

Seminários Técnicos 2003

Engenheiros e Projetistas



Módulo 1 S
Proteção das Instalações elétricas
de BT contra os efeitos das
sobrecargas através dos
Disjuntores e Fusíveis

SIEMENS

Índice

Página

1. Introdução

2. Cálculo das Correntes de Curto-Circuito na Baixa Tensão

2.1	Reatores Limitadores da Corrente de Curto-Circuito e Fusíveis de Back-up	05
2.2	Efeitos das Correntes de Curto-Circuito	06
2.3	Correntes Subtransitória, Transitória e Estacionária	08
2.4	Gráfico de uma Corrente de Curto-Circuito na Baixa Tensão	10

3. Método aproximado para Cálculo das Correntes de Curto-Circuito nos Circuitos em Baixa Tensão - Derivados de Redes de Distribuição

3.1	A Alimentação por rede de Média Tensão	11
3.2	Os Geradores	11
3.3	Os Motores de Indução	12
3.4	Transformadores de dois Enrolamentos	12
3.5	Transformadores com três Enrolamentos	13
3.6	Condutores.	14
3.7	Dispositivos de Manobra e Proteção	14
3.8	Desenvolvimento do Cálculo	14
3.9	Metodologia de Cálculo	15
3.10	Tabela das Resistências dos Condutores	16
3.11	Tabela das Reatâncias dos Cabos e Condutores	17
3.12	Barramentos	17
3.13	Ampacidade dos Barramentos	18

4. Método Prático do Cálculo das Correntes de Curto-Circuito

4.1	Curto Circuito Trifásico Alimentado por uma única fonte em ponto distante do Gerador	20
4.2	Curto Circuito Monofásico para terra em Ponto Remoto de Alimentador com uma só fonte	22
4.3	Contribuição de Motores para a Corrente de Curto-Circuito	23
4.4	Nomogramas para Determinação os Valores das Resistências e Indutâncias e das Correntes de Curto-Circuito para Cálculos de Curtos-Circuitos	25
4.5	Exemplo para Redes em 220 V	26
4.6	Exemplo para Redes em 380V	28
4.7	Exemplo para Redes em 480V	30
4.8	Formulário para Cálculo das Correntes de Curto-Circuito nas Redes de BT pela DIN VDE 0102	32

5. Estudo de Caso: Aplicação Industrial – Método Simplificado

5.1	Determinação a Impedância do Gerador Equivalente à Rede de Média Tensão	35
5.2	Reatância do Transformador	36
5.3	Impedância dos Cabos	36
5.4	Reatâncias de Condutores	37
5.5	Reatâncias dos Motores	37
5.6	Diagrama de Impedâncias, Levando em Conta as Reatâncias das Máquinas e do Transformador e as Reatâncias e Resistências dos Cabos	38
5.7	Cálculo das Correntes de Curto-Circuito	38
5.8	Corrente Total a ser Interrompida pelo DPCC	38

6. Proteção com Disjuntores

6.1	Proteção Contra Curtos Circuitos com Disjuntores	42
6.2	Geradores de Potência Reduzida	42
6.3	Capacitores	42
6.4	Transformadores	43
6.5	Transformadores BT/BT	43
6.6	Proteção de Linhas com minidisjuntores	44
6.7	Capacidade de Interrupção	44

7. Proteção com Fusíveis

7.1	Proteção de Condutores (Cabos)	46
7.2	Proteção de Transformadores	47
7.3	Proteção de Capacitores	48
7.4	Proteção de Semi-Condutores	48

8. Coordenação entre DPCC

8.1	Exemplo de Circuito Radial.(Coordenação entre Fusíveis)	50
8.2	Coordenação entre Disjuntores	52

9. Comparação entre Propriedades Protetoras de Disjuntores e Fusíveis

9.1	Anexos	54
9.2	Literatura Básica	54
9.3	Acrônimos	54
9.4	Definições Aplicáveis aos Dispositivos de Proteção: Disjuntores e Fusíveis	55
9.5	Disjuntores	55
9.6	Fusíveis	60

1. Introdução

Para especificar corretamente os dispositivos de manobra e proteção das instalações elétricas, bem como os condutores e equipamentos, é necessário conhecer a sobrecorrente de curto-circuito que poderá ocorrer nessa instalação.

Alguns componentes das instalações elétricas são destinados a interromper a corrente de curto circuito, enquanto outros devem suportar os seus efeitos sem serem danificados.

As prescrições definidas se destinam às instalações em baixa tensão que são alimentadas pelas redes públicas ou privadas. Redes públicas são aquelas que fornecem energia aos consumidores em geral, não importando se o fornecedor é empresa pública ou privada. Rede privada é a usual para atender instalações industriais ou comerciais de grande parte.

Cálculos suficientemente precisos para especificação dos equipamentos são feitos admitindo que essa rede de média tensão tem impedância nula (isto é, qualquer que seja a corrente de curto circuito na baixa tensão, a tensão da rede se mantém constante). Para esses cálculos será suficiente conhecer os dados do transformador: potência aparente, tensões nominais e impedância percentual de curto-circuito. Para os projetos de instalações em baixa tensão, o cálculo pode ser empregado porque o pequeno desvio estará a favor da segurança.

Se o projeto necessitar a especificação e dimensionamento da entrada em média tensão com os componentes de proteção, barramentos e acessórios será necessário o conhecimento dos parâmetros da rede de média tensão: potência de curto-circuito no ponto de entrega da instalação, tensão nominal e relação R/X.

Como exemplo é desenvolvido um pequeno projeto de instalação industrial com o roteiro de cálculo e a maneira de especificar os componentes.

São apresentadas as principais características dos Dispositivos de Proteção contra curto-circuito: disjuntores ou fusíveis (DPCC)*; os disjuntores e os fusíveis são dados as principais definições, as aplicações mais encontradas no dia-a-dia do projetista e as regras básicas da coordenação entre os DPCC.

* Os acrônimos são dados por extenso na primeira vez que aparecem no texto. Em anexo são apresentados todos eles em ordem alfabética.

2. Cálculo das Correntes de Curto-Circuito na Baixa Tensão

É essencial o cálculo das correntes de curto circuito, porque o responsável técnico deve demonstrar que levou em conta essas correntes para cumprir o especificado pela NBR-5410:1997, item 1.3.3.2.

“1.3.3.2 Proteção contra correntes de curto-circuito

Todo circuito deve ser protegido por dispositivos que interrompam a corrente nesse circuito quando pelo menos um de seus condutores for percorrido por uma corrente de curto-circuito, devendo a interrupção ocorrer num tempo suficientemente curto para evitar a deterioração dos condutores.

5.3.1 Regra geral

Os condutores vivos devem ser protegidos por um ou mais dispositivos de seccionamento automático contra sobrecargas (ver 5.3.3) e contra curtos-circuitos (ver 5.3.4), exceto quando as sobrecorrentes forem limitadas de acordo com 5.3.6. Além disso, a proteção contra sobrecargas e a proteção contra curtos-circuitos devem ser coordenadas de acordo com 5.3.5.

NOTAS:

1- Os condutores vivos protegidos contra sobrecargas, de acordo com 5.3.3, são considerados igualmente protegidos contra qualquer falta capaz de produzir sobrecorrentes na faixa das correntes de sobrecarga.

2- Para as condições de aplicação, ver 5.7.4.

3- A proteção dos condutores realizada de acordo com esta seção não garante necessariamente a proteção dos equipamentos ligados a esses condutores.”

Dizemos que há um curto-circuito quando há uma falha na isolação (sólida, líquida, gasosa) e o circuito percorrido pela corrente que sai da fonte vai até o ponto de falha e retorna à fonte é mais curto que o circuito original (fonte – carga - fonte).

O curto-circuito pode ser “sólido” [bolted]* quando o contato entre os condutores é firme e permanente e a corrente assim obtida é a maior corrente possível para o circuito com defeito naquele ponto. Uma situação próxima a essas ocorre nos circuitos em baixa tensão quando alguém esquece uma ferramenta sobre os barramentos de fases diferentes e o circuito é religado após a manutenção.

[]* indicamos entre colchetes a terminologia em inglês

Este tipo de curto ocorre geralmente nas médias e altas tensões quando os condutores foram interligados (para proteção dos operadores) e é energizado inadvertidamente. Essa interligação pode ser feita por um conjunto de cabos, conectores e uma haste de aterramento ou por chaves de terra (ou também denominadas de aterramento) que ligam à terra os terminais de entrada de uma chave seccionadora. O primeiro exemplo ocorre nas linhas de distribuição e o segundo nas seccionadoras de entrada das subestações; em ambos os casos a intenção é proteger os trabalhadores das linhas ou das subestações contra ligações indesejadas das fontes que alimentam os circuitos.

Além do curto-circuito sólido pode haver o curto-circuito por arco elétrico: havendo uma falha da isolação a tensão entre condutores das fases ou entre esses e a terra estabelece um arco que funciona como um condutor gasoso, que diminui o valor da corrente de curto-circuito.

Pode haver também a perfuração da isolação por uma sobretensão (de origem atmosférica ou por manobras no próprio circuito) o que pode criar caminho para estabelecer a corrente de curto-circuito.

A intensidade dessa corrente pode ser muito alta como nos curtos-circuitos sólidos ou muito baixa como nos curtos circuitos para terra pela queda de um condutor na terra em local de resistividade alta.

2.1 Reatores limitadores da corrente de curto-circuito e fusíveis de back-up

Quando a corrente de curto-circuito é muito alta e há vantagem em reduzi-la para diminuir os custos dos disjuntores de alta capacidade de interrupção é possível intercalar, em serie com a fonte, uma reatância que limite a corrente a um valor inferior ao da corrente nominal de interrupção do disjuntor disponível ou economicamente viável. Estes reatores são geralmente de núcleo de ar e são reforçados com resina epoxy ou poliéster, para suportar os efeitos mecânicos da corrente de curto-circuito. A indutância será incluída no circuito junto da fonte e a resistência será desprezada.

Outra solução mais econômica é o emprego de fusíveis limitadores de alta capacidade (fusíveis de back-up) interrompendo a corrente em um valor adequado para a capacidade do disjuntor. O inconveniente do ponto de vista da continuidade da operação é que ambos os protetores atuarão: o fusível atuará antes, mas a I^2t que ele deixa passar fará o disjuntor desligar também.

É possível ainda usar um disjuntor de menor corrente de interrupção a jusante, dimensionado para operar simultaneamente como o disjuntor principal de maior capacidade. Aqui também será perdida a continuidade de operação já que as outras cargas também serão desligadas.

A partir das correntes de curto circuito serão escolhidos os DPCC (fusíveis ou disjuntores) e será feita a seletividade e a coordenação entre eles.

A seletividade ou discriminação é a propriedade através da qual podemos escolher qual entre dois DPCC's deve atuar primeiro e a coordenação é a escolha de todos os DPCC's de um circuito de modo que, em caso de uma falta, seja desligada a menor parte possível do circuito.

2.2 Efeitos das correntes de curto-circuito

Efeitos mecânicos: uma corrente passando entre dois condutores em paralelo provoca o aparecimento de uma força proporcional ao quadrado da corrente e inversamente proporcional à distância, entre os condutores:

$$F = kxi^2 / d$$

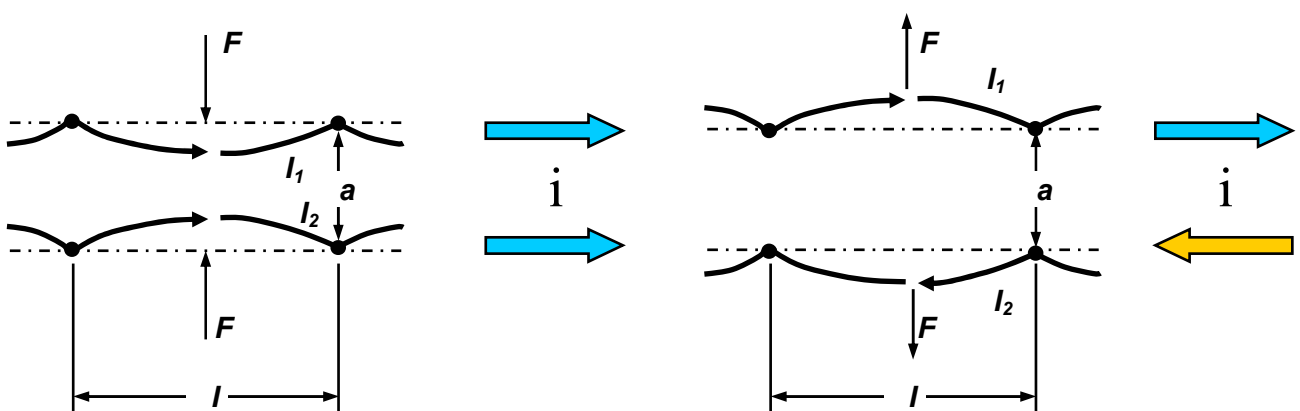
No caso genérico de correntes desiguais (i_1 e i_2) dados em kA, considerando a distância (ℓ em cm) entre os suportes dos barramentos e a distância (a , em cm) entre os centros das duas barras, a força F em N será calculada por:

$$F = 0,2i \cdot i_2 \frac{\ell}{a} \text{ N}$$

Se for a mesma corrente (i) que passa pelos dois condutores, o cálculo de F será feito por:

$$F = 0,2i^2 \frac{\ell}{a}$$

A força F será de atração ou repulsão conforme a corrente passa pelas barras no mesmo sentido, ou em sentido contrário e tende a deformar as barras como indicado a seguir: [1]



SIEMENS

Se forem várias barras em paralelo por fase

$$F = 0,2 \left(\frac{i_{p2}}{n} \right)^2 \cdot \frac{\ell}{a_s}$$

Onde:

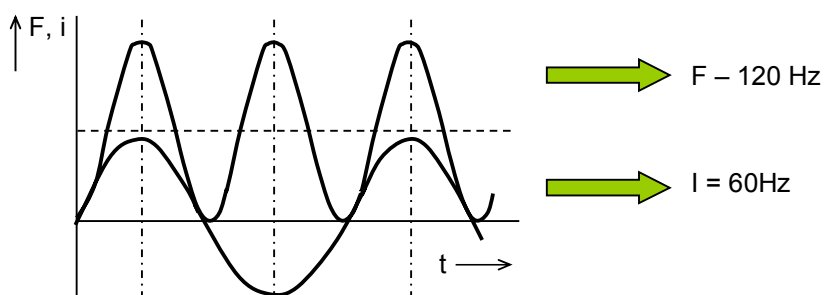
F força em N

i_{p2} corrente de cc (2 polos) em kA

n número de barras em paralelo/ fase

a_s distância efetiva entre as fases do barramento

Nota: A força entre os condutores tem o dobro da frequência da corrente (120Hz) no caso dos sistemas em 60Hz e será máxima no primeiro ou segundo meio-ciclo do curto-circuito.



Efeitos térmicos: aumentando o valor eficaz da corrente, aumenta o aquecimento dos condutores que podem destruir a isolamento. O efeito térmico depende do quadrado da corrente e da duração (I^2t).

2.3 Correntes subtransitória, transitória e estacionária

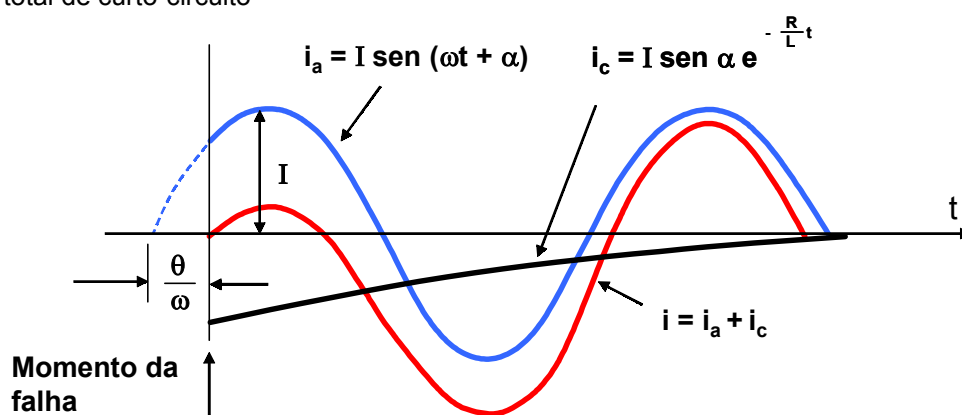
No caso típico de um curto-circuito próximo a um gerador temos uma corrente que vai decrescer a partir de um instante inicial (corrente subtransitória) passa por um valor intermediário (corrente transitória) e chega ao valor final (corrente estacionária), como exemplificado a seguir:

Onde:

i_a componente alternada

i_c componente contínua

i corrente total de curto-circuito



Dependendo do instante da onda de tensão em que ocorre o curto-circuito pode haver uma componente unidirecional amortecida exponencialmente e denominada componente contínua. O valor máximo teórico inicial da componente contínua é o valor de crista do valor estacionário.

Quando há a componente contínua a corrente de curto-circuito é assimétrica em relação ao eixo dos tempos. Para haver máxima assimetria (ou seja, para haver o valor máximo da componente contínua) é preciso que o curto circuito se dê no instante em que a tensão do circuito passe pelo zero. Quando o curto-circuito ocorre no instante em que a tensão passa pelo valor de crista não haverá a componente contínua e a corrente de curto-circuito será simétrica.

Em qualquer desses casos o valor da corrente será decrescente pela variação da reatância da máquina que passará de um valor inicial muito baixo a um valor final constante. Para efeito de cálculo são considerados três valores para as máquinas rotativas:

$x''d$ - reatância sub-transitória que determina o valor inicial no primeiro ciclo da corrente de curto circuito, a denominada corrente subtransitória.

