

5

Curto-circuito nas instalações elétricas

5.1 Introdução

A determinação das correntes de curto-circuito nas instalações elétricas de baixa e alta tensões de sistemas industriais é fundamental para a elaboração do projeto de ajuste das proteções e coordenação dos seus diversos elementos.

Os valores dessas correntes são baseados no conhecimento das impedâncias, desde o ponto de defeito até a fonte geradora.

As correntes de curto-circuito adquirem valores de grande intensidade, porém com duração geralmente limitada a frações de segundo. São provocadas mais comumente pela perda de isolamento de algum elemento energizado do sistema elétrico. Os danos provocados na instalação ficam condicionados à intervenção correta dos elementos de proteção. Os valores de pico estão, normalmente, compreendidos entre 10 e 100 vezes a corrente nominal no ponto de defeito da instalação e dependem da localização deste.

Além das avarias provocadas com a queima de alguns componentes da instalação, as correntes de curto-circuito geram solicitações de natureza mecânica, atuando, principalmente, sobre os barramentos, chaves e condutores, ocasionando o rompimento dos apoios e deformações na estrutura dos quadros de distribuição, caso o dimensionamento destes não

seja adequado aos esforços eletromecânicos resultantes.

É considerado como fonte de corrente de curto-circuito todo o componente elétrico ligado ao sistema que passa a contribuir com a intensidade da corrente de defeito, como é o caso dos geradores, condensadores síncronos e motores de indução. Erroneamente, muitas vezes é atribuído ao transformador a propriedade de *fonte de corrente de curto-circuito*. Na realidade, este equipamento é apenas um componente de elevada impedância inserido no sistema elétrico.

5.2 Análise das correntes de curto-circuito

Será feita inicialmente a análise sintética das formas de onda que caracterizam as correntes de curto-circuito, seguindo-se de um estudo que demonstra a influência dos valores das correntes de defeito em função da localização das fontes supridoras, para finalmente se proceder a uma análise de composição das ondas referidas e sua consequente formulação matemática simplificada.

Os curtos-circuitos podem ser do tipo franco, quando o condutor de fase faz contato direto com uma massa metálica aterrada, ou do tipo a arco, quando a corrente da fase circula através de um arco elétrico (condutor gasoso) para qualquer uma das fases ou para a terra. Os curtos-circuitos do tipo franco resultam as maiores correntes circulando no sistema.

Há curtos-circuitos em que a corrente é igual ou inferior à corrente de carga. São denominados curtos-circuitos de alta impedância para a terra.

Quando a corrente de curto-circuito é muito elevada, é conveniente reduzir seu valor a níveis compatíveis com os disjuntores e demais equipamentos instalados no sistema. No caso de curtos-circuitos trifásicos, a melhor forma de reduzir a corrente é introduzir nos condutores de fase um reator-série com o valor da impedância que limite essa corrente no valor

desejado. Para reduzir as correntes de curto-circuito fase-terra em sistema com tensão até 34,50 kV é usual o emprego de resistor de aterramento, que nada mais é do que uma resistência conectada em série com o ponto neutro do transformador. Podem-se utilizar também reatores em vez de resistores de aterramento. Esses reatores são normalmente fabricados com núcleo a ar e reforçados com poliéster ou fibra de vidro para que suportem os esforços eletromecânicos das correntes de defeito.

5.2.1 Análise das formas de onda das correntes de curto-circuito

As correntes de curto-circuito ao longo de todo o período de permanência da falta assumem formas diversas quanto à sua posição em relação ao eixo dos tempos:

a) Corrente simétrica de curto-circuito

É aquela em que o componente senoidal da corrente se forma simetricamente em relação ao eixo dos tempos. Conforme a [Figura 5.1](#), esta forma de onda é característica das correntes de curto-circuito permanentes. Devido ao longo período em que esta corrente se estabelece no sistema, ela é utilizada nos cálculos a fim de determinar a capacidade que devem possuir os equipamentos para suportar os efeitos térmicos correspondentes, cujo estudo será posteriormente efetuado.

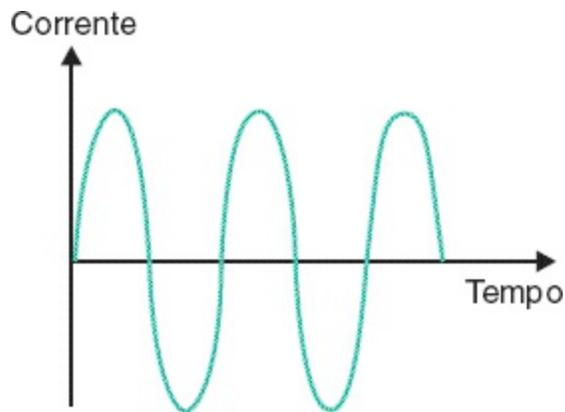


Figura 5.1 Corrente simétrica de curto-circuito.

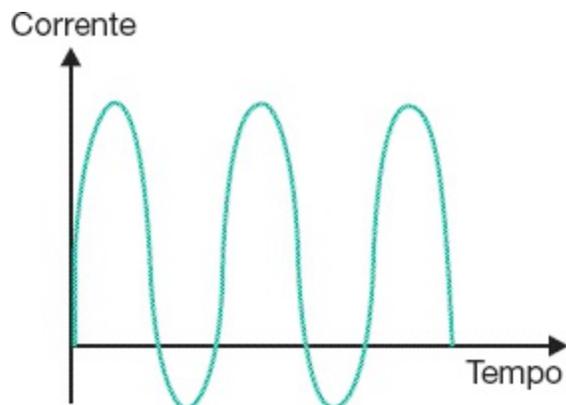


Figura 5.2 Corrente parcialmente assimétrica.

b) Corrente assimétrica de curto-circuito

É aquela em que o componente senoidal da corrente se forma de maneira assimétrica em relação ao eixo dos tempos e pode assumir as seguintes características:

- Corrente parcialmente assimétrica

Neste caso, a assimetria é de forma parcial, conforme a [Figura 5.2](#).

- Corrente totalmente assimétrica

Neste caso, toda a onda senoidal se situa acima do eixo dos tempos, conforme a [Figura 5.3](#).

- Corrente inicialmente assimétrica e posteriormente simétrica

Neste caso, nos primeiros instantes de ocorrência do defeito, a corrente de curto-circuito assume a forma assimétrica para, em seguida, devido aos efeitos atenuantes, adquirir a forma simétrica, conforme a [Figura 5.4](#).

5.2.2 Localização das fontes das correntes de curto-circuito

Serão analisados dois casos importantes nos processos de curto-circuito. O primeiro refere-se aos defeitos ocorridos nos terminais do gerador ou muito próximos a ele, em que a corrente apresenta particularidades próprias em diferentes estágios do processo, e o segundo refere-se aos defeitos ocorridos longe dos terminais do gerador, que é o caso mais comum das plantas industriais, normalmente localizadas muito distantes dos parques geradores que, no Brasil, são em sua grande maioria hidráulicos.

5.2.2.1 Curto-circuito nos terminais dos geradores

A principal fonte das correntes de curto-circuito são os geradores. No gerador síncrono, a corrente de curto-circuito, cujo valor inicial é muito elevado, mas que vai decrescendo até alcançar o regime permanente. Assim, pode-se afirmar que o gerador é dotado de uma reatância interna variável, compreendendo inicialmente uma reatância pequena até atingir o valor constante, quando o gerador alcança seu regime permanente. Para analisar os diferentes momentos das correntes de falta nos terminais do gerador é necessário conhecer o comportamento dessas máquinas quanto às reatâncias limitadoras, conceituadas como reatâncias positivas. Essas reatâncias são referidas à posição do rotor do gerador em relação ao estator. Nos casos estudados neste livro, as reatâncias mencionadas referem-se às *reatâncias do eixo direto*, cujo índice da variável é “d”, situação em que o eixo do enrolamento do rotor e do estator coincidem, ou seja:

a) **Reatância subtransitória (X''_d)**

Também conhecida como reatância inicial, compreende a reatância de dispersão dos enrolamentos do estator e do rotor do gerador, na qual se incluem as influências das partes maciças rotóricas e do enrolamento de amortecimento, limitando a corrente de curto-circuito no seu instante inicial, isto é, para $t = 0$. O seu efeito tem duração média de 50 ms, que corresponde à constante de tempo transitória (T_d). O seu valor é praticamente o mesmo para curtos-circuitos trifásicos, monofásicos e fase e terra.

A reatância subtransitória apresenta as seguintes variações:

- Para geradores hidráulicos: de 18 a 24 % na base da potência e tensão nominais dos geradores dotados de enrolamento de amortecimento.
- Para turbogeradores: de 12 a 15 % na base da potência e tensão nominais dos geradores.

b) **Reatância transitória (X'_d)**

Também conhecida como reatância total de dispersão, compreende a reatância de dispersão dos enrolamentos do estator e da excitação do gerador, limitando a corrente de curto-circuito, depois de cessados os efeitos da reatância subtransitória. O seu efeito tem duração varável entre 1.500 e 6.000 ms, que corresponde à constante de tempo transitória (T'_d). Os valores inferiores correspondem à constante de tempo de máquinas hidráulicas e os valores superiores aos de turbogeradores. O seu valor varia para curtos-circuitos trifásicos, monofásicos e fase-terra.

A reatância transitória apresenta as seguintes variações:

- Para geradores hidráulicos: de 27 a 36 % na base da potência e tensão nominais dos geradores dotados de enrolamento de amortecimento.
- Para turbogeradores: de 18 a 23 % na base da potência e tensão

nominais dos geradores.

Como um valor médio a ser adotado, pode-se admitir a reatância transitória como 150 % do valor conhecido da reatância subtransitória do gerador.

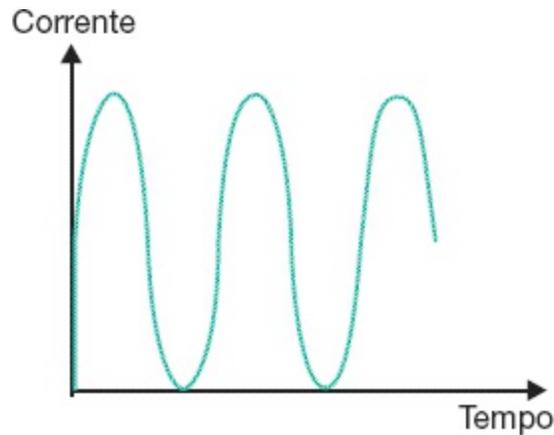


Figura 5.3 Corrente totalmente assimétrica.

