

CAPÍTULO 10

PROTEÇÃO E COORDENAÇÃO

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, 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 os mesmos 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 o 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 um determinado circuito ou equipamento deve ficar limitada ao valor de 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 DOS SISTEMAS DE BAIXA TENSÃO

Os condutores e equipamentos, de uma maneira geral, componentes de um sistema industrial de baixa tensão, são freqüentemente 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 no 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

Estas prescrições compreendem as proteções contra correntes de sobrecarga e de curto-circuito.

10.2.1.1 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 isolamento, das conexões e de outras partes contíguas do sistema além dos limites previstos por norma;
- os dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga devem ser localizados nos pontos do circuito onde haja uma mudança qualquer que caracteriza uma redução no 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 a troca de seção — de natureza, de maneira de instalar ou de constituição — e 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, 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 pelo mesmo, 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 em regime de funcionamento intermitente.

10.2.1.2 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 a 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 onde 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 do tipo 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:
 - num ponto do circuito compreendido entre aquele onde 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;
 - num 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, tais como condutores, chaves e outros, estiverem com as 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, os 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 a 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, tais como disjuntores, fusíveis etc., é calculada normalmente através 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

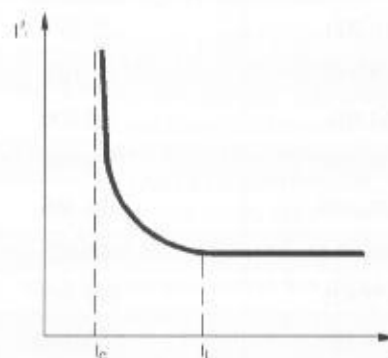


FIGURA 10.1
 Característica $P \times t$ típica de
 cabos de baixa tensão

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 isolamento. 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 5410/2004 estabelece que a integral de Joule a qual o dispositivo de proteção deve deixar passar não deve 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, sendo:

$K = 143$ para condutores de cobre com isolamento de PVC;

$K = 176$ para condutores de cobre com isolamento de EPR ou XLPE;

S – seção do condutor, em mm^2 ,

Ainda da NBR 5410/2004, podemos acrescentar:

- para curto-circuito de qualquer duração, onde a assimetria da corrente não seja significativa, e para curtos-circuitos simétricos de duração igual ou superior a 0,1 s e igual ou inferior a 0,5 s, pode-se escrever:

$$I_G^2 \times T \leq K^2 \times S^2 \quad (10.3)$$

I_G – corrente de curto-circuito presumida simétrica, em A;

T – duração, em segundos, sendo $0,1 \leq T \leq 0,5$ s

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

TABELA 10.1

Integral de Joule para aquecimento adiabático para condutores de cobre

Seção (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

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 de 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 uma determinada corrente de curto-circuito, ou seja:

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

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 3.26 e 3.27 do Capítulo 3.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.1)

Determinar o tempo máximo que a proteção deve atuar quando um determinado circuito em condutor isolado de cobre de seção de 70 mm², 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:

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

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

O mesmo valor pode ser obtido através do gráfico da Figura 3.26.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.2)

Um CCM é alimentado por um circuito trifásico em condutor de cobre isolado em PVC, de seção de 95 mm². A corrente de defeito é de 18.300 A e a proteção atua para essa corrente em 0,3 s. Verificar se a isolação 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 mm², ou seja:

$$K^2 \times S^2 = 119.355 \times 10^3 \text{ A}^2 \times \text{s}$$

$$I_{cs}^2 \times T < K^2 \times S^2 \text{ (condição satisfeita)}$$

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 num 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.

10.2.2.1 Proteção por dispositivo de proteção à corrente diferencial-residual

É cada vez mais comum 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 (dispositivo DR) 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, ou seja:

- zona 1: não provoca distúrbios perceptíveis;
- zona 2: não provoca distúrbios fisiológicos prejudiciais;
- zona 3: provoca distúrbios fisiológicos sérios, porém reversíveis, tais como parada cardíaca, parada respiratória e contrações musculares;
- zona 4: provoca distúrbios fisiológicos graves e geralmente irreversíveis, tais 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.

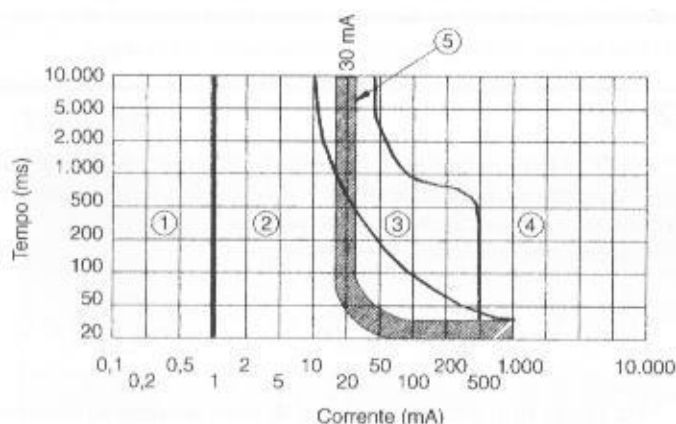


FIGURA 10.2
Curva tempo \times corrente das reações fisiológicas dos seres humanos

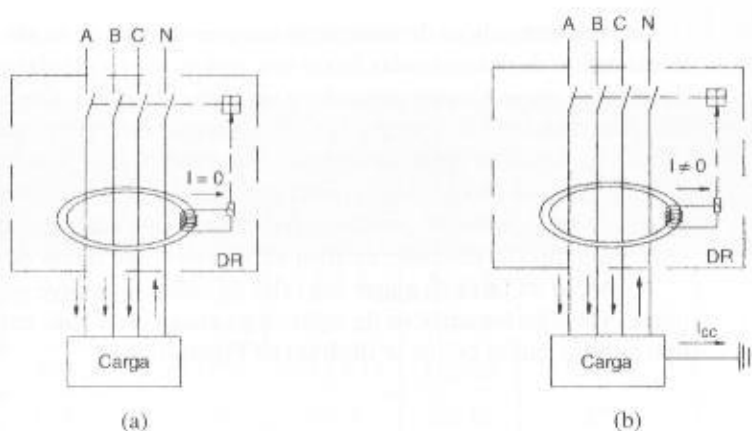
Esses dispositivos podem ser divididos em três partes funcionais, ou seja:

- 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 induzindo no secundário do transformador de corrente do dispositivo uma corrente também nula.

Se, no entanto, a instalação elétrica é submetida a uma corrente de falta, 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 melhor entendido a partir das análises da Figura 10.3 (a) e (b).

FIGURA 10.3
Dispositivo DR instalado num
circuito trifásico



A concepção do núcleo, associada a mecanismos auxiliares, é 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 NBR 5410/2004, qualquer que seja o esquema de aterramento deve ser objeto de proteção complementar contra contatos diretos por dispositivos à corrente diferencial-residual 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, no geral, em áreas internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens;
- a proteção dos circuitos pode ser realizada individualmente por ponto de utilização, por circuitos ou por grupos de circuitos.

10.2.2.2 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 nominal 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 contadores fornecem o tipo adequado dos relés apropriado a estes. Para um mesmo tipo de contador, 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.

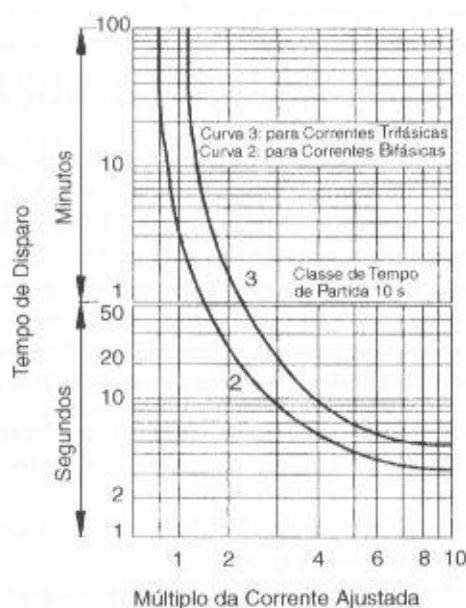


FIGURA 10.4
Características do relé 3UA –
Siemens

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

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

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

I_r – 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_w .

A integridade da isolamento de um condutor é severamente atingida por correntes de sobrecarga que provoquem efeitos térmicos excessivos. Assim, a norma NBR 5410/2004 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 da sua isolamento, 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 isolamento do condutor.

10.2.2.2.1 Critérios para o ajuste dos relés de sobrecarga

O ajuste dos relés de sobrecarga está vinculado aos de critérios básicos a seguir definidos.

a) Serviço contínuo (S1)

TABELA 10.2

Características elétricas dos relés bimetalicos – 3UA5/4

Potência de Motores Trifásicos Padronizados – NBR 5432 Categoria de Utilização AC3					Faixa de Ajuste	Para Montagem Acoplado aos Contadores				Fusíveis Máximos Diazed ou NH
Tipo	(kW)	220/230 V	380/400 V	440 V	(A)	AC3				A
3UA55-00-1J	2,2	3	4-5-6	5-6-7,5	6,3-10	3TF43		3TF35		25
3UA55-00-2A	3-3,7	4-5	7,5-10	7-5-10	10-16	3TF44		3TF45		35/32
3UA55-00-2B	3,7-4,5-5,5	5-6-7,5	10-12,5	10-12,5-15	12,5-20					50
3UA55-00-2D	5,5-7,5-9	7,5-10-12,5	15-20	20-25	20-32	22/32A				63
3UA55-00-2R	9-11	12,5-15	25	25-30	32-40			38A		63
3UA58-00-2D	5,5-7,5-9	7,5-10-12,5	15-20	20-25	20-32	3TF46	3TF47	3TF48	3TF49	63
3UA58-00-2F	9-11-15	12,5-15-20	25-30	30	32-50	45A				100
3UA58-00-2P	15-18,5	20-25	40	40-50	50-63		63A			125
3UA58-00-2U	18,5-22	25-30	50	60	63-80			75A		160
3UA58-00-8W	22	30	50-60	60	70-88				85A	160
3UA60-00-2W	18,5-22	25-30	50-60	75	63-90	3TF50				160
3UA60-00-3H	30-37	40-50	75	-	90-120	110A				224
3UA61-00-3H	30	40	75	100	90-120	3TF51				224
3UA61-00-3K	37-45	50-60	100	100	120-150	140A				224
3UA62-00-3H	30	40	75	100	90-120	3TF52				224
3UA62-00-3K	37-45	50-60	100	100	120-150					224
3UA62-00-3M	55	75	125	125	150-180	170A				224
3UA45-00-8YG	55	75	150	150	160-250	3TF53/205A				224
3UA45-00-8YG	55-75	75-100	125-175	150-200	160-250	3TF54/250A				315
3UA45-00-8YH	75-90	100-125	150-200	175-250	200-320	3TF55/300A				315
3UA45-00-8YH	75-90	100-125	150-200	175-250	200-320	3TF56/400A				400
3UA45-00-8YJ	110	150	250-300	300	250-400					500
3UA46-00-8YK	110-150	150-200	250-350	300-400	320-500	3TF57/475A		3TB58		500
3UA46-00-8YL	160-200	250	400-450	450-500	400-630	-		630A		630

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 seguintes requisitos:

- a corrente de ajuste do relé térmico de proteção deve ser igual ou superior à corrente do 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 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.

O ajuste dos relés térmicos bimetalícos da série 3UA de fabricação Siemens pode ser feito através da Tabela 10.2.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.3)

Determinar o ajuste do relé de proteção de sobrecarga térmica de um motor de 50 cv, 380 V/IV pólos, em regime de funcionamento S1, alimentado por um circuito em condutor unipolar de cobre, tipo da isolação PVC, de seção igual a 25 mm², 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:

$$I_a \geq I_c \rightarrow I_a = I_n$$

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

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

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 bimetalíco: tipo 3UA60-00-2W – Siemens – faixa de ajuste de 63 a 90 A.

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

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

$$T_{rb} = 10 \text{ s (Tabela 6.3)}$$

$$R_{pm} = 64 \text{ (relação entre a corrente de partida e a corrente nominal do motor obtida da Tabela 6.3)}$$

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

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

Logo: $T_{rn} \geq T_{ar} > T_{pm}$ (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 a 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 que é feita com determinada frequência.

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

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{I_{pm}^2 \times T_{pm} + I_n^2 \times T_n}{T_t + \frac{1}{3} \times T_v}} \quad (\text{A}) \quad (10.9)$$

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;

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_v – 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.

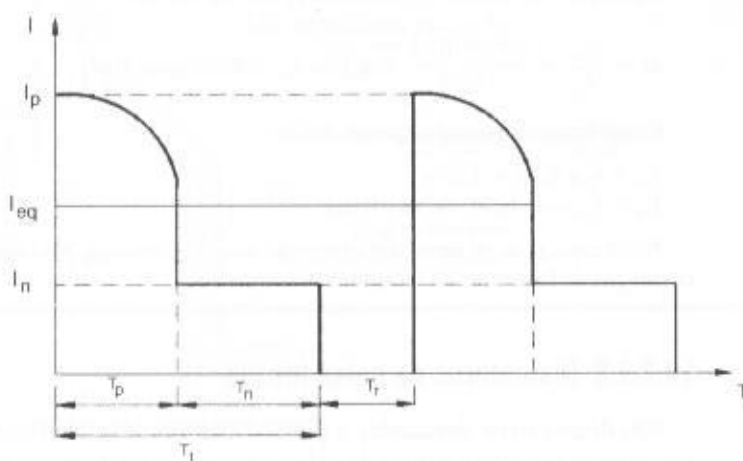


FIGURA 10.5
Curva de operação de um motor
em regime S4

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.4)

Determinar o ajuste do relé bimetálico de proteção de um motor de 75 cv-IV pólos, 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.

$$I_{av} = 101,1 \text{ A (Tabela 6.3)} \rightarrow R_{pm} = 6,8 \text{ (Tabela 6.3)}$$

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

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

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

$$T_n = 3,197 \text{ s (tempo de regime normal de operação do motor)}$$

$$T_t = T_{pm} + T_n = 3 + 3,197 = 3,200 \text{ s}$$

$$T_r = 3,300 - 3,200 = 100 \text{ s (tempo de repouso do motor)}$$

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{687,4^2 \times 3 + 111,2^2 \times 3,197}{3,200 + \frac{1}{3} \times 100}} = 112,5 \text{ A}$$

Da Equação (10.6), tem-se:

$$I_a \geq I_c = I_{eq} = 112,5 \text{ A}$$

Da Equação (10.7), tem-se:

$$I_a \leq I_{av}$$

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

$$\text{Logo: } 112,5 \leq I_a \leq 122 \text{ A}$$

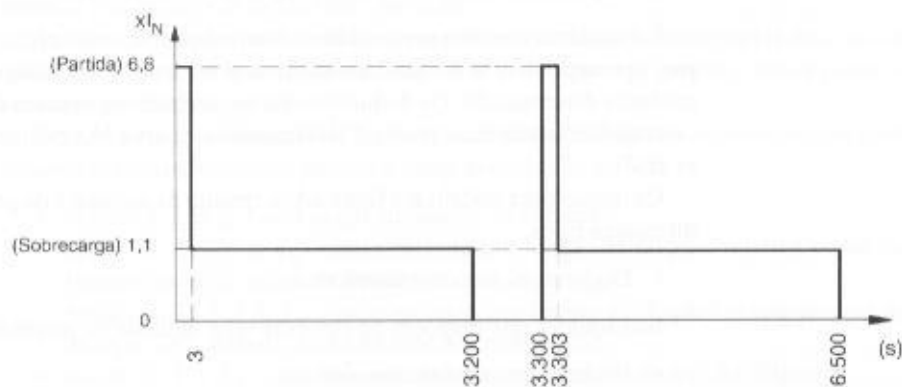


FIGURA 10.6
Curva de operação

Será escolhido o relé 3UA 60-00-3H – Siemens, com faixa de ajuste de 90 a 120 A. A corrente de ajuste será de 112,5 A.

Devem ser verificadas as condições de partida, ou seja:

$$M = \frac{I_{pm}}{I_u} = \frac{6,8 \times 101,1}{112,5} = 6,1 \rightarrow T_w = 6 \text{ s (Figura 10.4)}$$

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

$$T_w = 6 \times 0,25 = 1,50 \text{ s}$$

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

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

10.2.2.3 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 a sua forma construtiva, os disjuntores podem acumular várias funções, ou seja:

- 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 a 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 atuar, em geral, a uma temperatura de 20°C.

Considerando-se a utilização de disjuntores tropicalizados, em geral, em quadros de distribuição industriais, onde a temperatura pode ser elevada a valores não superiores 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 as suas curvas de características térmicas (curva T) e magnéticas (curva M), conforme pode ser observado na Figura 10.7.

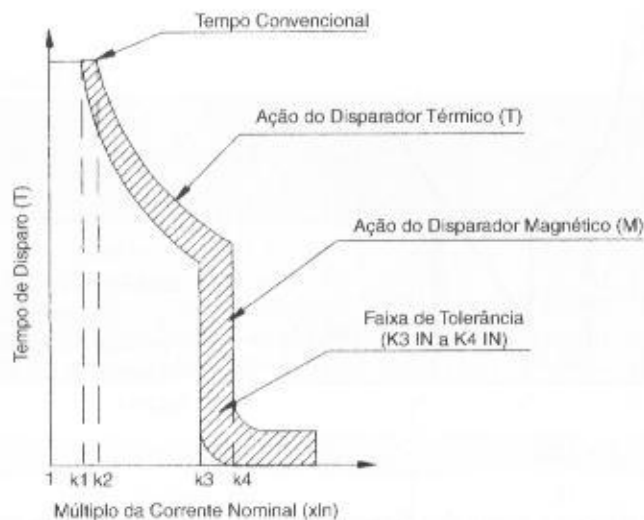
Os disjuntores podem ser fabricados, quanto às unidades de proteção incorporadas, em quatro diferentes tipos.

- Disjuntores somente térmicos

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

- Disjuntores somente magnéticos

FIGURA 10.7
Características tempo \times corrente de um disjuntor termomagnético



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 e o disjuntor é comercializado selado.

- 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.

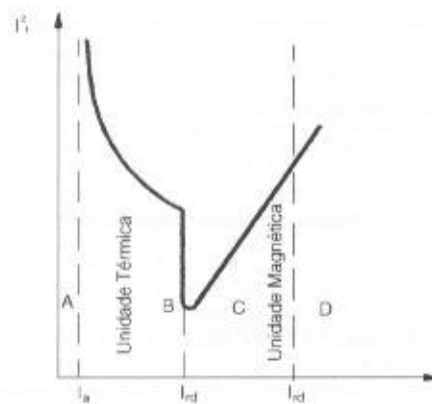
Assim como os fusíveis, os disjuntores devem ser dimensionados pela sua característica $I^2 \times t$ que representa o valor máximo da integral de Joule que o dispositivo deixa passar em função da corrente que circula por ele.

De acordo com a Figura 10.8, pode-se caracterizar o disjuntor através de suas quatro regiões de diferentes comportamentos quanto à integral de Joule, ou seja:

- 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.

FIGURA 10.8

Regiões características dos disjuntores termomagnéticos



I – corrente de circula pelo disjuntor;

$I_n = I_a$ – corrente nominal ou de ajuste do disjuntor;

I_m – corrente de sensibilidade da unidade magnética;

i_{rd} – corrente de interrupção do disjuntor ou capacidade de ruptura

A seleção e ajuste dos disjuntores deve ser feita com base nos seguintes requisitos previstos pela NBR 5410/2004.

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.

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

I_{adk} – corrente convencional de atuação do disjuntor.

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:

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

Por questões práticas, o valor de I_{adk} na Equação (10.13) pode ser substituído por $K \times I_a$, onde K seja:

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

K – 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, pode-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, ou seja:

- Disjuntores de características L

TABELA 10.3
Fatores de multiplicação de corrente (K)

Tipo	Corrente Nominal	Corrente Convencional de Não-atuação (fusão)	Corrente Convencional de Atuação (fusão)
	A	A	A
Fusível gI	I_n igual ou superior 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	Todas	$1,2 \times I_n$	$1,6 \times I_n$
Fusível gG	Todas	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$
Disjuntor em caixa moldada tipo G	Todas	$1,05 \times I_n$	$1,35 \times I_n$
Disjuntor em geral	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	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	$1,3 \times I_n$	$1,6 \times I_n$

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

- 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 × 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, ou seja:

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

T_{ad} – tempo de atuação do disjuntor;

T_{pm} – tempo de partida do motor;

T_{rb} – tempo de rotor bloqueado.

- 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, em geral, de acordo com a Tabela 10.4.