$x'd$ - reatância transitória que determina o valor característico seguinte (no período de 0,5s a 0,2s), a corrente transitória.

x_d - reatância síncrona constante que determina o valor final da corrente de curto-circuito.

SIEMENS

Os valores das reatâncias das máquinas rotativas são dados nominais e são fornecidos pelo fabricante em valor percentual adotando como base os valores nominais de potência e tensão da própria máquina. No caso dos motores de indução a queda da corrente quando ele passa a funcionar como gerador é muito rápida e só se considera o valor $X''d$.

O aquecimento dos condutores (cabos ou partes condutoras dos equipamentos) se calcula pelo valor eficaz decrescente da corrente de curto-circuito.

Todos componentes de um circuito ficam sujeitos aos efeitos dos curtos-circuitos e são ensaiados para verificar sua suportabilidade.

Essa verificação pode ser simultânea (de preferência, pelas normas IEC e ABNT de cláusulas comuns) ou em ensaios separados. É simultânea quando o laboratório consegue montar um circuito e provocar o curto-circuito de modo que se consegue o valor de crista inicial especificado (que produz o efeito mecânico) e o valor eficaz médio (que produz o efeito térmico) durante o tempo especificado (geralmente 1s).

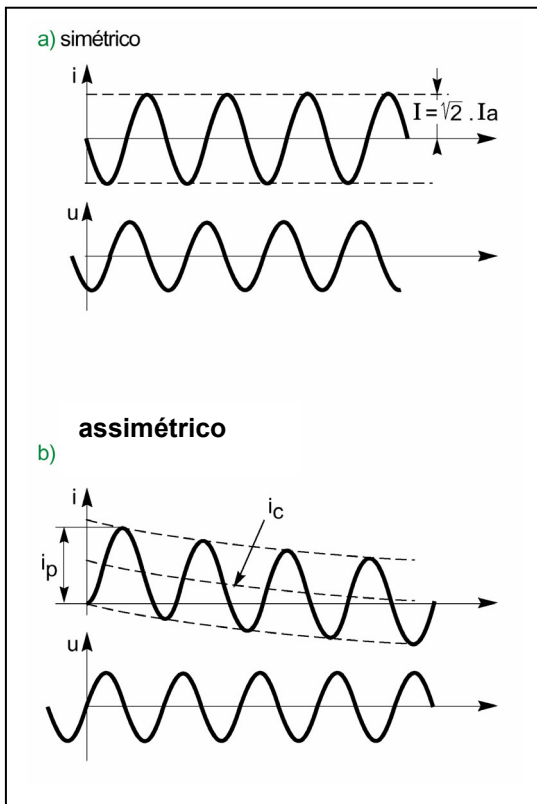
Consideram algumas normas (como a ANSI C37. 20c.1974) ainda a possibilidade de vibração dos barramentos que podem entrar em ressonância e por isso a corrente no ensaio de barramentos é mantida por um intervalo de tempo julgado suficiente (10 ciclos) para verificar essa condição.

Para o efeito térmico pode-se jogar com os valores de corrente e tempo considerando válida a equação $I^2t = \text{constante}$

no intervalo entre 0,5s e 5s.

Nas baixas tensões é possível contar com DPCCs limitadores: fusíveis e disjuntores

2.4 Gráfico de uma Corrente de Curto-Circuito na Baixa Tensão



O valor de componente alternada é praticamente constante porque as impedâncias X''_G e X'_G do gerador são muito pequenas em relação à impedância das linhas e transformadores desde a geração até o ponto de curto.

a) A falta se dá no instante em que a tensão está passando pelo máximo e por isso não há componente contínua

b) A falta se dá quando a tensão está passando pelo zero e a componente contínua tem o seu valor máximo.

Nos curtos circuitos nas redes de distribuição o andamento da corrente tem a forma indicada acima.

Nos circuitos em baixa tensão o cálculo das correntes pode ser simplificado como veremos a seguir. Para os circuitos em alta tensão, próximos às estações geradoras o cálculo deve ser feito pelas componentes simétricas como descrito na literatura [2] [3]**

** as referências bibliográficas são indicadas por um número entre colchetes e estão listadas no fim do texto.

3. Método aproximado para cálculo das correntes de curto circuito nos circuitos em baixa tensão derivados de redes de distribuição.

Para realizar os cálculos os componentes dos diagramas unifilares são substituídos por seus circuitos elétricos equivalentes. Assim um circuito pode ser formado por impedâncias equivalentes (diagramas de impedâncias) ou por reatâncias equivalentes (diagrama de reatâncias). O diagrama de reatâncias é obtido do diagrama de impedâncias quando são desprezadas as resistências em face das reatâncias, o que pode ser feito na maioria dos cálculos das correntes de curto-circuito, com exceção de circuitos em baixa tensão com condutores longos, nos quais as resistências dos condutores podem ser da mesma ordem ou mesmo maiores que as reatâncias.

3.1 A alimentação por rede de média tensão

A rede da média tensão tem uma corrente de curto circuito no ponto de entrega da instalação fornecida pela concessionária, a qual geralmente fornece a potência de curto-circuito (P_{cc}) em MVA. Além desse valor pode fornecer também a relação X/R . Se este valor não for fornecido pode ser adotado o valor característico $X/R = 15$ [1]. A rede de média tensão pode ser substituída por um gerador equivalente com a tensão do secundário do transformador (em vazio) que a ela estiver ligado e com a impedância calculada a partir da PCC e da tensão do secundário.

3.2 Os geradores

Estas máquinas apresentam uma reatância variável caracterizada por três valores:

$$X''_d, X'_d \text{ e } X_d$$

As resistências são muito pequenas em relação às reatâncias e por isso são normalmente desprezadas.

Para levar em conta as resistências, os seus valores no regime subtransitário podem ser avaliados por: [1]

- $R_G = 0,05 X''_d$, quando $U_{NG} > 1 \text{ kV}$ e $S_{NG} \geq 100 \text{ MVA}$
- $R_G = 0,07 X''_d$, quando $U_{NG} > 1 \text{ kV}$ e $S_{NG} < 100 \text{ MVA}$
- $R_G = 0,15 X''_d$, quando $U_{NG} < 1 \text{ kV}$

3.3 Os motores de indução

Para essas máquinas a impedância pode ser calculada por:

$$Z_M = R_M + jX_M$$
$$Z_M = \frac{U_{NM}}{\sqrt{3}I_{an}} = \frac{1}{\frac{I_{an}}{I_{NM}}} \times \frac{U_{NM}}{S_{NM}}$$

onde:

U_{NM} tensão nominal

I_{an} corrente de rotor bloqueado

I_{NM} corrente nominal

S_{NM} potência aparente nominal

X_M reatância

Para os motores de baixa tensão, podemos considerar os seguintes valores práticos:

$$X_M/R_M = 0,30, \quad X_M = 0,958 Z_M \quad \text{e} \quad I_{an}/I_{NM} = 5 [1]$$

O sub-índice M é para indicar que se trata de motor.

Observação: Nas máquinas rotativas são dados de placa que interessam nos cálculos: a Tensão Nominal, a Potência Nominal e os valores percentuais das Reatâncias ou Impedâncias Nominais tendo como base os valores nominais de Potência e Tensão.

3.4 Transformadores de dois enrolamentos

No transformador são fornecidas pelo fabricante as seguintes características nominais que interessam para os cálculos de curto-circuito.

Potência Aparente Nominal S_N

Tensão Nominal U_N

Impedância Nominal (%) Z_N também conhecida como tensão de curto-circuito.

Às vezes são dadas também as perdas no cobre P_{cu} determinadas em ensaio, que servirão para determinar o valor da componente resistiva da impedância.

Valem as relações

$$Z = R + jX$$

$$Z = \frac{Z}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$Z_N \approx X_N$$

Como $R \ll X$ é possível considerar $Z_N = X$ ou admitir $R = 0,2X$ [1]

3.5 Transformadores com três enrolamentos [2]

Para estes transformadores são fornecidas as impedâncias entre dois enrolamentos (primário, secundário e terciário) com o outro em curto-circuito e o terceiro em aberto: a partir desses valores obtidos em ensaios é possível calcular as impedâncias dos três enrolamentos Z_p , Z_s , e Z_t

$$Z_p = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st})$$

$$Z_s = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt})$$

$$Z_t = \frac{1}{2}(Z_{ts} + Z_{pt} - Z_{ps})$$

Há simetria entre os valores, considerando-se válidas:

$$Z_{ps} = Z_{sp}, Z_{pt} = Z_{tp}, Z_{st} = Z_{ts}$$

Z_{ps} = é a impedância vista do primário com o secundário em curto e com o terciário em aberto.

3.6 Condutores

A resistência dos condutores é calculada por:

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \quad \text{ou} \quad R = \frac{\ell}{kS}$$

Onde:

ρ	Resistividade
k	Condutividade
ℓ	comprimento do condutor
S	seção reta

A indutância pode ser desprezada para os condutores até 35mm² e a partir daí pode ser obtida em tabelas [1].

3.7 Dispositivos de manobra e proteção

Os valores das reatâncias ($X = 15 \text{ m}\Omega$ em média) [1] para os disjuntores e seccionadores e das resistências (alguns $\mu\Omega$) podem ser desprezados em face dos valores dos outros componentes dos circuitos (cabos, transformadores, motores). Os dispositivos de manobra e proteção aparecem nos diagramas unifilares onde é importante saber sua posição para o cálculo das correntes nesses pontos mas não são representados nos diagramas de reatâncias por não influírem nos cálculos.

3.8 Desenvolvimento do cálculo

Montando um circuito com todos os componentes representados por suas impedâncias podemos montar uma tabela aonde vão sendo representados os valores individuais das resistências e reatâncias e no fim de cada trecho podemos calcular a impedância total até aquele ponto:

$$Z_t = \sqrt{R^2 + X^2}$$

e a corrente naquele ponto $I_k'' = V_o/Z_t$ onde V_o é a tensão fase terra no secundário do transformador em vazio e Z_t a impedância.

Para visualizar melhor, é possível montar um diagrama das resistências e outro das reatâncias e chegar ao diagrama das impedâncias através do qual serão calculadas as correntes de curto circuito em cada trecho.

3.9 Metodologia de cálculo

O cálculo pode ser feito em valores percentuais (ou por unidade) a partir dos dados de placa dos equipamentos ou pelos valores reais obtidos a partir dos dados de placa.

Trabalhando com valores por unidade (p.u.): [2] [3]

Vantagens

- Trabalhamos com números menores
- Os valores para máquinas semelhantes são muito próximos
- Os valores em p.u. (ou percentuais) das máquinas e transformadores são dados de placa
- A corrente em p.u. é a mesma para as diferentes partes do circuito.

Trabalhando com valores reais

Vantagens

- É mais fácil ter uma avaliação dos valores reais
- Os equipamentos de interrupção e proteção têm seus dados de placa em valores reais.

Observações:

- Os curtos circuitos trifásicos causam em geral as maiores correntes que deverão ser interrompidas pelos Dispositivos de Proteção contra Curtos-Circuitos – DPCC*.
- Os curtos circuitos fase-fase têm um valor de corrente de 87% da corrente de um curto trifásico.
- Nos sistemas aterrados solidamente a corrente de curto para terra pode alcançar valores poucos % acima da corrente de curto circuito trifásico; isto entretanto, ocorre quando há poucos motores e a contribuição do sistema primário é pequena.
- O cálculo da corrente trifásica de curto circuito é feito pela corrente de fase do circuito monofásico equivalente.

Escolha dos valores de base para trabalhar com valores p.u.

- A potência de base (kVA_b): potência aparente em kVA da maior fonte (máquina ou transformador)
- A tensão de base V_b: tensão fase-fase do lado da baixa do transformador
- A corrente de base: é obtida da potência de base e da tensão de base pela relação

$$I_b = \frac{kVA_b \times 1000}{\sqrt{3} \times V_b}$$

- Impedância de base

$$Z_b = \frac{V_b}{\sqrt{3} \times I_b}$$

Calculados os valores de base deve ser montado o diagrama de impedância do circuito equivalente.

Com exceção dos condutores cuja resistência nas baixas tensões pode ter valor não desprezível, a maioria dos equipamentos pode ser representada somente por sua reatância e o diagrama a ser considerado pode ser o das reatâncias. Os parâmetros dos condutores podem ser calculados ou obtidos em tabelas [1].

Os acrônimos, são apresentados por extenso, na primeira vez e em ordem alfabética nos Anexos

3.10 Resistências dos condutores

Tabela 3.1[1]

Cobre		Alumínio	
Seção	Resistência por condutor a 70° C	Seção	Resistência por condutor a 80° C
mm ²	Ω/km	mm ²	Ω/km
0,75	29	25	1,495
1	21,7	35	1,092
1,5	14,47	50	0,8
2,5	8,71	70	0,554
4	5,45	95	0,401
6	3,62	120	0,318
10	2,16	150	0,26
16	1,36	185	0,209
25	0,863	240	0,161
35	0,627	300	0,131
50	0,463		
70	0,321		
95	0,232		
120	0,184		
150	0,15		
185	0,1202		
240	0,0922		
300	0,0745		

A reatância pode ser obtida de gráficos ou, ou tabelas.

3.11 Tabela de Reatâncias dos Cabos e Condutores

Tabela 3.2 [1]

Seção mm ²	Cabo para 0,6 / 1 kV		
	NKBA, por condutor com 4	NKLEY, com 3	NYN, NYCY, NYCWY com 3
	XL	XL	XL
	Ω/km	mm ²	Ω/km
1,5			0,138
2,5			0,132
4			0,128
6			0,121
10			0,114
16	0,118		0,108
25	0,112		0,105
35	0,11		0,102
50	0,108	0,085	0,102
70	0,104	0,082	0,098
95	0,103	0,081	0,098
120	0,102	0,08	0,096
150	0,103	0,081	0,096
185	0,102	0,08	0,096
240	0,1	0,79	0,096
300	0,1		0,096

3.12 Barramentos

Se houver um barramento, a escolha é feita por tabelas com dimensões em mm.

Essas tabelas dão a capacidade de condução de corrente para várias configurações de barramentos em paralelo.

Nota: - Para barramentos curtos pode-se desprezar a reatância e calcular a resistência pela fórmula geral dos condutores.

3.13 Ampacidade dos Barramentos

Tabela 3.3

Temperatura ambiente 35°C				Temperatura do barramento 65°						
Largura X Espessura		Seção	Peso	Material	Corrente máxima até 60Hz			Com pintura, de preferência fosco		
					Sem pintura			Com pintura, de preferência fosco		
		mm²	kg/m		Número de barras por fase			Número de barras por fase		
Básicas	Sob encomenda				I	II	III	I	II	III
-	12x2	23,5	0,209	E-CU F30	108	182	-	123	202	-
-	15x2	29,5	0,262		128	212	-	148	240	-
15x3	-	44,5	0,396		162	282	-	187	316	-
-	20x2	39,5	0,351		162	264	-	189	302	-
20x3	-	59,5	0,529		204	348	-	237	394	-
20x5	-	99,1	0,822		274	500	-	319	560	-
-	20x10	199	1,77		427	825	-	497	924	-
-	25x3	74,5	0,663		245	412	-	287	470	-
-	25x5	124	1,11		327	586	-	384	662	-
-	25x10	249	2,22		-	1200	-	-	1320	-
30x5	-	156	1,35		379	672	896	447	760	944
30x10	-	299	2,66		573	1060	1480	676	1200	1670
40x5	-	195	1,77		482	836	1090	573	952	1140
40x10	-	399	3,55		715	1290	1770	850	1470	2000
-	50x5	249	2,22		583	994	1260	697	1140	1330
50x10	-	499	4,44		852	1510	2040	1020	1720	2320
60x5	-	299	2,66		688	1150	1440	826	1330	1510
60x10	-	599	5,33		985	1720	2300	1180	1960	2810
80x5	-	399	3,55		885	1450	1750	1070	1680	1830
80x10	-	799	7,11		1240	2110	2790	1500	2410	3170
100x5	-	499	4,44		1080	1730	2050	1300	2010	2150
100x10	-	999	8,89		1490	2480	3260	1810	2850	3720
120x10	-	1200	10,7		1740	2860	3740	2110	3280	4270
160x10	-	1800	14,2		2220	3590	4680	2700	4130	5360
-	200x10	2000	17,8		2690	4310	5610	3290	4970	6430

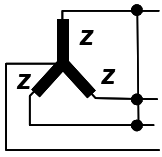
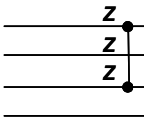
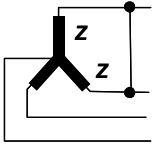
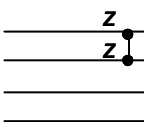
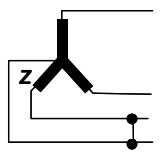
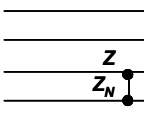
Notas:

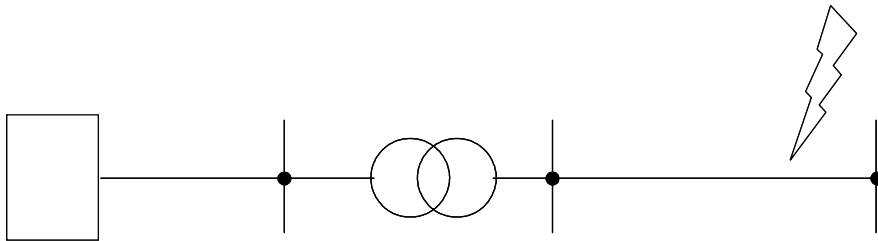
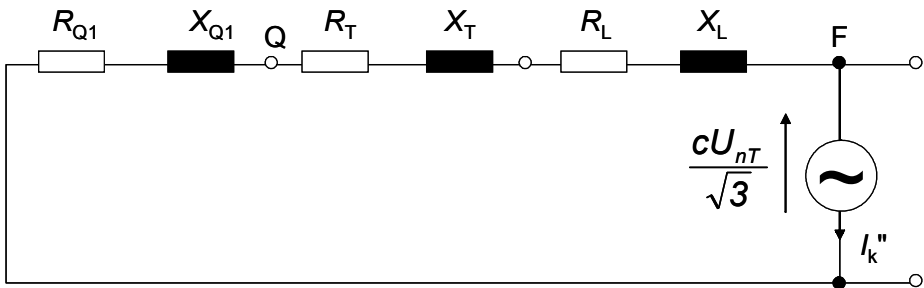
1. Nas execuções de barramentos com duas ou mais barras por fase, a distância entre elas é dada pela própria espessura da barra.
2. A pintura como recurso de aumentar a ampacidade não é aceita por algumas normas. Verificar em cada aplicação.