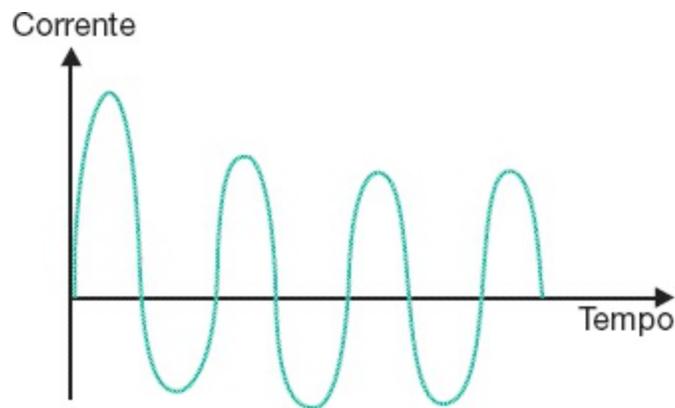


Figura 5.4 Corrente assimétrica e simétrica.

c) Reatância síncrona (X_d)

Compreende a reatância total dos enrolamentos do rotor do gerador, isto é, a reatância de dispersão do estator e a reatância de reação do rotor, limitando a corrente de curto-circuito, após cessados os efeitos da reatância transitória, iniciando-se aí a parte permanente de um ciclo completo da corrente de falta.

O seu efeito tem duração variável entre 100 e 600 ms, que corresponde à constante de tempo transitória (T_d), e depende das características amortecedoras dos enrolamentos do estator dado pela relação entre sua reatância e resistência e das reatâncias e resistências da rede conectada ao gerador.

A reatância subtransitória apresenta as seguintes variações:

- Para geradores hidráulicos: de 100 a 150 % na base da potência e tensão nominais dos geradores.
- Para turbogeradores: de 120 a 160 % na base da potência e tensão nominais dos geradores.

A [Figura 5.5](#) mostra graficamente a reação do gerador nos três estágios mencionados.

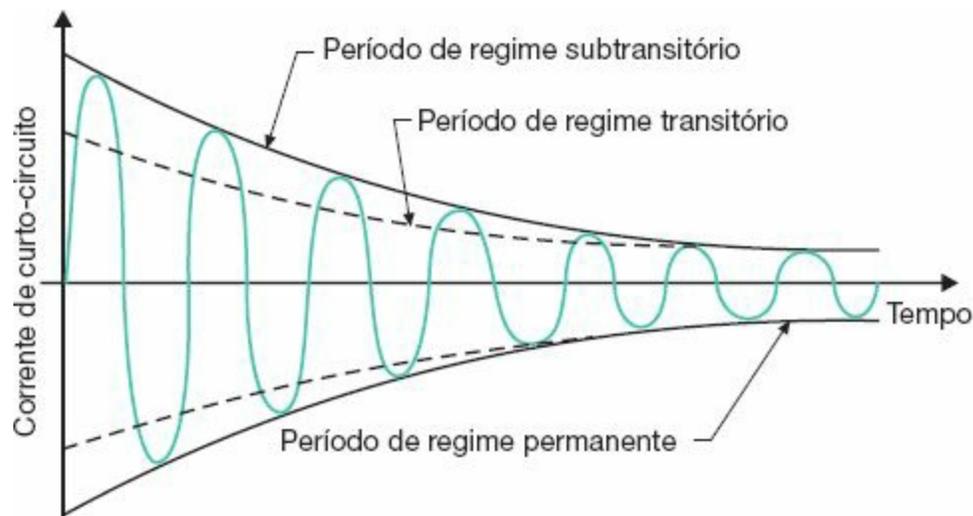


Figura 5.5 Corrente de curto-circuito nos terminais do gerador.

5.2.2.2 *Curto-circuito distante dos terminais do gerador*

Com o afastamento do ponto de curto-circuito dos terminais do gerador, a impedância acumulada das linhas de transmissão e de distribuição é tão grande em relação às impedâncias do gerador que a corrente de curto-circuito

simétrica já é a de regime permanente acrescida apenas do componente de corrente contínua. Neste caso, a impedância da linha de transmissão predomina sobre as impedâncias do sistema de geração, eliminando sua influência sobre as correntes de curto-circuito decorrentes. Assim, nas instalações elétricas alimentadas por fontes localizadas distantes, a corrente alternada de curto-circuito permanece constante ao longo do período, conforme se mostra na [Figura 5.6](#). Neste caso, a corrente inicial de curto-circuito é igual à corrente permanente. Ao longo deste livro será sempre considerada esta hipótese.

A corrente de curto-circuito assimétrica apresenta dois componentes na sua formação, ou seja:

- Componente simétrico

É a parte simétrica da corrente de curto-circuito.

- Componente contínuo

É a parte da corrente de curto-circuito de natureza contínua.

O componente contínuo tem valor decrescente e é formado em virtude da propriedade característica do fluxo magnético que não pode variar bruscamente, fazendo com que as correntes de curto-circuito nas três fases se iniciem a partir do valor zero.

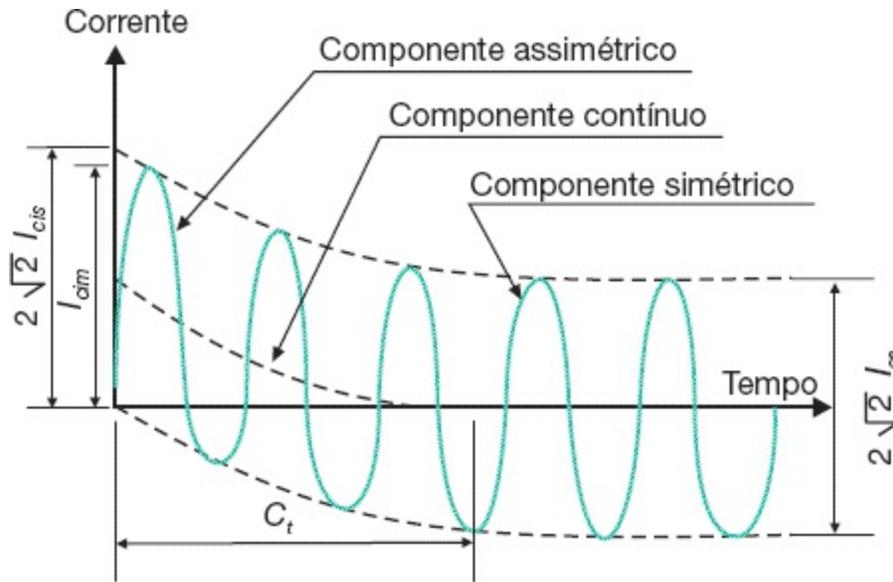


Figura 5.6 Componentes de uma corrente de curto-circuito.

A qualquer instante, a soma desses dois componentes mede o valor da corrente assimétrica. A [Figura 5.6](#) mostra graficamente os componentes de uma onda de corrente de curto-circuito.

Com base nas curvas da [Figura 5.6](#) podem-se expressar os conceitos fundamentais que envolvem a questão:

a) Corrente alternada de curto-circuito simétrica

É o componente alternado da corrente de curto-circuito que mantém em todo o período uma posição simétrica em relação ao eixo do tempo.

b) Corrente eficaz de curto-circuito simétrica permanente (I_{cs})

É a corrente de curto-circuito simétrica, dada em seu valor eficaz, que persiste no sistema, após decorridos os fenômenos transitórios.

c) Corrente eficaz inicial de curto-circuito simétrica (I_{cis})

É a corrente, em seu valor eficaz, no instante do defeito. O gráfico da [Figura 5.6](#) esclarece a obtenção do valor de I_{cis} em seus vários aspectos. Quando o

curto-circuito ocorre longe da fonte de suprimento, o valor da corrente eficaz inicial de curto-circuito simétrica (I_{cis}) é igual ao valor da corrente eficaz de curto-circuito simétrica (I_{cs}), conforme se mostra na mesma figura.

d) Impulso da corrente de curto-circuito (I_{cim})

É o valor máximo da corrente de defeito, dado em seu valor instantâneo, e que varia conforme o momento da ocorrência do fenômeno.

e) Potência de curto-circuito simétrica (P_{cs})

É a potência correspondente ao produto de tensão de fase pela corrente simétrica de curto-circuito. Se o defeito for trifásico, aplicar a este fator $\sqrt{3}$. Observar, no entanto, que a tensão no momento do defeito é nula, porém a potência resultante é numericamente igual ao que se definiu antes.

5.2.3 Formulação matemática das correntes de curto-circuito

Como se observa, as correntes de curto-circuito apresentam uma forma senoidal, cujo valor em qualquer instante pode ser dado pela Equação (5.1).

$$I_{cc(t)} = \sqrt{2} \times I_{cs} \times [\text{sen}(\omega t + \beta - \theta) - e^{-t/C_t} \times \text{sen}(\beta - \theta)] \quad (5.1)$$

$I_{cc(t)}$ - valor instantâneo da corrente de curto-circuito, em determinado instante t ;

I_{cs} - valor eficaz simétrico da corrente de curto-circuito;

t - tempo durante o qual ocorreu o defeito no ponto considerado, em s;

C_t - constante de tempo, dada pela Equação (5.2):

$$C_t = \frac{X}{2 \times \pi \times F \times R} \text{(s)} \quad (5.2)$$

β - deslocamento angular, em graus elétricos ou radiano, medido no sentido positivo da variação dv/dt , a partir de $V = 0$, até o ponto $t = 0$ (ocorrência do defeito).

A [Figura 5.7](#) mostra a contagem do ângulo β , que é nulo quando a ocorrência do defeito se dá no ponto nulo da tensão do sistema, ou seja, [Figura 5.7\(a\)](#). Quando o defeito ocorre no ponto em que a tensão está em seu valor máximo, como na [Figura 5.7\(b\)](#), o valor de $\beta = 90^\circ$.

θ - ângulo que mede a relação entre a reatância e a resistência do sistema e tem valor igual a:

$$\theta = \arctg\left(\frac{X}{R}\right) \quad (5.3)$$

R - resistência do circuito, desde a fonte geradora até o ponto de defeito, em Ω ou pu ;

X - reatância do circuito, desde a fonte geradora até o ponto de defeito, em Ω ou pu ;

ωt - ângulo de tempo;

F - frequência do sistema, em Hz.

O primeiro termo da Equação (5.1), ou seja, $\sqrt{2} \times I_{cs} \times \text{sen}(\omega t + \beta - \theta)$, representa o valor simétrico da corrente alternada da corrente de curto-circuito de efeito permanente. Por outro lado, o segundo termo da Equação (5.1), isto é, $\sqrt{2} \times I_{cs} \times e^{-t/C_t} \times \text{sen}(\beta - \theta)$, representa o valor do componente contínuo.