Se a corrente no ponto de instalação do disjuntor superar a 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. Nesse caso, as características do fusível ou outro dispositivo de retaguarda devem ser coordenadas com a

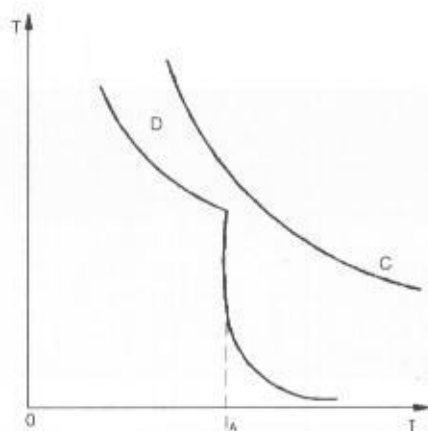


FIGURA 10.9
Curva de coordenação

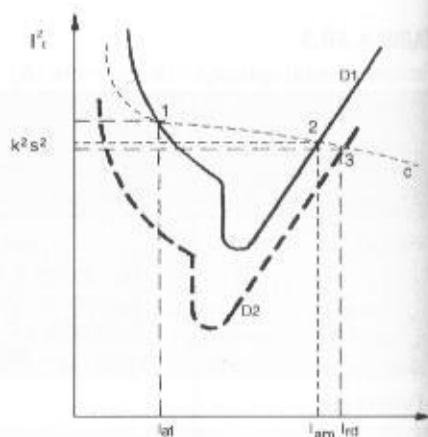


FIGURA 10.10
Curvas $I^2 \times t$ de disjuntores e condutor

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

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 6.3.

- 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, ou seja:

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

Essa verificação pode ser feita aplicando-se a Equação (3.19) ou através dos gráficos das Figuras 3.26 e 3.27, 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 as todas faixas de corrente até o valor correspondente a sua corrente de ruptura (ponto 3).

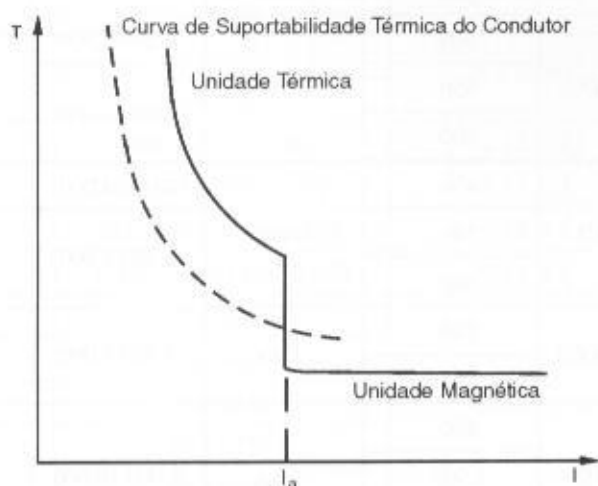
Para satisfazer a NBR 5410/2004, a curva de suportabilidade térmica do condutor deve cortar a curva do disjuntor em qualquer ponto do trecho de transição de atuação das unidades térmicas e magnéticas. A corrente de atuação ou ajuste do disjuntor no ponto referido deve ser inferior à mínima corrente de curto-circuito presumida, conforme mostra a Figura 10.11, ou seja:

$$I_a \leq I_{cmin} \quad (10.19)$$

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)		Correntes Nominais (A)	Capacidade de Ruptura
A	220 V	380 V	A	220 V	380 V	220 V	(kA)
10	10.000	4.000	180	10.000	8.000	10	3,5
15			200	25.000	20.000	15	
20			225			20	
25			250			25	
30			300			30	
35			350			35	
40			400			40	6,0
50			600	50.000	40.000	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 ou identificar o tipo e marca de um determinado fabricante.			
90			1.600				
100			2.000				
125			2.500				
150			3.000				


 FIGURA 10.11
 Interseção da curva de suportabilidade térmica do condutor e disjuntor

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 e terra também no final do trecho do circuito referido.

TABELA 10.5

Características elétricas dos disjuntores tripolares Siemens

Tipo	Correntes Nominais	Faixa de ajuste		Corrente de Interrupção (kA)		
		Unidade Térmica	Unidade Magnética	220	380	500
	A	A	A	V	V	V
HHED6	15	Fixa	400-700	100	65	42
	20					
	25					
	30					
	40		600-1.000			
	50					
	60					
	70					
	80					
	90					
	100					
	125					
HFXD	150	Fixa	800-1.500	100	65	42
	175		900-2.000			
	200		1.100-2.500			
	225					
	250					
HJXD	300	Fixa	1.250-2.500	100	65	42
	350		2.000-4.000			
	400					
HLXD	450	Fixa	2.000-4.000	100	65	42
	500		3.000-6.000			
	600					
HLMXD	700	Fixa	3.200-8.000	100	65	42
	800					
HNXD	900	Fixa	5.000-10.000	100	65	42
	1.000					
	1.200					
HPXD	1.400	Fixa	5.000-10.000	100	65	42
	1.600					
HRXD	1.800	Fixa	5.000-10.000	100	65	42
	2.000					

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
	A	A	A	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
3VU16	52	16-25	$12 \times I_n$	100	100	25
		22-32		100	35	25
		28-40		100	35	25
		36-52		100	35	25
3VF12	63	28-40	$12 \times I_n$	100	42	26
		36-50		100	30	22
		45-63		100	22	18
3VF31	100	63-80	$15 \times I_n$	100	65	50
		80-100				
3VF32	160	100-125	$15 \times I_n$	100	65	50
		125-160				
3VF42	250	160-200	$5 \text{ a } 10 \times I_n$	100	80	65
		200-250				
3VF52	400	250-315	$5 \text{ a } 10 \times I_n$	100	80	65
		315-400				
3VF62	630	400-500	$5 \text{ a } 10 \times I_n$	100	80	50
		500-630				
3VF71	800	400, 500, 630, 800	$2 \text{ a } 8 \times I_n$	65	50	42
3VF72	1.250	630, 800, 1.000, 1.250	$2 \text{ a } 8 \times I_n$	65	50	42
3VF82	1.600	800, 1.000, 1.250, 1.600	$2 \text{ a } 8 \times I_n$	100	80	65
3VF83	2.000	1.000, 1.250, 1.600, 2.000	$2 \text{ a } 8 \times I_n$	100	80	65
3WN6 1.600	630	252-630	$1,5 \text{ a } 12 \times I_n$	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	$1,5 \text{ a } 12 \times I_n$	Até 500 V = 80 kA		
	2.500	1.000-2.500				
	3.200	1.280-3.200				

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

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* \times *corrente* do disjuntor.

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

As Figuras 10.12 a 10.17 mostram as características de disparo dos disjuntores Siemens especificados nas tabelas anteriores.

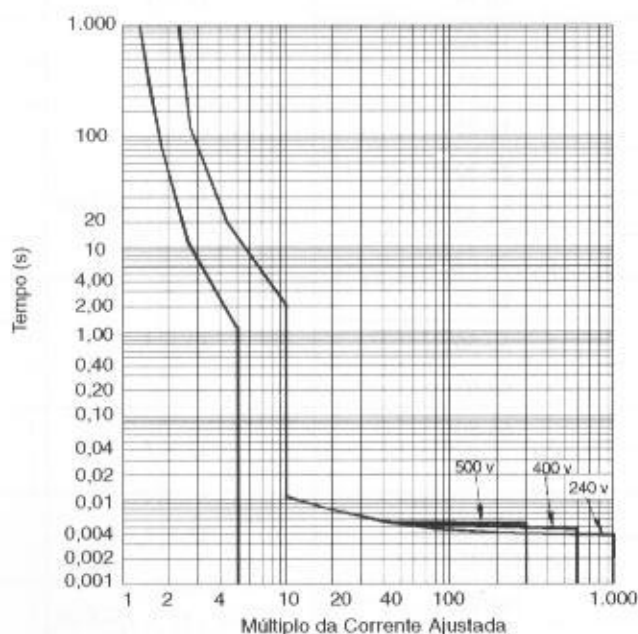


FIGURA 10.12
Características tempo \times corrente
dos disjuntores da série H –
Siemens

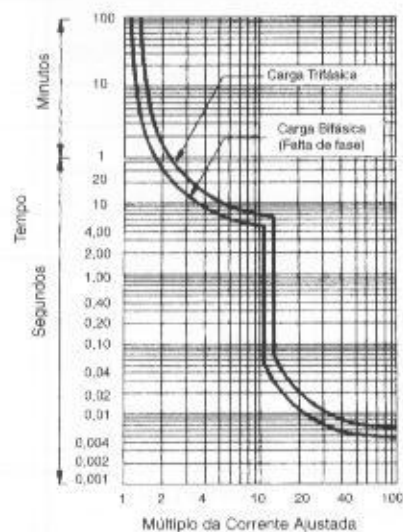


FIGURA 10.13
Disjuntores 3VU13 – Siemens

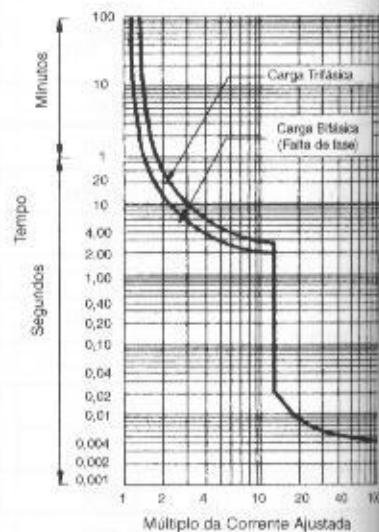


FIGURA 10.14
Disjuntores 3VU16 – Siemens

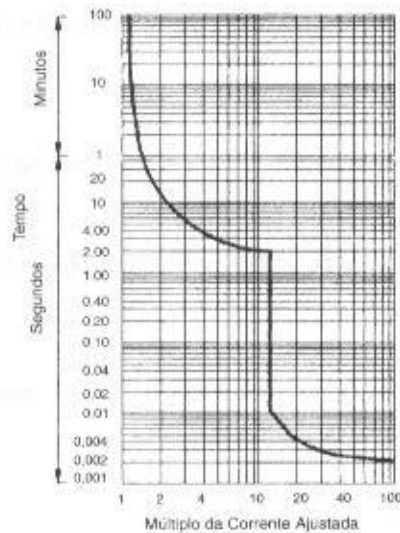


FIGURA 10.15
Disjuntores 3VF12 – Siemens

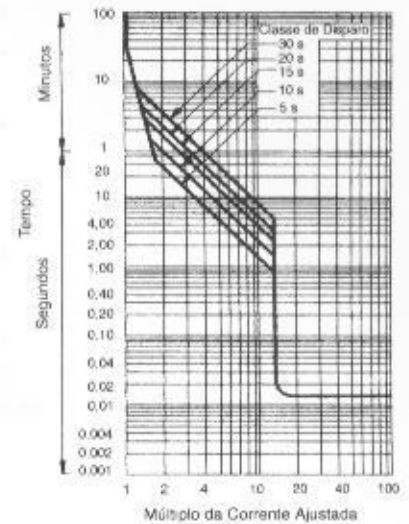


FIGURA 10.16
Disjuntores 3VF3/5/6 – Siemens

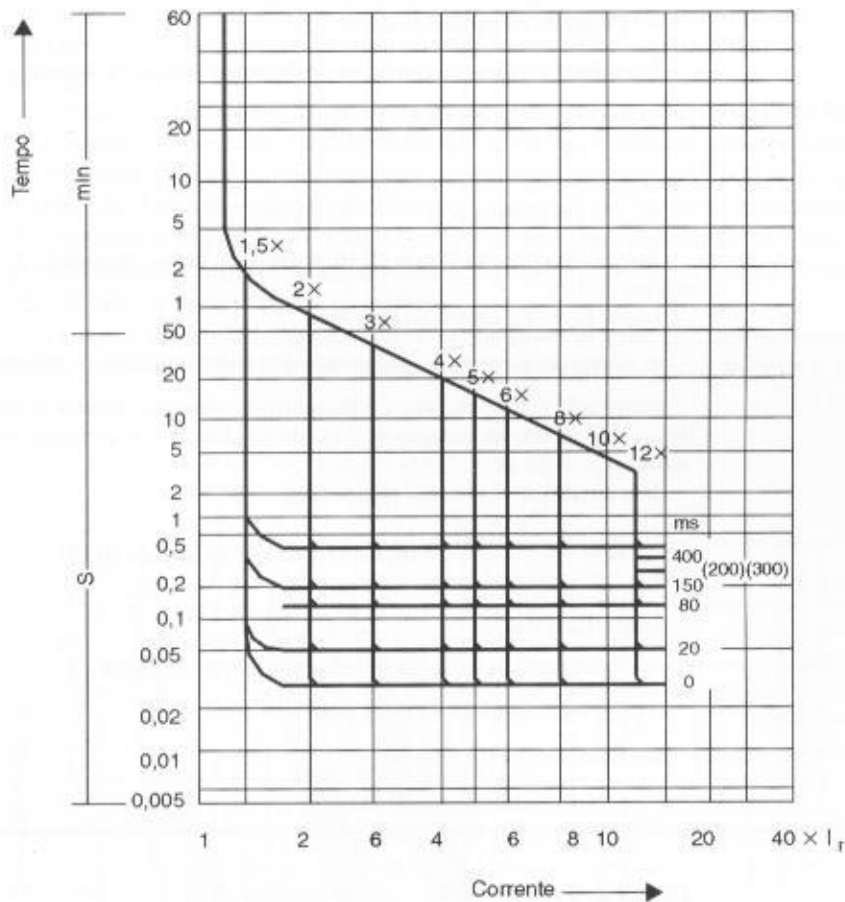


FIGURA 10.17
Disjuntores 3WN6 – Siemens

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.5)

Determinar os ajustes do disjuntor destinado à proteção de um motor de 50 cv, 380 V/IV pólos, em regime de funcionamento S1, alimentado por um circuito em condutor unipolar de cobre, tipo da isolamento PVC, de seção igual a 25 mm², instalado em eletroduto enterrado. 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 e 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:

- 1.^a condição
 $I_a \geq I_c \rightarrow I_c = 68,8 \text{ A}$
- 2.^a condição
 $I_{nc} = 86 \text{ A}$ (Tabela 3.6 – método de referência D3 da Tabela 3.4, correspondente ao método de instalação 61A)
 $I_a \leq I_{nc} \rightarrow I_{nc} = 86 \text{ A}$

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

$$68,8 \leq I_a \leq 86 \text{ A} \rightarrow I_a = 73 \text{ A (valor assumido)}$$

- 3.^a 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 $15 \times I_{nc}$.

- Condição de partida do motor

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

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

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

$$R_{pm} = 6,4 \text{ (Tabela 6.3)}$$

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

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

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

Através do gráfico da Figura 3.26, obtém-se para uma corrente de curto-circuito $I_{cc} = 5,0 \text{ kA}$, um tempo de suportabilidade da isolamento de PVC do condutor $T_{sc} = 16 \text{ ciclos} = 0,26 \text{ s}$, considerando-se a seção do condutor $S_c = 25 \text{ mm}^2$.

Já o disparo do disjuntor é efetuado no tempo de:

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

Logo: $T_{ad} < T_{sc}$

- Verificação da capacidade de interrupção do disjuntor

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

Da Equação (10.16), tem-se:

$$I_{ca} < I_{ca} \text{ (condição satisfeita)}$$

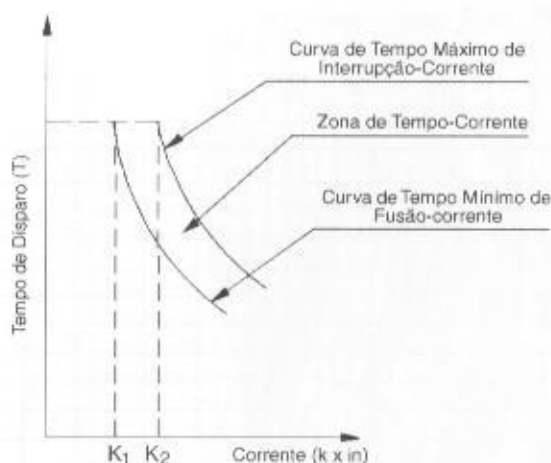
10.2.2.4 Fusíveis

São dispositivos destinados à proteção dos circuitos elétricos e que se fundem quando percorridos por uma corrente de valor superior àquela para a 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 ler 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 mostradas na Figura 10.18.

FIGURA 10.18
Características $\text{tempo} \times \text{corrente}$
dos fusíveis tipo aM



As Figuras 10.19 a 10.24 apresentam as curvas características de $\text{tempo} \times \text{corrente}$ dos fusíveis do tipo diazed e NH, enquanto as Tabelas 10.7 e 10.8 fornecem as correntes nominais padronizadas dos fusíveis do tipo diazed e NH.

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 num tempo extremamente rápido que não permite que a corrente de impulso atinja o seu valor máximo. Isto pode ser ilustrado através da 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 do seu ponto

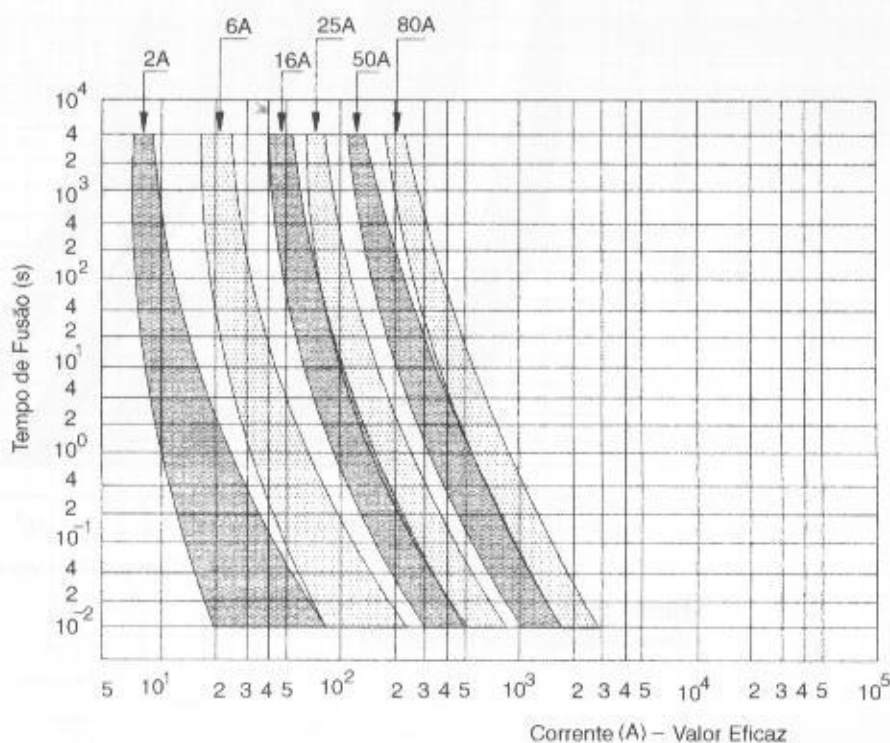
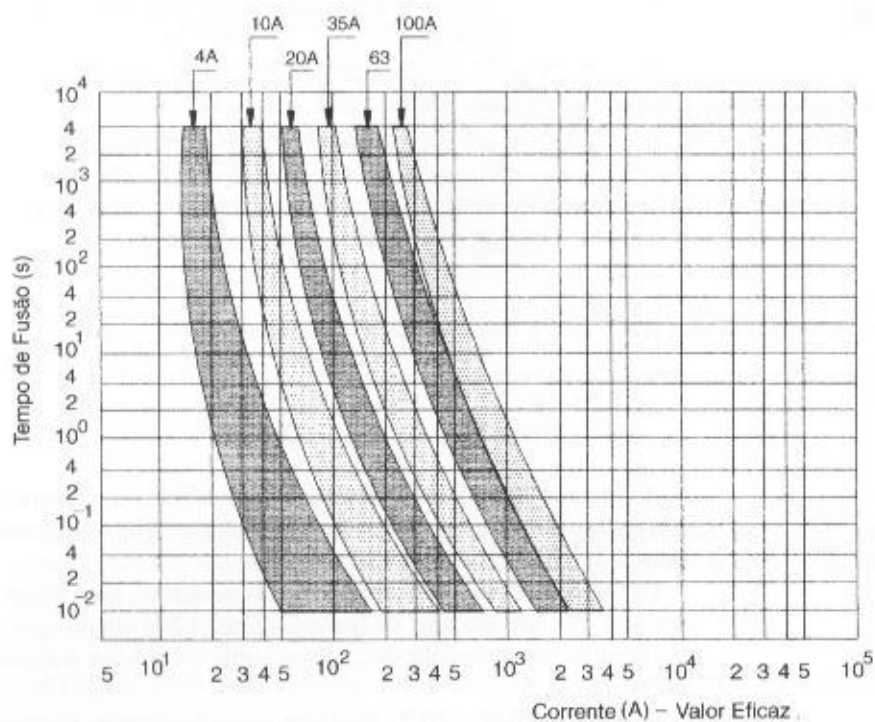
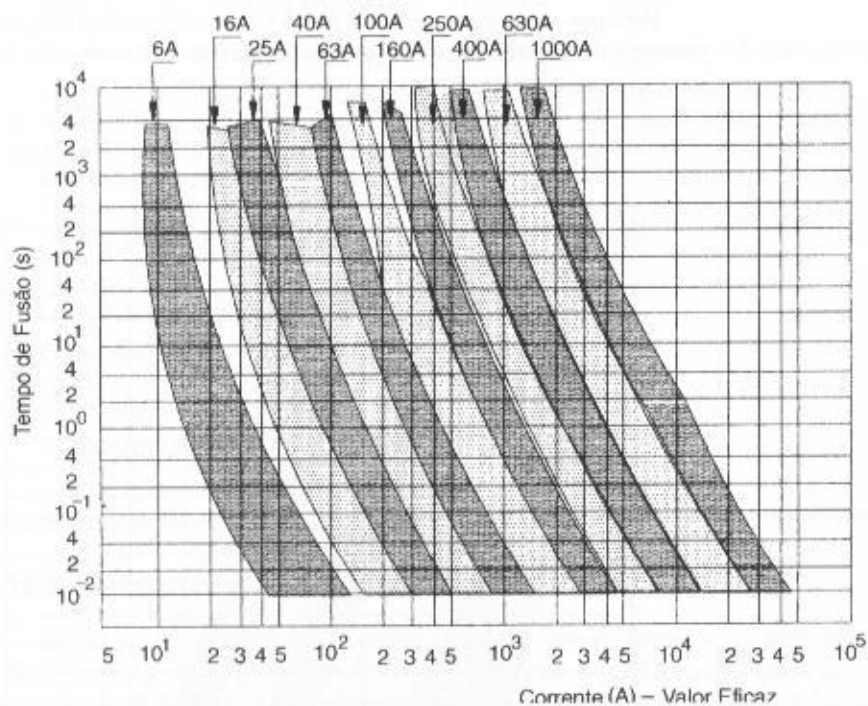