4. Método prático de cálculo das correntes de curto circuito

Em uma rede trifásica, podem ocorrer curtos-circuitos resultantes entre três fases, duas fases ou entre uma fase e o Neutro ou o PE.

A maiores correntes são causadas por curtos-circuitos trifásicos ou monofásicos diretamente nos terminais do lado da baixa tensão do transformador (e este for a única fonte de corrente para o curto-circuito).

Tipo de curto-circuito	Curto-circuito em terminais de transformadores			Curto-circuito ao longo dos condutores		
		Corrente de curto-circuito	Relação		Corrente de curto-circuito	Relação
Trifásico		$I_{k3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z}$	$\frac{I_{k3}}{I_{k3}} = 1$		$I_{k3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z}$	$\frac{I_{k3}}{I_{k3}} = 1$
Bifásico		Erro! Vínculo não válido.	$\frac{I_{k2}}{I_{k3}} = 0,87$		Erro! Vínculo não válido.	$\frac{I_{k2}}{I_{k3}} = 0,87$
Monofásico		$I_{k1} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z}$	$\frac{I_{k1}}{I_{k3}} = 1$		$I_{k1} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot (Z + Z_N)}$	$\frac{I_{k1}}{I_{k3}} \leq 0,5$



Simbologia:

Q	ponto de conexão à rede
S_{kQ}	Potência inicial simétrica de curto-circuito no ponto de conexão à rede
v_r	relação nominal de tensões na derivação principal
F	ponto de falta
R_{Qt}	resistência equivalente do alimentador
R_T	resistência equivalente do transformador
R_L	resistência equivalente dos condutores
X_{Qt}	reatância equivalente do alimentador
X_T	reatância equivalente do transformador
X_L	reatância equivalente dos condutores

Exemplo para cálculo da corrente subtransitória inicial de curto-circuito para uma única fonte de alimentação e curto-circuito remoto em relação ao gerador.

4.1 Curto-circuito trifásico alimentado por uma única fonte em ponto distante do gerador

Corrente inicial de curto-circuito I_k''

Da figura 4.1,

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_{nT}}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{c \cdot U_{nT}}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

c – fator para determinação da tensão equivalente

U_{nT} : Tensão nominal do enrolamento da baixa tensão do transformador.

Para cálculo da maior corrente de curto-circuito, usar

$c_{\text{máx.}} = 1,0$ para 220/380V (ou 230/400V) ou 1,05 para outras tensões

$R_k = R_{Qt} + R_T + R_L$; a soma das resistências por condutor, da fig. 4.1 na temperatura de 20°C do condutor

$X_k = X_{Qt} + X_T + X_L$; a soma das reatâncias serie por condutor, da fig. 4.1

Corrente de pico de curto-circuito i_p

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} I_k''$$

O fator X é obtido pela fig. 4.2 entrando com o valor $R/X = R_k / X_k$ na abcissa, ou é calculado numericamente pela equação:

$$\chi = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}}$$

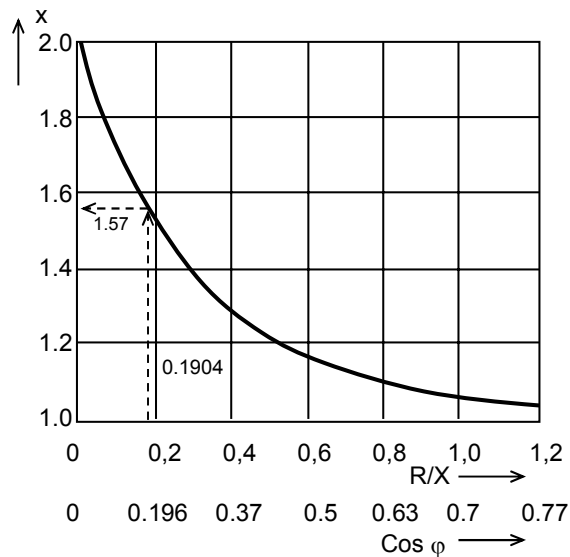


Fig. 4.2: Fator X em função da relação R/X

Corrente de curto-circuito bifásico em ponto remoto em circuito alimentado por uma única fonte

Corrente c.a. inicial de curto-circuito

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k''$$

I_k'' é determinado pela equação 4.1 usando os valores:

para cálculo da maior corrente de curto-circuito, usar

$c_{máx.} = 1$ para 220/380 V, ou alternativamente 1,05 para outras tensões

R_L para o condutor na temperatura 20° C

Para cálculo da menor corrente de curto-circuito, usar:

$c_{min.} = 0,95$ para 220/380 V ou alternativamente 1,0 para outras tensões.

R_L do condutor na temperatura de 80 ° C

- Corrente de pico de curto-circuito:

$$i_{p2} = \chi \sqrt{2} i_{k2}''$$

O fator χ pode ser obtido da figura 4.2 ou calculado numericamente. Pode ser assumida a relação R/X aplicável a um curto-circuito trifásico (0,20).

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_{nT}}{\sqrt{(2R_{Q1} + 2R_T + 2R_L + R_{0T} + R_{0L})^2 + (2X_{Qt} + 2X_T + 2X_L + X_{0T} + X_{0L})^2}} \quad \text{Eq. 4.2}$$

4.2 Curto-circuito monofásico para terra em ponto remoto de alimentador com uma só fonte

Para transformadores dos grupos vetoriais Dy, Dz, Yy, e Yz, nos quais o centro da estrela é aterrado somente no lado da baixa tensão, aplica-se a equação 4.2. Assim:

I_{k1}'' corrente inicial de curto-circuito de uma falta monofásica

c fator para determinar a tensão de alimentação do circuito

U_{nT} tensão nominal no lado da baixa do transformador (ex. 380 V)

R_{0T} resistência de seqüência zero do transformador

R_{0L} resistência de seqüência zero dos condutores

X_{0T} reatância de seqüência zero do transformador

Para calcular os valores mais altos e mais baixo da corrente de curto-circuito, usar os valores de **c** e de **R_L** com o mesmo critério do caso anterior.

4.3 Contribuição de motores para a corrente de curto-circuito

A DIN VDE 0102 recomenda o cálculo da contribuição dos motores no cálculo dos curtos-circuitos. Os motores síncronos e capacitores são considerados como geradores.

Na baixa tensão eles podem ser desprezados se a soma das correntes nominais do grupo de motores I_M for menor que 1% da corrente trifásica de curto-circuito I_k'' ou seja se

$$\sum I_{nM} < 0,01 \cdot I_k''$$

Também não precisa ser levada em conta a corrente de motores se eles não estão ligados, em termos de diagrama do circuito (intertravamentos), ou devido à sua função no processo (acionamento reverso).

O cálculo da maior corrente de curto-circuito produzida por motores assíncronos quando há um curto-circuito nos seus terminais é feito por meio das seguintes equações:

Corrente inicial de curto-circuito:

$$I_{k3M}'' = \frac{U_{nT}}{\sqrt{3}X_M}$$

Corrente de pico de curto-circuito:

$$i_{pM} = \chi_M \cdot \sqrt{2} I_{k3M}''$$

U_{nT} Tensão nominal da B.T do transformador

$$X_M = \frac{1}{I_{an} / I_{nM}} \cdot \frac{U_{nT}}{\sqrt{3}X_M}$$

U_{nt} Tensão nominal da BT do transformador

$X_M = 1.4$ correspondendo a $R_M/X_M = 0,3$
(valor assumido) [1]

U_{nM} = Tensão nominal do motor (ex. 380V)

I_{an} = Corrente de rotor bloqueado

I_{aM} = Corrente nominal do motor

X_M = Reatância de curto-circuito do motor

SIEMENS

Quando há vários motores ligados a um mesmo barramento de baixa tensão, os motores e seus alimentadores podem ser combinados e representados pelo circuito equivalente de um único motor para simplificar o cálculo.

Para o circuito equivalente, usar

X_M : pela fórmula acima

I_{nM} : a soma das correntes nominais de todos motores individuais do grupo de motores

$$I_{an}/I_{nM} = 5$$

$$\chi_M = 1.4 \text{ correspondendo a } R_M/X_M = 0,3$$

(ver fig. 4.2)

Com esses valores práticos recomendados [1], a influência dos alimentadores dos motores individuais já estão levados em conta.

Exemplo

Dado: I''_{k3} (sem motores) = 20 kA

$$I_{k3M} \text{ (grupo de motores)} = 400 \text{ A; } U_{nT} = 380 \text{ V}$$

Valor a ser calculado I''_{k3} (com motores)

Cálculo:

$$X_M = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 400} = 0,109695 \Omega$$

$$I''_{k3M} = \frac{380}{\sqrt{3 \cdot 0,109695}} = 2000 \text{ A}$$

Resulta: (com motores) = 22 kA

Conclusão: A contribuição do grupo de motores à corrente de curto circuito aumenta em 10% a
Corrente de curto-circuito

4.4 Nomogramas para determinação dos valores das resistências e indutâncias e das correntes de curto-circuito para cálculos de curtos-circuitos.

Assume-se que:

- a rede é alimentada somente por transformadores
- a tensão primária do transformador permanece constante (ou o que o mesmo, a impedância da rede é nula)

As reatâncias e resistências (X e R) para os vários trechos de linhas aéreas ou de cabos, assim como as resistência R_T e X_T podem ser obtidas dos nomogramas.

Tabela 4.1 (na página seguinte)

Tensões de reatâncias u_x dos transformadores com $u_{kr} = 4\%$ e $u_{kr} = 6\%$ e vários valores U_{Rr}

u_{Rr} em %	U_x em % com $u_{kr} = 4\%$	U_x em % com $u_{kr} = 6\%$
1	3,87	5,92
1,1	3,85	5,89
1,2	3,82	5,88
1,3	3,78	5,86
1,4	3,75	5,83
1,5	3,71	5,81
1,6	3,67	5,78
1,7	3,62	5,75
1,8	3,57	5,72
1,9	3,52	5,69
2,0	3,46	5,66
2,1	3,40	5,62
2,2	3,34	5,58
2,3	3,27	5,54
2,4	3,20	5,50
2,5	3,12	5,45

A tensão de reatância (tabela 4.1) é calculada por:

$$u_x = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2}$$

U_m tensão de reatância do transformador (%)

U_{kr} impedância de curto-circuito do transformador (%)

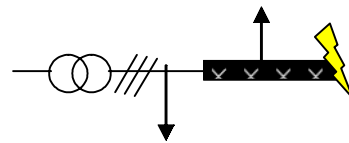
U_{Rr} queda de tensão resistiva do transformador (%)

Os valores para U_{kr} e U_{Rr} são dados pelos catálogos de transformadores.

Das figuras 4.3 a 4.5, portanto, pode ser determinado o valor eficaz da corrente inicial simétrica de curto circuito I''_k em função da soma geométrica das reatâncias e resistências. Os valores assim determinados têm todos um fator de segurança em grau variável, desde que a corrente de curto-circuito é limitada em boa parte pelos efeitos das resistências de contato, laços de corrente e da corrente de deslocamento. Esses fatores não são levados em conta pelo uso dos diagramas.

4.5. Exemplo para redes em 220 V

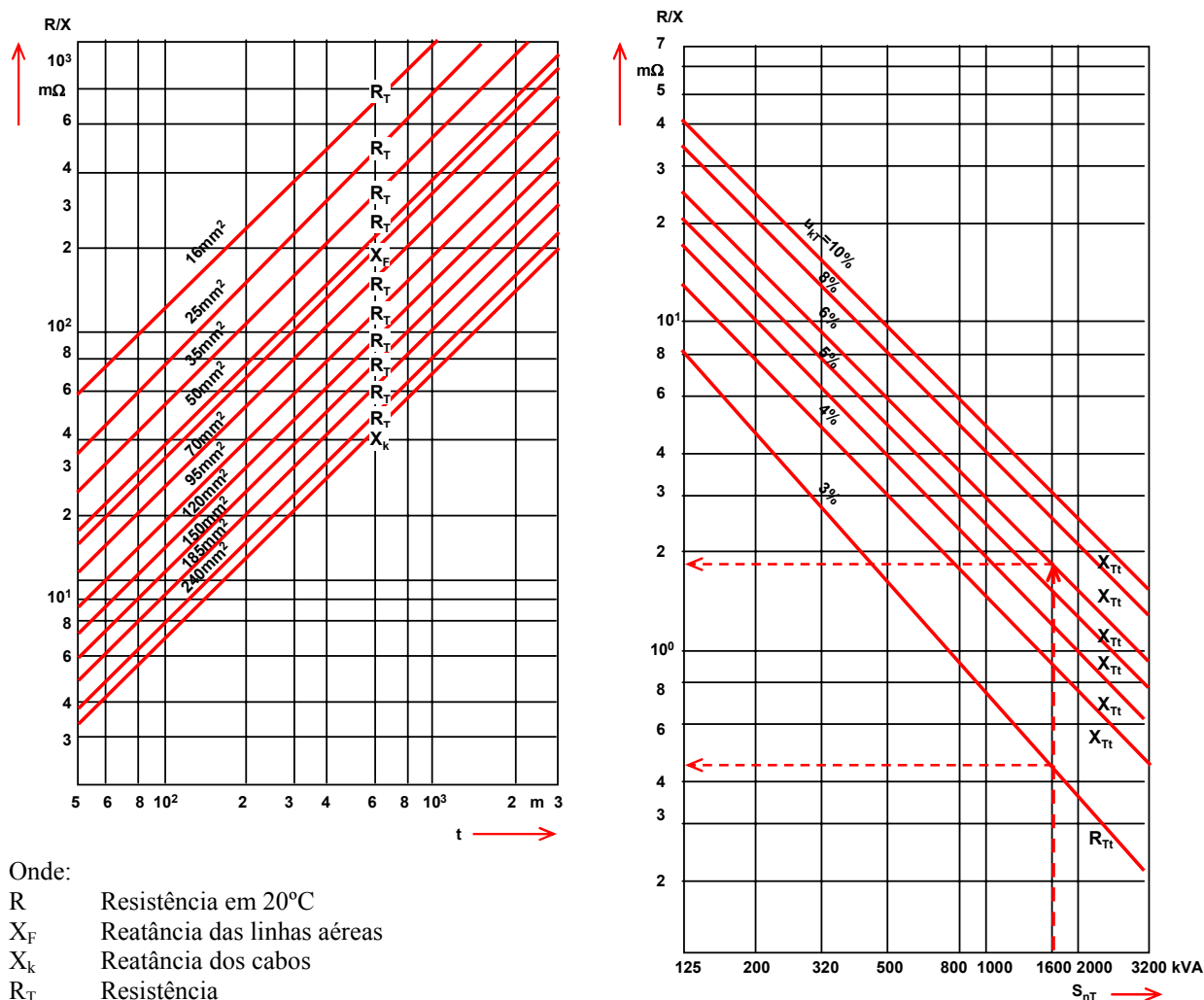
Transformador: 1600 kVA
 Cabo: 100m (3x150mm²)
 Linha aérea: Cobre, comprimento 80 m
 Seção 3 x 120 mm²



Transformador: Impedância $u_{kr} = 6\%$
 Queda de tensão resistiva $u_{Rr} = 1\%$

Tensão nominal de operação: 220V (no lado da baixa-tensão)

Tensão na reatância: $u_x = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = \sqrt{6^2 - 1^2} = 5,92\%$



a) Resistência e reatância de linhas aéreas e cabos

b) Resistência e reatância de transformadores

Figura 4.3 – Nomograma para determinar a corrente de curto-circuito da rede em 220/230V ¹⁾

Tabela das resistências e reatâncias 4.2

	Resistência R mΩ	Reatância X mΩ
Linha aérea e cabo da figura 4.3a	12,0	26,0
Transformador da figura 4.3	12,0	7,2
	$0,45 * 1,09^{1)}$	$1,8 * 1,09^{1)}$
Impedância total do percurso do curto-circuito	24,5	35,2

1) Para redes de 230V, as impedâncias resistiva e reativa mostrados na fig. 4.3 estão deslocadas para cima de aproximadamente 9%.

A impedância total do percurso é a soma aritmética das impedâncias individuais, resistivas e indutivas, respectivamente (tabela 4.2).

A obtenção por leitura do valor corresponde à corrente simétrica de curto-circuito.

Pelo uso dos valores totais da resistência e reatância determinadas acima, a corrente de curto-circuito pode ser lida na figura 4.3c. A interseção entre as linhas vertical da resistência e horizontal da reatância da a corrente inicial simétrica de curto-circuito I''_k . Se este ponto ficar entre duas curvas, o valor real da corrente de curto-circuito simétrica inicial deve ser obtido por interpolação. Assim, a corrente inicial de curto-circuito simétrica para os valores determinados de resistência e de reatância é aproximadamente $I''_k = 3000A$.