Com base na Equação (5.1) e nas [Figuras 5.7\(a\)](#) e (b), podem ser feitas as seguintes observações:

- Nos circuitos altamente indutivos, em que a reatância X é extremamente superior à resistência R , a corrente de curto-circuito é constituída de seu componente simétrico, e o componente contínuo ou transitório atinge seu valor máximo quando o defeito ocorrer no

instante em que a tensão está passando pelo seu valor nulo [(Figura 5.7(a))]. Neste caso, tem-se:

$$\text{Para } X \gg R \rightarrow \theta = \arctg\left(\frac{X}{R}\right) \rightarrow \theta \approx 90^\circ$$

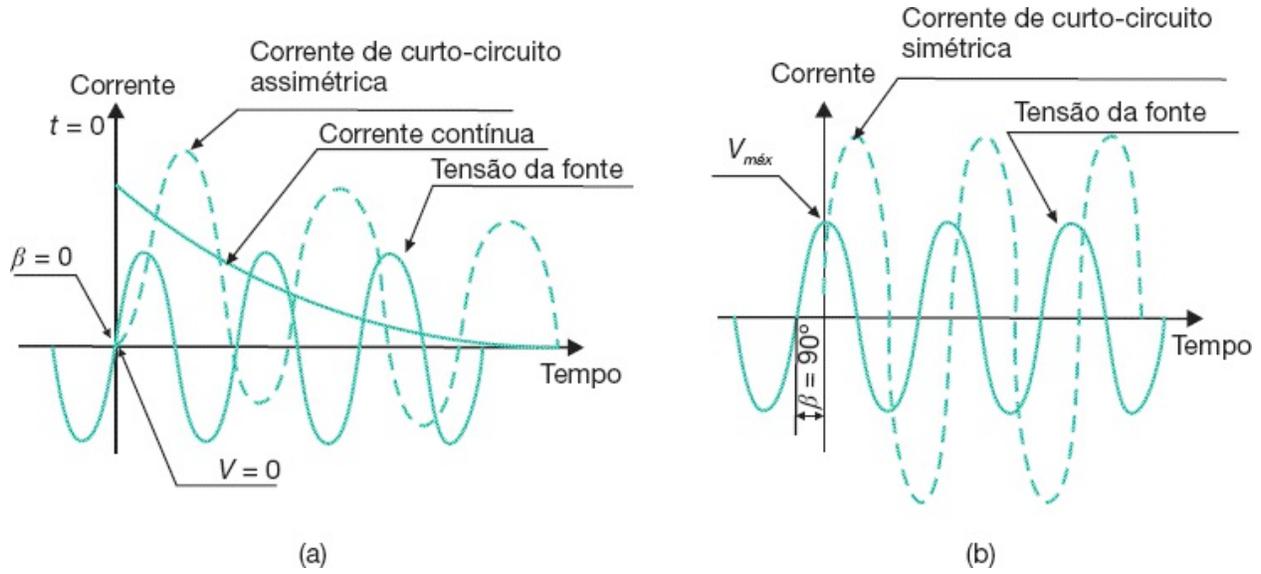


Figura 5.7 Corrente de curto-circuito em função do valor da tensão para $t = 0$.

Para o instante $t = 0 \rightarrow \beta = 0^\circ$

$$I_{cc(t)} = \sqrt{2} \times I_{cs} \times \left[\text{sen}(\omega t + 0^\circ - 90^\circ) - e^{-t/C_t} \times \text{sen}(0^\circ - 90^\circ) \right]$$

$$I_{cc(t)} = \sqrt{2} \times I_{cs} \times \left[\text{sen}(\omega t - 90^\circ) + e^{-t/C_t} \right]$$

I_{cis} - componente alternado inicial de curto-circuito;

I_{cim} - impulso da corrente de curto-circuito, ou valor do pico;

I_{cs} - corrente de curto-circuito permanente ou simplesmente corrente de curto-circuito simétrica;

C_t - constante de tempo.

- Nos circuitos altamente indutivos, em que a reatância X é
- extremamente superior à resistência R , a corrente de curto-circuito é constituída somente de seu componente simétrico, quando o defeito ocorrer no instante em que a tensão está passando pelo seu valor máximo [Figura 5.7(b)]. Neste caso, tem-se:

$$\text{Para } X \gg R \rightarrow \theta = \arctg\left(\frac{X}{R}\right) \rightarrow \theta \approx 90^\circ$$

Para o instante $t = 0 \rightarrow \beta = 90^\circ$

$$I_{cc(t)} = \sqrt{2} \times I_{cs} \times \left[\text{sen}(\omega t + 90^\circ - 90^\circ) - e^{-t/C_t} \times \text{sen}(90^\circ - 90^\circ) \right]$$

$$I_{cc(t)} = \sqrt{2} \times I_{cs} \times \left[\text{sen}(\omega t + 0^\circ) - e^{-t/C_t} \times \text{sen}(0^\circ) \right]$$

$$I_{cc(t)} = \sqrt{2} \times I_{cs} \times \text{sen}(\omega t)$$

- Analisando a Equação (5.1) verifica-se que as condições que tornam o máximo possível os termos transitórios não conduzem por consequência os máximos valores da corrente $I_{cc(t)}$.
- O componente contínuo apresenta um amortecimento ao longo do desenvolvimento dos vários ciclos durante os quais pode durar a corrente de curto-circuito de valor assimétrico. Este amortecimento está ligado ao fator de potência de curto-circuito, ou seja, à relação X/R , que caracteriza a constante de tempo do sistema.
- Quando o circuito apresenta característica predominantemente resistiva, o amortecimento do componente contínuo é extremamente rápido, já que $C_t = \frac{X}{377 \times R}$ tende a zero, para $R \gg X$, enquanto a expressão tende a zero, resultando, nos valores extremos, a nulidade do segundo termo da Equação (5.1).
- Quando o circuito apresenta características predominantemente reativas indutivas, o amortecimento do componente contínuo é lento, já que $C_t = \frac{X}{377 \times R}$ tende a para $R \ll X$, enquanto a expressão tende

à unidade, resultando, nos valores extremos, a permanência do componente contínuo associado ao componente simétrico.

É importante observar que em um circuito trifásico as tensões estão defasadas de 120° elétricos. Quando se analisam as correntes de curto-circuito é importante fazê-lo para a fase que permite o maior valor desta corrente.

Assim, quando a tensão está passando por zero em determinada fase, nas duas outras a tensão está a 86,6 % do seu valor máximo. E para se obter o maior valor da corrente de curto-circuito na ocorrência de um defeito é necessário analisar em que ponto de tensão ocorreu a falta.

Quando o defeito ocorre no instante em que a onda de tensão em qualquer uma das fases está passando por zero, a corrente nesta fase correspondente sofre um defasamento angular que pode chegar a praticamente 90°, quando o defeito acontecer nos terminais do gerador, cuja impedância do sistema fica restrita à reatância de dispersão do gerador. Se o defeito ocorrer distante dos terminais do gerador, o defasamento da corrente fica condicionado ao efeito da impedância do sistema.

Quando se analisa um circuito sob defeito tripolar considera-se somente uma fase, extrapolando-se este resultado para as demais que, logicamente, em outra situação de falta estão sujeitas às mesmas condições desfavoráveis.

Os processos de cálculo da corrente de curto-circuito fornecem facilmente a intensidade das correntes simétricas, em seu valor eficaz. Para se determinar a intensidade da corrente assimétrica, basta que se conheça a relação X/R do circuito, sendo X e R medidos desde a fonte de alimentação até o ponto de defeito e, através do fator de assimetria, dado na Equação (5.4), se estabeleça o produto deste pela corrente simétrica calculada, ou seja:

$$I_{ca} = I_{cs} \times \sqrt{1 + 2 \times e^{-(2 \times t / C_t)}} \quad (5.4)$$

I_{ca} - corrente eficaz assimétrica de curto-circuito;

I_{cs} - corrente eficaz simétrica de curto-circuito.

O termo $\sqrt{1+2 \times e^{-(2 \times t / C_t)}}$ é denominado fator de assimetria. O seu valor pode ser obtido facilmente pela [Tabela 5.1](#) para diferentes valores de $C_t = \frac{X}{377 \times R}$, considerando, neste caso, $t = 0,00416$ s, que corresponde a um quarto do ciclo, ou seja, o valor de pico do primeiro semiciclo. Para exemplificar o cálculo de um valor tabelado, adotar a relação $X/R = 3,00$.

$$C_t = \frac{X}{377 \times R} = \frac{3,00}{377} = 0,00795 \text{ s}$$

$$F_a = \sqrt{1+2 \times e^{-(2 \times 0,00416 / 0,00795)}} = 1,30$$

Tabela 5.1 Fator de assimetria F para $t = 1/4$ ciclo

Relação X/R	Fator de assimetria F	Relação X/R	Fator de assimetria F	Relação X/R	Fator de assimetria F
0,40	1,00	3,80	1,37	11,00	1,58
0,60	1,00	4,00	1,38	12,00	1,59
0,80	1,02	4,20	1,39	13,00	1,60
1,00	1,04	4,40	1,40	14,00	1,61
1,20	1,07	4,60	1,41	15,00	1,62
1,40	1,10	4,80	1,42	20,00	1,64
1,60	1,13	5,00	1,43	30,00	1,67
1,80	1,16	5,50	1,46	40,00	1,68

2,00	1,19	6,00	1,47	50,00	1,69
2,20	1,21	6,50	1,49	60,00	1,70
2,40	1,24	7,00	1,51	70,00	1,71
2,60	1,26	7,50	1,52	80,00	1,71
2,80	1,28	8,00	1,53	100,00	1,71
3,00	1,30	8,50	1,54	200,00	1,72
3,20	1,32	9,00	1,55	400,00	1,72
3,40	1,34	9,50	1,56	600,00	1,73
3,60	1,35	10,00	1,57	1000,00	1,73

Exemplo de aplicação (5.1)

Calcular a corrente de curto-circuito em seu valor de crista após decorrido um quarto de ciclo do início do defeito, que ocorreu no momento em que a tensão passava por zero no sentido crescente, em uma rede de distribuição de 13,8 kV, resultando em uma corrente simétrica de 12.000 A. A resistência e reatância até o ponto que falta valem, respectivamente, 0,9490 e 1,8320 Ω .

$$C_t = \frac{X}{2\pi \times F \times R} = \frac{1,8320}{2 \times \pi \times 60 \times 0,9490} = 0,00512 \text{ S}$$

$$\omega t = 2 \times \pi \times \frac{1}{4} = \frac{\pi}{2} = 1,57079 \text{ rad}$$

$$t = \frac{1}{4} \times \frac{1}{60} = 0,00416 \text{ s}$$

$$1 \text{ rad} = 57,3^\circ$$

$$\omega_t = 1,57059 \times 57,3 = 90^\circ$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{X}{R}\right) = \arctg\left(\frac{1,8320}{0,9490}\right) = 62,61^\circ$$

$$\beta = 0^\circ \text{ (tensão no ponto nulo no sentido crescente)}$$

Aplicando-se a Equação (5.1), tem-se:

$$I_{cc(t)} = \sqrt{2} \times 12.000 \times \left[\text{sen}(90^\circ + 0^\circ - 62,61^\circ) - e^{-\left(\frac{0,00416}{0,00512}\right)} \times \text{sen}(0^\circ - 62,61^\circ) \right]$$
$$I_{cc(t)} = 16.970,5 \times (0,460 + 0,394) \rightarrow I_{cc(t)} = 14.492\text{A} = 14,4 \text{ kA}$$

5.3 Sistema de base e valores por unidade

Para se obterem algumas facilidades no cálculo das correntes de curto-circuito é necessário aplicar alguns artifícios matemáticos que muito simplificam a resolução dessas questões.