FIGURA 10.19
Zonas de atuação dos fusíveis
diazed

**FIGURA 10.20**

Zonas de atuação dos fusíveis diazed

**FIGURA 10.21**

Zonas de atuação dos fusíveis NH

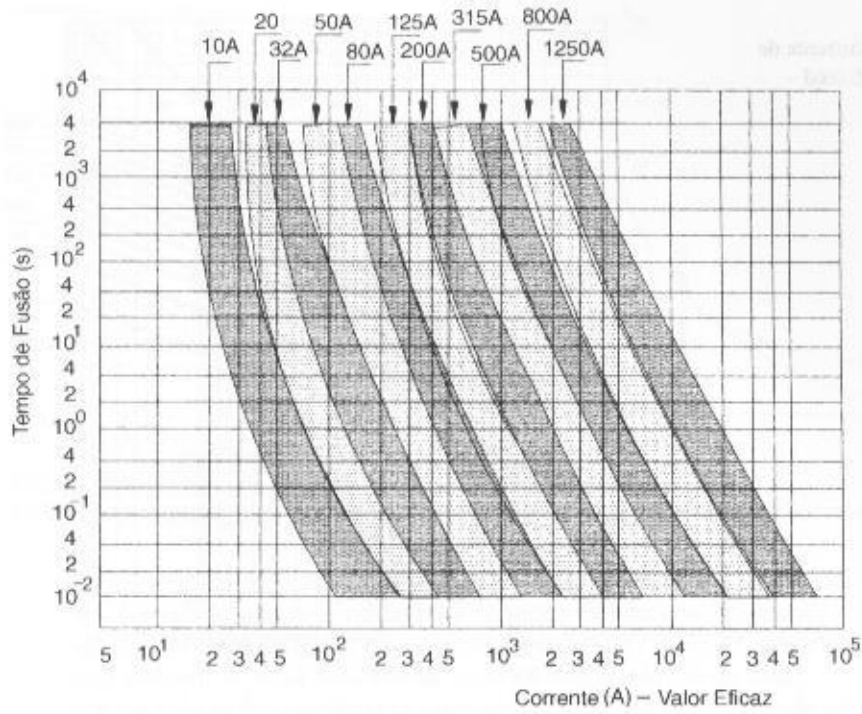


FIGURA 10.22
Zonas de atuação dos fusíveis
NH

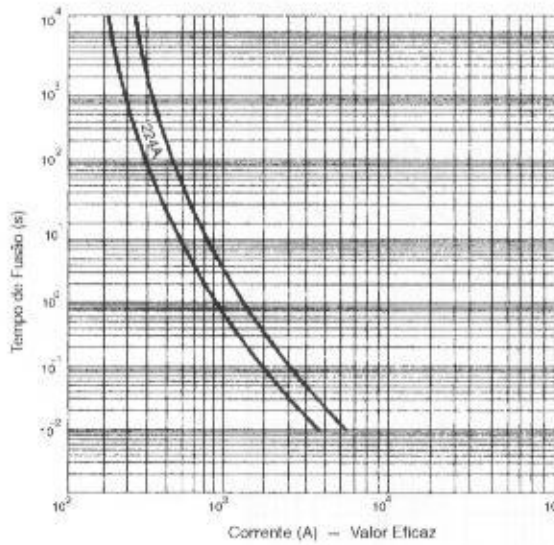


FIGURA 10.23
Zonas de atuação: NH 224

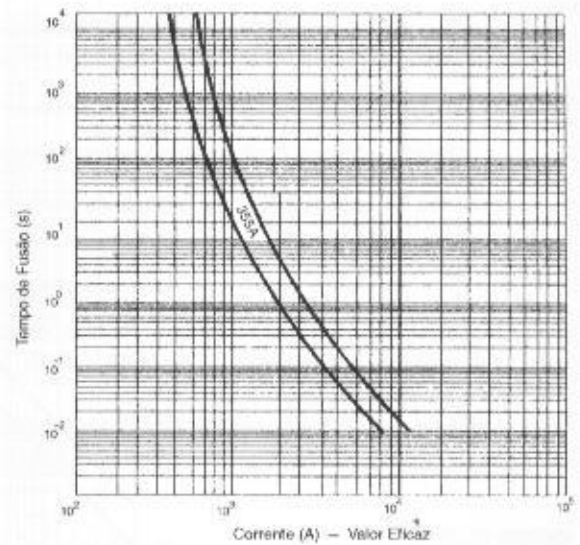


FIGURA 10.24
Zonas de atuação: NH 355

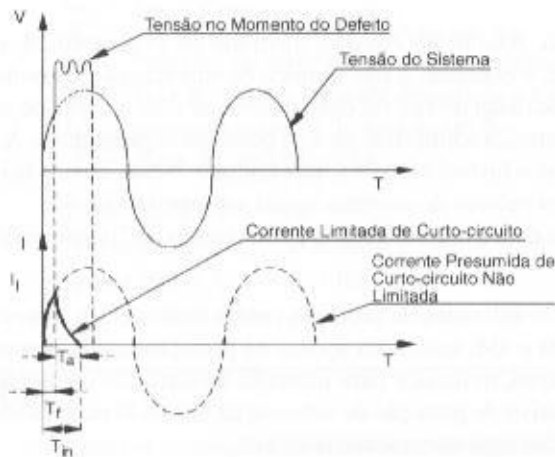


FIGURA 10.25
Ilustração das propriedades de
limitação de corrente dos
fusíveis diazed e NH

FIGURA 10.26

Características da corrente de corte dos fusíveis diazed – Siemens

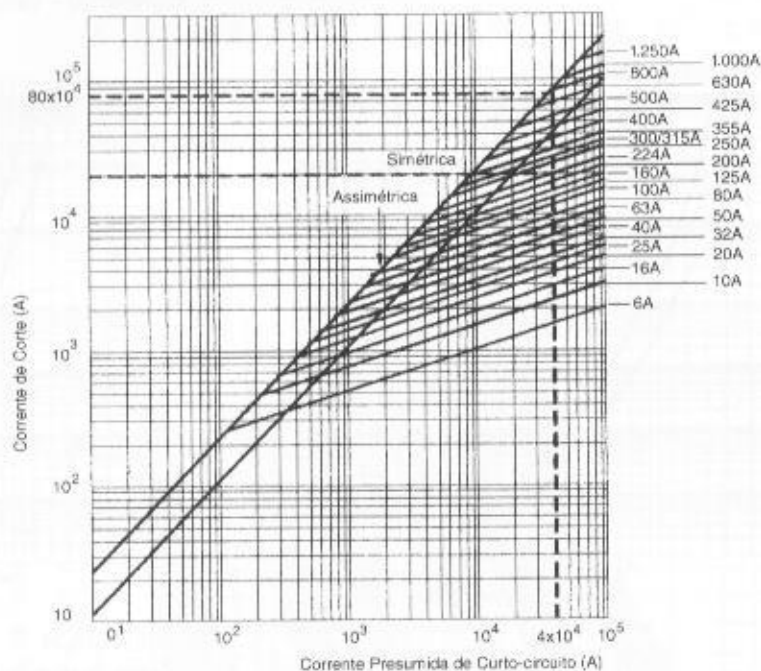
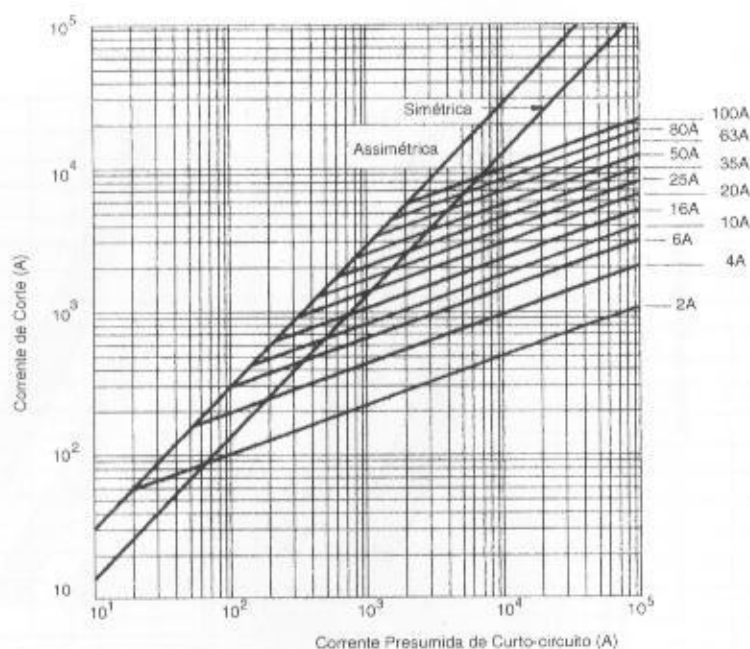


FIGURA 10.27

Características de corte dos fusíveis NH – Siemens

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 o 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_n .

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;
- tipo gM e aM: utilizados apenas na proteção contra correntes de curto-circuito, sendo, por tal motivo, 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:

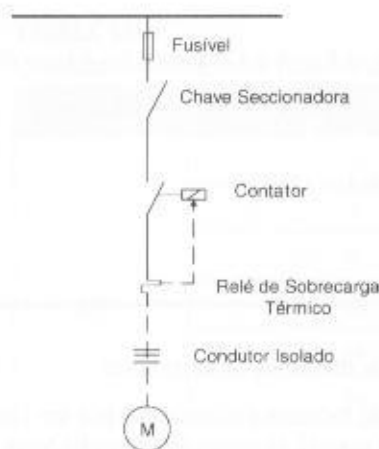


FIGURA 10.28
Unifilar simplificado

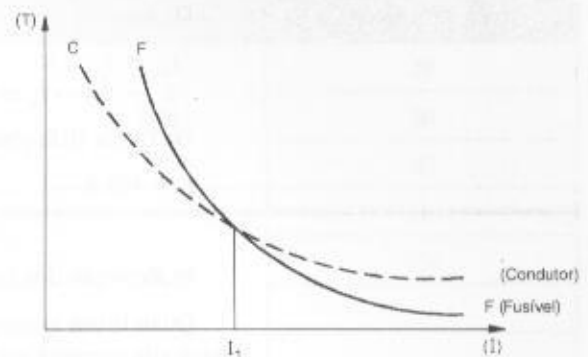


FIGURA 10.29
Curvas tempo \times corrente do fusível e condutor

- 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.

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 proteção de circuito de motores.

10.2.2.4.1 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 a Seção 6.3.13, alínea 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, ou seja:

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

Sendo que:

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

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 6.3;

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

K – fator de multiplicação.

- 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 fusível de um motor trifásico de 50 cv, 380 V/IV pólos.

$$I_{pm} = I_{am} \times R_{cm}$$

$$I_{nm} = 68,8 \text{ A (Tabela 6.3)} \rightarrow R_{cm} = 6,4 \text{ (Tabela 6.3)} \rightarrow I_{pm} = 68,8 \times 6,4 = 440,3 \text{ A}$$

Da Equação (10.20), tem-se:

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

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

Da Tabela 10.8, obtém-se:

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

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).

$$I_{af} \leq I_{pm} \times K + \sum I_{nm} \quad (10.21)$$

I_{pm} – corrente de partida do maior motor;

$\sum I_{nm}$ – soma das correntes nominais dos demais motores;

K – fator de multiplicação, cujos valores foram definidos no item a da Seção 10.2.2.4.1.

c) Proteção de circuitos de distribuição de aparelhos

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

$$I_{af} \geq \alpha \times \sum I_{na} \quad (10.22)$$

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

$\sum I_{na}$ – 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).

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

K – valores definidos no item a da Seção 10.2.2.4.1.

e) Proteção de circuitos terminais de capacitores ou banco

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

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:

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

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

TABELA 10.7

Correntes nominais dos fusíveis diazed – Siemens

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

TABELA 10.8

Correntes nominais dos fusíveis NH – Siemens

Tamanho	Correntes Nominais	Tamanho	Correntes Nominais
000	6	1	125
	10		160
	16		200
	20		224
	25		250
	32	2	224
	40		250
	50		315
	63		355
	80		400
00	100	3	400
	125		500
	160		630
1	40	4	800
	50		1.000
	63		1.250
	80		-
	100		-

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} .

Através dos gráficos das Figuras 3.26 e 3.27, respectivamente, para condutores isolados em PVC/70°C e XLPE ou EPR, fabricação Ficap, obtém-se o tempo máximo, T_{sc} , que a isolamento 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 de manobra

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.

• 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_{nf} que devem ser pré-ligados aos contadores a fim de eliminar as correntes de curto-circuito. Deve ser garantida a seguinte relação:

$$I_{nf} \leq I_{nfc}$$

(10.27)

TABELA 10.9
Integral de Joule dos fusíveis diazed – Siemens

Corrente Nominal	Corrente de Curto-circuito (mínima)	I _t de Fusão	I _t de Interrupção			Corrente Nominal	Corrente de Curto-circuito (mínima)	I _t de Fusão	I _t de Interrupção		
			Tensão						Tensão		
			220 Vca	380 Vca	440 Vca				220 Vca	380 Vca	440 Vca
(A)	(A)	(A ² s)	(A ² s)	(A ² s)	(A ² s)	(A)	(A)	(A ² s)	(A ² s)	(A ² s)	(A ² s)
2	36	5,6	8,4	9,8	11,1	25	650	1.690	3.000	3.500	4.000
4	90	32	41	46	51	35	900	3.610	5.500	6.700	7.800
6	150	90	138	155	170	50	1.300	6.250	9.800	12.000	14.000
10	300	336	445	495	530	63	1.600	10.800	19.900	24.900	30.000
16	350	462	890	1.100	1.300	80	1.900	15.745	27.000	35.000	43.500
20	500	1.082	1.830	2.170	2.400	100	2.800	27.040	44.500	57.500	70.000

TABELA 10.10
Integral de Joule dos fusíveis NH – Siemens

Corrente Nominal	Corrente de Curto-circuito (mínima)	Pt de Fusão	Pt de interrupção			Corrente Nominal	Corrente de Curto-circuito (mínima)	Pt de Fusão	Pt de Interrupção		
			Tensão						Tensão		
			220 Vca	380 Vca	440 Vca				220 Vca	380 Vca	440 Vca
(A)	(A)	(A²s)	(A²s)	(A²s)	(A²s)	(A)	(A)	(A²s)	(A²s)	(A²s)	(A²s)
6	210	46	80	105	150	160	7.800	60.000	118.500	149.000	223.000
10	310	90	180	250	370	200	10.500	115.000	215.000	270.000	400.000
16	620	300	460	585	880	224	12.000	146.000	295.000	370.000	550.000
20	840	565	860	1.100	1.650	250	14.000	210.000	415.000	520.000	780.000
25	1.100	980	1.500	1.900	2.900	315	19.000	290.000	550.000	700.000	1.050.000
32	1.450	2.200	3.400	4.300	6.400	355	21.000	475.000	880.000	1.120.000	1.700.000
40	2.100	4.000	6.000	8.200	12.100	400	23.000	590.000	1.140.000	1.430.000	2.150.000
50	2.500	6.000	9.000	11.000	16.000	500	29.000	1.000.000	1.900.000	2.360.000	3.500.000
63	2.800	7.700	14.000	18.000	27.000	630	39.000	1.900.000	3.500.000	4.500.000	6.700.000
80	3.500	12.900	24.000	30.000	46.000	800	54.000	3.500.000	6.500.000	8.300.000	12.400.000
100	4.800	24.000	45.000	57.000	85.000	1.000	72.000	6.400.000	11.900.000	15.100.000	22.700.000
125	6.000	36.000	69.000	86.000	130.000	1.250	96.000	11.300.000	21.000.000	26.700.000	40.000.000

I_{nf} – corrente nominal do fusível a ser pré-ligado ao contator;
 I_{nf} – corrente nominal do fusível.

• 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_{nf} que devem ser pré-ligados aos relés a fim de eliminar as correntes de curto-circuito. Deve ser garantida a seguinte relação:

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

I_{nf} – 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 seguinte relação:

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

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 contadores 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 através da sensibilidade dos relés térmico e magnético a eles ligados, podendo voltar ao estado de operação alguns instantes depois.

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 eletroduto enterrado e a isolamento do condutor é de PVC, 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 dez chuveiros elétricos de 3.500 W.

a) Corrente de carga dos aparelhos

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

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

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

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

$$F_p \approx 1$$

$$\sum I_{no} = \frac{191}{\sqrt{3} \times 0,38} = 290,2 \text{ A}$$

$$S_c = 240 \text{ mm}^2 \text{ (Tabela 3.6 – coluna D13, justificada pela Tabela 3.4 – método de instalação 61A)}$$

b) Corrente de carga motriz

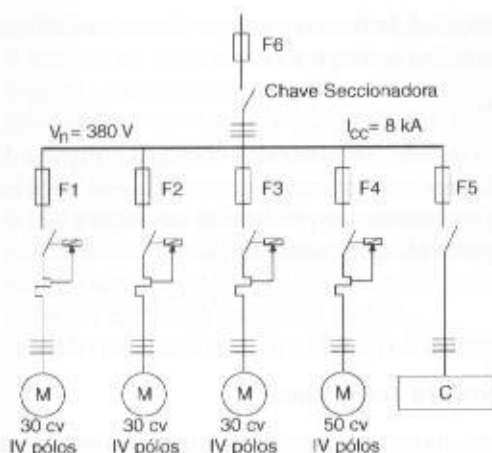
$$P_{m1} = 30 \text{ cv} \rightarrow I_{m1} = 43,3 \text{ A (Tabela 6.3)} \rightarrow S_c = 10 \text{ mm}^2 \text{ (Tabela 3.6 – coluna D13, justificada pela Tabela 3.4 – método de instalação 61A)}$$

$$P_{m2} = 50 \text{ cv} \rightarrow I_{m2} = 68,8 \text{ A (Tabela 6.3)} \rightarrow S_c = 25 \text{ mm}^2 \text{ (Tabela 3.6 – coluna D13, justificada pela Tabela 3.4 – método de instalação 61A).}$$

c) Corrente total da carga

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

FIGURA 10.30
Diagrama unifilar



d) Seção nominal do condutor de alimentação

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

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

e) Corrente nominal dos fusíveis F1 – F2 – F3

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

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

$$I_{pnc} = I_{nnc} \times R_{c,pnc} = 43,3 \times 6,8 = 294,4 \text{ A}$$

$$K = 0,4$$

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

- O fusível não deve atuar durante a partida do motor

Através da Figura 10.20, tem-se:

$I_{pnc} = 294,4 \text{ A} \rightarrow T_{af} = 300 \text{ s}$ (valor mínimo da faixa de atuação do fusível de NH 100 A, visto na Figura 10.20)

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

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

- O fusível deve proteger a isolação dos condutores

Através da Figura 3.26, tem-se:

$$I_{cr} = 8 \text{ kA} \rightarrow S_c = 10 \text{ mm}^2 \rightarrow T_{rc} = 2 \text{ ciclos} = 0,033 \text{ s}$$

Através do gráfico da Figura 10.20, tem-se:

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

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

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

De acordo com a Tabela 10.1, o condutor de 10 mm^2 , com isolação PVC, tem como integral de Joule o valor de $1.322 \times 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$. Através da Tabela 10.10 pode-se observar que o fusível NH 100 A deixa passar, em 380 V, uma integral de Joule de $57.000 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$, portanto muito inferior à capacidade do condutor, protegendo-o por conseguinte. Esta é outra forma de verificar a suportabilidade da isolação do cabo protegido por um determinado fusível.

