusíveis

São elementos metálicos que operam no interior de um cartucho de fenolite, parte integrante das chaves fusíveis indicadoras, assunto este tratado na Seção 9.3.2.

São utilizados na proteção geral de pequenas subestações industriais do tipo aéreo.

A [Figura 10.84](#) fornece as curvas características dos fusíveis do tipo *K*. Já a [Tabela 10.19](#) apresenta as correntes nominais dos elos fusíveis de distribuição para a proteção dos transformadores, de acordo com a potência indicada.

**Tabela 10.22** Elos fusíveis de distribuição

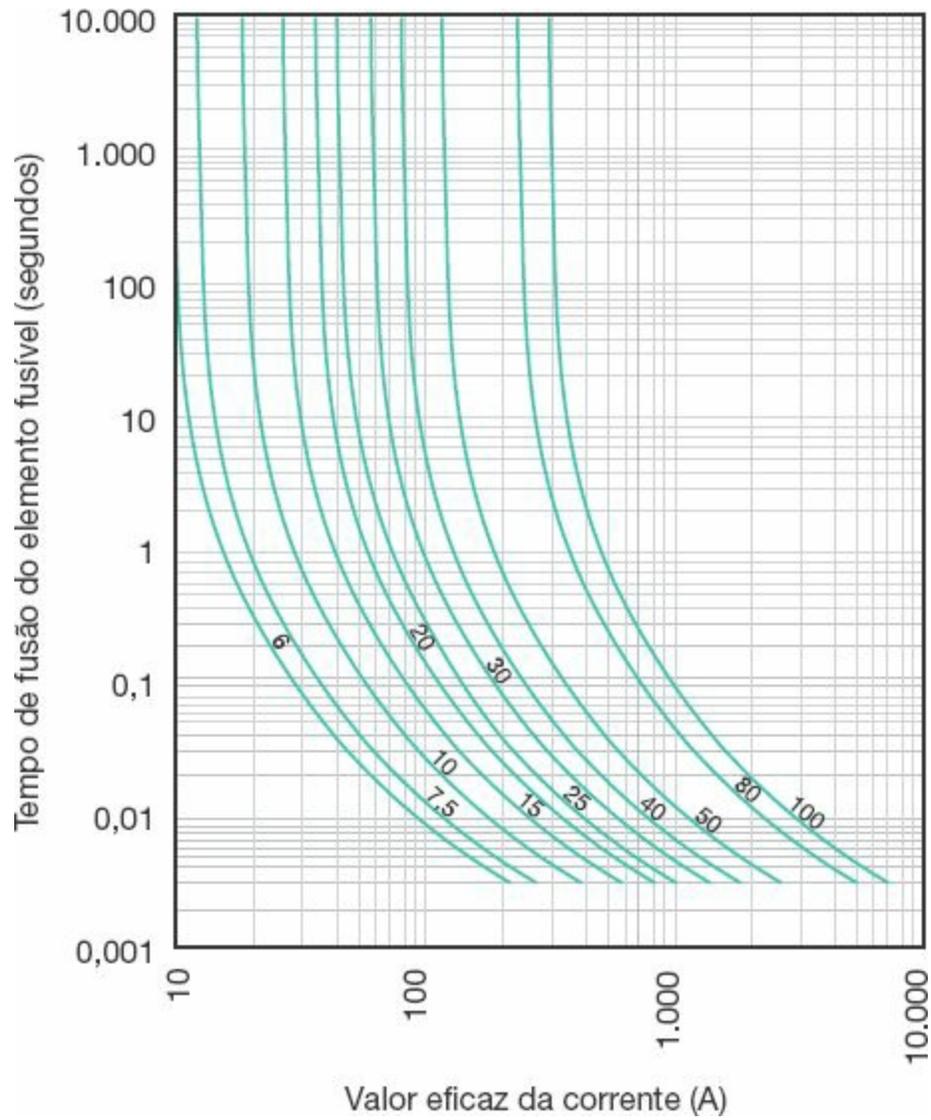
Potência do transformador	Elo fusível
15	1 H
30	2 H
45	3 H
75	5 H
112,5	6 K