5.3.1 Sistema de base

Quando em determinado sistema há diversos valores tomados em bases diferentes é necessário que se estabeleça uma base única e se transformem todos os valores considerados nesta base para que se possa trabalhar adequadamente com os dados do sistema.

Para facilitar o entendimento, basta compreender que o conhecido

sistema percentual ou por cento é um sistema no qual os valores considerados são tomados da base 100. Da mesma forma se poderia estabelecer um sistema de base 1.000 ou sistema *milesimal*, em que os valores deveriam ser tomados nesta base. Assim, se um engenheiro que ganhasse US\$ 2.500,00/mês recebesse um aumento de 10 % (base 100) passaria a perceber um salário de $US\$ 2.500,00 + 10/100 \times 2.500 = US\$ 2.750,00$. Se, no entanto, o aumento fosse de 10 *por milésimo* (base 1.000), passaria a perceber somente $US\$ 2.500 + 10/1.000 \times 2.500 = US\$ 2.525,00$.

Caso semelhante acontece com os diversos elementos de um sistema elétrico. Costuma-se expressar a impedância do transformador em $Z\%$ (base 100) da sua potência nominal em kVA. Também as impedâncias dos motores elétricos são definidos em $Z\%$ na base da potência nominal do motor, em cv. Já os condutores elétricos apresentam impedâncias em valores ôhmicos.

Ora, como se viu, é necessário admitir uma base única para expressar todos os elementos de determinado circuito, a fim de que se possa operar facilmente, como, por exemplo, realizando-se as operações de soma, subtração etc.

5.3.2 Valores por unidade

É um dos vários métodos de cálculo conhecidos na prática que procuram simplificar a resolução das questões relativas à determinação das correntes de curto-circuito.

O valor de determinada grandeza *por unidade* (*pu*) é definido como a relação entre esta grandeza e o valor adotado arbitrariamente como sua base, sendo expresso em decimal. O valor em *pu* pode ser também expresso em porcentagem, que corresponde a 100 vezes o valor encontrado.

Os valores de tensão, corrente, potência e impedância de um circuito são, normalmente, convertidos em porcentagem ou por unidade. As impedâncias dos transformadores, em geral, dadas em forma percentual são

da mesma maneira convertidas em pu . As impedâncias dos condutores, conhecidas normalmente em $m\Omega/m$ ou Ω/km , são transformadas também em pu , todas referidas, porém, a uma mesma base. O sistema pu introduz métodos convenientes de expressar as grandezas elétricas mencionadas em uma mesma base.

Uma das vantagens mais significativas para se adotar a prática do sistema por unidade está relacionada à presença de transformadores no circuito. Neste caso, as impedâncias no primário e secundário — que em valores ôhmicos estão relacionadas pelo número de espiras —, são expressas pelo mesmo número no sistema por unidade. Para demonstrar esta afirmação, considerar uma impedância de $0,6 \Omega$ tomada no secundário de um transformador de $1.000 \text{ kVA} - 13.800/380 \text{ V}$. O seu valor em pu nos lados primário e secundário do transformador é o mesmo, ou seja:

- Valor da impedância no secundário do transformador

$$Z_b = \frac{1.000 \times V_{b2}^2}{P_b} = \frac{1.000 \times 0,380^2}{1.000} = 0,1444 \Omega$$

$$Z_{pu2} = \frac{Z_{\Omega 2}}{Z_b} = \frac{0,6}{0,1444} = 4,15 pu$$

- Valor da impedância no primário do transformador

$$Z_{\Omega 1} = \left(\frac{V_{1b}}{V_{2b}} \right)^2 \times Z_{\Omega 2} = \left(\frac{13.800}{380} \right)^2 \times 0,6 = 791,3 \Omega$$

$$Z_b = \frac{1.000 \times V_{b1}^2}{P_b} = \frac{1.000 \times 13,80^2}{1.000} = 190,4 \Omega$$

$$Z_{pu1} = \frac{Z_{\Omega 1}}{Z_b} = \frac{791,3}{190,4} = 4,15 pu$$

Algumas vantagens podem ser apresentadas quando se usa o sistema por

unidade, ou seja:

- Todos os transformadores do circuito são considerados com a relação de transformação 1:1, sendo, portanto, dispensada a representação no diagrama de impedância.
- É necessário conhecer apenas o valor da impedância do transformador expressa em *pu* ou em porcentagem, sem identificar a que lado se refere;
- Todos os valores expressos em *pu* estão referidos ao mesmo valor percentual.
- Toda impedância expressa em *pu* tem o mesmo valor, independentemente do nível de tensão a que está referido.
- Para cada nível de tensão o valor da impedância ôhmica varia ao mesmo tempo que varia a impedância base, resultando sempre a mesma relação.
- A potência base é selecionada para todo o sistema.
- A tensão base é selecionada para determinado nível de tensão do sistema.
- Adotando-se a tensão base para um lado de tensão do transformador, deve-se calcular a tensão base para o outro lado de tensão do transformador apenas dividindo-se a tensão base, inicialmente adotada, pela relação de transformação, conforme demonstrado anteriormente.
- Normalmente é tomada como bases a potência e a tensão nominal do transformador.

Deve-se entender que a base adotada deverá ser utilizada para todo o cálculo. Em geral, como os sistemas elétricos possuem diferentes níveis de tensão, para cada um desses níveis deve-se tomar a tensão correspondente para o cálculo da corrente de curto-circuito. Assim, um sistema com os níveis de tensão de 69–13,8–0,380 kV, deve-se tomar uma potência básica qualquer (por exemplo, a potência nominal do transformador de 69 kV) e a tensão de

base deve ser utilizada a tensão do sistema no qual estamos efetuando o cálculo. Se estamos calculando as correntes de curto-circuito na baixa tensão, a potência de base é a potência nominal do transformador de 69 kV (se esta for a potência de base adotada) e a tensão de base é de 0,380 kV. Tomando-se como base a potência P_b em kVA e a tensão V_b em kV, tem-se:

a) Corrente base

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} \text{ (A)} \quad (5.5)$$

b) Impedância base

$$Z_b = \frac{1.000 \times V_b^2}{P_b} \text{ (\Omega)} \quad (5.6)$$

c) Impedância por unidade (pu)

$$Z_{pu} = \frac{Z_{c\Omega}}{Z_b} \text{ (pu)} \quad (5.7)$$

Pode ser expressa também por:

$$Z_{pu} = Z_{c\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (5.8)$$

em que $Z_{c\Omega}$ é a impedância do circuito, em Ω .

Quando o valor de uma grandeza é dado em determinada base (1) e se deseja conhecer seu valor em outra base (2), podem-se aplicar as seguintes expressões:

a) Tensão

$$V_{u2} = V_{u1} \times \frac{V_1}{V_2} \text{ (pu)} \quad (5.9)$$

V_{u2} - tensão em pu na base V_2 ;

V_{u1} - tensão em pu na base V_1 .

b) Corrente

$$I_{u2} = I_{u1} \times \frac{V_2}{V_1} \times \frac{P_1}{P_2} (pu) \quad (5.10)$$

I_{u2} - corrente em pu nas bases V_2 e P_2 ;

I_{u1} - corrente em pu nas bases V_1 e P_1 .

c) Potência

$$P_{u2} = P_{u1} \times \frac{P_1}{P_2} (pu) \quad (5.11)$$

P_{u2} - potência em pu na base P_2 ;

P_{u1} - potência em pu na base P_1 .

d) Impedâncias

$$Z_{u2} = Z_{u1} \times \frac{P_2}{P_1} \times \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 (pu) \quad (5.12)$$

Z_{u2} - impedância em pu nas bases V_2 e P_2 ;

Z_{u1} - impedância em pu nas bases V_1 e P_1 .

5.4 Tipos de curto-circuito

O defeito nas instalações elétricas pode ocorrer em uma das seguintes formas:

5.4.1 Curto-circuito trifásico

Um curto-circuito trifásico se caracteriza quando as tensões nas três fases se anulam no ponto de defeito, conforme se mostra na [Figura 5.8](#).

Por serem geralmente de maior valor, as correntes de curto-circuito trifásicas são de fundamental importância devido à larga faixa de aplicação. O seu emprego se faz sentir nos seguintes casos:

- ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente;
- capacidade de interrupção dos disjuntores;
- capacidade térmica dos cabos e equipamentos;
- capacidade dinâmica dos equipamentos;
- capacidade dinâmica dos barramentos coletores.

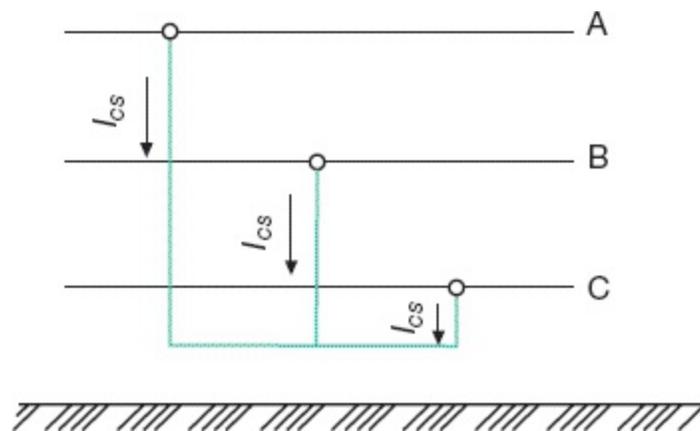


Figura 5.8 Curto-circuito trifásico.

5.4.2 Curto-circuito bifásico

O defeito pode ocorrer em duas situações distintas, ou seja: na primeira, há o contato somente entre dois condutores de fases diferentes, conforme se observa na [Figura 5.9](#); na segunda, além do contato direto entre os citados condutores, há a participação do elemento terra, de acordo com a [Figura 5.10](#).