- O fusível deve proteger o contator

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

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

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

- O fusível deve proteger o relé térmico

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

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

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

f) Corrente nominal do fusível F4

$$R_{cpm} = 6,4 \text{ (Tabela 6.3)}$$

$$I_{nm} = 68,8 \text{ A (Tabela 6.3)}$$

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

$$K = 0,4$$

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

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

g) Corrente nominal do fusível F5

$$I_{nf} \geq \alpha \times \sum I_{no}$$

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

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

- O fusível deve proteger a isolação dos condutores

Pelo gráfico da Figura 3.26, tem-se:

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

Através do gráfico da Figura 10.24, tem-se:

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

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

- O fusível deve proteger a chave seccionadora

$$I_{nm} = \sum I_{no} = 290,2 \text{ A}$$

$$I_{se} \geq 1,15 \times I_{nm} \geq 1,15 \times 290,2 \geq 333,7 \text{ A} \rightarrow I_{se} = 382 \text{ A/380 V - S32 - 630/3}$$

Através da Tabela 9.14, obtém-se o fusível máximo que deve ser pré-ligado à chave, ou seja:

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

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

h) Corrente nominal do fusível F6

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K + \sum I_{nm} + \sum I_{no}$$

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

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

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

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

Através do gráfico da Figura 10.22, tem-se:

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

Da Equação (10.26), tem-se:

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

De acordo com a Tabela 10.1, o condutor de cobre de 185 mm^2 , com isolação PVC, tem como integral de Joule o valor de $462.625 \times 10^1 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$. Através da 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

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

$$I_{se} = 870 \text{ A/380 V - S32 - 1.250/3}$$

Através da Tabela 9.14, tem-se:

$$I_{sc} = 870 \text{ A}/380 \text{ V} \rightarrow I_{qcn} = 1.250 \text{ A}$$

$$I_{qt} < I_{qcn} \text{ (condição satisfeita).}$$

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

Através do gráfico da Figura 10.22, tem-se:

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

Da Equação (10.25), tem-se:

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

10.2.3 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 300 mm^2 , devido à pouca flexibilidade, 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 e CCMs para grandes motores elétricos ou no suprimento de grandes cargas.

No entanto, o uso de condutores em paralelo por fase podem criar 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 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 através de registradores digitais dotados de alicates amperimétricos, mesmo de grande capacidade de corrente.

10.2.3.1 Proteção contra sobrecarga de condutores em paralelo

- a) 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. Nesse caso, basta estabelecer as seguintes condições:

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

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_{mk} – 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 o seu arranjo na bandeja, prateleira etc. esteja em conformidade com os arranjos mostrados nas Figuras 3.22 e 3.23, respectivamente, para condutores em posição plana e em trifólio.

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

- 1.º plano: RST – TSR
- 2.º plano: RST – TSR
- 3.º 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 corrente de 1.250 kVA. Determinar a seção dos condutores desse circuito limitada a 240 mm²/condutor. Os condutores estão instalados em três bandejas metálicas não ventiladas 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:

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

- Corrente corrigida pelo fator de agrupamento

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

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

- Número de condutores em paralelo por fase

$$I_{cr} = \frac{2.277}{6} = 379,5 \text{ A} \rightarrow S_c = 240 \text{ mm}^2 \rightarrow I_{nc} = 403 \text{ A (coluna C11 da Tabela 3.6)}$$

- Corrente de ajuste da proteção de sobrecarga

Será adotado o disjuntor 3WN6 – 3.200 A – faixa de ajuste da unidade temporizada 800 a 2.000, conforme Tabela 10.6.

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

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

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

$$I_{ck} \leq I_{ap} \leq \sum I_{nc} \rightarrow 1.640 \leq I_{ap} \leq 2.418 \text{ A}$$

Logo, o ajuste da unidade temporizada será $I_{aj} = I_{ap} = 1.700 \text{ A}$.

A disposição dos cabos nas bandejas deve obedecer ao que foi definido na Figura 3.22.

b) 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. Nesse 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 através de registradores gráficos e escolher os valores de corrente máximos que determinam o valor da carga total. No entanto, na fase de projeto cabe determinar os valores das impedâncias de cada condutor do grupo em paralelo e distribuir as correntes de forma inversamente proporcional aos valores das impedâncias. Essa é uma tarefa nada 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.

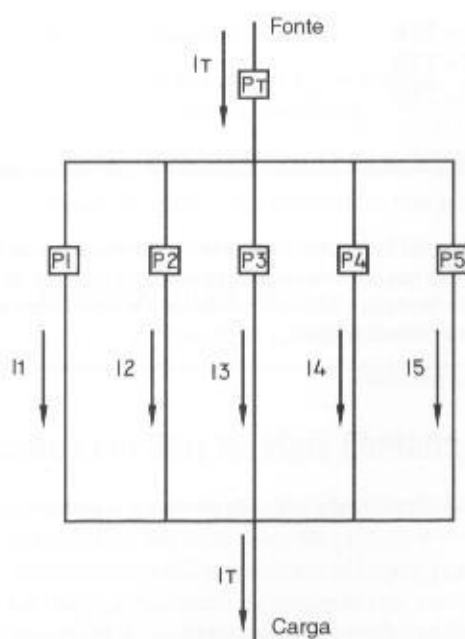


FIGURA 10.31
Condutores em paralelo (1 fase)

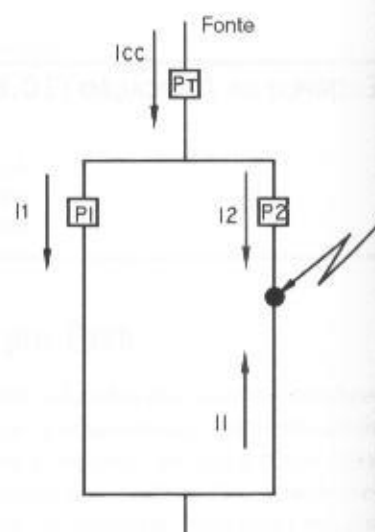


FIGURA 10.32
Dois condutores em paralelo em curto (1 fase)

A determinação da corrente de um condutor k específico, parte do grupo de condutores em paralelo, pode ser definida pela Equação (10.31), extraída da NBR 5410/2004.

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

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 através de medição com registradores de demanda.

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

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

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

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

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

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

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

- Capacidade máxima de corrente do cabo 240 mm^2

Para a sua particular condição de instalação com seis condutores agrupados: $I_{nc} = 0,72 \times 403 = 290$ 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^2 por condutores de 300 mm^2 .

- Capacidade máxima de corrente do cabo 300 mm^2

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

- Correntes de carga por fase

$$R_i = 1.567 \text{ A}; S_i = 1.593 \text{ A}; T_i = 1.569 \text{ A}$$

- Correntes de ajuste dos dispositivos de proteção de cada condutor

Serão utilizados seis disjuntores do tipo 3VF 52 – 400 A, faixa de ajuste 315 a 400 A, em conformidade com a Tabela 3.6.

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

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

A proteção contra curtos-circuitos pode ser utilizada de duas formas, ou seja:

- a) 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 num tempo inferior ao tempo de suportabilidade térmica do cabo, conforme gráficos das Figuras 3.26 e 3.27, ou empregar a Equação (3.19). Se essa condição não for satisfeita, cumpre utilizar a proteção individual em cada condutor em paralelo do grupo.

- b) Proteção individual para cada condutor do grupo em paralelo

Ao se adotar a proteção individual num projeto elétrico é necessário seguir alguns princípios, ou seja:

- para dois condutores em paralelo por fase, deve-se utilizar um dispositivo de proteção na origem de cada condutor; neste caso, não há realimentação da corrente de curto-circuito pelo condutor não atingido, conforme observado na Figura 3.32;

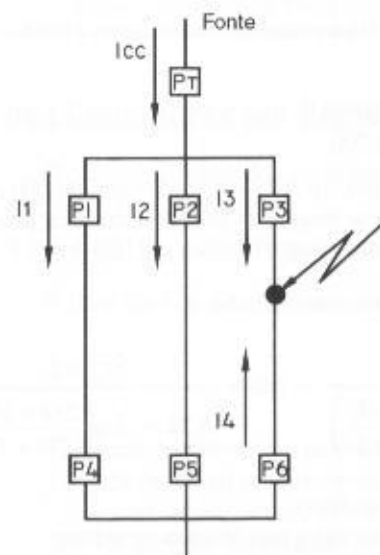


FIGURA 10.33

Três condutores em paralelo em curto-circuito (1 fase)

- 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 condutor, ou seja, na carga, conforme mostrado na Figura 10.33.

Caso se considere 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 através dos dois condutores não atingidos. Assim, a corrente $I_4 = I_1 + I_2$ irá atravessar a proteção P6 que deve também ser sensibilizada por esta corrente, isolando definitivamente o ponto defeituoso.

Quando a proteção é feita individualmente, deve-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^2 e disjuntores com unidades magnéticas de rápida temporização.

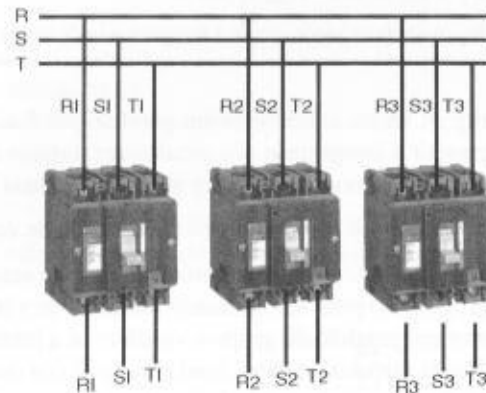


FIGURA 10.34
Disposição dos cabos paralelos
no disjuntor

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.10)

Considerar o Exemplo de Aplicação (10.8). Foram utilizados seis condutores por fase de seção igual a 240 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 kA.

- Determinação da proteção, inicialmente única

De acordo com a Equação (3.19) e utilizando-se o disjuntor 3WN6 – 3.200, faixa de ajuste de 800 a 2.000 A, ajustado em 1.700 A, tem-se:

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

- Ajuste da unidade magnética: $10 \times I_{m1} = 10 \times 1.700 = 17.000 \text{ A}$
- Ajuste da classe de tempo de disparo da unidade magnética: 80 ms (veja a Figura 10.17)
- Tempo de disparo da unidade magnética: $I_n = 22.000 \text{ A}$ ($10 \times I_{m1}$) $\rightarrow T_{adm} = 0,13 \text{ s}$ (veja a 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 mm²/condutor. Os condutores estão instalados em três bandejas metálicas não ventiladas, em camada única. A corrente de curto-circuito fase-terra na extremidade da carga servida pelo alimentador em questão vale 42 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.

$$I_{cac} = \frac{1.640}{0,70} = 2.342 \text{ A}$$

- Número de condutores em paralelo por fase

$$I_{cc} = \frac{2.342}{12} = 195 \text{ A} \rightarrow S_c = 95 \text{ mm}^2 \rightarrow I_{sc} = 223 \text{ A (coluna C1 da Tabela 3.6)}$$

- Determinação da proteção única: unidades térmica e magnética

De acordo com a Equação (3.19), e utilizando-se o disjuntor 3WN6 – 3.200, faixa de ajuste da unidade térmica de 1.000 a 2.500 A, ajustado em 1.700 A, tem-se:

$$I_R = 42.000 \text{ A} \rightarrow M = \frac{42.000}{1.700} = 24 \text{ A}$$

- Ajuste da classe de tempo de disparo da unidade magnética: 400 ms (veja a Figura 10.17)
- Tempo de disparo do disjuntor na unidade magnética: $I_R = 24 \times I_n \rightarrow T_{adm} = 0,47 \text{ s}$
- Tempo de suportabilidade térmica do cabo

$$S_c = \frac{\sqrt[3]{T_{sc}} \times I_{cc}}{0,34 \times \sqrt{\log\left(\frac{234 + T_f}{234 + T_i}\right)}} \rightarrow 95 = \frac{\sqrt[3]{T_{sc}} \times 42}{0,34 \times \sqrt{\log\left(\frac{234 + 160}{234 + 70}\right)}} \rightarrow T_{sc} = 0,066 \text{ s}$$

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.

10.2.4 Comportamento dos Condutores em Regime Transitório

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

- Condutor isolado com início de operação a uma temperatura ambiente de 30°C

A limitação da duração da corrente de sobrecarga vale:

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

T_{sb} – tempo necessário para um determinado condutor atingir 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_n – relação de sobrecarga térmica, dada na Equação (10.35);

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

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

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 mm²;

β – 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:

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

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

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

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

TABELA 10.11

Coeficientes de linha (β)

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

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

b) Condutor isolado a uma temperatura inicial máxima de regime

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

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.12)

Determinar o tempo máximo para o condutor de isolamento PVC atingir a sua temperatura de sobrecarga de regime, quando alimenta um transformador de 150 kVA – 13.800/440 V em operação e em carga nominal e que deve ser sobressolicitado por uma carga igual a 155% de sua potência nominal por um tempo limitado. O circuito está instalado isoladamente em eletroduto enterrado e a temperatura ambiente é de 30°C.

Aplicando-se a Equação (10.37), tem-se:

$$T_{sb} = K_i \times \ln \left(\frac{R_s^2 - 1}{R_s^2 - R_{st}} \right) \text{ (s)}$$

$$I_m = 196 \text{ A}$$

$$S_c = 120 \text{ mm}^2$$

$$I_{sc} = 203 \text{ A (Tabela 3.6 – coluna D13, justificada pela Tabela 3.4 – método de instalação 61A)}$$

$$T_a = 30^\circ\text{C}$$

$$T_s = 100^\circ\text{C (Tabela 3.5)}$$

$$T_{sc} = 70^\circ\text{C (Tabela 3.5)}$$

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

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

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

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

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

$\beta = 14,5$ (Tabela 10.11 – tipo de linha D)

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

$$K_i = \frac{10^4}{14,5^2} \times (0,7 \times 25^{0,75} + 0,8 \times 25^{0,5} + 0,4 \times 25^{0,25}) \rightarrow K_i = 605$$

$$T_{sb} = 605 \times \ln \left(\frac{1,49^2 - 1}{1,49^2 - 1,75} \right)$$

$$T_{sb} = 577 \text{ s} \rightarrow T_{sb} = 9,6 \text{ min}$$

Logo, o tempo máximo de sobrecarga acima da qual prejudicará a isolação do condutor será de 9,6 min.

10.2.5 Seletividade

É a característica que deve ter um sistema elétrico quando submetido a correntes anormais, de modo a atuar os dispositivos de proteção para desenergizar somente a parte do circuito afetado.

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

- seletividade amperimétrica;

- seletividade cronológica;
- seletividade lógica.

10.2.5.1 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 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 a 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 ser levados em conta 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 somente magnéticos, com diferentes correntes de atuação dos disparadores magnéticos.

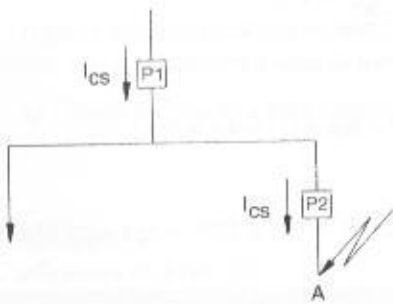


FIGURA 10.35
Seletividade amperimétrica

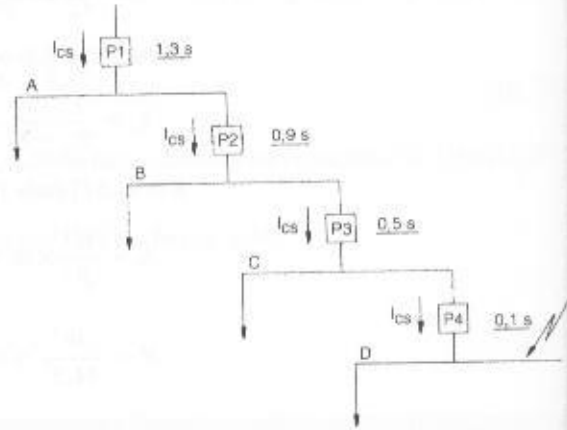


FIGURA 10.36
Seletividade cronométrica

10.2.5.2 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, onde se admite um intervalo de coordenação de 0,4 s. Um curto-circuito na barra D resulta uma corrente de valor I_{cs} que atra-

vessa 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 P1 foram ajustadas, respectivamente, em 0,9 e 1,3 s.

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 \times 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 a especificação do dispositivo adotado.

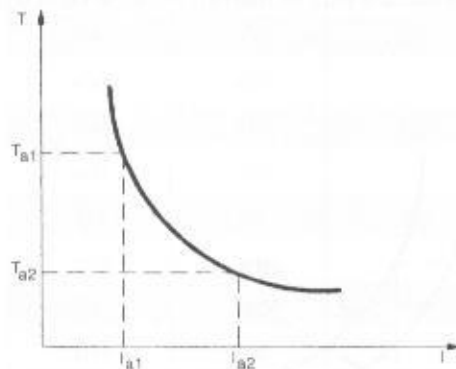


FIGURA 10.37
Curva de tempo inverso

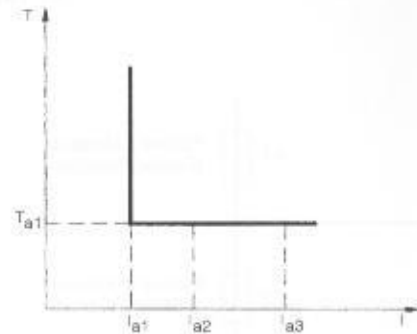


FIGURA 10.38
Curva de tempo definido

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, ou seja:

- nos projetos industriais, a concessionária impõe condições de tempo na proteção de fronteira com a planta, em função do 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 tem valores muito diferentes, pode-se ter que 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 contém o sistema de proteção.

10.2.5.2.1 Fusível em série com fusível

Praticamente, a seletividade entre fusíveis do mesmo tipo e tamanho imediatamente subsequentes é natural. A fim de ficar assegurada a seletividade entre fusíveis, é necessário que a corrente no-

nominal do fusível protegido (fusível a montante) seja igual ou superior a 160% do fusível protetor (fusível a jusante), isto é:

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

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

I_{fj} – 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.

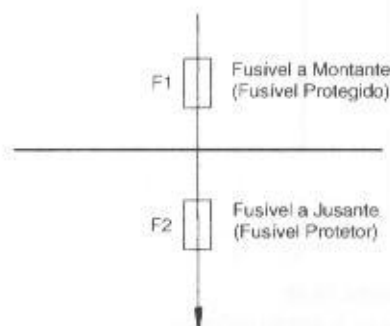


FIGURA 10.39
Posição dos fusíveis

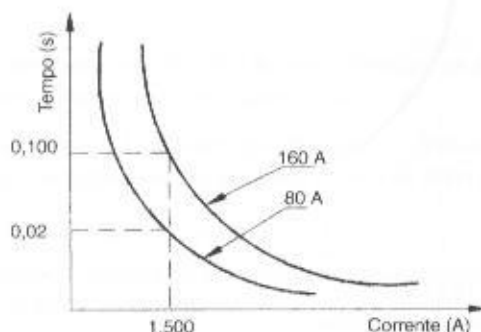


FIGURA 10.40
Curva de seletividade entre fusíveis

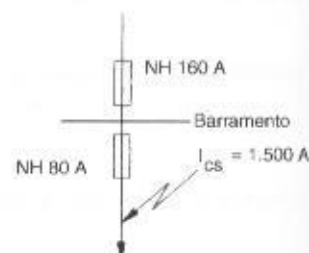


FIGURA 10.41
Fusíveis de 160 A e 80 A em série

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 a 75% do tempo de fusão das mesmas, sem que haja alteração nas características do elemento fusível.

10.2.5.2.2 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 relé eletromagnético, 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 freqüentemente empregado, é aquele em que se deseja proteger o disjuntor contra correntes 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 da Figuras 10.26 e 10.27, pode-se observar, entretanto, que para correntes muito elevadas o fusível não mais responde a esta característica.

TABELA 10.12

Tabela de seletividade entre fusíveis

Corrente 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		

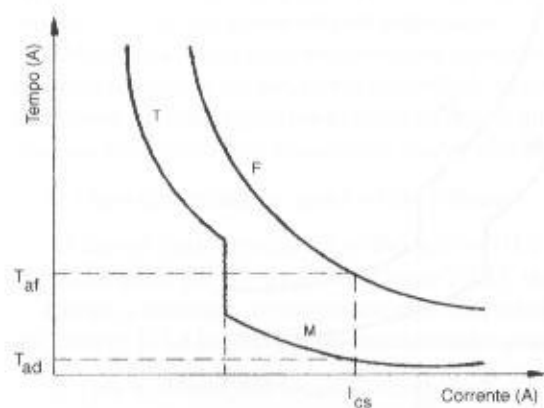


FIGURA 10.42

Fusível em série com o disjuntor

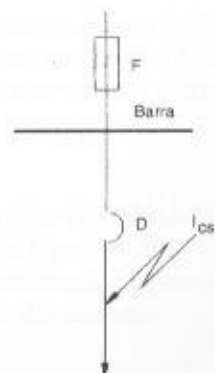


FIGURA 10.43

Posições do fusível e disjuntor

10.2.5.2.3 Disjuntor de ação termomagnética em série com fusível

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.

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:

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

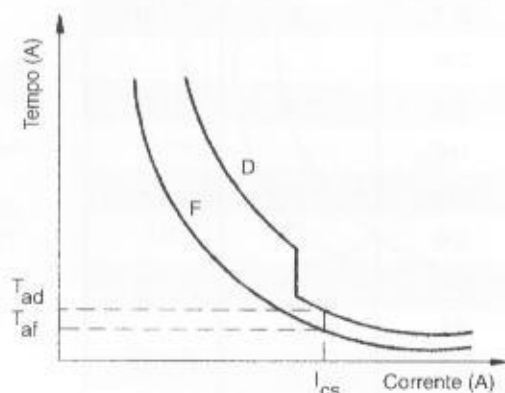


FIGURA 10.44
Disjuntor em série com fusível

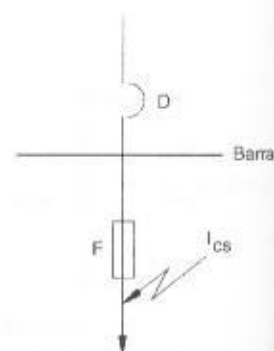


FIGURA 10.45
Posição do disjuntor e fusível

10.2.5.2.4 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.