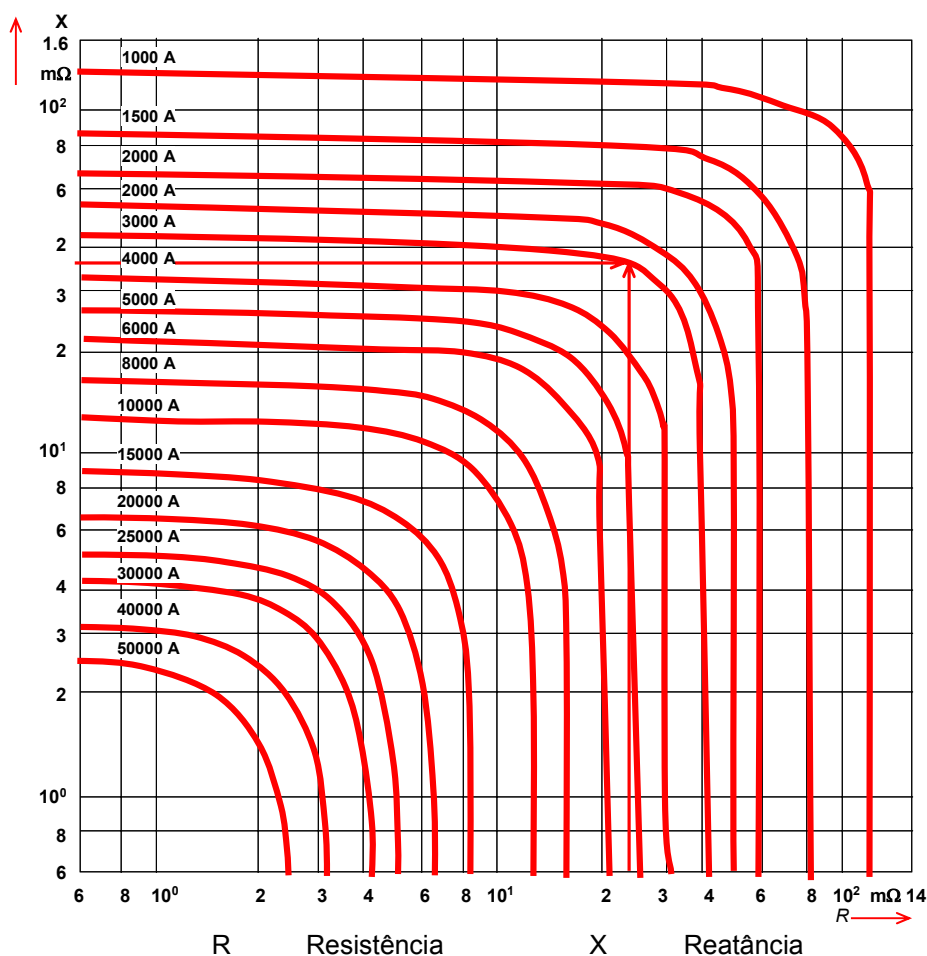


Figura 4.3c - Corrente c.a. inicial simétrica de curto-circuito I''_k (valor eficaz) em função da reatância e da resistência totais do percurso da corrente de curto-circuito.

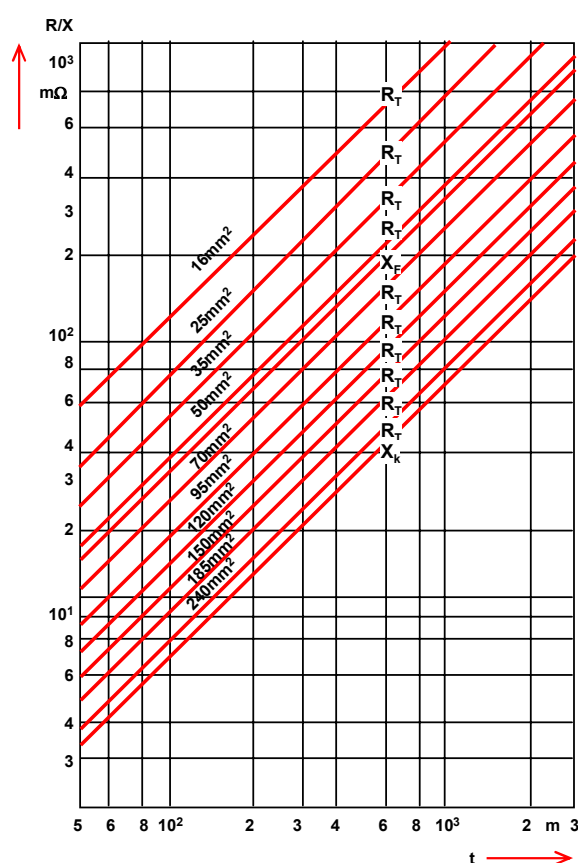
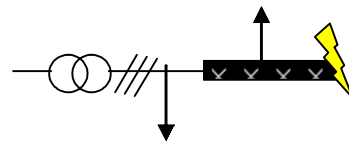
4.6. Exemplo para redes em 380 V

Transformador: 1600 kVA
 Cabo: 100m (3x150mm²)
 Linha aérea: Cobre, comprimento 80 m
 Seção 3 x 120 mm²

Transformador: Impedância $u_{kr} = 6\%$
 Queda de tensão resistiva $u_{Rr} = 1\%$

Tensão nominal de operação: 380V

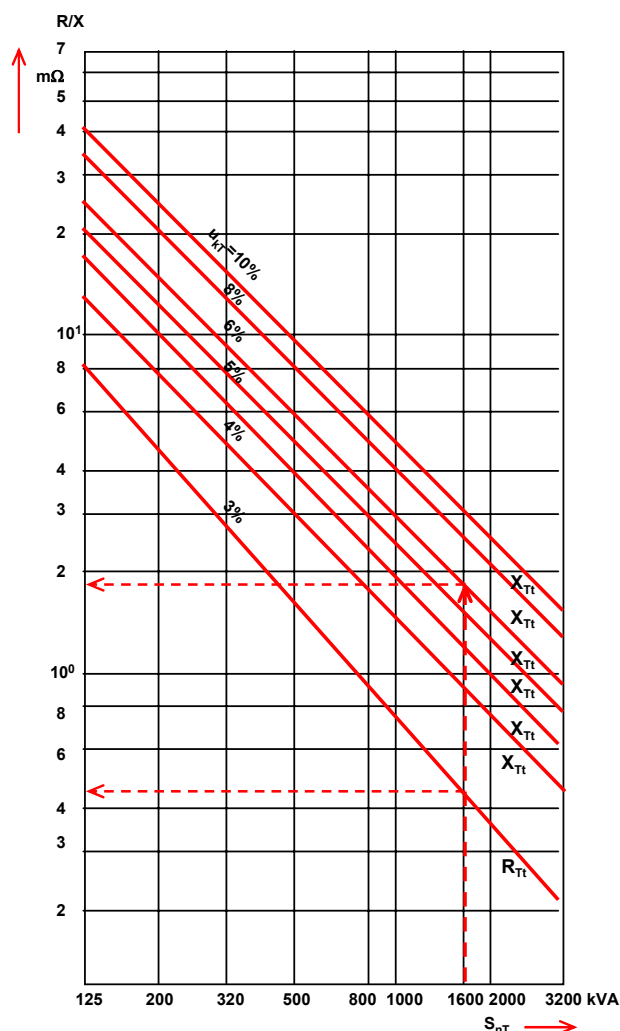
Tensão na reatância: $u_x = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = \sqrt{6^2 - 1^2} = 5,92\%$



Onde:

R Resistência em 20°C
 X_F Reatância das linhas aéreas
 X_k Reatância dos cabos
 R_T Resistência
 X_T Reatância

(no caso de condutores de alumínio, os valores de resistência tirados do gráfico precisam ser multiplicados por 1.7)



a) Resistência e reatância de linhas aéreas e cabos

b) Resistência e reatância de transformadores

Figura 4.4 – Nomograma para determinar a corrente de curto-circuito da rede em 380/400V ¹⁾

Tabela das resistências e reatâncias 4.3

	Resistência R mΩ	Reatância X mΩ
Linha aérea e cabo da figura 4.3a	12,0	26,0
Transformador da figura 4.3b	12,0	7,2
	1,3 * 1,1 ¹⁾	5,2 * 1,1 ¹⁾
Impedância total do percurso do curto-circuito	25,4	38,9

1) Para redes de 400V, as impedâncias resistiva e reativa mostrados na fig. 4.4 estão deslocadas para cima de aproximadamente 10%.

A impedância total do percurso é a soma aritmética das impedâncias individuais, resistivas e indutivas, respectivamente (tabela 4.3).

A obtenção por leitura do valor corresponde à corrente simétrica de curto-circuito.

Pelo uso dos valores totais da resistência e reatância determinadas acima, a corrente de curto-circuito pode ser lida na figura 4.4c. A interseção entre as linhas vertical da resistência e horizontal da reatância da a corrente inicial simétrica de curto-circuito I''_k . Se este ponto ficar entre duas curvas, o valor real da corrente de curto-circuito simétrica inicial deve ser obtido por interpolação. Assim, a corrente inicial de curto-circuito simétrica para os valores determinados de resistência e de reatância é aproximadamente $I''_k = 4700A$.

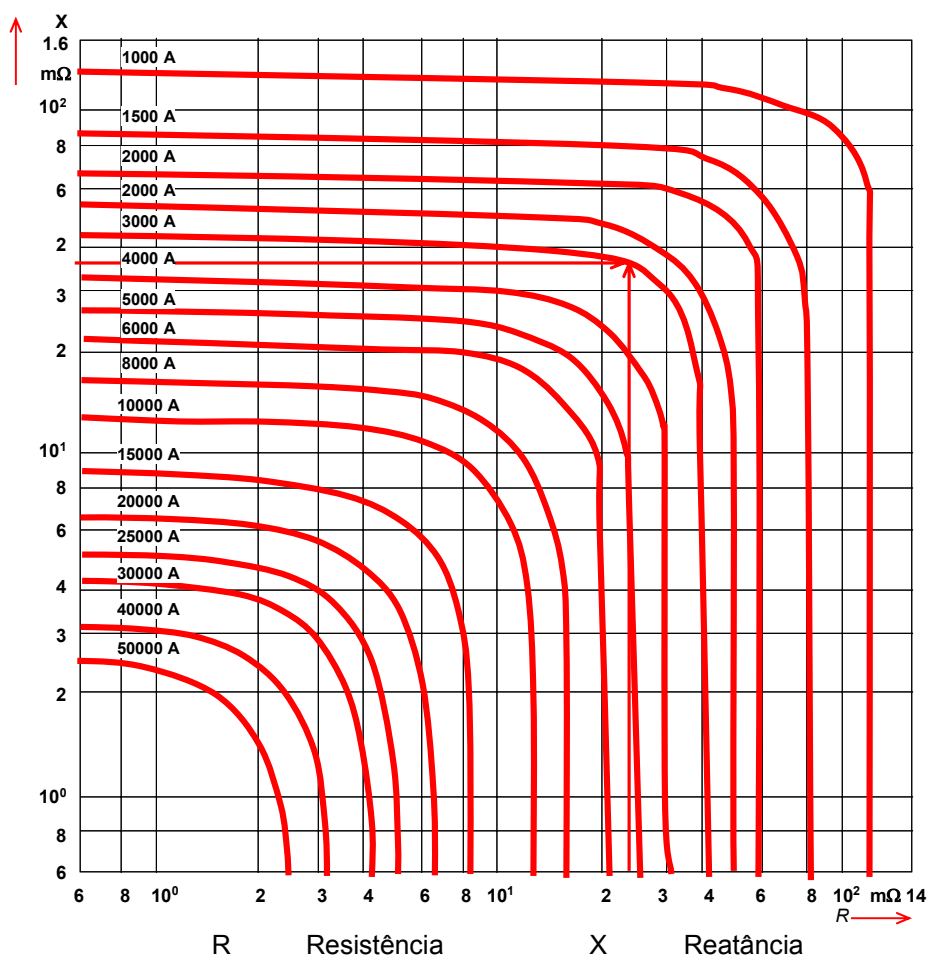


Figura 4.4c - Corrente c.a. inicial simétrica de curto-circuito I''_k (valor eficaz) em função da reatância e da resistência totais do percurso da corrente de curto-circuito.

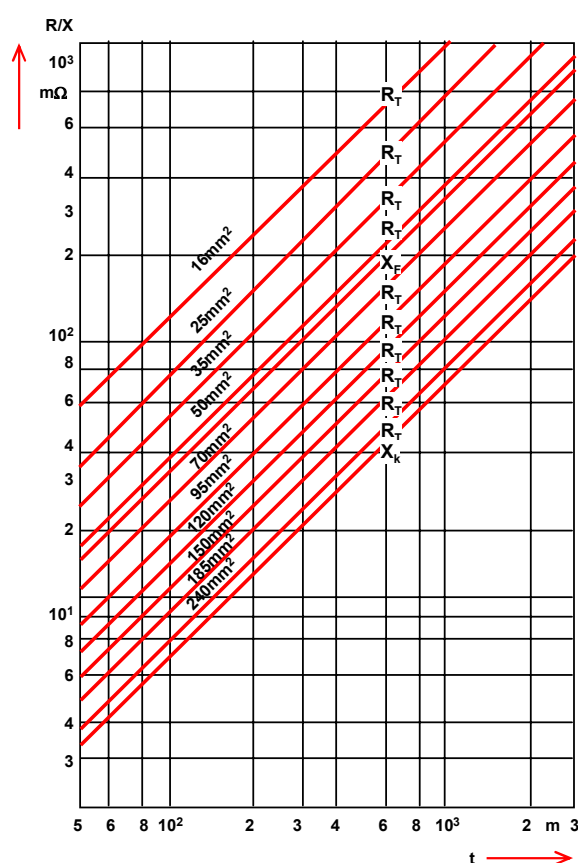
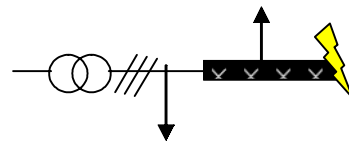
4.7. Exemplo para redes em 480 V

Transformador: 1600 kVA
 Cabo: 100m (3x150mm²)
 Linha aérea: Cobre, comprimento 80 m
 Seção 3 x 120 mm²

Transformador: Impedância $u_{kr} = 6\%$
 Queda de tensão resistiva $u_{Rr} = 1\%$

Tensão nominal de operação: 500V

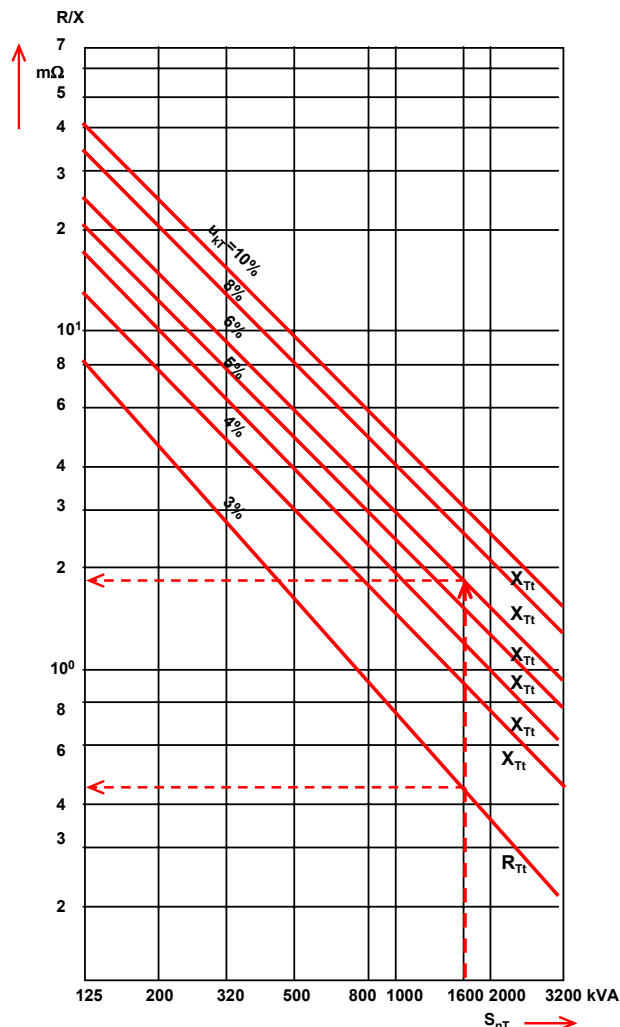
Tensão na reatância: $u_x = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = \sqrt{6^2 - 1^2} = 5,92\%$



Onde:

R Resistência em 20°C
 X_F Reatância das linhas aéreas
 X_k Reatância dos cabos
 R_T Resistência
 X_T Reatância

(no caso de condutores de alumínio, os valores de resistência tirados do gráfico precisam ser multiplicados por 1.7)



a) Resistência e reatância de linhas aéreas e cabos

b) Resistência e reatância de transformadores

Figura 4.5 – Nomograma para determinar a corrente de curto-circuito da rede em 500V ¹⁾

Tabela das resistências e reatâncias 4.4

	Resistência R mΩ	Reatância X mΩ
Linha aérea e cabo da figura 4.3a	12,0	26,0
Transformador da figura 4.3b	2,2	9,5
Impedância total do percurso do curto-circuito	26,2	42,7

A impedância total do percurso é a soma aritmética das impedâncias individuais, resistivas e indutivas, respectivamente (tabela 4.3).

A obtenção por leitura do valor corresponde à corrente simétrica de curto-circuito.

Pelo uso dos valores totais da resistência e reatância determinadas acima, a corrente de curto-circuito pode ser lida na figura 4.5c. A interseção entre as linhas vertical da resistência e horizontal da reatância dá a corrente inicial simétrica de curto-circuito I''_k . Se este ponto ficar entre duas curvas, o valor real da corrente de curto-circuito simétrica inicial deve ser obtido por interpolação. Assim, a corrente inicial de curto-circuito simétrica para os valores determinados de resistência e de reatância é aproximadamente $I''_k = 5800A$.