5.4.3 Curto-circuito fase-terra

À semelhança do curto-circuito bifásico, o defeito monopolar pode ocorrer em duas situações diversas: na primeira, há somente o contato entre o condutor fase e terra, conforme a [Figura 5.11](#); na segunda, há o contato simultâneo entre dois condutores fase e terra, de acordo com a [Figura 5.12](#).

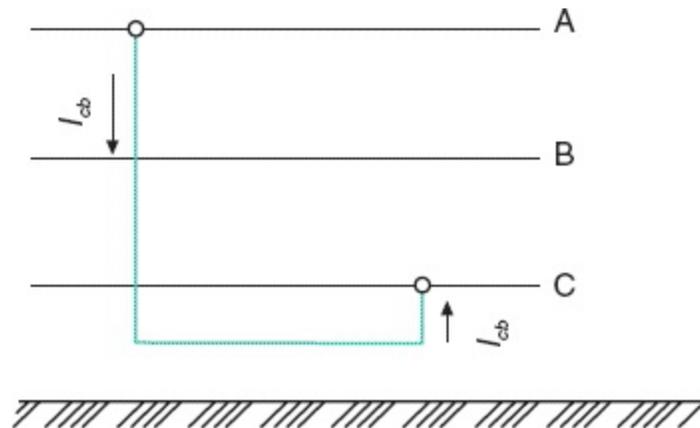


Figura 5.9 Curto-circuito bifásico.

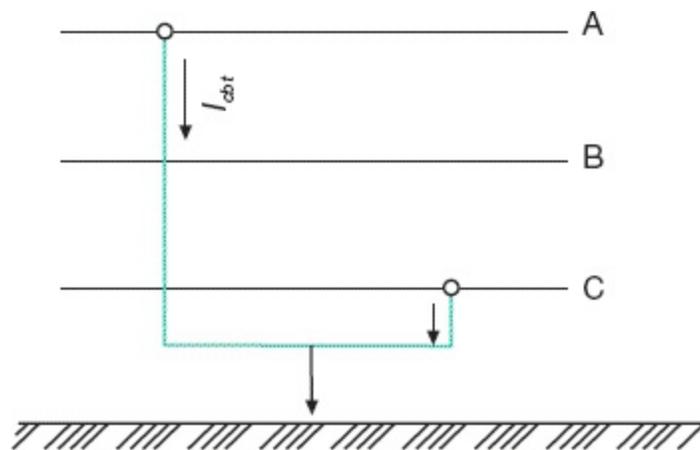


Figura 5.10 Curto-circuito bifásico com terra.

Exemplo de aplicação (5.2)

A impedância percentual de um transformador de força de 1.000 kVA – 13.800/13.200/12.600–380/220 V é de 4,5 % referida ao tape de 13.200 V. Calcular esta impedância no tape de tensão mais elevada, ou seja, 13.800 V.

Adotando-se as bases de 1.000 kVA e 13.800 V e aplicando-se a Equação (5.12), tem-se:

$$Z_{u2} = 4,5 \times \frac{1.000}{1.000} \times \left(\frac{13.200}{13.800} \right)^2 = 4,11\%$$

$P_1 = 1.000$ kVA (valor de base da potência a que refere a impedância de 4,5 %);

$P_2 = 1.000$ kVA (nova base à qual se quer referir a impedância de 4,5 %);

$V_1 = 13.200$ V (valor de base de tensão a que refere a impedância de 4,5 %);

$V_2 = 13.800$ V (nova base à qual se quer referir a impedância de 4,5 %; foi selecionada a base igual à tensão nominal primária do transformador).

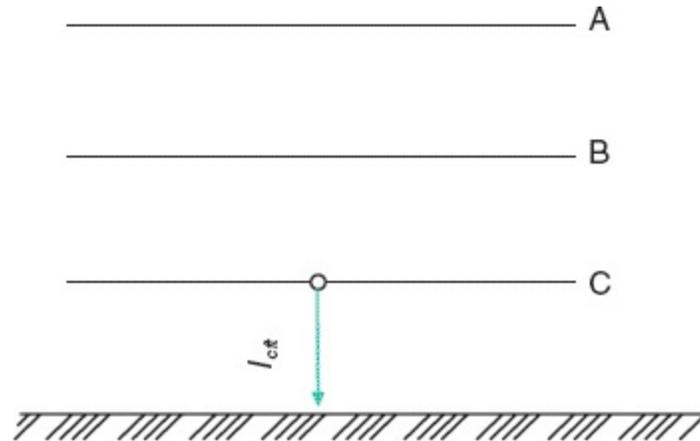


Figura 5.11 Curto-circuito fase-terra.

As correntes de curto-circuito monopolares são empregadas nos seguintes casos:

- ajuste dos valores mínimos dos dispositivos de proteção contra sobrecorrentes;
- seção mínima do condutor de uma malha de terra;
- limite das tensões de passo e de toque;
- dimensionamento de resistor ou reator de aterramento.

As correntes de curto-circuito monopolares costumam ser maiores do que as correntes de curto-circuito trifásicas nos terminais do transformador da

subestação, na condição de falta máxima.

Quando as impedâncias do sistema são muito pequenas, as correntes de curto-circuito, de uma forma geral, assumem valores muito elevados, capazes de danificar térmica e mecanicamente os equipamentos da instalação, caso seu dimensionamento não seja compatível. Muitas vezes, não se obtêm no mercado equipamentos com capacidade suficiente para suportar determinadas correntes de curto-circuito. Neste caso, o projetista deve buscar meios para reduzir o valor dessas correntes, podendo admitir uma das seguintes opções:

- dimensionar os transformadores de força com impedância percentual elevada (transformador normalmente fora dos padrões normalizados e fabricados sobre encomenda);
- dividir a carga da instalação em circuitos parciais alimentados por vários transformadores (subestações primárias);
- inserir uma reatância série no circuito principal ou no neutro do transformador quando se tratar de correntes monophasadas elevadas.

A aplicação da reatância série no circuito principal acarreta uma redução do fator de potência da instalação, necessitando-se, pois, da aplicação de banco de capacitores para compensação.

A base de qualquer sistema de proteção está calcada no conhecimento dos valores das correntes de curto-circuito da instalação. Deste modo, são dimensionados os fusíveis e disjuntores e determinados os valores nominais dos dispositivos e equipamentos a serem utilizados, em função dos limites da corrente de curto-circuito indicados por seus fabricantes.

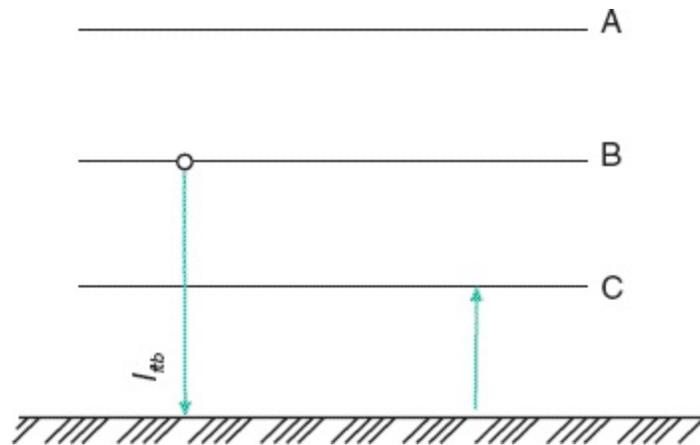


Figura 5.12 Curto-circuito com contato simultâneo.

5.5 Determinação das correntes de curto-circuito

As correntes de curto-circuito devem ser determinadas em todos os pontos em que se requer a instalação de equipamentos ou dispositivos de proteção. Em uma instalação industrial convencional, como aquela apresentada na [Figura 5.13](#), podem-se estabelecer previamente alguns pontos de importância fundamental, ou seja:

- ponto de entrega de energia, cujo valor é normalmente fornecido pela companhia supridora;
- barramento do Quadro Geral de Força (QGF), devido à aplicação dos equipamentos e dispositivos de manobra e proteção do circuito geral e dos circuitos de distribuição;
- barramento dos Centros de Controle de Motores (CCMs), devido à aplicação dos equipamentos e dispositivos de proteção dos circuitos terminais dos motores;
- terminais dos motores, quando os dispositivos de proteção estão ali instalados;
- barramento dos Quadros de Distribuição de Luz (QDLs), devido ao

dimensionamento dos disjuntores, normalmente selecionados para esta aplicação.

5.5.1 Impedâncias do sistema

No cálculo das correntes de defeito devem ser representados os principais elementos do circuito por meio de suas impedâncias. No entanto, as impedâncias de alguns desses elementos podem ser desprezadas, dependendo de algumas considerações.

É importante lembrar que quanto menor é a tensão do sistema, mais necessário se faz considerar um maior número de impedâncias, dada a influência que poderia exercer no valor final da corrente. Como orientação, podem-se mencionar os elementos do circuito que devem ser considerados por meio de suas impedâncias no cálculo das correntes de curto-circuito.

5.5.1.1 Impedância reduzida do sistema

É aquela que representa todas as impedâncias, desde a fonte de geração até o ponto de entrega de energia à unidade consumidora, isto é, compreendo as impedâncias da geração, do sistema de transmissão, do sistema de subtransmissão e do sistema de distribuição. A [Figura 5.13](#) mostra um diagrama simplificado representativo de um sistema anteriormente mencionado.