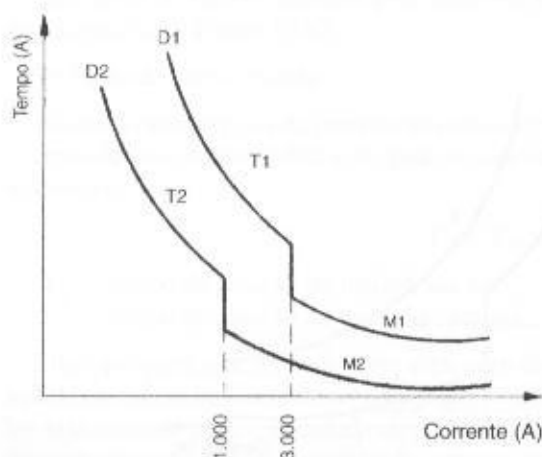


FIGURA 10.46
Disjuntor em série com disjuntor

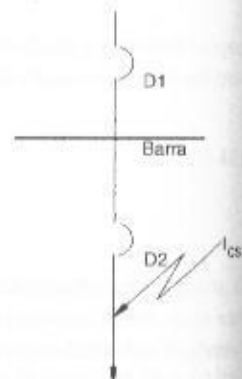


FIGURA 10.47
Posições dos disjuntores

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 os mesmos serem afetados térmico 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.

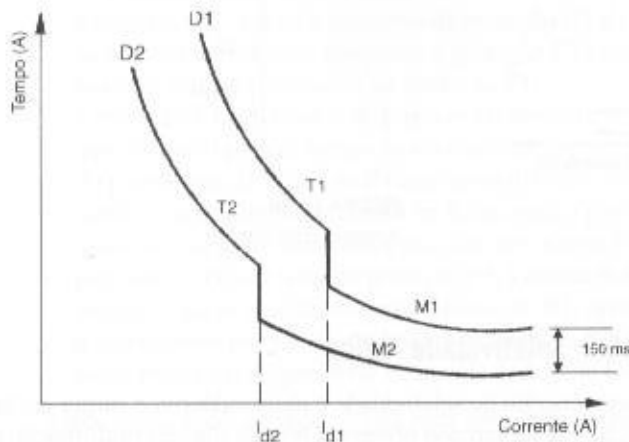


FIGURA 10.48

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 à seguinte condição:

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

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.

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, ou seja:

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 disjuntores D1 e D2 devem ser multiplicadas por dois somente na escala das correntes.

b) Três alimentações iguais e simultâneas.

Conforme a Figura 10.51, as mesmas considerações anteriores podem ser aplicadas adequadamente no caso.

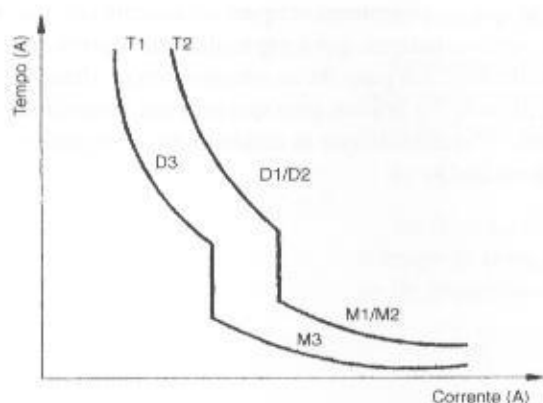


FIGURA 10.49
Curvas para alimentação dupla

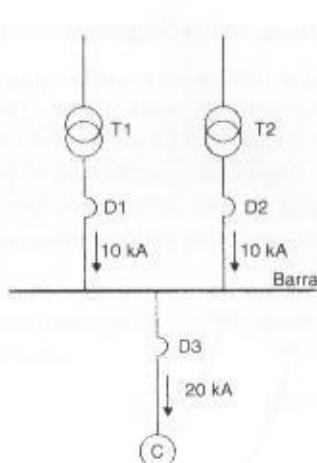


FIGURA 10.50
Alimentação dupla

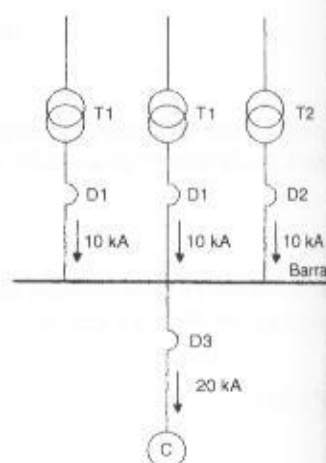


FIGURA 10.51
Alimentação tripla

10.2.5.3 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 onde são utilizadas unidades de sobrecorrentes digitais em diferentes níveis de barramento. Cada relé digital se conecta a outro através de um fio piloto que tem função de conduzir o sinal lógico de bloqueio.

Os princípios básicos de funcionamento da seletividade lógica estão resumidos a seguir com a ajuda da Figura 10.52, ou seja:

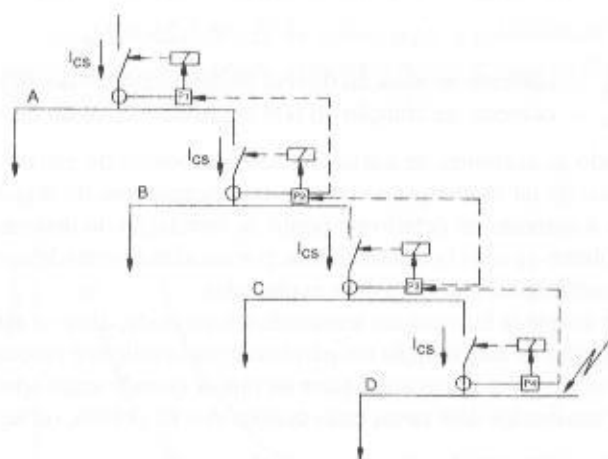


FIGURA 10.52
Seletividade lógica

- 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;
- 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 através de 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 solicitado 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 num tempo dado pelo tempo de abertura do dispositivo de interrupção.

10.2.6 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 estudado anteriormente, a proteção dos motores tinha por base o uso dos relés de sobrecarga bimetalicos. 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 monopolarmente, já que ele é sensível à ausência de fase do sistema desde a fonte até o seu ponto de instalação. Atua normalmente sobre o contator de manobra do motor.

b) Relé digital de proteção multifunção

São relés numéricos dotados de 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 detetores 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 detetores 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 dos tipos 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 detetores aumentam abruptamente a 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, a sua resistência reduz-se abruptamente, provocando a atuação de um relé auxiliar responsável pela abertura da chave de manobra do motor.

Os detetores 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.

10.2.6.1 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 vinte 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.

10.2.6.2 Sobrecarga intermitente

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

A proteção através de relés térmicos torna-se adequada à medida que se conheça exatamente o regime de sobrecarga do motor, ajustando-se o seu valor de atuação de forma a não interferir na operação da máquina, 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, nesse caso, mais conveniente suprimir a referida proteção, evitando-se, assim, desligamentos intempestivos.

10.2.6.3 Redução da tensão de alimentação

Considerando a instalação do motor num 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 é também eficaz. Uma alternativa recomendada é o uso de relés de subtensão comandando o dispositivo de abertura do motor.

10.2.6.4 Tensão de alimentação elevada

Considerando a instalação do motor num 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.

Cabe lembrar que, por norma, os motores devem suportar uma tensão de ensaio de no mínimo 1.500 V. 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.

10.2.6.5 Rotor bloqueado

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

10.2.6.6 Temperatura ambiente elevada

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

10.2.6.7 Circulação deficiente do meio refrigerante

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

10.2.6.8 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 durante carga nominal. Nestas condições, podem ser empregados as sondas térmicas e termistores. Se a frequência for superior à nominal, então nenhum prejuízo de ordem térmica sofrerá o motor.

10.2.6.9 Funcionamento com correntes desequilibradas

Como já foi explanado no Capítulo 6, o desequilíbrio das correntes de fase provocam efeitos térmicos danosos ao motor quando este opera com carga próxima a seu valor nominal ou superior. Neste caso, o campo de seqüência 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 através de relés térmicos ou de imagem térmica acoplados aos terminais do estator não seriam sensibilizados, 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 irreversíveis, 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 ASA (*American Standard Association*).

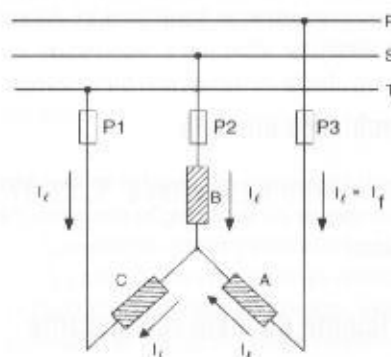
10.2.6.10 Funcionamento com ausência de uma fase

A ausência de uma fase nas instalações elétricas industriais pode trazer sérias conseqüências aos motores em operação, desde que os dispositivos de proteção não atuem adequadamente. Embora alguns tipos de relés bimetalicos 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.



I_f – corrente de fase do enrolamento do motor; I_L – corrente de linha.

FIGURA 10.53
Ligação estrela

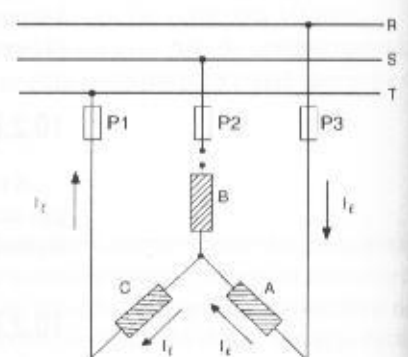


FIGURA 10.54
Ligação estrela com ausência de uma fase

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 triângulo

A Figura 10.55 representa um motor ligado em triângulo, operando em condições normais. A Figura 10.50 mostra a ligação do mesmo motor quando uma das fases de alimentação é desconectada.

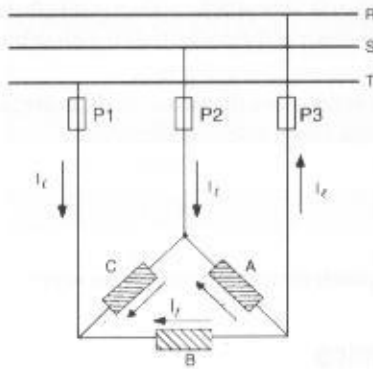


FIGURA 10.55
Ligação em triângulo

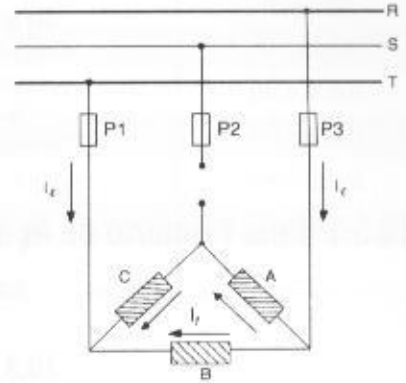


FIGURA 10.56
Ligação em triângulo com ausência de fase

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 conjunto da 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 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 o seu processo de sensibilização do relé de proteção.

10.3 PROTEÇÃO DE SISTEMAS PRIMÁRIOS

Segundo a NBR 14039/2003 é considerada 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 através de 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.

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 através de relés secundários dotados de unidades instantâneas (50) e temporizadas (51) de fase e de neutro.

Dessa forma, fica vedada, pela NBR 14030/2003, 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 na 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 eletrônicos 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 como relés secundários.

10.3.1 Relé Primário de Ação Direta

São empregados mais freqüentemente dois tipos, ou seja:

10.3.1.1 Relé fluidodinâmico

Consiste em um dispositivo provido de uma bobina formada de grossas espiras de condutores de cobre, através da 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 a 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 a temporização do mesmo. 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, através do 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). Através 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.

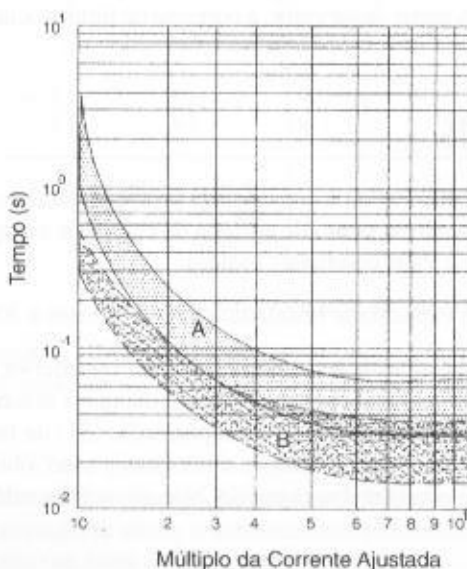


FIGURA 10.57
Curvas de atuação do relé RM2F

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		

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 neste indicada coincida com o valor da corrente desejada, contida na escala.

A corrente de regulação desses relés, quando utilizados no disjuntor geral da subestação, é normalmente preestabelecida pela concessionária local e o seu valor, em geral, vale:

$$I_r = (1,3 \text{ a } 1,5) \times I_n \quad (10.46)$$

I_r – corrente de regulação, em A;

I_n – 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 estático

São dispositivos fabricados de componentes estáticos montados em caixa metálica blindada para evitar a interferência do campo magnético dos condutores de alta tensão e instalados nos bornes dos disjuntores.

Esses relés dispensam alimentação auxiliar, o que torna a sua aplicação muito prática. O 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 através de seletores localizados no seu painel frontal, cada um deles contendo uma escala adequada. Para melhor entendimento, observar a Figura 9.30, que mostra o relé em perfil.

10.3.1.2.1 Características construtivas

Esses relés são constituídos basicamente de três módulos, tal como se apresenta o relé RPC-1, ou seja:

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.

TABELA 10.14

Características elétricas dos relés RPC-1

Características Elétricas	Unid.	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						
Sobrecorrente de carregamento	mm	3						
Curso de disparo	mm	15						

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 pólo 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 realizar a ligação do relé ao barramento da subestação através 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 semi-exposição 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 na utilização desses relés é a ausência de qualquer fonte de alimentação auxiliar, tal 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, ou seja:

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 numa 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 e grande portes, onde 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.

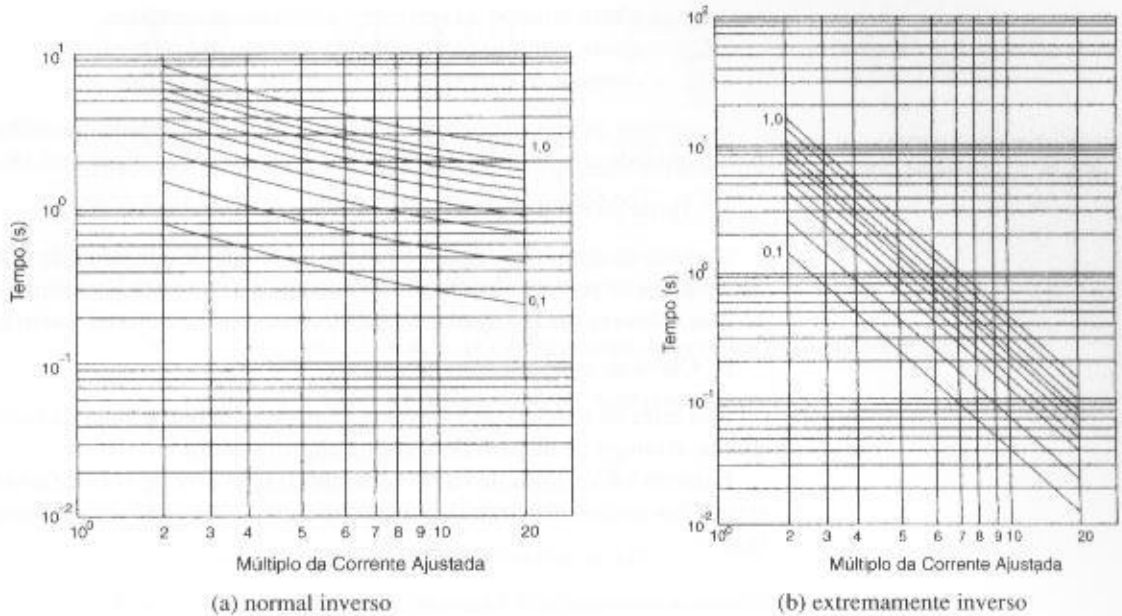
Para se ajustar o relé RPC-1, devem-se seguir estes passos:

- 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;

FIGURA 10.58

 Característica tempo ×
corrente do relé RPC-1


- entre 176 e 320 A: $I_n = 160$ A.
- Corrente de ajuste da unidade temporizada

É o valor da corrente que é 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 o 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 a 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:

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

I_{ai} – corrente de ajuste da unidade instantânea.

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

– valor mínimo:

$$I_{ima} \geq 4 \times I_{ai} \quad (10.50)$$

– valor máximo:

$$I_{ima} < I_{cs} \quad (10.51)$$

- I_{mi} – ajuste mínimo da corrente da unidade instantânea;
- I_{ma} – ajuste máximo da corrente da unidade instantânea;
- I_{cs} – corrente de curto-circuito simétrico, valor eficaz.

A corrente de acionamento da unidade instantânea é dada em múltiplos da corrente ajustada para a unidade temporizada. O valor de I_{ma} não deve ser superior a $18 \times I_{ar}$.

- Ajuste da temporização

O ajuste do tempo de disparo é função do estudo de coordenação que se deseja com os demais dispositivos de proteção localizados a jusante ou a montante. Conforme se observa na Figura 9.30, há dois seletores para se ajustar o tempo, sendo um para ajustes inteiros e o outro para as frações.

- b) Curva de temporização inversa

Nos relés de temporização inversa, quando se define o valor da corrente de ajuste, por conseguinte, o tempo de disparo do relé fica também definido.

Existem vários tipos de curva de temporização inversa com diferentes níveis de inclinação, o que define o nível de temporização do relé, conforme pode ser visto através da Figura 10.58 (a) e (b).

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.13)

Dimensionar e ajustar os relés RPC-1 instalados numa 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.

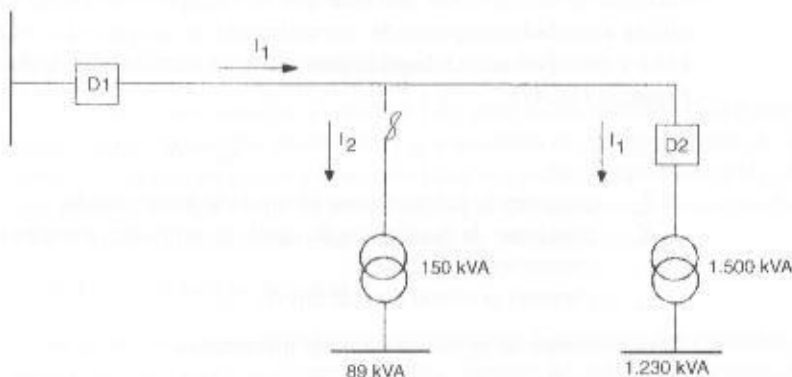


FIGURA 10.59
Esquema elétrico

Os relés estão montados nos pólos 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. Este valor é normalmente utilizado por grande parte das concessionárias brasileiras.