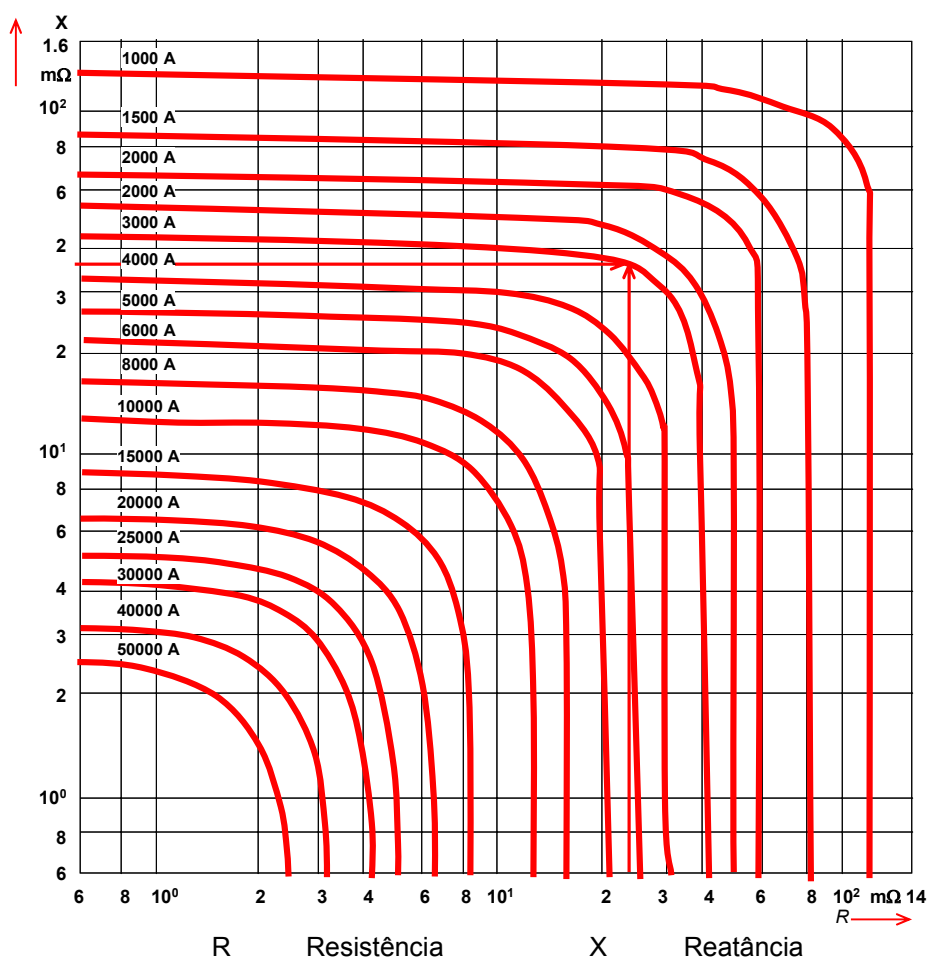

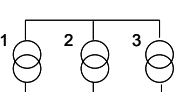





Figura 4.5c - Corrente c.a. inicial simétrica de curto-circuito I''_k (valor eficaz) em função da reatância e da resistência totais do percurso da corrente de curto-circuito.

4.8 Formulário para cálculo das correntes de curto-circuito nas redes de BT pela DIN VDE 0102

Curto-circuito trifásico alimentado pela rede

Tensão BT do transformador
 $U_{rTUS} = 231, 400, 525$ ou V,
 50 ou Hz

Dados da rede		Processo de cálculo	Resistência R (mΩ)	Resistência X (mΩ)																				
		$U_{rTUS}^2 = 231^2 = 53,4 \cdot 10^3$ $U_{rTUS}^2 = 400^2 = 160 \cdot 10^3$ $U_{rTUS}^2 = 525^2 = 275,6 \cdot 10^3$																						
a) Rede 	S''_{kQ} MVA (fornecido pela concessionária) MVA (Valor real) U_{nQ} kV	Referido ao lado da BT $Z_{Qt} = \frac{1,1 \cdot U_{nQ}^2}{S''_{kQ} \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{U_{rTUS}}{U_{rTOS}} \right) =$ $X_{Qt} = 0,995 \cdot Z_{Qt} =$ $R_{Qt} = 0,1 \cdot X_{Qt} =$																						
b) Transformador 	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>S_{rT} (kVA)</th> <th>u_{kr} (%)</th> <th>u_{Rr} (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Total S_{rT}</td> <td colspan="2">Valores médios</td> </tr> </tbody> </table> Se necessário, obter dados do catálogo.		S_{rT} (kVA)	u_{kr} (%)	u_{Rr} (%)	1				2				3				Total S_{rT}		Valores médios		$Z_T = u_{kr} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT} \cdot 100\%} =$ $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} =$ $R_T = u_{Rr} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT} \cdot 100\%} =$		
	S_{rT} (kVA)	u_{kr} (%)	u_{Rr} (%)																					
1																								
2																								
3																								
Total S_{rT}		Valores médios																						
c) Cabo ou linha aérea  x mm ² n* q l = m $x'^{**} \approx 0,08 m\Omega / m$ $x'^{**} \approx 0,33 m\Omega / m$ Cu Al Fe	$R_{L1} \approx \frac{l \cdot e}{q \cdot n} \cdot 10^3 =$ $X_{L1} \approx x' \cdot \frac{l}{n} =$																						
d) Barramentos no quaro de manobra 	Barras por fase x x mm thus $q = mm^2 / Ph$ $l = m$ $x'^{**} \approx 0,12 m\Omega / m$	$R_{L2} \approx \frac{l \cdot e}{q \cdot n} \cdot 10^3 =$ $X_{L2} \approx x' \cdot l = 0,12 \cdot =$																						
e) Cabo de distribuição  x mm ² n* q l = m $x'^{**} \approx 0,08 m\Omega / m$ Cu Al Fe	$R_{L3} \approx \frac{l \cdot e}{q \cdot n} \cdot 10^3 =$ $X_{L3} \approx x' \cdot \frac{l}{n} = 0,08 \cdot =$																						

n* = número de condutores paralelos por fase

x** = valores válidos para 5° Hz (para as demais frequências, converter proporcionalmente)

$$z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} =$$

Máxima corrente trifásica inicial no ponto de curto circuito no ponto:

$$I_k'' = \frac{U_{rT}}{\sqrt{3} \cdot z_k} =$$

O máx. valor prospectivo de crista de corrente considerado (corrente prospectiva)

$$U_{rTUS} = \text{Tensão nominal da baixa tensão do transformador (ex.: 400V, veja acima)}$$

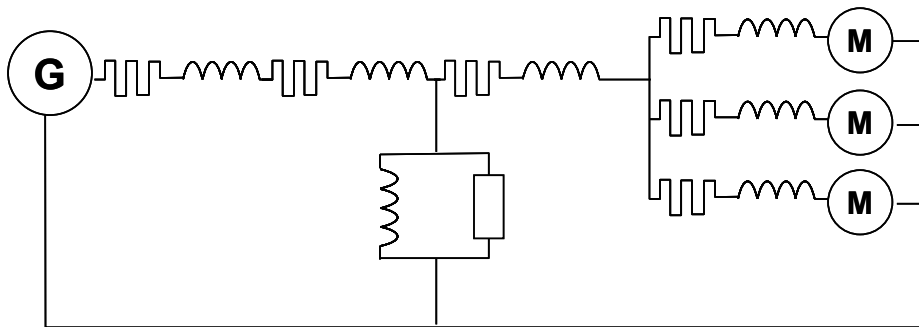
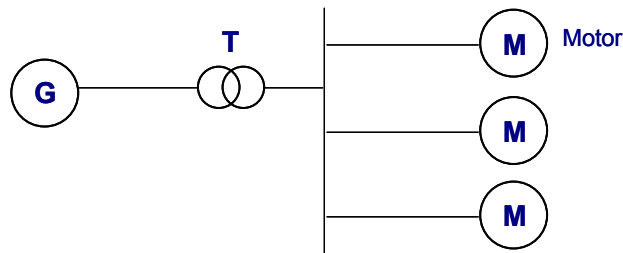
$$U_{rTOS} = \text{Tensão nominal da alta tensão do transformador}$$

5. Estudo de Caso: Aplicação Industrial – Método Simplificado

Rede: 13,8 kV

Potência de curto circuito no local da conexão: $P_{cc} = 750\text{MVA}$

Transformador: 750 kVA, 13,8 kV (Δ) / 380 V (Y), Z 5,5 %



5.1 Determinação da impedância do gerador equivalente à rede de MT

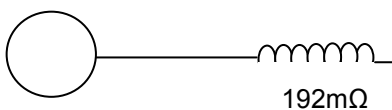
$$Z_e = \frac{U_s^2}{P_{cc}} = \frac{380^2}{750 \times 10^3} = 0,192\text{m}\Omega$$

Valor referido à baixa tensão

Em geral despreza-se o valor de R_e e adota-se $X_e = Z_e$

Se for conhecida (ou adotada) a relação R/X (0,15)

pode-se calcular:



$$Z_e = \frac{U_s^2}{P_{cc}} = \frac{380^2}{750 \times 10^3} = 0,19\text{m}\Omega$$

5.2 Reatância do Transformador

Pode-se admitir também a reatância igual a impedância

$$Z = \frac{U_{BT}^2}{P_N} \times \frac{Z\%}{100} \text{ m}\Omega \qquad Z = \frac{380^2}{750} \times \frac{5,5}{100} = 10,6 \text{ m}\Omega = X$$

Se for conhecida, por ensaio, a perda no cobre pode-se determinar a componente resistiva da impedância; como primeira aproximação pode-se adotar $Z = X$.

5.3 Impedância dos cabos

No caso dos cabos em BT a resistência é frequentemente mais importante que a indutância e pode ser calculada pela relação:

$$R_c = \frac{\ell}{k \cdot S}$$

onde:

R resistência em ohms,

ℓ comprimento em metros ou quilômetros,

k condutividade em Siemens/mm² (56 para o cobre e 34 para o alumínio),

S seção em mm².

Para 2 cabos de 120mm² com 100 m de comprimento e em paralelo:

$$R_c = \frac{100}{2 \times 120 \times 56} = 7,4 \text{ m}\Omega \qquad X_c = \frac{0,096}{2} \times 100 = 4,8 \text{ m}\Omega$$

Para 1 cabo de 240mm² e comprimento de 150m

$$R_c = \frac{150}{240 \times 56} = 11,2 \text{ m}\Omega \qquad X_c = 0,096 \times 150 = 14,4 \text{ m}\Omega$$

Para 2 cabos de 240mm² em paralelo e comprimento de 200m

$$R_c = \frac{200}{480 \times 56} = 7,4 \text{ m}\Omega \qquad X_c = \frac{0,096}{2} \times 200 = 9,6 \text{ m}\Omega$$

5.4 Reatâncias de Condutores [1]

cabo de 240mm²: 0,096mΩ/m

cabo de 120mm² = 0,096mΩ/m

5.5 Reatâncias dos motores

M₁: 20kW, cos φ = 0,88, I_N = 360A, I_P = 6,9x360, V_N = 380V, X" = 30%

$$\chi'' = \frac{30}{100} \times \frac{380^2}{227,27} = 190\text{m}\Omega$$

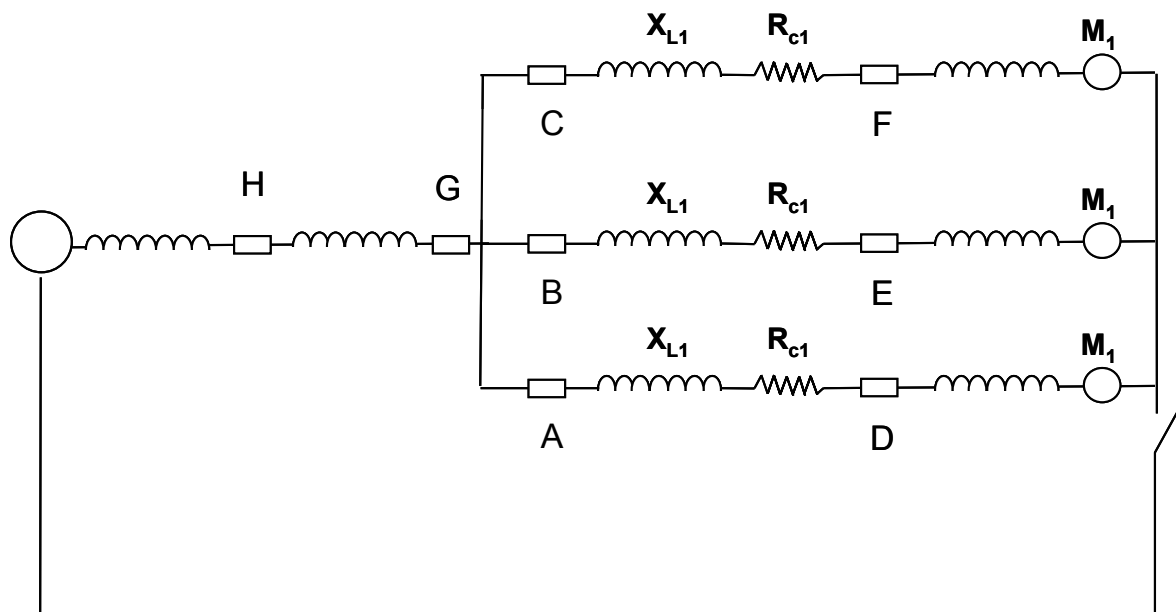
M₂: 240kW, cos φ = 0,98, I_N = 430A, I_P = 7x430, V_N = 380V, X" = 30%

$$\chi'' = \frac{30}{100} \times \frac{380^2}{244,89} = 177\text{m}\Omega$$

M₃: 300kW, cos φ = 0,89, I_N = 530A, I_P = 7x530, V_N = 380V, X" = 30%

$$\chi'' = \frac{30}{100} \times \frac{380^2}{337,08} = 128\text{m}\Omega$$

5.6 Diagrama de impedâncias, levando em conta as reatâncias das máquinas e do transformador e a reatâncias e resistências dos cabos



 Dispositivos Proteção Contra Curto-circuito representados de A a H: Fusível ou Disjuntor

5.7 Cálculo das correntes de curto circuito

Para o dimensionamento do DPCC representado em A, determinam-se as correntes de curto-circuito antes e depois dele e escolhe-se a maior delas.

$$I_{cca1} = \frac{380}{\sqrt{3(0,192 + 10,6 + 1)}} = \frac{320}{11,79} = 18,6\text{kA}$$

5.8 Corrente de curto-circuito depois de A fornecida pela alimentação:

$$I_{cca2} = \frac{380}{\sqrt{3(Z_{m2} + Z_{c2} + Z_{b1})}} = \frac{380}{\sqrt{3 \cdot 192,7}} = 1,1\text{kA}$$

Idem fornecida pelo motor M₂

$$X_{m2} + X_{c2} + R_{c2} + X_{b1} = \sqrt{(177 + 14,4 + 1)^2 + 11,2^2} = 192,7 \text{ m}\Omega$$

Idem fornecida pelo motor M1

$$I_{cca1} = \frac{380}{\sqrt{3} \sqrt{(190 + 4,8 + 1 + 1)^2 + 7,4^2}} = \frac{220}{196,9} = 1,1 \text{ kA}$$

Corrente total a ser interrompida por A: 18,6kA + 1,1kA + 1,1kA = 20,8kA

Para um curto circuito antes do DPCC A, a corrente será só a fornecida pelo motor M₃ que será da mesma ordem de grandeza que o dos motores M₁ e M₂, $\approx 1, 1 \text{ kA}$ e portanto a corrente a ser utilizada para A será:

$$I_{cc} \geq 20,8 \text{ kA}$$

O mesmo procedimento será feito para os demais DPCC.

Determinadas as correntes serão especificados os fusíveis e/ou disjuntores e será feita a coordenação entre eles.

6. Proteção com disjuntores

Uma vez calculada a corrente de curto-circuito devem ser escolhidos os dispositivos de proteção que a interrompa no menor espaço de tempo possível, como especificado no item 5.34 da NBR 5410:1997.

“5.3.4 Proteção contra correntes de curto-circuito

5.3.4.1 Regra geral

Devem ser previstos dispositivos de proteção para interromper toda corrente de curto-circuito nos condutores dos circuitos, de forma a evitar que os efeitos térmicos e dinâmicos da corrente prevista possam causar a danificação dos condutores e / ou de outros elementos do circuito.

5.3.4.2 Determinação das correntes de curto-circuito presumidas

As correntes de curto-circuito presumidas devem ser determinadas em todos os pontos da instalação julgados necessários. Essa determinação pode ser efetuada por cálculo ou por medida.”