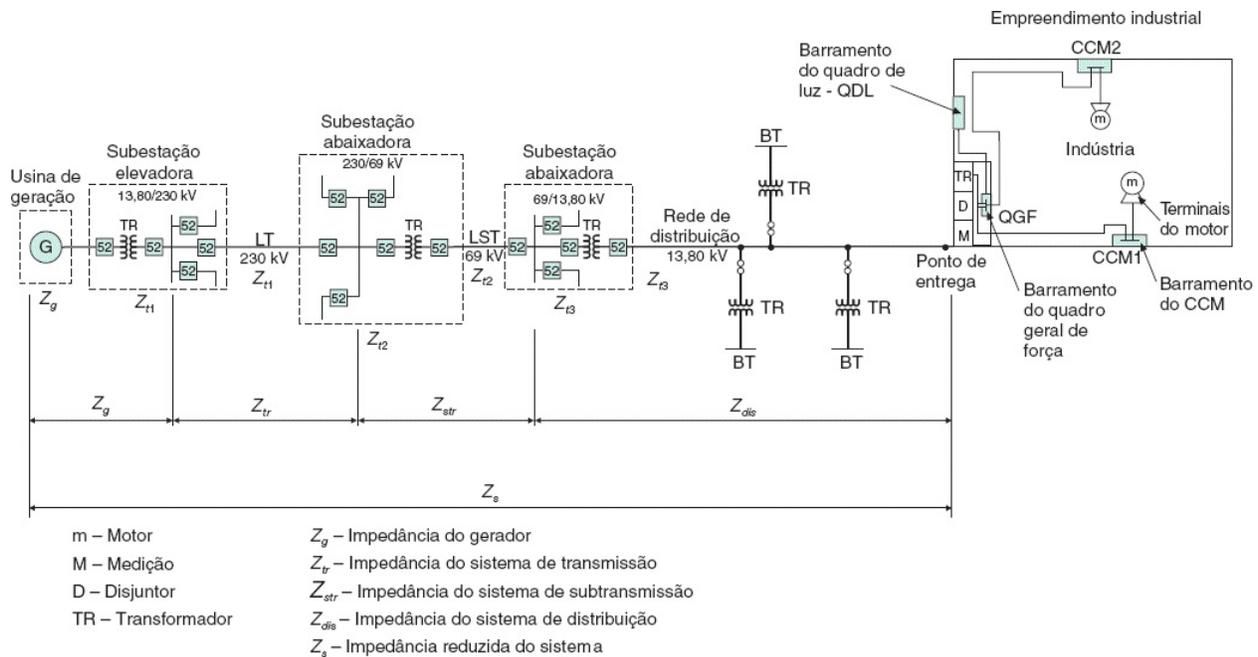


Figura 5.13 Diagrama de um sistema de geração / transmissão / subtransmissão / distribuição / consumidor.

O valor da impedância reduzida do sistema deve ser fornecido ao projetista da instalação industrial pela área técnica da companhia concessionária de energia elétrica local. Dependendo da concessionária, pode ser fornecido em *pu* (normalmente na base de 100 MVA) ou em ohms. Algumas vezes, é fornecido o valor da corrente de curto-circuito no ponto de entrega de energia. Quando ainda os valores anteriores são desconhecidos, toma-se a capacidade de ruptura mínima do disjuntor geral de proteção de entrada, geralmente estabelecida por norma de fornecimento da concessionária e de conhecimento geral. Este último é o valor mais conservativo que se pode tomar como base para se determinar a impedância reduzida do sistema. Na maioria das aplicações, a impedância do sistema de suprimento é muito pequena, relativamente ao valor da impedância da rede industrial.

5.5.1.2 Impedância do sistema primário (tensões acima de 2.400 V)

É aquela que a partir do ponto de entrega de energia representa as impedâncias dos componentes conectados na tensão superior a 2.400 V, isto é:

- transformadores de força;
- circuito de condutores nus ou isolados de grande comprimento;
- reatores limitadores, se for o caso.

5.5.1.3 Impedância do sistema secundário

É aquela que a partir do transformador abaixador representa as impedâncias de todos os componentes dos circuitos de tensão, isto é:

- circuitos de condutores nus ou isolados de grande comprimento;
- reatores limitadores, se for o caso;
- barramentos de painéis de comando de comprimento superior a 4 m;
- impedância dos motores quando se levar em consideração a sua contribuição.

Podem ser dispensadas as impedâncias dos autotransformadores.

Os limites dos valores anteriormente considerados são orientativos e cabe ao projetista o bom senso de decidir a influência que estes poderão ter sobre o resultado das correntes de curto-circuito.

5.5.2 Metodologia de cálculo

Os processos de cálculo utilizados neste trabalho são de fácil aplicação no desenvolvimento de um projeto industrial. Os resultados são valores aproximados dos métodos mais sofisticados, porém a precisão obtida satisfaz plenamente aos propósitos a que se destinam. Assim, vamos considerar uma indústria com *layout* bastante convencional como o representado na [Figura 5.14](#).

Com base nessa figura, pode-se elaborar o diagrama unifilar

simplificado e, posteriormente, o diagrama de bloco de impedâncias, conforme as Figuras 5.15 e 5.16, respectivamente.

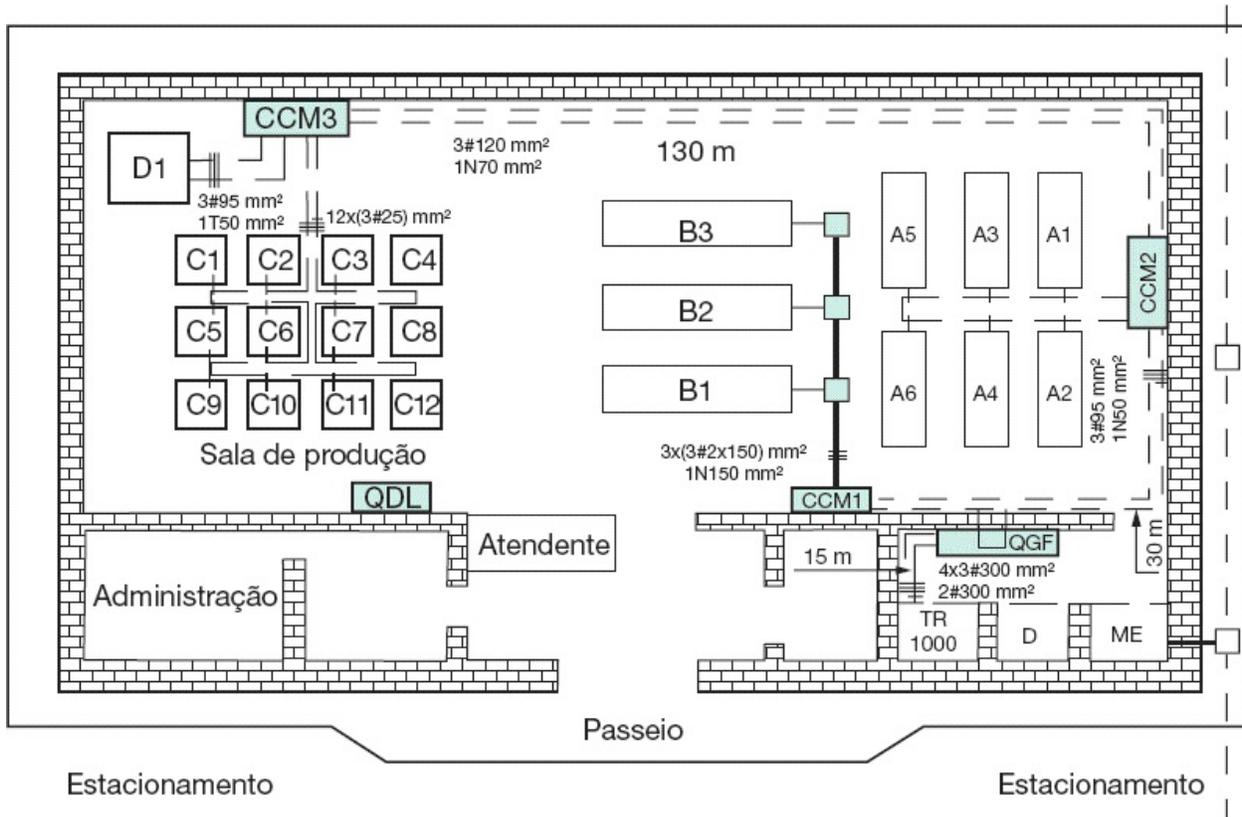


Figura 5.14 Planta de *layout* de uma indústria.

O diagrama de bloco sintetiza a representação das impedâncias de valor significativo que compõem o sistema elétrico, desde a geração até os terminais do motor.

Para simplicidade de cálculo, será empregada a metodologia de valores por unidade (*pu*). Em função desta condição, serão adotados como base o valor P_b , expresso em kVA, e a tensão secundária do transformador da subestação V_b , dada em kV.

As impedâncias de barramentos e cabos devem ser calculadas em seus valores de sequência positiva, negativa e zero. O valor da impedância de sequência negativa, neste caso, é igual ao valor da impedância de sequência

positiva.

A seguir, será mostrado o roteiro de cálculo que permite determinar os valores das correntes de curto-circuito em diferentes pontos da rede industrial.

5.5.3 Sequência de cálculo

5.5.3.1 Impedância reduzida do sistema (Z_{us})

Resistência (R_{us})

Como a resistência do sistema de suprimento é muito pequena, relativamente ao valor da reatância, na prática é comum desprezar-se o seu efeito, isto é:

$$R_{us} \cong 0$$

Reatância (X_{us})

Considerando-se que a concessionária forneça a corrente de curto-circuito (I_{cp}) no ponto de entrega, tem-se:

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times V_{np} \times I_{cp} \text{ (kVA)} \quad (5.13)$$

P_{cc} - potência de curto-circuito no ponto de entrega, em kVA;

V_{np} - tensão nominal primária no ponto de entrega, em kV;

I_{cp} - corrente de curto-circuito simétrica, em A.

O valor da reatância, em pu , é dado pela Equação (5.14).

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} (pu) \quad (5.14)$$

$$\vec{Z}_{us} = R_{us} + jX_{us} (pu) \quad (5.15)$$

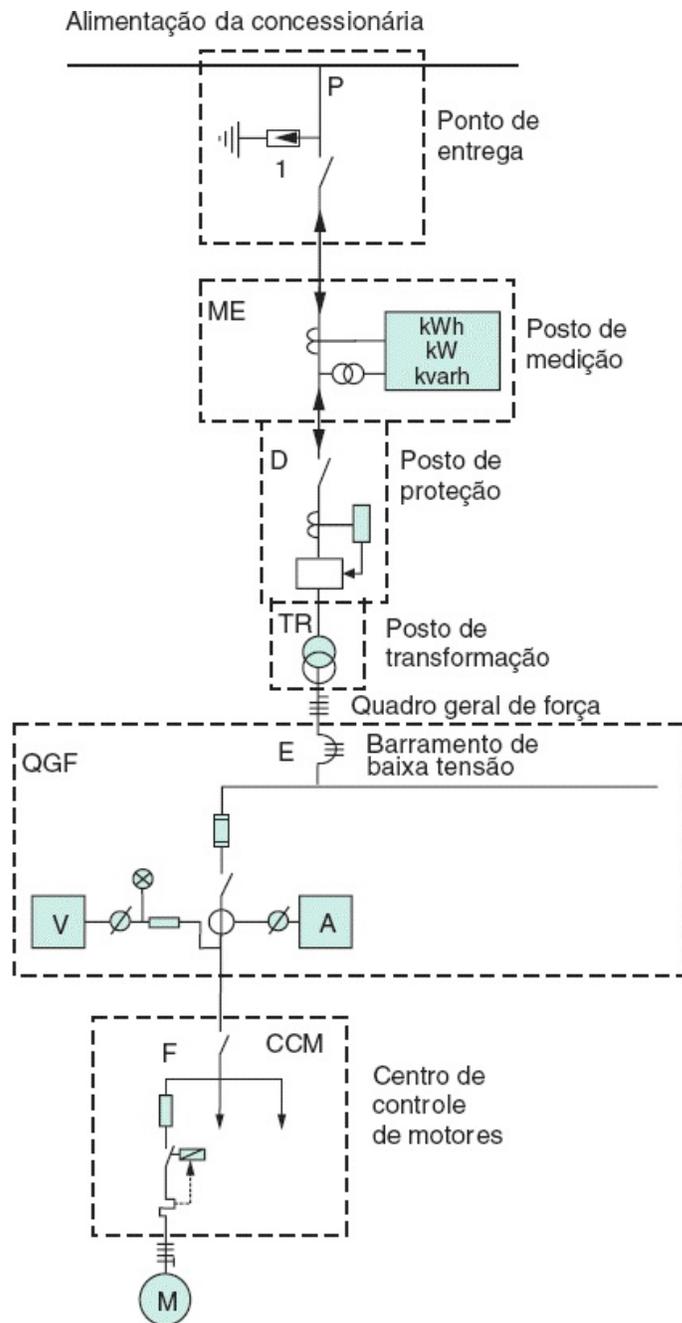
No entanto, quando a concessionária local dispuser de informações