- Corrente nominal do relé acoplado ao disjuntor D2
- Considerando a corrente da carga

$$I_{ar} = \frac{1.500}{\sqrt{3} \times 13,80} = 62,7 \text{ A}$$

- Considerando a corrente de curto-circuito

$$I_{cs} = \frac{31.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 1.296 \text{ A}$$

- Corrente de ajuste da unidade temporizada

$$I_{ar} = 1,5 \times 62,7 = 94,05 \text{ A} \rightarrow I_{ar} = 80 \text{ A}$$

$$K_r = \frac{I_{ar}}{I_{nr}} = \frac{94,05}{80} = 1,17 \rightarrow K_r = 1,2$$

$$I_w = I_{nr} \times K_r = 80 \times 1,2 = 96 \text{ A}$$

O ajuste do tempo deve ser função dos tempos de coordenação do sistema, não expressos neste exemplo. Ao se optar pelo ajuste da unidade temporizada, é necessário fazer $K_t = \infty$, que corresponde a $I_{ms} = \infty$. 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:

$$K_i = \frac{1,296}{1,2 \times 80} = 13,5 \rightarrow K_i = 11 \text{ (Valor adotado, inferior em cerca de 10% a 15%)}$$

$$I_{ms} = 11 \times 96 = 1,056 \text{ A (corrente de ajuste da unidade instantânea)}$$

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

$$I_{ms} \geq 4 \times I_{ar} \text{ (valor mínimo)}$$

$$I_{ms} \geq 4 \times 96 \geq 384 \text{ A}$$

$$I_{ms} < 18 \times 96 < 1,728 \text{ A}$$

- Verificação da capacidade de curto-circuito do relé

Para verificar se o relé suporta térmica e dinamicamente a corrente de curto-circuito, tem-se:

$$I_{cs} = I_{nr} = 1,296 \text{ kA (para 1 s)}$$

$$I_{scr} = 15 \text{ kA (Tabela 10.14)}$$

$$\text{Logo: } I_{scr} > I_{cs} \text{ (condição satisfeita).}$$

$$I_{da} = \sqrt{2} \times F_a \times I_{cs}$$

$$F_a = 1,3 \text{ (fator de assimetria admitido)}$$

$$I_{da} = \sqrt{2} \times 1,3 \times 1,296 = 2,382 \text{ A} = 2,38 \text{ kA}$$

$$I_{da} = 79 \text{ kA (Tabela 10.14)}$$

$$\text{Logo: } I_{da} > I_{da} \text{ (condição satisfeita).}$$

Deixa-se para o leitor o ajuste da proteção do disjuntor D1.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.14)

Seja o diagrama unifilar industrial simplificado da Figura 10.60. 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: $I_{cs} = 3 \text{ kA}$
- ponto 1: $I_{cs} = 28 \text{ kA}$
- ponto 2: $I_{cs} = 8 \text{ kA}$
- ponto 3: $I_{cs} = 13 \text{ kA}$
- ponto 4: $I_{cs} = 6 \text{ kA}$
- ponto 5: $I_{cs} = 9 \text{ kA}$

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 seletividade de todos os elementos de proteção. Não será exercido nenhum controle de sobrecarga dos condutores.

a) Motor de 60 cv

a1) Proteção contra curto-circuito (fusível)

- Corrente nominal do fusível F2

$$I_{af} \leq I_{pn} \times K$$

$$I_{pn} = I_{an} \times R_{pn}$$

$$I_{an} = 83,3 \text{ A (Tabela 6.3)}$$

$$S_c = 25 \text{ mm}^2 \text{ (Tabela 3.6 – referência D, justificada pela Tabela 3.4 para o método de instalação 61A)}$$

$$I_{ar} = 86 \text{ A (Tabela 3.4 – coluna D13)}$$

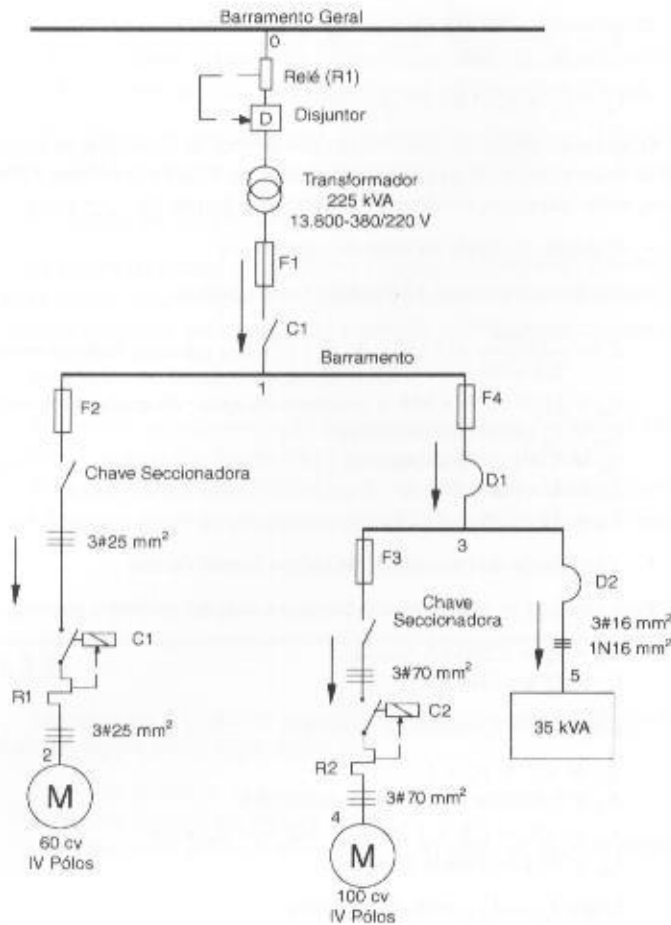
$$R_{pn} = 6,7 \text{ (Tabela 6.3)}$$

$$I_{pn} = 83,3 \times 6,7 = 558,1 \text{ A}$$

$$K = 0,3 \text{ (para } I_{pn} > 500 \text{ A)}$$

$$I_{af} \leq 6,7 \times 83,3 \times 0,3 \rightarrow I_{af} = 167,4 \text{ A} \rightarrow I_{af} = 160 \text{ A (Tabela 10.8)}$$

FIGURA 10.60
Diagrama unifilar industrial



a2) Proteção contra sobrecarga do relé R1

- 1.ª condição:
Da Equação (10.6), tem-se:
 $I_a \leq I_c \rightarrow I_c = I_{nom} = 83,3 \text{ A}$
- 2.ª condição:
Da Equação (10.7), tem-se:
 $I_a \leq I_{ar} \rightarrow I_{ar} = 86 \text{ A}$
 $83,3 \text{ A} \leq I_a \leq 86 \text{ A}$
 - Ajuste adotado: $I_a = 83,3 \text{ A}$
 - Relé adotado: 3UA58-00-8W (Tabela 10.2)
 - Faixa de ajuste: 70–88 A

a3) Verificação das condições de proteção

- O relé térmico não deve atuar durante a partida do motor

$$I_{pv} = 6,7 \times 83,3 = 558,1 \text{ A}$$

Através da Equação (10.5) e da Figura 10.4, tem-se:

$$M = \frac{I_{pv}}{I_a} = \frac{558,1}{83,3} = 6,69 \rightarrow M = 6,69 \rightarrow T_w = 5 \text{ s}$$

Da Equação (10.8), tem-se:

$$T_{rb} = 12 \text{ s (tempo de rotor bloqueado)}$$

$$T_{rb} \geq T_w > T_{mp} \text{ (condição satisfeita).}$$

Observar que o relé garante a proteção contra rotor bloqueado.

- O fusível não deve atuar durante a partida do motor

Através da Figura 10.21, tem-se:

$$I_{pm} = 558,1 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 160 \text{ A} \rightarrow T_{af} = 8 \text{ a } 70 \text{ s} \rightarrow T_{af} = 8 \text{ s}$$

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

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

Observar que o fusível não garante a proteção contra rotor bloqueado.

- O fusível deve proteger termicamente a isolação dos condutores

Através do gráfico da Figura 3.26, tem-se:

$$I_{cc} = 8 \text{ kA} \rightarrow S_c = 25 \text{ mm}^2 \rightarrow T_{sc} = 8 \text{ ciclos} = 0,13 \text{ s}$$

Através do gráfico da Figura 10.21, tem-se:

$$I_{cc} = 8 \text{ kA} \rightarrow I_{nf} = 160 \text{ A} \rightarrow T_{af} < 0,010 \text{ s}$$

Da Equação (10.26), tem-se:

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

- O fusível deve proteger o contator

Através da Tabela 9.15, tem-se:

$$P_{nm} = 60 \text{ cv} \rightarrow \text{contator: 3TF 22} \rightarrow I_{nf} = 160 \text{ A}$$

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

$$I_{nf} \leq I_{nf} \rightarrow I_{nf} = I_{nf} \text{ (condição satisfeita).}$$

- O fusível deve proteger o relé térmico

Através da Tabela 10.2, tem-se:

$$P_{nm} = 60 \text{ cv} \rightarrow \text{relé térmico: 3UA58-00-8W} \rightarrow I_{nf} = 160 \text{ A}$$

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

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

- O fusível deve proteger a chave seccionadora

Da Equação (9.18), tem-se:

$$I_{sc} = 1,15 \times I_{nm} = 1,15 \times 83,3 = 95,7 \text{ A}$$

$$I_{sc} = 102 \text{ A/380 V} - \text{S32} - 160/3 \text{ (Tabela 9.14)}$$

Através da Tabela 9.14, tem-se:

$$I_{sc} = 102 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 160 \text{ A}$$

Da Equação (10.29), tem-se:

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

- b) Motor de 100 cv

- b1) Proteção contra curto-circuito (fusível)

- Corrente nominal do fusível F3

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

$$I_{pm} = 135,4 \text{ A (Tabela 6.3)}$$

$$S_c = 70 \text{ mm}^2 \text{ (Tabela 3.6 – referência D, justificada pela Tabela 3.4 – método de instalação 6IA)}$$

$$I_{sc} = 151 \text{ A (Tabela 6.3)}$$

$$R_{cpm} = 6,7 \text{ (Tabela 6.3)}$$

$$I_{pm} = 135,4 \times 6,7 = 907,18 \text{ A}$$

$$K = 0,3 \text{ (para } I_{pm} > 500 \text{ A)}$$

$$I_{nf} \leq 6,7 \times 135,4 \times 0,3$$

$$I_{nf} < 272,1 \text{ A} \rightarrow I_{nf} = 250 \text{ A (Tabela 10.8)}$$

b2) Proteção contra sobrecarga

1.ª condição:

Da Equação (10.6), tem-se:

$$I_a \geq I_c \rightarrow I_c = I_{cm} = 135,4 \text{ A}$$

2.ª condição:

Da Equação (10.7), tem-se:

$$I_a \leq I_{ac} \rightarrow I_{ac} = 151 \text{ A}$$

$$135,4 \text{ A} \leq I_a \leq 151 \text{ A}$$

– Ajuste adotado: $I_a = 135,4 \text{ A}$

– Relé adotado: 3UA61-00-3K (Tabela 10.2)

– Faixa de ajuste: (120-150) A

b3) Verificação das condições de proteção

- O relé térmico não deve atuar durante a partida do motor

$$I_{pm} = 6,7 \times 135,4 = 907,18 \text{ A}$$

Através da Figura (10.4), tem-se:

$$M = \frac{I_{pm}}{I_a} = \frac{907,18}{135,4} = 6,70 \rightarrow M = 6,70 \rightarrow T_{ar} = 5 \text{ s}$$

$$T_{th} = 8,3 \text{ s (Tabela 6.3)}$$

Da Equação (10.8), tem-se:

$$T_{th} \geq T_{ar} > T_{pm} \text{ (condições satisfeitas).}$$

- O fusível não deve atuar durante a partida do motor

Através da Figura 10.21, tem-se:

$$I_{pm} = 907,18 \text{ A} \rightarrow I_{af} = 250 \text{ A} \rightarrow T_{af} = 7 \text{ a } 50 \text{ s} \rightarrow T_{af} = 7 \text{ s}$$

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

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

- O fusível deve proteger a isolamento dos condutores

Através do gráfico da Figura 3.26, tem-se:

$$I_{cs} = 6 \text{ kA} \rightarrow S_c = 70 \text{ mm}^2 \rightarrow T_{sc} = 100 \text{ ciclos} = 1,6 \text{ s}$$

Através do gráfico da Figura 10.21, tem-se:

$$I_{cs} = 6 \text{ kA} \rightarrow I_{af} = 250 \text{ A} \rightarrow T_{af} < 0,01 \text{ s}$$

Da Equação (10.26), tem-se:

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

- O fusível deve proteger o contator

Através da Tabela 9.15, tem-se:

$$P_{nom} = 100 \text{ cv} \rightarrow \text{contator: 3TF 51} \rightarrow I_{nc} = 224 \text{ A}$$

Deve-se reduzir a corrente nominal do fusível de $I_{af} = 250 \text{ A}$ para $I_{af} = 224 \text{ A}$, satisfazendo a condição do item b1.

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

$$I_{af} = I_{nc} \text{ (condição não satisfeita).}$$

- O fusível deve proteger o relé térmico

Através da Tabela 10.2, tem-se:

$$P_{nom} = 100 \text{ cv} \rightarrow \text{relé térmico: 3UA61-00-3K} \rightarrow I_{np} = 224 \text{ A}$$

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

$$I_{af} = I_{np} \text{ (condição satisfeita)}$$

- O fusível deve proteger a chave seccionadora

Da Equação (9.18), tem-se:

$$I_{sec} = 1,15 \times I_{nom} = 1,15 \times 135,4 = 155,71 \text{ A}$$

$$I_{sc} = 190 \text{ A}/380 \text{ V} - \text{S32} - 400/3 \text{ (Tabela 9.14)}$$

Através da Tabela 9.14, tem-se:

$$I_{sc} = 190 \text{ A}/380 \text{ V} \rightarrow I_{qch} = 400 \text{ A}$$

Da Equação (10.29), tem-se:

$$I_{qf} < I_{qch} \text{ (condição satisfeita).}$$

- c) Proteção geral (F1)

De acordo com a Equação (10.23), tem-se:

$$I_{af} \leq I_{pm} \times K + \sum I_{na} + \sum I_{sa}$$

$$I_{af} = \frac{35}{\sqrt{3} \times 0,38} = 53,1 \text{ A}$$

$$I_{qf} \leq 135,4 \times 6,7 \times 0,3 + 83,3 + 53,1 \leq 408,5 \text{ A} \rightarrow I_{qf} = 400 \text{ A}$$

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

Considerar ligados o motor de 60 cv e a carga de 35 kVA e acionar o motor de 100 cv. Logo, a corrente circulará no fusível F1 vale:

$$I_c = I_{nov} + \sum I_{sa} + I_{pm}$$

$$I_c = 83,3 + 53,1 + 907,18 = 1.043,58 \text{ A}$$

Através da Figura 10.21, tem-se:

$$I_c = 1.043,58 \text{ A} \rightarrow T_{af} = (30 \text{ a } 400) \text{ s} \rightarrow T_{af} = 30 \text{ s}$$

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

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

- O fusível deve proteger a chave seccionadora

Da Equação (9.18), tem-se:

$$I_{ser} \geq 1,15 \times I_{nom}$$

Será tomada a corrente nominal do transformador, que é de 225 kVA (veja item g)

$$I_v = \frac{225}{\sqrt{3} \times 0,38} = 341,8 \text{ A}$$

$$I_{sc} = 1,15 \times 341,8 = 393,0 \text{ A}$$

$$I_{sc} = 447 \text{ A}/380 - \text{S32} - 1.000/3 \text{ (Tabela 9.14)} \rightarrow I_{qch} = 1.000 \text{ A}$$

Da Equação (10.29), tem-se:

$$I_{qf} < I_{qch} \text{ (condição não satisfeita).}$$

- d) Proteção com o disjuntor D2

- 1.ª condição:

$$I_a \geq I_c \rightarrow I_a = 53,1 \text{ A}$$

- 2.ª condição:

$$I_a \geq I_{sc} \rightarrow S_c = 16 \text{ mm}^2 \text{ (Tabela 3.6 – referência D, justificada pela Tabela 3.4 – método de instalação 61A)}$$

$$I_m = 67 \text{ A (Tabela 3.6)}$$

Logo, tem-se: $53,1 \text{ A} \leq I_a \leq 67 \text{ A} \rightarrow I_a = 53,1 \text{ A}$ (valor adotado)

- 3.ª condição:

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

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 10.2.3.

As características elétricas nominais do disjuntor obtidas da Tabela 10.6 são:

- Tipo: 3VF12 63 A $\rightarrow I_{ad} = 63$ A
- Faixa de ajuste do relé temporizado: 45-63 A
- Corrente ajustada: $I_a = 53,1$ A
- O disjuntor deve proteger o condutor

$$I_{cs} = 9 \text{ kA} \rightarrow S_c = 16 \text{ mm}^2 \rightarrow T_{sc} = 1,5 \text{ ciclo} = 0,025 \text{ s (Figura 3.26)}$$

$$M = \frac{I_{cs}}{I_a} = \frac{9.000}{53,1} = 169,5$$

Da Figura 10.15, tem-se:

$$M = 169,5 \rightarrow T_{ad} = 0,002 \text{ s}$$

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

- 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

Para efeito desse exemplo, o disjuntor somente será dotado de uma unidade térmica. Serão admitidas as características do disjuntor do tipo 3VF sem a unidade magnética.

$$I_a \geq I_c$$

$$I_c = 53,1 + 135,4 = 188,5 \text{ A} \rightarrow I_a = 188,5 \text{ A}$$

$$I_a \leq I_{sc} \text{ (o disjuntor está diretamente ligado à barra, não havendo cabo a proteger)}$$

$$I_a = 190 \text{ A (valor adotado)}$$

$$I_{ad} = 250 \text{ A (Tabela 10.6: disjuntor 3VF42 – faixa de ajuste da unidade térmica: 160 a 200 A)}$$

- Verificação da capacidade de curto-circuito

Neste caso, o fusível F4 é o responsável pela interrupção das correntes de curto-circuito.

f) Fusível F4

De acordo com a Equação (10.23), tem-se:

$$I_{sf} \leq I_{pm} \times K + \Sigma I_{sm} + \Sigma I_{ad}$$

$$I_{sf} \leq 6,7 \times 135,4 \times 0,3 + 53,1 \leq 325,2 \text{ A} \rightarrow I_{sf} = 315 \text{ A}$$

Como a corrente do fusível F4 é superior à do fusível F3, não há necessidade de verificar as condições de partida do motor.

g) Proteção primária (relé R1)

Deve-se ressaltar que a NBR 14039 veda o uso do relé fluidodinâmico na proteção de fronteira com a concessionária.

A potência nominal do transformador vale:

$$P_n = \frac{60 \times 0,736}{0,86 \times 0,92} \times 0,87 + \frac{100 \times 0,736}{0,87 \times 0,92} \times 0,87 + 35 = 163 \text{ kVA} \rightarrow P_n = 225 \text{ kVA}$$

$$I_n = \frac{225}{\sqrt{3} \times 13,8} = 9,4 \text{ A}$$

Da Equação (10.46), tem-se:

$$I_a = (1,3 \text{ a } 1,5) \times I_n$$

$$I_a = 1,5 \times 9,4 = 14,1 \text{ A}$$

Da Tabela 10.13 relativa ao relé RM2F, tem-se:

$$I_{ar} = 17 \text{ A} \rightarrow \text{Faixa de ajuste: 10 a 20 A}$$

h) Coordenação da proteção

- Coordenação entre F1 ($I_{sf1} = 400 \text{ A}$) e F2 ($I_{sf2} = 160 \text{ A}$)

Da Equação (10.41), tem-se:

$$I_{pn} \geq 1,6 \times I_{\phi}$$

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

$$I_{pn} \geq 1,6 \times 160 \rightarrow I_{pn} \geq 256 \text{ A (condição satisfeita).}$$

O mesmo resultado pode ser obtido através da Tabela 10.12.

- Coordenação entre F1 ($I_{n1} = 400 \text{ A}$) e F4 ($I_{n4} = 315 \text{ A}$)

$$I_{pn} \times 1,6 \times I_{\phi}$$

$$I_{\phi} = 315 \text{ A}$$

$$I_{pn} \geq 1,6 \times 315 \geq 504 \text{ A (condição não satisfeita, isto é, os dois fusíveis não são seletivos pois } I_{n1} = 400 \text{ A).}$$

Pode-se, como alternativa, reduzir a corrente nominal do fusível F4 ($I_{n4} = 315 \text{ A}$) para o valor de $I_{n4} = 250 \text{ A}$ que, segundo a Tabela 10.13, permite coordenar com o fusível de $I_{n1} = 400 \text{ A}$, ou seja:

$$I_{pn} \geq 1,6 \times 250 \geq 400 \text{ A (condição satisfeita).}$$

É necessário reduzir a corrente nominal do fusível F3 para possibilitar a coordenação com o fusível F4. Pela Tabela 10.13, o fusível de corrente nominal de 160 A coordena com o fusível F4 de 250 A. É necessário, porém, verificar se o fusível de 160 A não atuaria na partida do motor de 100 cv, ou seja:

Até a Figura 10.19, tem-se:

$$I_{pn} = 907,18 \text{ A} \rightarrow I_{sf} = 160 \text{ A} \rightarrow T_{sf} = (0,5 \text{ a } 4) \text{ s} \rightarrow T_{sf} = 0,5 \text{ s}$$

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

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

Isto implica não ser possível utilizar o fusível de corrente nominal de 160 A. Será admitido agora o fusível de 200 A, ou seja:

$$I_{pn} = 907,18 \text{ A } I_{sf} = 200 \text{ A} \rightarrow T_{sf} = (2 \text{ a } 22) \text{ s} \rightarrow T_{sf} = 2 \text{ s (Figura 10.22)}$$

$$T_{sf} > T_{pm} \text{ (condição não garantidamente satisfeita, porque } T_{pm} = 3 \text{ s e o fusível pode atuar entre 2 e 22 s).}$$

Será adotado o fusível F3 de $I_{n3} = 200 \text{ A}$, porém não se garante a sua coordenação com o fusível F4 de $I_{n4} = 250 \text{ A}$, que, por sua vez, coordena com o fusível F1 de 400 A. Também não fica garantida a partida do motor de 100 cv sem a intervenção do fusível. Pode-se estudar a alternativa de elevar o valor da corrente nominal do fusível F1.

- Coordenação entre F4 e D1

A coordenação somente deve ser verificada para a possibilidade de sobrecarga considerando a condição de rotor bloqueado. Isto pode ser constatado pelo gráfico da Figura 10.61, em que a curva do fusível não corta a curva do disjuntor na faixa de até 1.000 A, aproximadamente. Observar que o disjuntor D1, neste caso, somente é dotado de unidade magnética.

- Coordenação entre D1 e F3

Deve obedecer às mesmas condições anteriores, porém a curva do disjuntor está acima da curva do fusível F3, a partir da corrente de 700 A, conforme a Figura 10.61.

- Coordenação entre os disjuntores D1 (3VF42) e D2 (3VF12)

– Faixa de sobrecarga

Deve ser obedecido o que dispõe a Seção 10.2.4.2.4. A curva da Figura 10.62 mostra as curvas dos disjuntores D1 e D2.

– Faixa de curto-circuito

Como o disjuntor D1 não dispõe desta unidade (para efeito deste Exercício), não será considerada esta hipótese.