Usando disjuntores permitidos pela NBR-5361(disjuntor tipo NEMA), o projetista deve obter as características para satisfazer o item 5.3.4.3 da NBR 5410:1997:

“5.3.4.3 Características dos dispositivos de proteção contra correntes de curto-circuito

Todo dispositivo que garanta a proteção contra curtos-circuitos deve atender às duas condições seguintes:

a) sua capacidade de interrupção deve ser no mínimo igual à corrente de curto-circuito presumida no ponto da instalação, exceto na condição indicada a seguir:

- um dispositivo com capacidade de interrupção inferior é admitido se um outro dispositivo com a capacidade de interrupção necessária for instalado a montante. Nesse caso, as características dos dois dispositivos devem ser coordenadas de tal forma que a energia que deixam passar os dispositivos não seja superior à que podem suportar, sem danos, o dispositivo situado a jusante e as linhas protegidas por esse dispositivo;

NOTA - Em certos casos, pode ser necessário tomar em consideração outras características, tais como os esforços dinâmicos e a energia de arco, para os dispositivos situados a jusante. Os detalhes das características que necessitam de coordenação devem ser obtidos junto aos fabricantes desses dispositivos.

b) a integral de Joule que o dispositivo deixa passar deve ser inferior ou igual à integral de Joule necessária para aquecer o condutor desde a temperatura máxima para serviço contínuo até a temperatura limite de curto-circuito (ver tabela 29), o que pode ser indicado pela seguinte expressão:

$$\int_0^t i^2 dt \leq k^2 S^2$$

Onde:

$\int_0^t i^2 dt$: é a integral de Joule que o dispositivo de proteção deixa passar, em ampères quadrado-segundo;

$k^2 S^2$: é a 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 igual a:

115 para condutores de cobre com isolamento de PVC;

135 para condutores de cobre com isolamento de EPR e XLPE;

74 para condutores de alumínio com isolamento de PVC;

87 para condutores de alumínio com isolamento de EPR ou XLPE;

115 para as emendas soldadas a estanho nos condutores de cobre correspondendo a uma temperatura de 160°C;

S é a seção do condutor em milímetros quadrados.

NOTAS:

1 Para curtos-circuitos de qualquer duração, onde a assimetria da corrente não seja significativa, e para curtos-circuitos assimétricos de duração $0,1s \leq t \leq 5s$, pode-se escrever:

$$I^2 t \leq k^2 S^2$$

onde:

I corrente de curto-circuito presumida simétrica, em ampères;

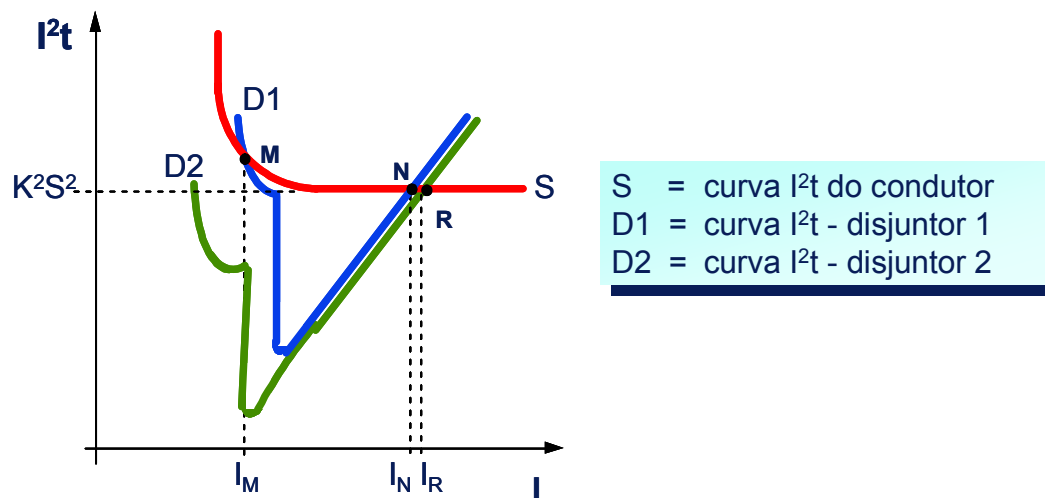
t duração, em segundos.

2 Outros valores de k , para os casos mencionados abaixo, ainda não estão normalizados:

- condutores de pequena seção (principalmente para seções inferiores a 10 mm²);
- curtos-circuitos de duração superior a 5 s;
- outros tipos de emendas nos condutores;
- condutores nus;
- condutores blindados com isolante mineral.

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

6.1 Proteção contra curto circuitos com disjuntores



6.2 Geradores de potência reduzida (de reserva).

Estes geradores não podem operar em paralelo com a rede mas podem ser ligados em paralelo entre eles. É necessária uma chave de transferência para separar da rede evitando o paralelismo com ela.

A proteção é feita por disjuntores com dispositivo de disparo eletrônico com as características:

- Proteção contra sobrecargas (L)
- Proteção contra curtos-circuitos com temporização (S)
- Proteção contra curto-circuito pleno (I)
- Proteção de falta à terra (G)

6.3 Capacitores

Os capacitores exigem disjuntores com uma capacidade de interrupção superior à corrente de curto-circuito disponível nos seus terminais.

É muito importante também a corrente de ligação quando há bancos de capacitores em paralelo. Para reduzir a corrente de ligação de bancos em paralelo devem ser usados resistores ou indutores.

Além da corrente de ligação de alta frequência devem ser considerados:

- as sobretensões de manobra que exigem maior capacidade do Dispositivo de Proteção contra Sobretensões (DPS)
- Manobras freqüentes

Os condutores dos circuitos com capacitores e os dispositivos de seccionamento devem ter I_N maior que a I_N do capacitor pelas seguintes razões:

- a tolerância na capacitância de $\pm 15\%$
- há um acréscimo da corrente pela variação da tensão inclusive a transitória e a contribuição das harmônicas.

Para os disjuntores os fabricantes recomendam um acréscimo de 50% em relação à corrente do capacitor, dando um total de 65%.

Como os capacitores suportam correntes de 1,3 x a corrente nominal, eles não são protegidos contra as sobrecargas. Estas só podem ocorrer na presença de harmônicas. Quando há uma combinação entre a capacitância do capacitor, a reatância do transformador e da linha é possível haver ressonância para alguma harmônica. Para evitar isso podem ser usadas duas alternativas:

- equipar os capacitores com indutores ou choques de modo a formar um circuito sintonizado para uma frequência de ressonância inferior à frequência da harmônica de ordem mais baixa,
- Introdução de filtros ressonantes para, eliminar as harmônicas existentes no circuito.

6.4 Transformadores

A proteção é feita somente para os transformadores não incluindo os condutores de ambos os lados.

Condições a serem verificadas:

- a proteção de sobrecarga deve limitar as sobrecargas aos valores toleráveis (30% a 40% ou 50%)
- se a falta for do lado da carga a proteção deve evitar danos ao transformador e deve ter a capacidade de interrupção adequada para esses casos.
- a corrente transitória de energização deve ser suportada pelo disjuntor.
- Baseado em exigência complementar com proteção contra faltas à terra.
- a I_R (corrente de ajuste) do disjuntor do secundário não deve exceder 125% da corrente secundária nominal do transformador; em casos especiais com instalação supervisionada, o disjuntor pode ter I_R de 250% da corrente secundária.

6.5 Transformadores BT/BT

- A proteção no primário, o disjuntor deve ser ajustado para 125% da corrente nominal do primário. Obs.: Se a corrente nominal for menor que 9A o ajuste será para 1,67 vezes a corrente nominal do primário.
- Com a proteção no secundário não há necessidade de proteção no primário se a proteção no secundário for ajustada para $1,25 \times I_{N(s)}$ ou se o alimentador do primário tiver proteção ajustada para até $2,5 \times I_{N(p)}$.

6.6 Proteção de linhas com minidisjuntores

Campo de aplicação

Esses disjuntores são usados para proteção contra curtos circuitos e sobrecargas de condutores em instalações elétricas e sistemas de distribuição. Nos sistemas TT e TN com desligamento por equipamento de proteção contra sobrecargas os minidisjuntores também evitam a permanência de tensões de toque elevadas no caso de faltas.

Estes disjuntores são também aplicados em ambientes industriais, em sistemas de distribuição em edifícios muito altos ou em aplicações comerciais para proteger partes de equipamentos elétricos e pequenas máquinas.

Os disjuntores para proteção de linhas têm disparadores fixos para cada corrente nominal. Por isso eles não são ideais para proteção de motores.

Os minidisjuntores até 63 A são apropriados para uso em sistemas até 240/415 V. Os minidisjuntores c.a./c.c. são adequados para sistemas até 440 V cc

6.7 Capacidade de interrupção

As classes de capacidade de interrupção são definidas na norma NBR IEC 898. “ 5.3.4.1 Os valores padronizados até 10.000 A são: 1500 A, 3000 A, 4500 A, 6000 A, 10.000 A e também 1000 A, 2000 A, 2500 A, 5000 A, 7500 A e 9000 A. Para valores acima de 10.000 até 25.000 A inclusive, o valor preferencial é 20.000 A.

Se a capacidade for maior que a capacidade de interrupção do mini - disjuntor é possível usar um fusível ou um outro disjuntor a montante que interromperá a corrente de curto-circuito. A energia I^2t que o fusível ou disjuntor deixa passar irá atuar o minidisjuntor. Para os disjuntores 5Sx a coordenação será feita obedecendo a tabelas fornecidas pelo fabricante.

Seletividade

Disjuntor a jusante			Disjuntor montante 3VF2											
	I _n (A)		16	20	25	32	40	45	50	63	70	80	90	100
		I > (A)	350	450	500	600	750	750	800	800	900	900	1000	1000
		I _{cn} (kA)	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
			Seletividade (kA)											
5SX1 Curva B	6	3	0.3	0.4	0.5	0.7	1	1	1	1	1.2	1.2	1.5	1.5
	10	3	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	1	1
	16	3		0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
	20	3			0.3	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
	25	3				0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
	32	3					0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
5SX1 Curva C	0.5	3	2.9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	1	3	2.9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	1.6	3	2.9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	2	3	2.9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	3	3	0.3	0.4	0.5	0.7	1	1	1	1	1.2	1.2	1.5	1.5
	4	3	0.3	0.4	0.5	0.7	1	1	1	1	1.2	1.2	1.5	1.5
	6	3	0.3	0.4	0.5	0.7	1	1	1	1	1.2	1.2	1.5	1.5
	8	3	0.2	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	1	1
	10	3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	1	1
	16	3		0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
	20	3			0.3	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
	25	3				0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
	32	3					0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
	40	3									0.7	0.7	0.7	0.7
	50	3									0.7	0.7	0.7	0.7
	63	3									0.7	0.7	0.7	0.7

7. Proteção com fusíveis

7.1 Proteção de condutores (cabos)

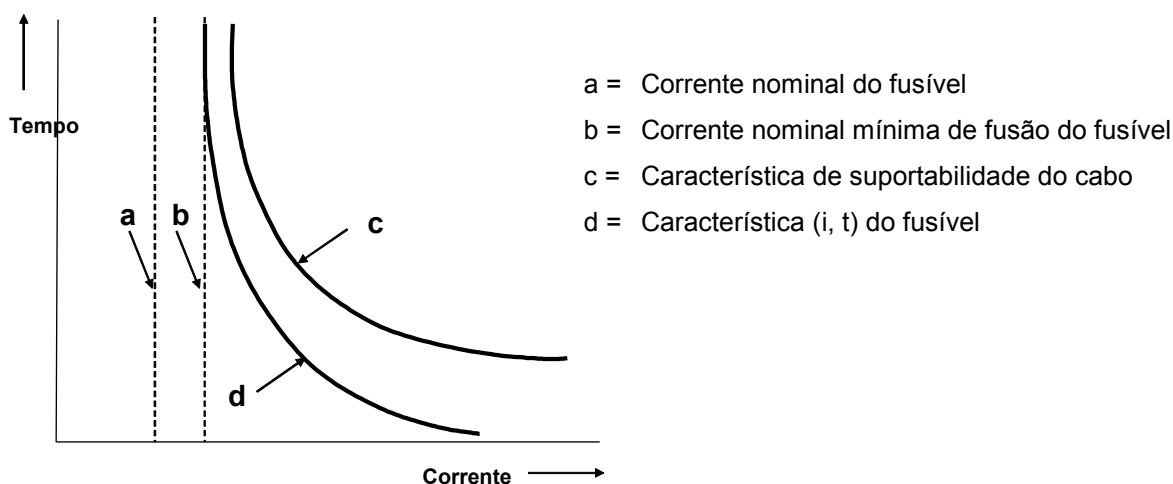
Para a proteção de cabos são usados fusíveis gG. A primeira condição é que a corrente nominal do fusível I_N seja maior ou igual à máxima corrente de carga que o cabo pode conduzir permanentemente no circuito onde está instalado. Por sua vez a corrente nominal do fusível deve ser menor ou igual à capacidade I_z de condução do cabo (máxima corrente que ele pode suportar permanentemente). Por breves intervalos de tempo, o cabo pode conduzir correntes maiores que a corrente I_z .

Sendo conhecida a curva de suportabilidade corrente-tempo do condutor, a proteção será suficiente se a curva de tempos máximos de fusão do fusível estiver à esquerda da curva do cabo.

Além disso, a I^2t de interrupção do fusível deve ser inferior ao I^2t suportável pelo cabo. A suportabilidade do cabo é dada pela expressão $K^2 S^2$, onde S é a seção transversal do cabo e K é uma constante padronizada pela NBR-5410:1997 em função da bitola do cabo, do material (cobre ou alumínio) e do isolamento (PVC...).

Para o tempo de 0,5 a 5 s vale a relação: $I^2t = K^2 S^2$

O gráfico da figura abaixo mostra a coordenação entre o fusível e o cabo



Por esse gráfico pode-se ver que a corrente b mínima de fusão do fusível deve ser somente um pouco menor que a corrente permanente suportável pelo cabo. Se o fusível tiver um fator de fusão (relação entre a corrente nominal de fusão e a corrente nominal) de 1,5 o cabo deveria conduzir permanentemente uma corrente 50% maior que a corrente nominal do fusível, o que eleva muito o custo da instalação. A vida da isolamento cai 50% cada vez que se eleva de 10°C a temperatura permanente do cabo. Levando em conta a relação custo/benefício, as normas de um modo geral especificam que a corrente mínima de operação do fusível (do DPCC de uma maneira geral) seja igual ou menor que 1,45 vezes a capacidade de condução de

corrente do cabo. A IEC 269-1 especifica, para um fusível gG, um ensaio para verificar se esses fusíveis são capazes de proteger os cabos para sobrecorrentes de longa duração.

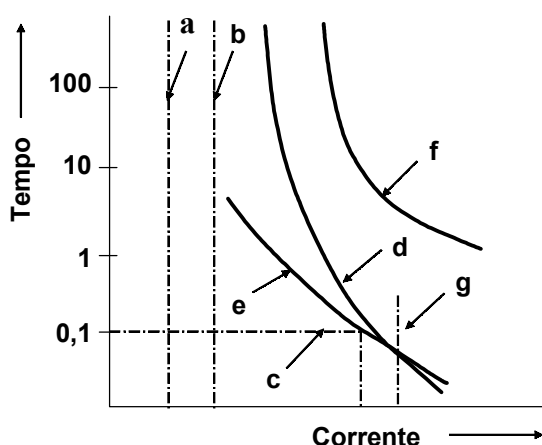
Para verificar a condição de energia, basta verificar se o I^2t do fusível para um tempo de referência de 5 s é menor que a energia suportável pelo cabo ($K^2 S^2$).

7.2 Proteção de transformadores

Os transformadores usados para baixar a tensão das redes de distribuição (13,8 kV a 34,5 kV) para a tensão de utilização (BT) são na maioria das vezes, protegidos por fusíveis em ambos os lados. Nas instalações industriais, os transformadores são protegidos por fusíveis na AT e por fusíveis ou disjuntores na BT.

A alimentação em média tensão pode ser feita por cabos ou por linhas aéreas e a posição dos fusíveis é diferente conforme o caso.

Os fusíveis instalados na entrada do transformador se destinam à proteção das falhas internas e os da saída, à proteção dos circuitos nas cargas (condutores e equipamentos). Se o esquema da distribuição for em malha no secundário, os fusíveis (os DPCCs) terão também que operar com as correntes provenientes dos transformadores em paralelo e isto exige que os fusíveis sejam capazes de suportar as correntes de curto da carga e também as correntes de retorno dos transformadores que estão em paralelo com o transformador com defeito.



Proteção de transformadores: o fusível não deve ser com a corrente magnetizante.

Onde:

- a = Corrente de plena carga
- b = Sobrecarga permissível
- c = Corrente magnetizante equivalente
- d = Fusível da AT
- e = Fusível da BT referido à AT
- f = Relé do disjuntor da fonte
- g = Máxima corrente na AT para falta na BT

7.3 Proteção de capacitores

Os capacitores representam um problema para os dispositivos de seccionamento e proteção principalmente no instante da energização, e especialmente se estiverem em bancos que vão sendo energizados à medida que aumentam as necessidades do sistema. As correntes de ligação ou energização atingem valores altíssimos (100 a $150 \times I_N$) que podem atuar os fusíveis ou causar a soldagem dos contatos dos disjuntores. A razão das altíssimas correntes de energização ou em caso de faltas é que nesses casos além da corrente fornecida pela fonte, surgirão outras componentes devidas às contribuições dos demais bancos de capacitores.

A aplicação dos fusíveis é feita segundo diferentes concepções nos diferentes países. Assim, alguns preferem instalar fusíveis em cada capacitor e outros preferem instalá-los em cada banco.

As correntes nominais dos fusíveis serão escolhidas de maneira que eles suportem as correntes transitórias de energização (inrush current) e as de carga e operem rapidamente no caso de falta nos bancos ou em alguma unidade.

Nas baixas tensões geralmente os capacitores são instalados em cada fase, enquanto nas médias e altas tensões a instalação é feita em bancos com a montagem em Δ ou em Y com neutro aterrado ou não. Para que os fusíveis não atuem quando ocorrem essas correntes, é preciso que a sua corrente nominal seja bem mais alta que a correspondente à corrente de carga dos capacitores.

Os fabricantes devem ser consultados sobre a melhor especificação da proteção para cada caso.

7.4 Proteção de semi-condutores

Os semicondutores têm pequena massa, baixa capacidade térmica e uma alta resistividade e portanto apresentam aquecimento interno limitando a corrente que eles podem conduzir. As sobretensões que um semicondutor pode suportar na direção inversa e as sobretensões transitórias limitadas a somente duas vezes o valor de crista da tensão de operação, também dificultam a proteção.