acerca de seu sistema nos diversos pontos da rede distribuição, é mais acertado obter as impedâncias de sequência positiva e zero. Normalmente, esses valores vêm referidos à base de 100 MVA. Por facilidade de cálculo é conveniente que as impedâncias fornecidas devam migrar da base de 100 MVA para a base da potência nominal do transformador.

5.5.3.2 Impedância do(s) transformador(es) da subestação (Z_T)

É necessário conhecer:

- potência nominal P_{nt} , dada em kVA;
- impedância percentual Z_{pt} (Tabela 9.11);
- perdas ôhmicas no cobre P_{cu} , em W (Tabela 9.11);
- tensão nominal V_{nt} , em kV.



P – ponto de entrega de energia à indústria; ME – posto de medição da concessionária; D – posto de proteção e comando, onde são instalados o disjuntor geral de proteção e a chave seccionadora, o transformador de corrente de proteção e, em alguns casos, um transformador de potencial de proteção; TR – posto de transformação; QGF – Quadro Geral de Força, onde são instalados os principais equipamentos de proteção, manobra e medição indicativa em baixa tensão; CCM – Centro de Controle de Motores, onde estão instalados, geralmente, os elementos de proteção e manobra dos motores; M – máquinas industriais, caracterizadas, principalmente, pelos valores de placa dos motores que as acionam, ou outros componentes elétricos de trabalho, tais como resistência, reatores etc.

Figura 5.15 Diagrama unifilar simplificado.

Resistência (R_{ut})

Inicialmente, determina-se a queda de tensão reativa percentual, ou seja:

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{nt}} (\%) \quad (5.16)$$

Então, R_{ut} será determinada pela Equação (5.17).

$$R_{ut} = R_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 (pu) \quad (5.17)$$

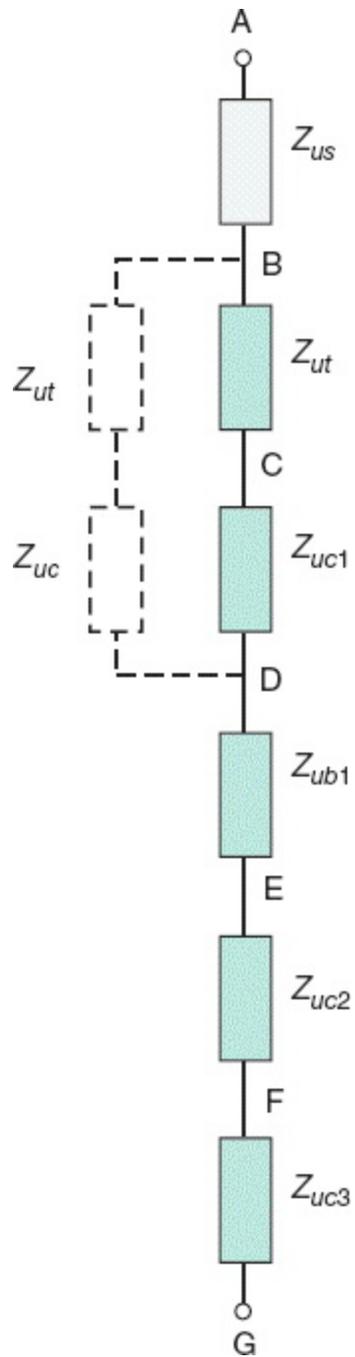


Figura 5.16 Diagrama de blocos.

Reatância (X_{ut})

A impedância unitária tem valor de:

$$Z_{ut} = Z_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 \text{ (pu)} \quad (5.18)$$

A reatância unitária será:

$$X_{ut} = \sqrt{Z_{ut}^2 - R_{ut}^2} \quad (5.19)$$

Logo, a impedância do transformador vale:

$$\vec{Z}_{ut} = R_{ut} + jX_{ut} \text{ (pu)} \quad (5.20)$$

5.5.3.3 Impedância do circuito que conecta o transformador ao QGF

Resistência (R_{uc1})

$$R_{c1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \text{ (\Omega)} \quad (5.21)$$

$$R_{uc1} = R_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (5.22)$$

$R_{u\Omega}$ - resistência do condutor de sequência positiva, em m Ω /m ([Tabela 3.22](#)).

L_{c1} - comprimento do circuito, medido entre os terminais do transformador e o ponto de conexão com o barramento, dado em m;

N_{c1} - número de condutores por fase do circuito mencionado.

Reatância (X_{uc1})

A reatância do cabo é:

$$X_{c1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \text{ (\Omega)} \quad (5.23)$$

$$X_{uc1} = X_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} (pu) \quad (5.24)$$

sendo $X_{u\Omega}$ a reatância de sequência positiva do condutor fase, em m Ω /m (Tabela 3.22).

$$\vec{Z}_{uc1} = R_{uc1} + jX_{uc1} (pu) \quad (5.25)$$

Quando há dois ou mais transformadores ligados em paralelo, deve-se calcular a impedância série de cada transformador com o circuito que o liga ao QGF, determinando-se, em seguida, a impedância resultante, por meio do paralelismo destas.

Para transformadores de impedâncias iguais e circuitos com condutores de mesma seção e comprimento, a impedância é dada por:

$$\vec{Z}_{c1\Omega} = \frac{\vec{Z}_{1c1r}}{N_{trp}}$$

\vec{Z}_{1c1r} - impedância do circuito, compreendendo o transformador e condutores, em Ω ou pu ;

N_{trp} - número de transformadores em paralelo.

5.5.3.4 Impedância do barramento do QGF (Z_{ub1})

Resistência (R_{ub1})

$$R_{b1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_b}{1.000 \times N_{b1}} (\Omega) \quad (5.26)$$

$R_{u\Omega}$ - resistência ôhmica da barra, em m Ω /m (Tabelas 3.38 e 3.39);

N_{b1} - número de barras em paralelo;

L_b - comprimento da barra, em m.

A resistência, em pu , é dada por:

$$R_{ub1} = R_{b1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} (pu) \quad (5.27)$$

Reatância (X_{ub1})

$$X_{b1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_b}{1.000 \times N_{b1}} (\Omega) \quad (5.28)$$

A reatância, em pu , é dada por:

$$X_{ub1} = X_{b1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} (pu) \quad (5.29)$$

Logo, a impedância do barramento vale:

$$\bar{Z}_{ub1} = R_{ub1} + jX_{ub1} (pu) \quad (5.30)$$

5.5.3.5 Impedância do circuito que conecta o QGF ao CCM

Os valores da resistência e reatância, em pu , iguais a R_{uc2} e X_{uc2} , respectivamente, são calculados à semelhança de R_{uc1} e X_{uc1} , na Seção 5.5.3.3.

5.5.3.6 Impedância do circuito que conecta o CCM aos terminais do motor

Aqui também é válida a observação feita na seção anterior.

Foi omitida no próprio diagrama de bloco a impedância do barramento do CCM1. Uma vez que normalmente é de pequena dimensão, sua influência sobre a impedância total é de pouca importância e, por isso, desprezada. No caso da existência de barramentos de grandes dimensões (acima de 4 m), aconselha-se considerar o efeito de sua impedância. Com relação ao barramento do QGF, também é válido este comentário.

5.5.3.7 Corrente simétrica de curto-circuito trifásico

Para a determinação das correntes de curto-circuito em qualquer ponto do sistema, procede-se à soma vetorial de todas as impedâncias calculadas até o ponto desejado e aplica-se a Equação (5.31), ou seja:

$$\vec{Z}_{atot} = \sum_{i=1}^{i=n} (R_{ui} + jX_{ui}) \text{ (pu)} \quad (5.31)$$

R_{ui} e X_{ui} são, genericamente, a resistência e a reatância unitárias de cada impedância do sistema até o ponto em que se pretende determinar os valores das correntes de curto-circuito.

A corrente base vale:

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} \text{ (A)} \quad (5.32)$$

A corrente de curto-circuito simétrica, valor eficaz, então, é dada por:

$$\vec{I}_{cs} = \frac{I_b}{1.000 \times \vec{Z}_{utot}} \text{ (kA)} \quad (5.33)$$

Quando se pretende obter simplifadamente a corrente de curto-circuito simétrica nos terminais do transformador, basta aplicar a Equação (5.34):

$$I_{cst} = \frac{I_n}{Z_{pt\%}} \times 100 \text{ (A)} \quad (5.34)$$

I_n - corrente nominal do transformador, em A;

$Z_{pt\%}$ - impedância percentual do transformador.

Este valor é aproximado, pois nele não está computada a impedância reduzida do sistema de suprimento.

5.5.3.8 Corrente assimétrica de curto-circuito trifásico

$$I_{ca} = F_a \times I_{cs} \text{ (kA)} \quad (5.35)$$

sendo F_a o fator de assimetria, determinado segundo a relação dada na Tabela 5.1.

5.5.3.9 Impulso da corrente de curto-circuito

$$I_{cim} = \sqrt{2} \times I_{ca} \text{ (kA)} \quad (5.36)$$

5.5.3.10 Corrente bifásica de curto-circuito

$$I_{cb} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cs} \text{ (kA)} \quad (5.37)$$

5.5.3.11 Corrente fase-terra de curto-circuito

A determinação da corrente de curto-circuito fase-terra requer o conhecimento das impedâncias de sequência zero do sistema, além das impedâncias de sequência positiva já abordadas. Se o transformador da instalação for ligado em triângulo primário e estrela no secundário com o ponto neutro aterrado, não se deve levar em conta as impedâncias de sequência zero do sistema de fornecimento de energia, pois estas ficam confinadas no delta do transformador em questão.