- Coordenação entre o relé R1 e o fusível F1

$$I_{cr} = 3.000 \text{ A (corrente de curto-circuito no ponto de entrega de energia)}$$

$$I_{cs} = 28.000 \text{ A (corrente na barra de baixa tensão)}$$

A corrente de defeito secundário refletida no primário vale:

$$I_{cr} = \frac{380}{13.800} \times 28.000 = 771,0 \text{ A}$$

O tempo de atuação do relé R1 vale:

$$M = \frac{I_{cr}}{I_u} = \frac{771,0}{14,1} = 54,6$$

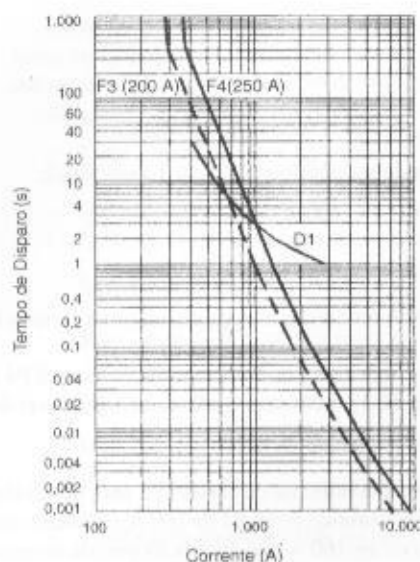


FIGURA 10.61
Curvas de coordenação

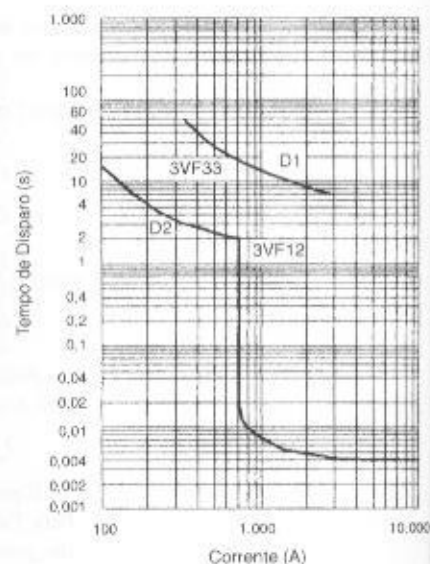


FIGURA 10.62
Curvas de coordenação

Considerando que o diafragma do relé esteja fechado (curva A), o tempo de atuação do mesmo na curva alta, segundo a Figura 10.57, vale:

$$M = 54,6 \rightarrow T_w = 0,03 \text{ s (tempo mínimo)}$$

O tempo de utilização do fusível para o mesmo defeito vale:

$$I_{cs} = 28.000 \text{ A} \rightarrow T_{af} < 0,0010 \text{ s}$$

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

10.3.2 Relés Secundários de Sobrecorrente Digitais

Com o advento da inteligência artificial nas diferentes atividades da sociedade atual, foram utilizados no meio da década dos anos de 1980 os primeiros relés concebidos com memória de dados.

O relé deixou apenas de ser um elemento que exercia a sua atividade de proteção e passou a armazenar informações e ser capaz de interligar-se 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 está *automatizado*, por exemplo, uma subestação, 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 auto-supervisão.

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 numa 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;
- ajuste duplo quando da mudança do ajuste principal para o secundário;
- comunicação serial via fibra ótica ou fio metálico que possibilita a troca de informação entre o relé e o sistema hierarquicamente superior.

Através 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 através da Figura 10.72, ou através da comunicação com a unidade de processamento vinculada.

Os valores das correntes de fase e de 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 conhecido 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 do 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.

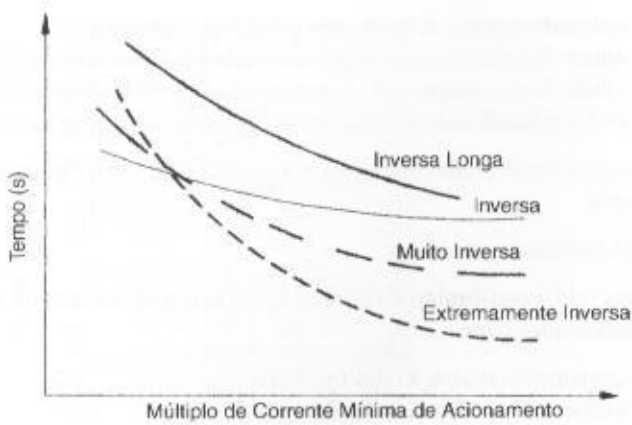
Os relés secundários atualmente utilizados são digitais incorporando em muitos modelos outras funções, além das funções 50 e 51.

Existem muitos fabricantes de relés digitais de fabricação nacional e outros de procedência estrangeira operando nas mais diversas instalações elétricas nacionais, 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 acompa-

FIGURA 10.63
Tipos de curvas de acionamento
dos relés de sobrecarga



nham os relés digitais, de acordo com a norma IEC 255-4, cujas declividades estão mostradas na Figura 10.63.

- Curvas de temporização normalmente inversa

São caracterizadas por uma temporização inferior à temporização inversa longa, sendo aplicadas em sistema de potência onde as correntes de curto-circuito variam consideravelmente com a capacidade de geração. Sua curva está definida na Figura 10.64 e pode ser determinada através da Equação (10.52).

$$T_{ni} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} \times T_{ms} \tag{10.52}$$

- 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, já que se adequam às curvas de temporização dos elos fusíveis. Sua curva está definida na Figura 10.65 e pode ser determinada através da Equação (10.53).

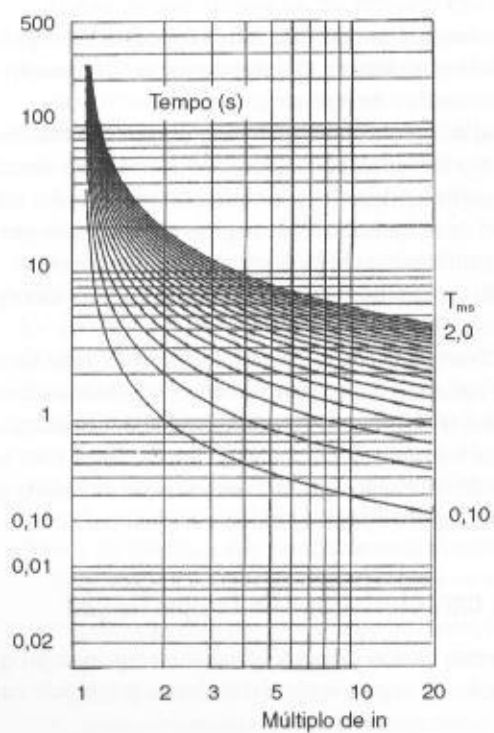
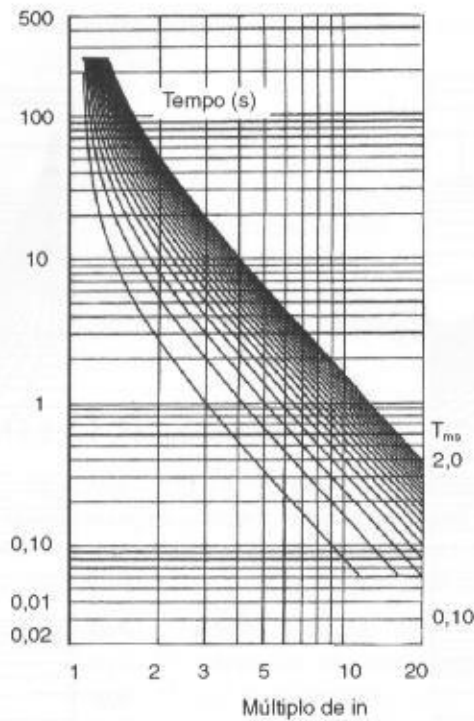


FIGURA 10.64
Curva de tempo normalmente
inversa

FIGURA 10.65
Curva de tempo extremamente inversa



$$T_{ei} = \frac{80}{\left(\frac{I_{ms}}{I_{ac}}\right)^2 - 1} \times T_{ms} \quad (10.53)$$

- 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 10.66 e pode ser determinada através da Equação (10.54).

$$T_{ei} = \frac{120}{\left(\frac{I_{ms}}{I_i}\right) - 1} \times T_{ms} \quad (10.54)$$

- Curvas de temporização muito inversa

São caracterizadas por uma temporização inferior à temporização normalmente inversa, sendo aplicadas particularmente em sistemas industriais onde as correntes de curto-circuito variam consideravelmente em função do ponto de defeito. Sua curva está definida na Figura 10.67 e pode ser determinada através da Equação (10.55).

$$T_{mi} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ms}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} \quad (10.55)$$

Além das curvas anteriormente apresentadas, muitos relés digitais executam as curvas IT e PT, respectivamente, definidas através da Equação (10.56) e (10.57) e representadas pelas Figuras 10.68 e 10.69, ou seja:

- Curvas de temporização representativa de IT

$$T_{mi} = \frac{60}{\left(\frac{I_{ms}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} \quad (10.56)$$

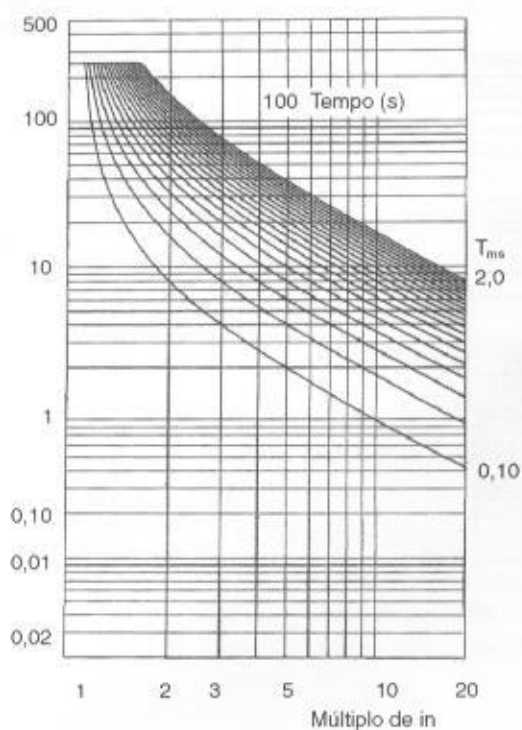


FIGURA 10.66
Curva de tempo inversa longo

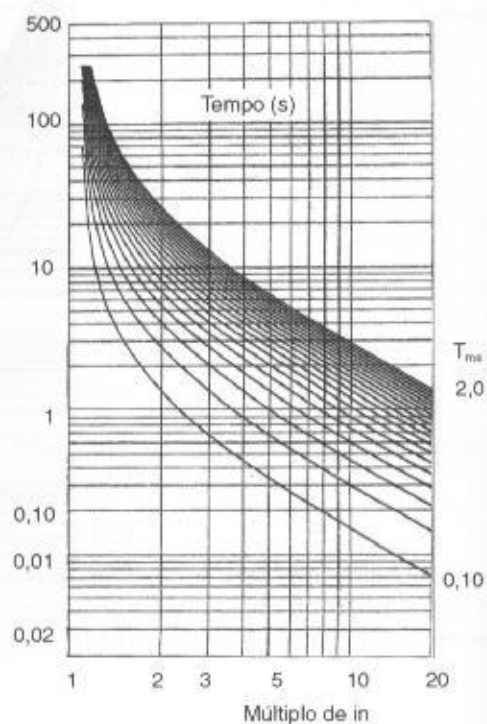


FIGURA 10.67
Curva de tempo muito inverso

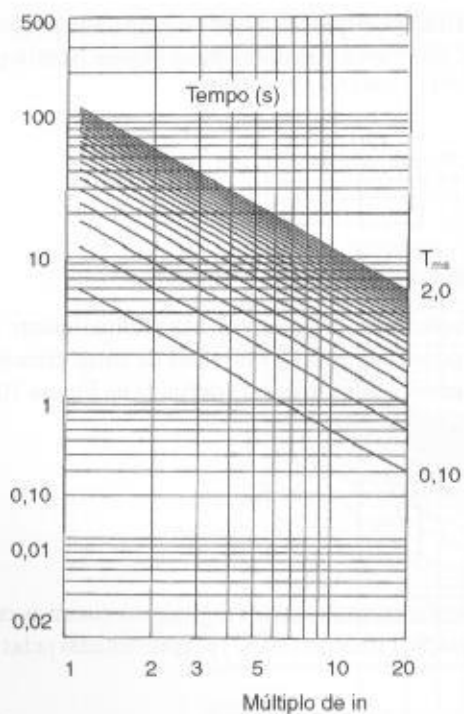


FIGURA 10.68
Curva IT

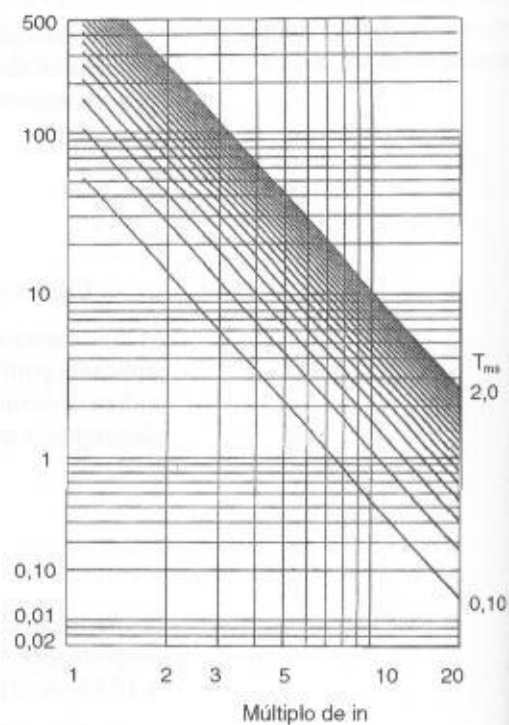


FIGURA 10.69
Curva FT

- Curvas de temporização representativa de FT

$$T_{mi} = \frac{540}{\left(\frac{I_{mi}}{I_{ac}}\right)^2 - 1} \times T_{ms} \quad (10.57)$$

T_{mi} – tempo de operação do relé;

T_{ms} – multiplicador de tempo;

I_{ac} – corrente de acionamento;

I_{mi} – sobrecorrente máxima admitida, em A.

10.3.2.2 Funções ANSI

A norma ANSI estabelece uma codificação das funções dos diferentes dispositivos empregados na proteção, comando e sinalização dos sistemas elétricos e internacionalmente utilizada por fabricantes, projetistas e montadores. Aqui reproduziremos as principais funções inerentes ao assunto deste livro e aplicação nos sistemas elétricos afins, ou seja:

- 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 mancão.
- 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 de 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 74: relé de alarme.
- 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 as suas funções de proteção. Os relés de aplicação mais comum nos sistemas elétricos requerem os valores de tensão, corrente e frequência. O valor de tensão é normalmente obtido através de transformadores de potencial (TPs); já a corrente elétrica é fornecida ao relé pelos transformadores de corrente (TCs).

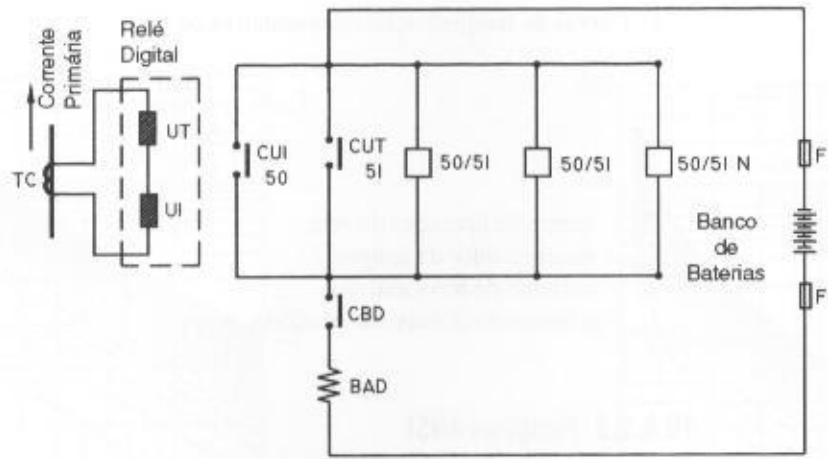
Os relés de sobrecorrente são conectados ao sistema de acordo com o esquema simplificado da Figura 10.70 e só necessitam de TCs para a sua operação. Já a Figura 10.71 mostra a ligação básica de um relé de fase.

10.3.2.4 Ajuste de corrente dos relés

Para se determinar os ajustes dos relés digitais de fase e de neutro, podem ser utilizados os seguintes procedimentos:

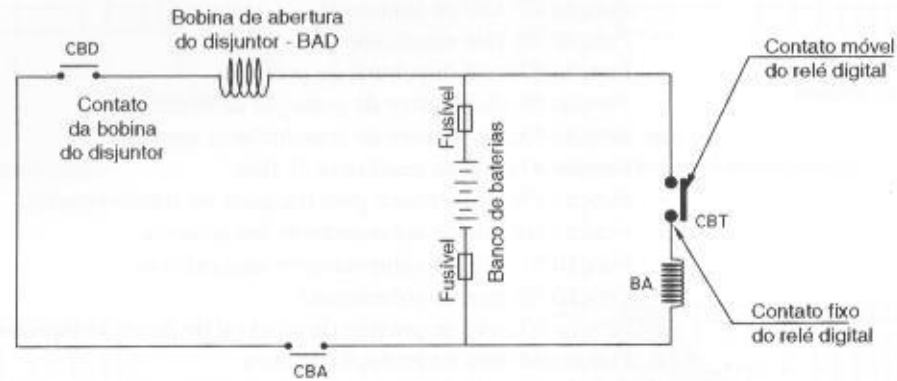
- Unidade temporizada de fase (51) ou de neutro (51N)

FIGURA 10.70
Esquema básico de ligação dos relés de fase e de neutro ao sistema



UT – unidade instantânea; UT – unidade temporizada; CUI – contato da unidade instantânea; CUT – contato da unidade temporizada; CBD – contato da bobina de abertura do disjuntor; BAD – bobina de abertura do disjuntor; F – fusível; 50/5I – unidades de sobrecorrente instantânea e temporizada de fase; 50/5I N – unidades de sobrecorrente instantânea e temporizada de neutro.

FIGURA 10.71
Esquema básico de ligação de um relé digital



CBD – contato da bobina do disjuntor; BAD – bobina de abertura do disjuntor; F – fusível; CBT – contato da unidade temporizada; CBA – contato da bobina do relé auxiliar; BA – bobina auxiliar.

Deve ser ajustada de forma que o relé não opere para a carga máxima presumida e de acordo com a Equação (10.58).

$$I_a = \frac{K \times I_{ma}}{RTC} \tag{10.58}$$

- I_a – corrente mínima de ajuste da unidade temporizada, em A;
- I_{ma} – corrente máxima presumida do sistema, em A. No caso de proteção de transformador da subestação, I_{ma} corresponde à sua corrente nominal;
- K – fator de sobrecarga do sistema. Para os relés de fase, o valor K pode variar de 1,3 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.

Para se determinar o tempo de atuação da unidade temporizada, utiliza-se a Equação (10.59).

$$M = \frac{I}{RTC \times I_a} \tag{10.59}$$

- M – múltiplo da corrente de acionamento da unidade temporizada;
- I – corrente para 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 no seletor do respectivo relé.

- Unidade instantânea de fase (50) e de neutro (50N)

O ajuste dessa unidade deve ser feita de forma que o relé de fase não atue para a corrente de magnetização do transformador que corresponde aproximadamente a oito vezes a sua corrente nominal e opere para a corrente de curto-circuito no trecho protegido pelo transformador. O valor do ajuste é dado pela Equação (10.60).

$$I_i < \frac{I_{ca}}{RTC} \quad (\text{A}) \quad (10.60)$$

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.

É necessário verificar se o relé de fase é acionado pela corrente de magnetização do transformador da subestação, ou seja:

$$I_{mg} = 8 \times I_n \quad (10.61)$$

$$I_{ac} = I_n \times RTC \quad (10.62)$$

$$I_{ac} > I_{mg} \quad (10.63)$$

I_{mg} – corrente de magnetização do transformador, em A;

I_n – 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 relés digitais. Algumas particularidades devem ser respeitadas para cada fabricante em particular.

10.3.2.5 Relé digital da Pextron

A Pextron fabrica diversos tipos de relés largamente utilizados em instalações industriais, comerciais de grande porte, distribuição, transmissão e geração. No entanto, para atender ao nível de aplicação deste livro, será estudado apenas o relé de sobrecorrente URP 1439T.

Trata-se de 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. Tem aplicação na proteção de cabines primárias de instalações industriais e comerciais, motores elétricos, geradores, redes de distribuição e transmissão etc. Pode substituir de um a quatro relés de sobrecorrente dos tipos eletromecânicos e estáticos.

Além da proteção contra sobrecorrentes, o relé URP 1439T 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 e alta tensões.

A seguir serão descritas sumariamente as principais partes componentes do relé URP 1439T. No entanto, o usuário do relé deve ter acesso ao catálogo específico do fabricante a partir do qual pode obter as informações completas do relé.

O URP 1439T 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 50N_GS: relé de sobrecorrente instantâneo de neutro ou sensor de terra (GS).
- 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 através de conversores A/D 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 via 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 10.72, existe um *display* de quatro dígitos que indica através 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 10.72, existe um *display* com quatro dígitos que indica através 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.