150

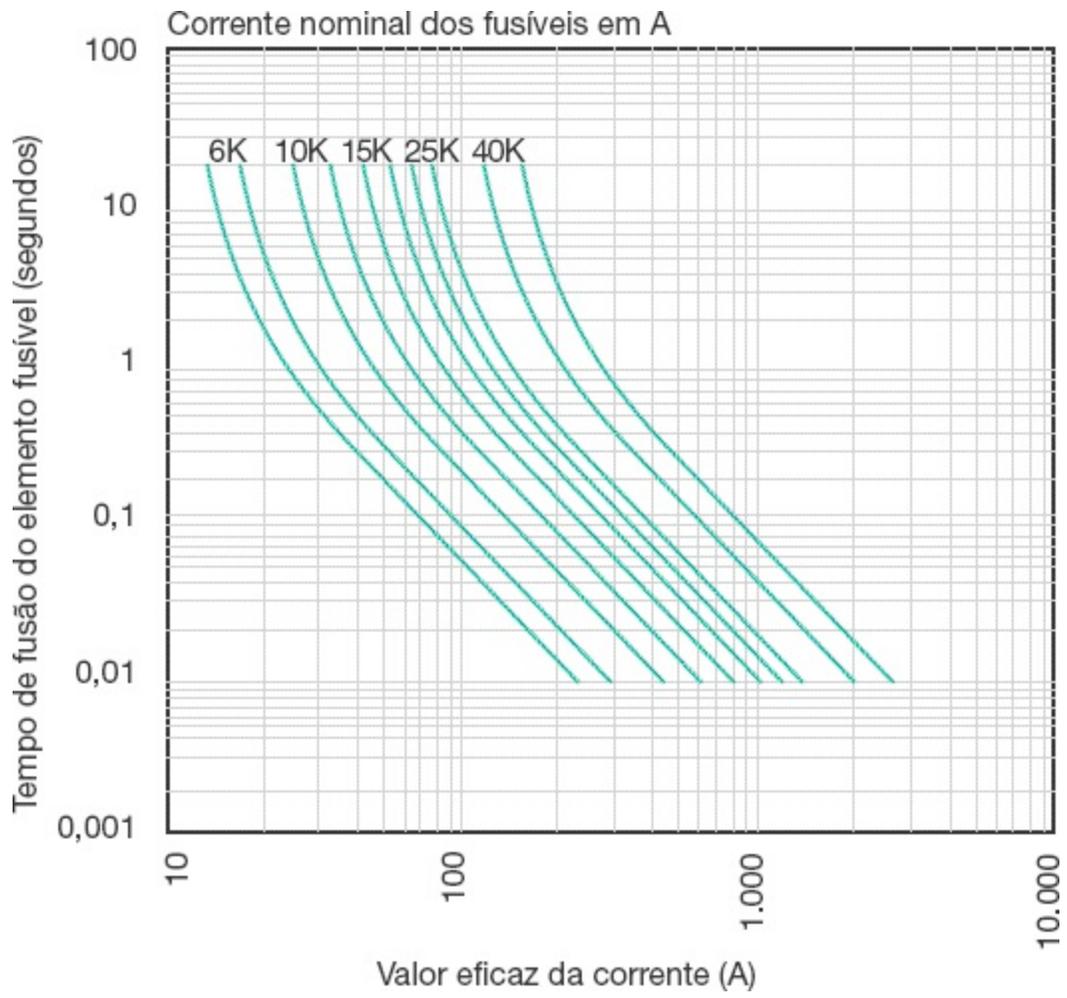
8 K

225

10 K



**Figura 10.83** Curvas de atuação dos fusíveis limitadores de corrente.



**Figura 10.84** Curvas de atuação de fusíveis do tipo K.