As condições a serem satisfeitas pelos fusíveis são [1]:

- quando um semi-condutor falhar a interrupção deve ser suficientemente rápida para evitar danos a outros semicondutores, pois o modo de falha usual é o curto-circuito o que causa altas correntes.
- em um equipamento que contém semicondutores as faltas em outras partes devem ser suprimidas antes que os semicondutores sejam danificados.
- as sobrecorrentes (acima de $4 I_N$) que possam causar danos devem ser interrompidas antes que ocorram os danos.

- a operação dos protetores não deve causar sobretensões perigosas em nenhum dos semicondutores do equipamento.

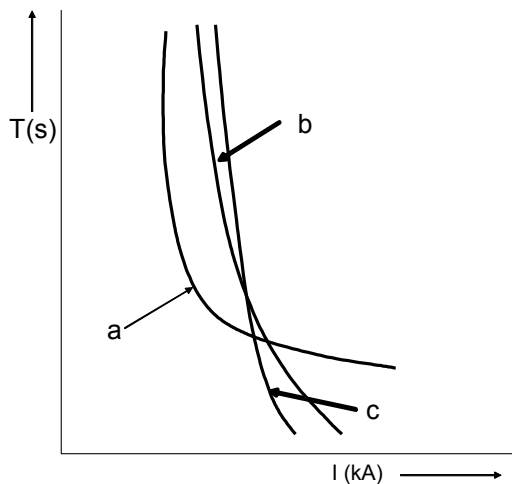
Para satisfazer a essas condições foram desenvolvidos fusíveis limitadores com tempo de cortes ainda menores.

O fusível deve estar conforme a norma IEC 269-4 que foi criada para cobrir os requisitos de desempenho dos fusíveis para esta aplicação.

Deve-se chamar a atenção para o fato de que os fusíveis sozinhos não oferecem uma proteção completa em toda faixa de sobrecorrentes, devido à diferença citada acima entre o aquecimento do condutor e o aquecimento das diferentes partes do semicondutor.

Os fusíveis são encarregados da proteção somente para as altas correntes de falta; a proteção para as correntes menores será proporcionada por outros DPCC que podem ser disjuntores (CA ou CC) ou tiristores.

Em um esquema típico de proteção, um disjuntor protege contra sobrecorrentes de baixo valor e longa duração e os fusíveis protegem contra as altas correntes que precisam ser interrompidas rapidamente.



Onde:

- a = curva característica de operação de um disjuntor
- b = curva característica de um diodo ou de um tiristor
- c = curva característica de um fusível limitador ultra-rápido

8. Coordenação entre DPCC

É possível coordenar:

- fusível com fusível ,
- disjuntor com disjuntor,
- fusível com disjuntor,
- fusível com contator ou
- disjuntor com contator.

Se a coordenação for em toda faixa de corrente nominais há coordenação completa.

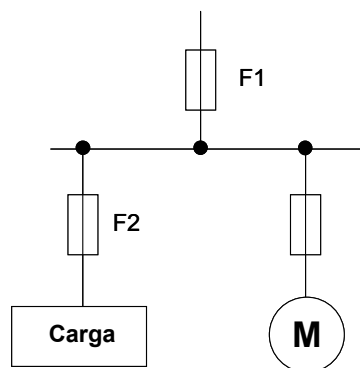
Se não for conseguido há coordenação parcial.

Para os fusíveis usar:

- Nas baixas correntes as curvas (i,t)
- Nas altas correntes os valores de I^2t , deixando uma margem de 40% .

8.1 Exemplo de circuito radial

Coordenação de um fusível principal e vários fusíveis alimentando cargas



Condições:

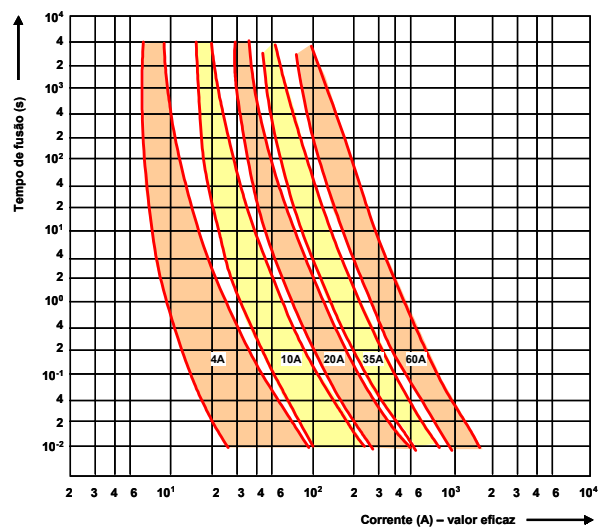
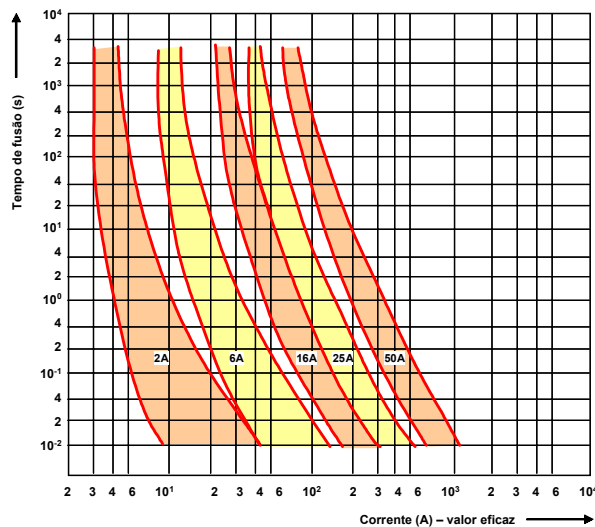
$I_N \text{ de F2} \leq I_N \text{ das cargas}$

$I_N \text{ de F1} > I_N \text{ de F2 e de } I_N \text{ de F3}$

Para correntes de faltas de baixo valor verificar pelas curvas (i,t) para tempos mínimos de fusão:

Se a curva de F2 ou de F3 ficar totalmente à esquerda da curva de F1 haverá coordenação.

Regra geral: Se as faixas de atuação dos fusíveis não se cruzarem, há coordenação:



Quando o tempo de pré-arco do fusível de corrente menor for inferior a 100 ms este tempo precisa ser levado em consideração.

Fazer a coordenação pelo I^2t e não pelos tempos de fusão.

Condição para uso de I^2t :

I^2t de pré-arco de F1 $\leq 1,4$ I^2t de interrupção de F2 ou de F3, porque há há possibilidade F2 ou F3 estarem frios e F1 quente e assim poderá não haver a coordenação.

As normas de instalação dão uma regra geral:

A corrente nominal do fusível principal deve ser 25% maior que a soma de todas as correntes nominais dos fusíveis das cargas.

8.2 Coordenação entre disjuntores

A coordenação entre os disjuntores pode ser por:

- degrau de corrente
- degrau de tempo

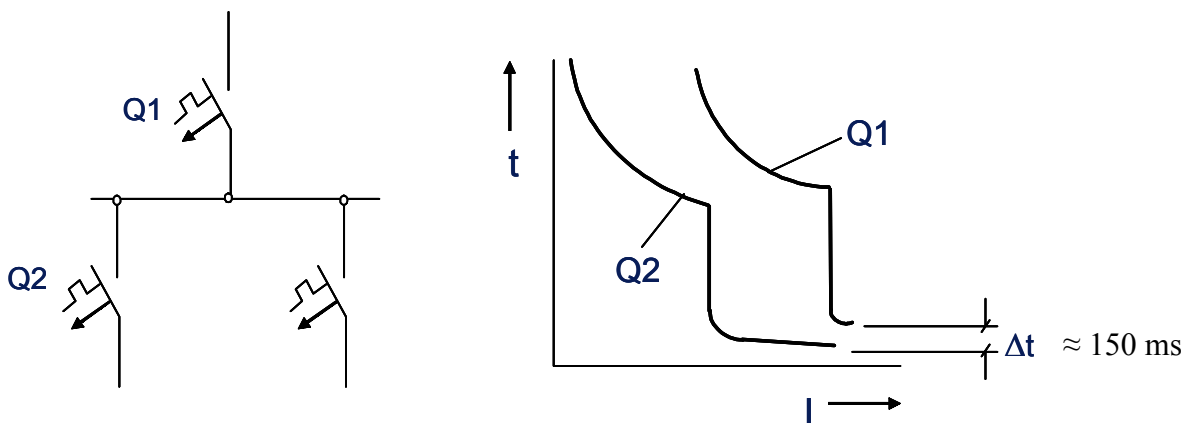
e pode ser total ou parcial.

A coordenação por degrau de corrente consiste em escolher para o disjuntor à jusante, uma corrente suficientemente menor que a do disjuntor a montante para que as curvas de atuação dos dois disjuntores não se cruzem. Isto deve acontecer desde a corrente mínima de atuação até a capacidade de interrupção.

Se as curvas se cruzarem em algum ponto a coordenação será parcial e a partir desse ponto os dois disjuntores poderão abrir simultaneamente.

A coordenação por degrau de tempo é obtida quando a atuação do disjuntor a montante é atrasada de um certo Δt . Também aqui a coordenação poderá ser parcial ou total.

É possível fazer também, uma coordenação combinada por degraus de corrente e de tempo: haverá uma diferença entre as correntes nominais e um degrau de tempo.



A coordenação pode ser feita através das tabelas que dão os limites de seletividade para diferentes curvas (por exemplo B, C, D) com disjuntores de mesmo tipo ou de tipo diferente ou ainda com fusíveis.

A seguir são apresentadas tabelas para mini disjuntores.

9. Comparação entre propriedades protetoras de disjuntores e fusíveis

Propriedade	Fusíveis	Disjuntores
Capacidade de Interrupção em c.a.	> 100 kA, 600 V	f(In, V, Construção) ¹⁾
Limitação de corrente	f(In, Ik)	f(In, V, Construção) ¹⁾
Espaço adicional para o arco	Nenhum	f(In, V, Construção) ¹⁾
Indicação externa de operacionalidade	Sim	Não
Segurança operacional	a um custo extra ²⁾	Sim
Chaveamento remoto	Não	Sim
Desligamento automático de todos os pólos	a um custo extra ³⁾	Sim
Possibilidade de indicação remota	a um custo extra ⁴⁾	Sim
Possibilidade de intertravamento	Não	Sim
Religamento depois de:		
Interrupção por sobrecarga	Não	Sim
Interrupção por curto-circuito	Não	f (condição)
Tempo morto depois de interrupção	Sim	f (condição)
Custos de manutenção	Não	f (nº de operações e condição)
Discriminação/ Seletividade	sem custo extra	a um custo extra
Substituição	Sim ¹⁾	mesma marca/ modelo
Proteção contra curto-circuito de:		
Cabos e condutores	Muito bom	Bom
Motores	Muito bom	Bom
Proteção contra sobrecarga:		
Cabos e condutores	Adequado	Bom
Motores	Inadequado	Bom

¹⁾ Construção pode se referir a: técnica de extinção do arco, resistência interna que garante suportabilidade aos curtos-circuitos, projeto mecânico.

²⁾ Por exemplo, com ajuda de chaves fusíveis de fechamento rápido, em caixas metálicas.

³⁾ Através de monitoração de fusíveis e um disjuntor associado.

⁴⁾ Através de monitoração de fusíveis.

⁵⁾ Desde que os tamanhos sejam padronizados.

SIEMENS

9.1 Anexos

9.2 Literatura Básica

[1] Siemens

Switching, Protection and Distribution in Low-Voltage Networks

Publicis MCD, 2^a Edição, 1994

[2] Willian D. Stevenson

Elementos de Análise de Sistemas de Potência

Ed. Mc Graw Hill do Brasil, 1975

[3] Ernesto João Robba

Introdução à Análise de Sistemas de Potência Editora da USP/ Editora Edgard Bluecher, 1975

9.3 Acrônimos

BT	Baixa Tensão
DPCC	Dispositivo de Proteção Contra Curtos-Circuitos (Disjuntor ou Fusível)
DPS	Dispositivos de Proteção Contra Sobreensões
MCB	Disjuntor Miniatura; disjuntor, proteção de retaguarda e seletividade (Software para)
MCCB	Disjuntor de caixa moldada (Molded case Circuit Breaker)
MT	Média Tensão
PCB	Disjuntor de potência
Pcc	Potência de Curto-Circuito
QGBT	Quadro Geral de baixa Tensão

9.4 Definições aplicáveis aos dispositivos de proteção:

Disjuntores e fusíveis

9.5 Disjuntores

Disjuntor

Dispositivo mecânico de manobra, capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais de operação e também estabelecer e conduzir por um intervalo especificado de tempo, correntes sob condições anormais específicas como aquelas resultantes de um curto-circuito.

Disjuntor seco

Aquele disjuntor cujos contatos principais operam ao ar sob pressão atmosférica.

Disjuntor de potência

Disjuntor aberto para elevadas correntes (PCB – Power Circuit Breaker)

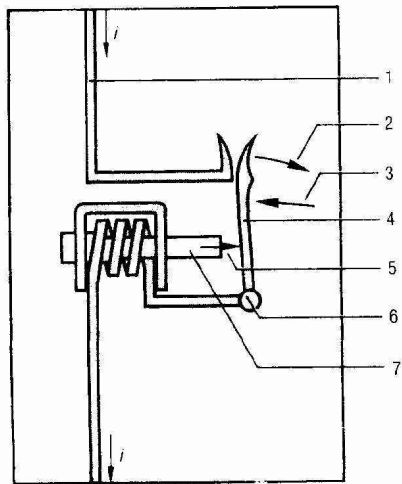
Disjuntor em caixa moldada (MCCB – Molded Case Circuit Breaker)

Disjuntor montado em caixa moldada em material isolante que o suporta e o encerra.

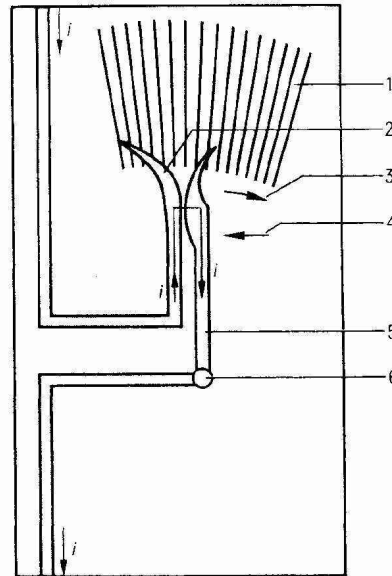
Disjuntor limitador de corrente

É aquele cujo tempo de interrupção é suficientemente curto para não deixar que a corrente de curto-circuito atinja seu valor de crista máximo.

Isto é conseguido em alguns tipos de disjuntores com a separação dos contatos pela força de repulsão devida à corrente de curto-circuito e a extinção do arco na câmara de extinção. A abertura definitiva dos contatos será dada pelo disparador. As figuras abaixo exemplificam alguns tipos de disjuntores limitadores.



- 1 Fixed contact assembly
- 2 Direction of repulsive force between contacts
- 3 Direction of force from contact pressure spring
- 4 Moving contact assembly
- 5 Direction of impact from moving armature
- 6 Hinge point of moving contact assembly
- 7 Moving armature



- 1 Arc-splitting plates
- 2 Fixed contact
- 3 Direction of repulsive force and contact lifting force
- 4 Direction of force from contact pressure spring
- 5 Moving contact arm
- 6 Hinge point of moving contact arm

Disjuntor extraível

Aquele que é montado em uma estrutura na qual pode ser movimentado entre as posições conectado, desconectado e de teste ou da qual pode ser retirado sem desparafusar conexões ou suportes de montagem.

Disjuntor termo-magnético

Disjuntor que possui um disparo que atua pelo efeito térmico de uma corrente de sobrecarga e um disparo instantâneo pelo efeito eletromagnético de uma corrente de curto-circuito. O disparo térmico geralmente é obtido por uma lâmina bimetálica e o instantâneo por uma solenóide.

Ambos podem ser substituídos por disparo de comando eletrônico.

Disjuntor com operação por energia acumulada

Disjuntor capaz de operar em determinada sequência de manobras usando a energia acumulada em seu mecanismo de comando sem intervenção externa. O mecanismo mais comum é o que acumula energia em molas e capaz de executar um conjunto de manobras desliga-liga-desliga sem necessidade de recarregar as molas.

Contatos auxiliares e de alarme

São os operados mecanicamente pelo disjuntor para sinalizar, intertravar ou outra finalidade.

Corrente de curto-circuito presumida

O valor eficaz de máxima corrente simétrica de curto-circuito que pode haver em um ponto de um circuito quando uma barra de impedância desprezível mantém um contato entre dois ou mais condutores do circuito.

Corrente presumida de um circuito em relação a um DPCC

Corrente que passaria pelo circuito se o disjuntor fosse substituído por uma barra de impedância desprezível. A corrente presumida de crista máxima é o valor de crista do primeiro meio ciclo de mais alto valor da corrente subtransitória. Se o disjuntor for multipolar o valor ocorre em um só dos pólos.

Capacidade nominal de Interrupção I_{cn}

Valor eficaz prospectivo da componente alternada da corrente simétrica de curto-circuito que o disjuntor é capaz de interromper sob a tensão nominal, frequência nominal e um valor especificado do fator de potência.

Capacidade nominal de interrupção máxima em curto-circuito I_{cu}

A maior corrente que um disjuntor pode interromper sob sua tensão nominal em um determinado ciclo de operação, e em uma seqüência de ensaios. É dada como o valor eficaz em kA, da corrente presumida.