O relé pode ser alimentado através de 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 o 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.

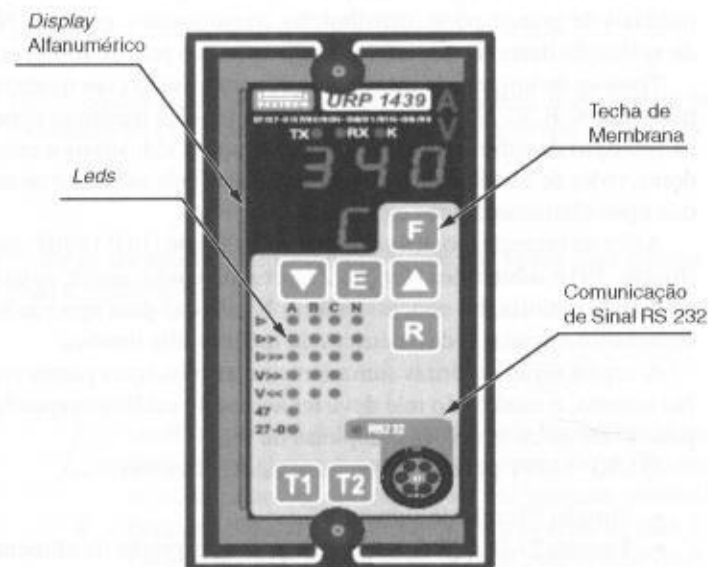


FIGURA 10.72
Vista frontal do relé digital da Pextron

O relé possui quatro entradas de corrente independentes. Cada entrada é dotada de um dispositivo com seis lâminas que fecham em curto-circuito os bornes do relé quando extraído.

O relé possui um circuito lógico com temporização interna que ativa a função de *auto-check* 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 apresentar falha, automaticamente a função de *auto-check* envia um aviso. É prudente que o contato de *auto-check* seja conectado a um relé anunciador ou a uma sinalização sonora ou visual.

O relé possui um teclado com microchaves utilizado 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 a fase de corrente ou tensão que provocam o desligamento.

O relé é dotado de um *display* superior com quatro dígitos que é 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 e é utilizado para indicar a grandeza elétrica que está sendo apresentada no *display* superior. O relé mede a corrente e a 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: $\leq 16 \text{ }\Omega$;
- 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 A;
- 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 de fase (50): 1,0 a 100 A, em passos de 0,1 A;
- faixa de ajuste de corrente da unidade instantânea 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 – FT;
- tipos de curva de atuação da unidade temporizada de neutro: NI – MI – EI – LONG – IT – FT;
- 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 ajuste de corrente de tempo definido de neutro GS (51N-GS): 0,15 a 100 A, em passos de 0,1 A;
- faixa de tempo definido de neutro GS (51N-GS): 0,05 a 240 s.

Deve-se observar que a atuação do relé na curva normalmente inversa, para correntes superiores a 100 A da unidade temporizada de fase e 50 A para a unidade temporizada de neutro, torna a curva de tempo definida.

Se o valor da corrente do circuito ultrapassar $1,02 \times I_{aj}$, o relé inicia o processo de atuação da sua unidade temporizada de fase. Se a corrente permanece o 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 $V >>$ (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 ($V >>$). Os parâmetros de ajuste são:

- faixa de ajuste da tensão de tempo definido de sobretensão $V >>$: 10,0 a 600 Vac;
- faixa de ajuste de tempo definido de sobretensão $V >>$: 0,05 a 240 s.

Quando a tensão de entrada do relé tornar-se superior ao valor ajustado na unidade de subtensão o relé inicia o processo de atuação. Se a tensão permanece o 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 97% da tensão ajustada.

c) Proteção de subtensão $V <<$ (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 ($V <<$). 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 $V <<$: 2,0 a 600 Vac;
- faixa de ajuste de tempo definido de subtensão $V <<$: 0,05 a 240 s;
- faixa da tensão mínima auxiliar (27-0): 1,0 a 99%.

Quando a tensão de entrada do relé tornar-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 97% da tensão ajustada. O tempo de atuação da proteção de fase e de neutro é de 0,90 s.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.15)

Calcular o ajuste de corrente das unidades temporizadas e instantâneas dos relés de fase e de neutro instalados em conformidade com a Figura 10.73. Determinar também os ajustes das unidades de sobretensão e subtensão do sistema. Utilizar o relé UPR 1439T da Pextron. Admitir a curva de temporização muito inversa. Utilizar um transformador de potencial com RTP de 13.800-115 V: 120. A sobretensão não deverá ser superior a 5% da tensão nominal e a subtensão não deverá ser inferior a 10% da tensão nominal. Para o relé de fase, utilizar o tempo de 0,90 s e para o relé de neutro, utilizar o tempo de 0,5 s.

- Corrente nominal do transformador de força

$$I_m = \frac{10.000}{\sqrt{3} \times 13,8} = 418,3 \text{ A}$$

- RTC do transformador de corrente para um fator de sobrecorrente $F = 20$

$$I_w \geq \frac{I_g}{F} \geq \frac{6.000}{20} = 300$$

$$RTC = 500-5:100 \text{ (maior valor entre } I_m \text{ e } I_w)$$

- Seleção do tape da unidade temporizada de fase (51)

De acordo com a Equação (10.58), o valor do tape é:

$$I_o = \frac{K \times I_m}{RTC} = \frac{K \times I_w}{RTC} = \frac{1,5 \times 418,3}{100} = 6,27 \text{ A}$$

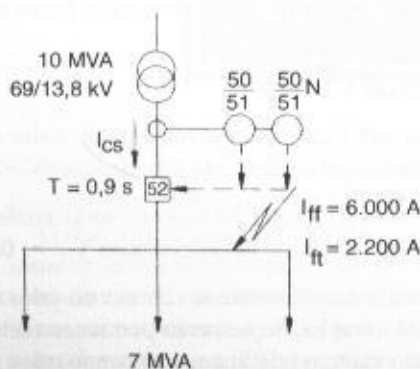


FIGURA 10.73
Diagrama unifilar

- Corrente nominal do relé

$$I_n = 5 \text{ A (valor do fabricante)}$$

O múltiplo do ajuste do relé vale:

$$M_{rel} = \frac{I_a}{I_n} = \frac{6,27}{5} = 1,25 \rightarrow I_g = 1,3 \times I_n \rightarrow I_g = 1,3 \times 5 \rightarrow I_g = 6,5 \text{ A}$$

- Faixa de ajuste da corrente: 1 a 16 A
- Corrente ajustada na unidade temporizada de fase: $I_g = 7 \text{ A}$ (valor assumido)
- Seleção da curva de unidade temporizada de fase (51)

De acordo com a Equação (10.59), tem-se:

$$M = \frac{I}{RTC \times I_a} = \frac{I_g}{RTC \times I_g} = \frac{6.000}{100 \times 7} = 8,5$$

Pelo gráfico da Figura 10.67 $\rightarrow T = 0,9 \text{ s} \rightarrow M = 8,5 \rightarrow$ curva de acionamento escolhida: 0,5
Aplicando a Equação (10.55), tem-se:

$$T_{rel} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ms}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} = \frac{13,5}{\left(\frac{6.000}{700}\right) - 1} \times 0,5 = 0,90 \text{ s}$$

$$I_{ac} = RTC \times I_g = 100 \times 7 = 700 \text{ A}$$

- Determinação da corrente de ajuste da unidade temporizada de neutro (51N)

$$I_a = \frac{K \times I_{ms}}{RTC} = \frac{0,3 \times 418,3}{100} = 1,25$$

- Faixa de ajuste do relé: (0,15 a 6,5) A
- Corrente ajustada: $I_{ac} = 1,25 \text{ A}$ (valor assumido)
- Seleção da curva da unidade temporizada de neutro (51N)

$$M = \frac{I}{RTC \times I_a} = \frac{I_g}{RTC \times I_{an}} = \frac{2.200}{100 \times 1,25} = 17,6$$

Pelo gráfico da Figura 10.67 $\rightarrow T = 0,5 \text{ s} \rightarrow M = 17,6 \rightarrow$ curva de acionamento escolhida: 0,6
Aplicando a Equação (10.55), tem-se:

$$T_{rel} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ms}}{I_{ac}}\right) - 1} \times T_{ms} = \frac{13,5}{\left(\frac{2.200}{125}\right) - 1} \times 0,6 = 0,49 = 0,50 \text{ s}$$

$$I_{ac} = RTC \times I_{af} = 100 \times 1,25 = 125 \text{ A}$$

Há uma pequena diferença entre o tempo admitido e o tempo calculado. Isto se deve aos intervalos entre curvas.

- Determinação da corrente de ajuste da unidade instantânea de fase (50)

De acordo com a Equação 10.60, tem-se:

$$I_i < \frac{I_{ca}}{RTC} < \frac{I_g}{RTC} < \frac{6.000}{100} < 60 \text{ A}$$

- Faixa de ajuste do relé: 1 a 100 A
- Corrente ajustada: 55 (valor selecionado em cerca de 10% inferior a I_i para permitir uma atuação segura do relé)
- Verificação do acionamento do relé 50 através da corrente de magnetização do transformador

De acordo com a Equação (10.61), tem-se:

$$I_{mg} = 8 \times I_g = 8 \times 418,3 = 3.346,4 \text{ A}$$

$$I_{ac} = I_a \times RTC = 55 \times 100 = 5.500 \text{ A}$$

Logo: $I_{ac} > I_{mg}$ (condição atendida).

- Determinação da corrente de ajuste da unidade instantânea de neutro (50N)

$$I_l < \frac{I_n}{RTC} < \frac{I_f}{RTC} < \frac{2.200}{100} < 22 \text{ A}$$

- Faixa de ajuste do relé: 0,15 a 50 A
- Corrente ajustada: 20 A

$$I_{ac} = I_n \times RTC = 20 \times 100 = 2.000 \text{ A}$$
$$I_{ac} < I_f \text{ (condição atendida).}$$

Da forma como foram ajustadas as funções 50/51 e 50/51N para defeitos na barra, como mostrado na Figura 10.73, a atuação do relé sempre será realizada pelas unidades instantâneas de fase e de neutro, cabendo às unidades temporizadas de fase e de neutro a função de proteção de retaguarda (*back-up*).

- Determinação do valor de ajuste do valor da subtensão (27)

$$\text{RTP: } 13.800\text{-}115: 120 \text{ V}$$

$$V_{aj} = 90\% \times V_n = \frac{90}{100} \times 13.800 = 12.420 \text{ V}$$

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

$$V_{op} = \frac{12.420}{120} = 103,5 \text{ V}$$

- Tempo de ajuste da tensão de atuação: 104 V (valor assumido)
- Tempo de atuação ajustado: 3 s (valor assumido)
- Determinação do valor de ajuste da sobretenção

$$V_m = 105\% \times V_n = \frac{105}{100} \times 13.800 = 14.490 \text{ V}$$

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

$$V_{op} = \frac{14.490}{120} = 120,7 \text{ V}$$

- Tempo de ajuste da tensão de atuação: 120 V (valor assumido)
- Tempo de atuação ajustado: 3 s (valor assumido)

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (10.16)

Conhecido o diagrama unifilar da Figura 10.74, onde 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 1439T – 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 sobretenção não deverá ser superior a 5% da tensão nominal e a subtensão não deverá ser inferior à queda de tensão na partida do motor.

- a) Corrente nominal do transformador de força

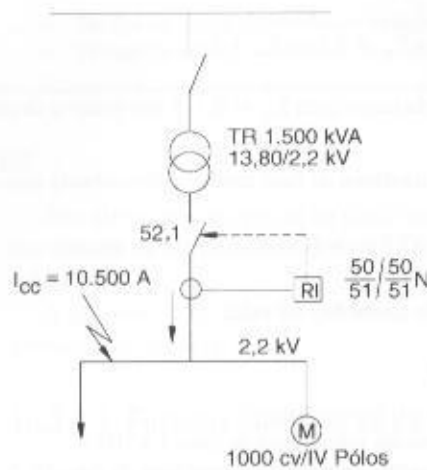
$$I_{tr} = I_{na} = \frac{1.500}{\sqrt{3} \times 2,2} = 393,6 \text{ A}$$

- b) RTC do transformador de corrente

$$I_n \geq \frac{10.500}{20} \geq 525 \text{ A}$$
$$\text{RTC: } 600\text{-}5:120$$

- c) Determinação da corrente de ajuste da unidade de sobrecorrente de fase ($I >>>$)

FIGURA 10.74
Diagrama unifilar



De acordo com a Equação (10.58), tem-se:

$$I_a = I_s = \frac{K \times I_{ms}}{RTC} = \frac{1,5 \times 393,6}{120} = 4,92 \text{ A}$$

$K = 1,5$ (valor da sobrecarga admitida para o transformador)

A corrente nominal do relé vale:

$$I_n = 5 \text{ A (valor do fabricante)}$$

O múltiplo da corrente de ajuste do relé vale:

$$M_{rel} = \frac{I_a}{I_n} = \frac{4,92}{5} = 0,98 \rightarrow I_{aj} = 1,0 \times I_n \rightarrow I_{aj} = 1,0 \times 5 \rightarrow I_{aj} = 5 \text{ A}$$

- Faixa de ajuste da corrente: 1 a 16 A
 - Corrente ajustada na unidade temporizada de fase: $I_{aj} = 5 \text{ A}$ (corrente de acionamento do lado do relé).
- A corrente de acionamento no primário vale:

$$I_{ocp} = RTC \times 5 = 120 \times 5 = 600 \text{ A}$$

- Verificação da atuação do relé durante a partida do motor

$$I_{am} = \frac{P_{nm} \times 0,736}{\sqrt{3} \times V_{nm} \times \eta \times F_p} = \frac{1.000 \times 0,736}{\sqrt{3} \times 2,20 \times 0,98 \times 0,96} = 205,3 \text{ A}$$

$$\eta = 0,98$$

$$F_p = 0,96$$

$$\frac{I_p}{I_n} = 7,6$$

$$T_{poc} = 5 \text{ s}$$

$$I_p = I_{ms} = \frac{7,6 \times I_{am}}{RTC} = \frac{7,6 \times 205,3}{120} = 13,0 \text{ A}$$

Deve-se ajustar o tempo de atuação do relé num valor um pouco superior ao tempo de partida do mesmo, a fim de evitar atuação intempestiva do relé, ou seja: $T_{rel} = T_{poc} = 5 \text{ s}$. Através da Equação (10.54), tem-se:

$$T_{rel} = \frac{120}{\left(\frac{I_{ms}}{I_{aj}}\right) - 1} \times T_{poc} \rightarrow T_{ms} = \frac{T_{rel} \times \left[\left(\frac{I_{ms}}{I_{aj}}\right) - 1\right]}{120}$$

$$T_{ms} = \frac{5 \times \left[\left(\frac{13,0}{5,0}\right) - 1\right]}{120} = 0,07 \rightarrow T_{ms} = 0,1 \text{ (curva do relé)}$$

Utilizando a curva da Figura 10.66 (curva inversa longa), pode-se comprovar:

$$\frac{I_{ma}}{I_{av}} = \frac{13,0}{5} = 2,6 \rightarrow T_{mr} = 0,1 \rightarrow T_{mv} = 5 \text{ s}$$

Deve-se ajustar o valor da curva para $T_{mv} = 0,1$, a fim evitar o desarme intempestivo do relé durante a partida do motor.

d) Ajuste da unidade instantânea de fase, também denominada auto-ajuste ($I >>>$)

$$I_r < \frac{I_{cr}}{RTC} < \frac{10.500}{120} < 87,5 \text{ A} \rightarrow I_n = 80 \text{ A (valor do ajuste)}$$

O múltiplo da corrente de ajuste do relé vale:

$$M_{rel} = \frac{80}{5} = 16 \times I_n$$

- Faixa de ajuste da unidade instantânea de fase: 1 a 100 A
- Valor de ajuste de corrente da unidade instantânea de fase: 80 A
- Verificação de não atuação do relé pela corrente de magnetização do transformador

$$I_{mg} = 8 \times I_n = 8 \times \frac{1.500}{\sqrt{3} \times 2,20} = 3.149,2 \text{ A}$$

A corrente de acionamento do lado primário vale:

$$I_{ac} = M_{rel} \times RTC = 16 \times I_n \times RTC = 16 \times 5 \times 120 = 9.600 \text{ A}$$

Logo: $I_{ac} > I_{mg}$ (condição satisfeita).

- Tempo de atuação do relé para a corrente de curto-circuito

$$T_{mv} = \frac{120}{\left(\frac{10.500}{120 \times 5}\right) - 1} \times 0,1 = 0,72 \text{ s}$$

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)

RTP: 13.800-115: 120 V

A queda de tensão na partida do motor vale:

$$\Delta V = 100 - \frac{12.320}{13.800} \times 100 = 10,7\%$$

$$V_{aj} = 12.320 \text{ V (tensão no momento da partida do motor)}$$

Os valores que devem ser ajustados no relé são:

- Faixa de ajuste da tensão de atuação: 2 a 600 Vca
- Faixa de ajuste do tempo de atuação: 0,05 a 240 s

$$V_{av} = \frac{12.320}{120} = 102,6 \text{ V}$$

- Tempo de ajuste da tensão de atuação: 101 V (valor assumido)
- 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

$$V_{qt} = 105\% \times V_n = \frac{105}{100} \times 13.800 = 14.490 \text{ V}$$

Os valores ajustados no relé são:

- Faixa de ajuste da tensão de atuação: 10 a 600 Vca
- Faixa de ajuste do tempo de atuação: 0,05 a 240 s

$$V_{qr} = \frac{14.490}{120} = 120,7 \text{ V}$$

- Tempo de ajuste da tensão de atuação: 120 V (valor assumido)
- Tempo de atuação ajustado: 3 s (valor assumido)

10.3.3 Fusíveis Primários

São elementos de proteção para sistemas primários aplicados na interrupção de correntes de curto-circuito. É desaconselhável o 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 10.75.

TABELA 10.15

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

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 10.76 relaciona as curvas características dos fusíveis do tipo K. Já a Tabela 10.15 relaciona as correntes nominais dos elos fusíveis de distribuição para a proteção dos transformadores de acordo com a potência indicada.

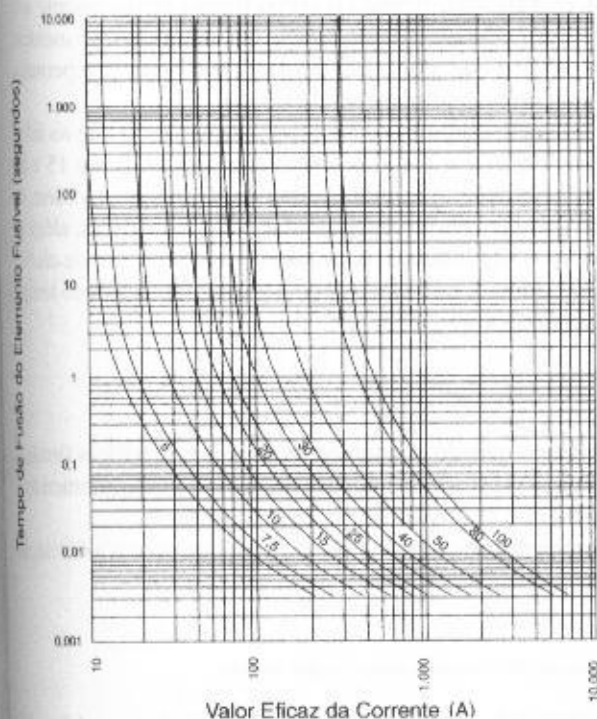


FIGURA 10.75

Curvas de atuação dos fusíveis limitadores de corrente

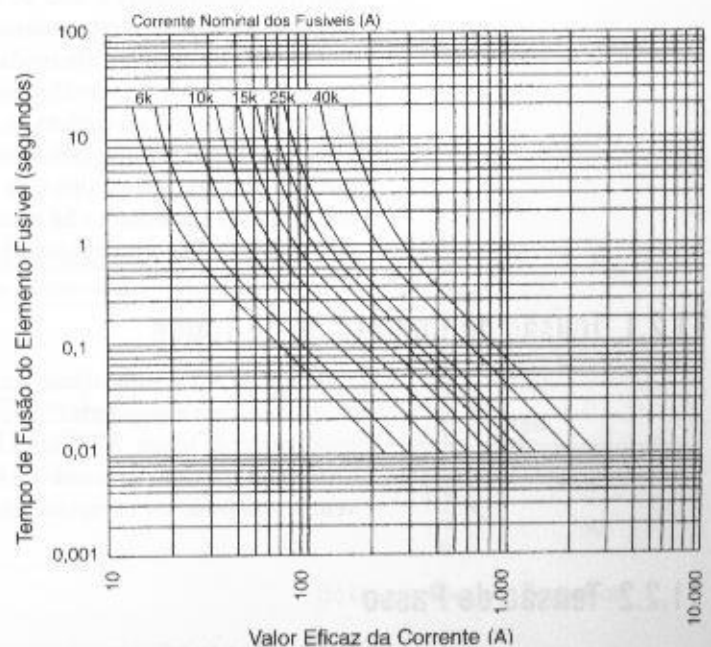


FIGURA 10.76

Curvas de atuação de fusíveis do tipo K.