Ciclo de operação

Uma seqüência de operações desliga-liga-desliga com intervalos pré determinados. **Para I_{cu} o ciclo de operação é:**

O – t – CO,

onde:

O operação de abertura;

CO operação liga - desliga sem intervalo de tempo intencional;

t intervalo mínimo de tempo para poder religar; o valor básico de t é de 3 minutos.

Nota: Para os disjuntores domiciliares a prescrição não inclui a necessidade de o disjuntor conduzir 0,85 vezes a sua corrente de não atuação pelo tempo convencional de não atuação.

Capacidade nominal de interrupção de curto-circuito em serviço I_{cs}

É a máxima corrente que o disjuntor é capaz de interromper executando o ciclo de operação:

O - t - CO - t – CO,

Nota: Para os disjuntores domiciliares a prescrição inclui a necessidade de o disjuntor conduzir 0,85 vezes a sua corrente de não atuação pelo tempo convencional de não atuação.

Relação entre I_{cu} e I_{cs}

Para a Categoria A: I_{cs} pode ser 25, 50, 75 ou 100% de I_{cu}

Para a categoria B: I_{cs} pode ser 50, 75, 100% de I_{cu}

SIEMENS

Categoria de utilização

Característica de um disjuntor que indica se ele é ou não destinado a ser utilizado em seletividade pelo uso de um retardo de tempo.

Categoria A

Aplica-se aos disjuntores não indicados para seletividade por retardo de tempo. Estes disjuntores não têm corrente suportável de curta duração.

Categoria B

Aplica-se aos disjuntores indicados para seletividade em curto-circuito por retardo de tempo em relação a outros disjuntores ou fusíveis.

Impedância dinâmica

Impedância do arco elétrico estabelecido quando da abertura do disjuntor para interrupção de uma corrente.

Tensão de operação nominal U_n

É a máxima tensão eficaz entre fases do circuito sob a qual o disjuntor pode executar seu ciclo nominal de operação.

Tensão de isolamento U_i

Tensão de referência para os ensaios de tensão aplicada durante 1 min. na sua frequência de operação.

Tensão suportável de impulso U_{imp}

O valor de crista de um impulso da forma $1,2/50 \mu s$ que o disjuntor pode suportar sob condições padronizadas de ensaio.

Corrente nominal I_n

Maior corrente que o disjuntor pode conduzir permanentemente sob a tensão nominal, sem que haja elevações de temperatura acima do valor especificado.

Corrente nominal de longa duração

Menor valor da corrente que provoca o desligamento do disjuntor após um intervalo de tempo superior a uma ou mais horas.

Corrente suportável de curta duração I_{cw}

Maior valor da corrente de curto-circuito que o disjuntor pode conduzir durante 1s sem que haja disparo do seu mecanismo de operação. Para outros intervalos de tempo, aplicar a relação:

$I^2 t = \text{Constante.}$

SIEMENS

Mecanismo motorizado

Dispositivo acionado por um motor elétrico de controle e comando usado para fechar, abrir ou religar um disjuntor.

Tamanho da estrutura (frame size)

É a dimensão de uma estrutura caracterizada por um valor em ampères que corresponde ao disjuntor de maior corrente nominal do grupo de disjuntores que pode ser encaixado na referida estrutura.

Integral quadrática da corrente ($I^2 t$)

Uma expressão relacionada com a energia resultante da passagem da corrente em condições adiabáticas.

A equação correspondente é: $I^2 t = \int I^2 dt$

e a unidade é ampère quadrado-segundo (A^2s).

Disparo instantâneo

Valor nominal da corrente de ajuste do disjuntor para disparar sem nenhum retardo.

Disparo à tempo inverso

Variação do retardo de disparo do disjuntor inversamente proporcional ao valor da sobrecorrente.

Disparo com curto retardo

Disparo com temporização do disjuntor para permitir a coordenação (seletividade) entre disjuntores instalados em série em um circuito pelo disparo do elemento de disparo instantâneo.

Sobrecorrente

Qualquer corrente maior que a corrente nominal, resultante de sobrecarga ou curto-circuito.

Sobrecarga

Sobrecorrente de valor pouco acima da corrente nominal e que provoca a operação do disparo térmico de um disjuntor.

Corrente prospectiva

Corrente que passará no local em que o disjuntor vai ser instalado quando ele é substituído por uma barra de impedância desprezível.

Redução da corrente de curto-circuito por reatores, fusíveis de back-up ou associação de disjuntores

Quando a corrente de curto-circuito é muito alta e há vantagem em reduzi-la para diminuir os custos dos disjuntores de alta capacidade de interrupção é possível intercalar, em série com a fonte, uma reatância que limite a corrente a um valor inferior ao da corrente nominal de interrupção do disjuntor disponível ou

economicamente viável. Estes reatores são geralmente de núcleo de ar e são reforçados com resina epoxy ou poliéster, para suportar os efeitos mecânicos da corrente de curto-circuito.

Para o cálculo a indutância do reator será incluída junto da fonte no circuito e a resistência será desprezada.

Outra solução mais econômica é o emprego de fusíveis limitadores de alta capacidade (fusíveis de back up) interrompendo a corrente em um valor adequado para a capacidade do disjuntor. O inconveniente do ponto de vista da continuidade da operação é que ambos os protetores atuarão: o fusível atuará antes, mas a 1ª vez que ele deixa passar fará o disjuntor desligar também.

É possível ainda usar um disjuntor de menor corrente de interrupção a jusante, dimensionado para operar simultaneamente como o disjuntor principal de maior capacidade. Aqui também será perdida a continuidade de operação já que as outras cargas também serão desligadas.

9.6 Fusíveis

Fusível

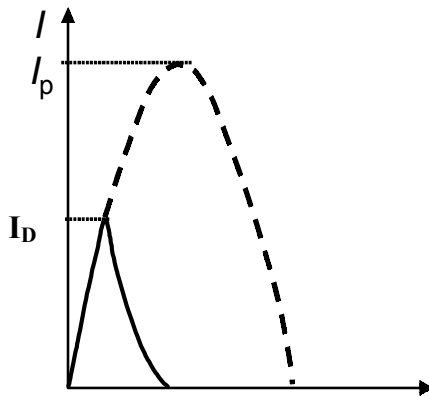
É um dispositivo de proteção que, pela fusão de um ou mais de componentes especialmente projetados e dimensionados, abre o circuito no qual está inserido e interrompe a corrente quando esta superar um dado valor por um dado intervalo de tempo. O fusível compreende todas as partes, a saber: a base, o corpo, os terminais, o elo fusível, o porta-fusível, e o material que extingue o arco.

Tensão nominal U_n

É o valor eficaz da máxima tensão sob a qual é garantida a operação correta do fusível, isto é, a tensão sob a qual ele é capaz de interromper uma dada corrente em condições especificadas de ensaio. É também a tensão marcada no fusível e atribuída a ele pelo fabricante.

Corrente nominal I_n

É o valor eficaz da máxima corrente que pode passar permanentemente pelo fusível sem causar sua operação ou aquecimentos de seus componentes acima do valor especificado pelas normas. É também o valor da corrente marcada no fusível e atribuída a ele pelo fabricante.



Corrente prospectiva I_p

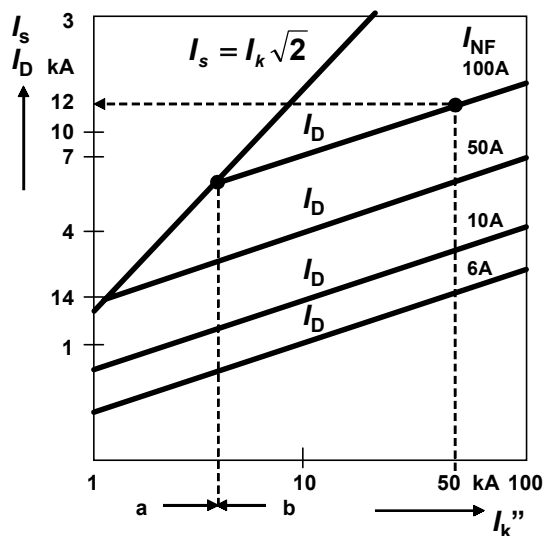
É o valor de crista da corrente que seria atingido se um fusível do tipo limitador não tivesse operado e cortado a corrente antes do seu valor de crista.

Corrente de corte I_D

É o valor máximo atingido pela corrente antes da fusão do elo fusível.

Característica de corte dos fusíveis: é a um gráfico que permite conhecer para cada corrente de curto-circuito:

- para cada corrente nominal, a partir de que sobrecorrente ele é limitador
- o valor da corrente de corte, para cada sobrecorrente em que ele é limitador



Onde:

I_N = Corrente Nominal do fusível

I_D = Corrente de corte

a = Não limitador de corrente

b = Limitador de corrente

Corrente mínima de fusão

É a menor corrente que provoca a operação do fusível em um tempo longo (1 a 4 horas).

Faixa de interrupção

Indica a possibilidade de um fusível conduzir correntes especificadas sem danos e ser capaz de interromper as sobrecorrentes em uma faixa específica (faixa de capacidade de interrupção). É indicada pela primeira letra da designação:

Fusíveis “g”

Fusíveis que podem, conduzir continuamente correntes até ao menos sua corrente nominal e têm a capacidade de interromper correntes desde a mínima corrente de fusão até a máxima capacidade de interrupção (faixa completa).

Fusíveis “a”

Fusíveis que podem conduzir continuamente correntes até a sua corrente nominal e interromper correntes acima de um valor múltiplo especificado da sua corrente nominal até a sua capacidade nominal de interrupção.

Classes de utilização

É a designação da classe de utilização de um fusível em conjunto com o objeto a ser protegido. Podem ser (pela norma DIN / VDE) para as diferentes aplicações:

gR: semicondutores.

gG: aplicação geral

gB: instalações de mineração

aR: semicondutores ($I_{int} \geq 2,7 I_n$)

gL: condutores (fios e cabos)

aM: motores ($I_{int} \geq 4 I_n$)

gTR: transformadores

Pela norma IEC 269/NBR as designações e aplicações são um pouco diferentes, embora haja uma certa correspondência, conforme tabela que segue.

Basicamente os fusíveis de uso geral da IEC correspondem aos de faixa completa da VDE e os de retaguarda da IEC correspondem aos de faixa parcial da VDE.

Corrente permanente	Corrente de interrupção	Características	Observações
Fusíveis de uso geral			
I_n	$\geq I_{min}$	gI	1) Destina-se às tensões (U_n) de 220, 380, 500, 660 VCA. 2) Corresponde à “gL” da VDE
		gII	3) Destina-se às tensões (U_n) de 120, 208, 240, 277, 415, 480, 600 VCA 4) Até $I_n = 50A$, fusíveis gII são mais rápidos que fusíveis gI. 5) De 100 a 1000A (I_n), as características gI e gII são iguais. 6) Para aplicações domésticas, as capacidades de interrupção de fusíveis gI e gII diferem.
Fusíveis de retaguarda			
I_n	$\geq k I_n$	aM	7) Corresponde à “aM” da VDE 8) Proteção apenas contra curto-circuito, Se necessário, associar, por ex., a um relé de sobrecarga 9) Fator $k1$, por ex. = 4 (v. IEC)

I_{min} = Corrente mínima de fusão

Nota: Há um projeto de revisão da norma IEC 60269 e também da correspondente NBR.

Capacidade nominal de interrupção

A maior corrente prospectiva que o fusível é capaz de interromper sob condições especificadas e sob 110% da tensão nominal.

Integral quadrática I^2t

É a integral do quadrado da corrente em um dado intervalo de tempo:

$$I^2t = \int_{t_0}^{t_1} i^2 dt$$

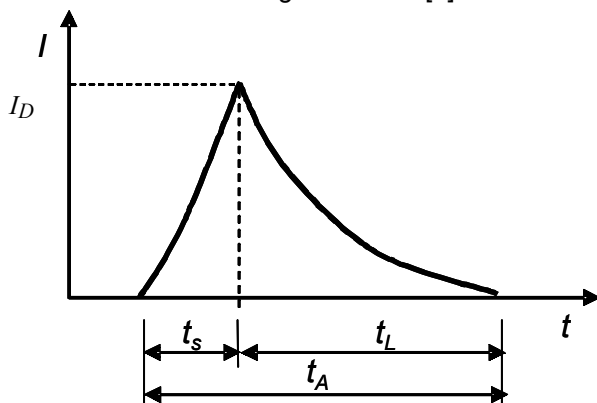
São considerados três valores:

- **Integral quadrática de pré-arco ou de fusão** na qual t_0 é o instante inicial da corrente de curto circuito e t_1 é o instante em que se completa a fusão do elo fusível.
- **Integral quadrática do arco** na qual t_0 é o instante em que se completa a fusão do elo fusível e t_1 é o instante em que o arco é extinto.
- **Integral quadrática de interrupção** na qual t_0 é o instante em que se inicia o curto circuito e t_1 é o instante em que o arco é extinto.

A última é aproximadamente a soma das outras duas:

$$I^2t_A \cong I^2t_s + I^2t_L$$

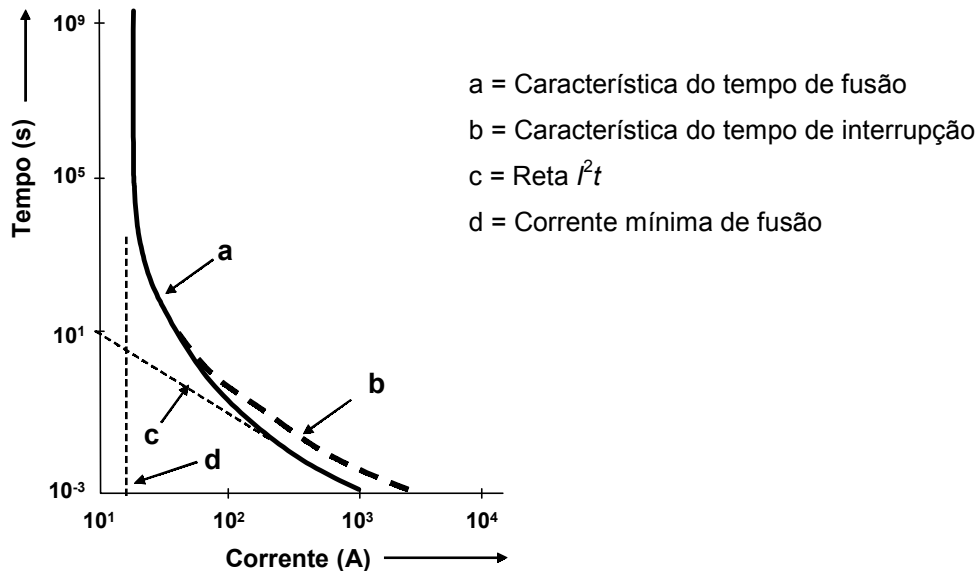
conforme mostrado na figura abaixo [5]



I_D = Corrente de corte
 t_s = Tempo de pré-arco
 t_L = Tempo de arco
 t_A = Tempo de interrupção

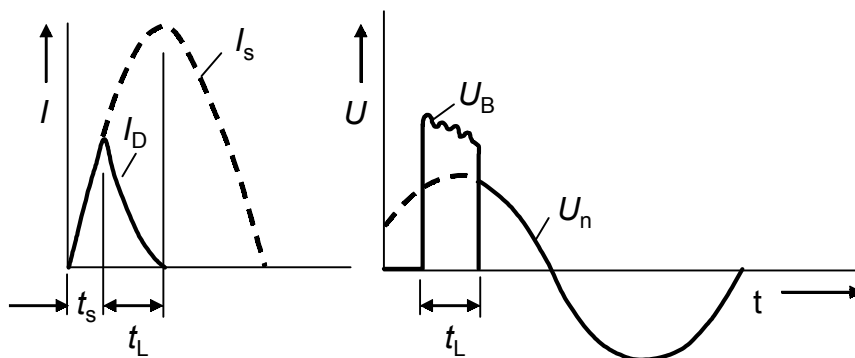
Característica tempo-corrente

É a curva que fornece o tempo virtual de pré-arco em função da corrente prospectiva.



Tensão de arco U_s (de crista)

É a máxima tensão que ocorre entre os terminais do fusível durante a ocorrência do arco (intervalo de tempo t_c ou t_L).



onde:

- I_s Corrente de impulso de curto-circuito
- I_D Corrente de corte
- t_s Tempo de fusão
- t_L Tempo de arco
- U_B Tensão de arco

Tensão de recuperação V_w

É o valor eficaz da tensão que aparece entre os terminais do fusível após a interrupção da corrente.

Fábrica**São Paulo:**

Rua Cel. Bento Bicudo, 111
Lapa 05069-900

Tel. (55 11) 3833-4511

Fax (55 11) 3833-4655

Vendas**Belo Horizonte:**

Tel. (55 31) 3289-4400

Fax (55 31) 3289-4444

Brasília:

Tel. (55 61) 348-7600

Fax (55 61) 348-7639

Campinas:

Tel. (55 19) 3754-6100

Fax (55 19) 3754-6111

Curitiba:

Tel. (55 41) 360-1171

Fax (55 41) 360-1170

Fortaleza:

Tel. (55 85) 261-7855

Fax (55 85) 244-1650

Porto Alegre:

Tel. (55 51) 3358-1818

Fax (55 51) 3358-1714

Recife:

Tel. (55 81) 3461-6200

Fax (55 81) 3461-6276

Rio de Janeiro:

Tel. (55 21) 2583-3379

Fax (55 21) 2583-3474

Salvador:

Tel. (55 71) 340-1421

Fax (55 71) 340-1433

São Paulo:

Tel. (55 11) 3817-3000

Fax (55 11) 3817-3071

Produtos e Sistemas Industriais,
Prediais e Automação Siemens
Central de Atendimento Siemens
Tel. 0800-119484

e-mail: atendimento@siemens.com.br

www.siemens.com.br