No cálculo das correntes de curto-circuito fase-terra, deve-se considerar a existência de três impedâncias de fundamental importância para a grandeza dos valores calculados. São elas:

5.5.3.11.1 Impedância de contato (R_{ct})

É caracterizada normalmente pela resistência (R_{ct}) que a superfície de contato do cabo e a resistência do solo no ponto de contato oferecem à passagem da

corrente para a terra. Tem-se atribuído geralmente o valor conservativo de 40 Ω , ou seja: $3 \times \frac{R_{ct0}}{3} = 40 \Omega$. Tem-se também utilizado com frequência o valor de 120 Ω , ou seja, $3 \times \frac{R_{ct0}}{3} = 120 \Omega$.

5.5.3.11.2 Impedância da malha de terra (R_{mt})

Pode ser obtida pela medição ou calculada conforme metodologia exposta no [Capítulo 11](#). O valor máximo admitido por norma de diversas concessionárias de energia elétrica é de 10 Ω , nos sistemas de 15 a 25 kV, e é caracterizado pelo seu componente resistivo.

5.5.3.11.3 Impedâncias de aterramento (R_{at})

Quando a corrente de curto-circuito fase-terra é muito elevada, costuma-se introduzir entre o neutro do transformador e a malha de terra determinada impedância que pode ser um reator ou um resistor, sendo mais frequente este último. O valor desta impedância varia em função de cada projeto. Para melhor esclarecer o assunto, veja o livro deste mesmo autor, *Manual de Equipamentos Elétricos*, 4ª edição (GEN | LTC, 2013).

A [Figura 5.17](#) mostra esquematicamente as impedâncias anteriormente mencionadas.

5.5.3.11.4 Corrente de curto-circuito fase-terra máxima

É determinada quando são levadas em consideração somente as impedâncias dos condutores e as do transformador. É calculada pela Equação (5.38).

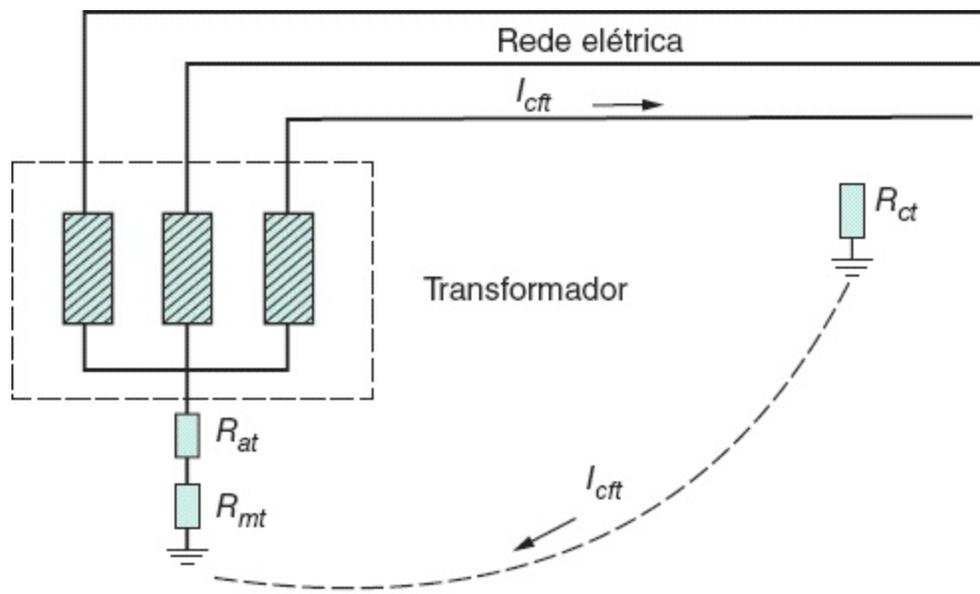
$$\vec{I}_{cfmct} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \vec{Z}_{utot} + \vec{Z}_{u0t} + \vec{Z}_{u0c}} \text{ (A)} \quad (5.38)$$

em que Z_{u0t} é a impedância de sequência zero do transformador, igual a sua impedância de sequência positiva.

O valor é determinado considerando-se as resistências e reatâncias de sequência zero dos condutores. Na prática, pode-se desprezar a impedância de sequência zero dos barramentos, pois seu efeito não se faz sentir nos valores calculados. De um modo geral, \vec{Z}_{u0c} é dado pela Equação (5.39).

$$\vec{Z}_{u0c} = R_{u0c} + jX_{u0c} \text{ (pu)} \quad (5.39)$$

$$R_{u0c} = R_{c\Omega 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (5.40)$$



R_{ct} - resistência de contato ou de arco;
 R_{mt} - resistência de malha de terra;
 R_{at} - resistor de aterramento.

Figura 5.17 Percurso da corrente de curto-circuito fase-terra.

$$X_{u0c} = X_{c\Omega 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (5.41)$$

$R_{c\Omega 0}$ e $X_{c\Omega 0}$ - resistências e reatâncias de sequência zero, valores obtidos na Tabela 3.22.

5.5.3.11.5 Corrente de curto-circuito fase-terra mínima

É determinada quando se levam em consideração, além das impedâncias dos condutores e transformadores, as impedâncias de contato, a do resistor de aterramento, caso haja, e da malha de terra. É calculada segundo a Equação (5.42).

$$\bar{I}_{cftma} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \bar{Z}_{utot} + \bar{Z}_{u0c} + \bar{Z}_{u0t} + 3 \times (R_{uct} + R_{umt} + R_{uat})} \text{ (A)} \quad (5.42)$$

$$R_{uct} = R_{ct} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)}$$

$$R_{umt} = R_{mt} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)}$$

$$R_{uat} = R_{at} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)}$$

R_{uct} - resistência de contato, em *pu*;

R_{umt} - resistência da malha de terra, em *pu*;

R_{uat} - resistência do resistor de aterramento, em *pu*.

A determinação das correntes de curto-circuito em sistemas de alta tensão pode ser feita com base nos mesmos procedimentos adotados anteriormente. No caso, por exemplo, de um sistema de 13,80 kV, alimentado por uma subestação de 69,0 kV, os dados necessários à determinação das correntes de curto-circuito podem ser obtidos no livro *Manual de Equipamentos Elétricos*, do autor, ou no livro *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência* (GEN | LTC, 2011), do autor e do Eng. Daniel Ribeiro Mamede, em que são apresentados vários exemplos de aplicação, incluindo sistemas de 230 kV.

Exemplo de aplicação (5.3)

Considerar a indústria representada na Figura 5.14 com as seguintes características elétricas:

tensão nominal primária: $V_{np} = 13,80$ kV;

tensão nominal secundária: $V_{ns} = 380$ V;

impedância de sequência positiva do sistema de suprimento: $Z_{ps} = 0,0155 + j0,4452 pu$ (na base de 100 MVA);

impedância de sequência zero do sistema de suprimento: $Z_{zs} = 0,0423 + j0,3184 pu$ (na base de 100 MVA);

impedância percentual do transformador: $Z_{pt} = 5,5 \%$;

comprimento do circuito TR-QGF = 15 m;

barramento do QGF: duas barras de cobre justapostas de 50×10 mm;

comprimento da barra do QGF: 5 m;

comprimento do circuito QGF-CCM3: 130 m;

resistência de contato do cabo com o solo (falha de isolação): 40 Ω ;

resistência da malha de terra: 10 Ω .

Calcular os valores de corrente de curto-circuito nos terminais de alimentação do CCM3.

a) Escolha dos valores de base

Potência base: $P_b = 100.000$ kVA.

Tensão base: $V_b = 13,80$ kV.

b) Corrente de base

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} = \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 13,8} = 4.183 \text{ A}$$

c) Corrente de curto-circuito no ponto de entrega de energia — lado de média tensão

Corrente de curto-circuito trifásica

$$I_{cs} = \frac{1}{Z_{ups}} \times I_{ba} = \frac{1}{0,0155 + j0,4452} \times 4.183 = 9.390 \text{ A}$$

Corrente de curto-circuito fase-terra

$$\bar{I}_{cft} = \frac{3 \times 4.183}{0,0155 + j0,4452 + 0,1423 + j0,3184}$$

$$\bar{I}_{cft} = \frac{12.549}{0,1578 + j0,7636} = 16.094 \text{ A}$$

d) Potência de curto-circuito no ponto de entrega de energia

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times V_{np} \times I_{cp} = \sqrt{3} \times 13,8 \times 4.183 = 99.983 \text{ kVA}$$

e) Impedância do transformador

$$P_{nt} = 1.000 \text{ kVA}$$

Resistência

$$P_{cu} = 11.000 \text{ (valor obtido da Tabela 9.11)}$$

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{nt}} = \frac{11.000}{10 \times 1.000} = 1,1 \% = 0,011 \text{ pu (nas bases } P_{nt} \text{ e } V_{nt})$$

$$R_{ut} = R_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} = 0,011 \times \frac{100.000}{1.000} = 1,10 \text{ pu (na base } P_{nt})$$

Reatância

$$Z_{ut} = Z_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} = 0,055 \times \frac{100.000}{1.000} = 5,50 \text{ pu (nas bases } P_{nt} \text{)}$$

$$Z_{pt} = 5,5 \% = Z_{ut} = 0,055 \text{ pu (nas bases } P_{nt} \text{ e } V_{nt} \text{)}$$

$$X_{ut} = \sqrt{Z_{ut}^2 - R_{ut}^2} = \sqrt{5,50^2 - 1,10^2} = 5,38 \text{ pu (nas bases } P_{nt} \text{)}$$

$$\vec{Z}_{ut} = R_{ut} + jX_{ut} = 1,100 + j5,38 \text{ pu}$$

f) Corrente de curto-circuito simétrica, valor eficaz, nos terminais secundários do transformador

Corrente de base

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} = \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 0,38} = 151.934 \text{ A}$$

Corrente de curto-circuito trifásico

$$\vec{I}_{cs} = \frac{I_b}{\vec{Z}_{utot}} = \frac{151.934}{(0,0155 + j0,4452 + 1,1 + j5,38)}$$

$$\vec{I}_{cs} = \frac{151.934}{1,1155 + j5,8252} = 25.616 \text{ kA}$$

Corrente de curto-circuito fase e terra

$$\vec{I}_{cft} = \frac{3 \times 151.934}{2 \times (0,0155 + j0,4452 + 1,10 + j5,38) + (0,0423 + j0,31284 + 1,10 + j5,38)}$$

$$\vec{I}_{cft} = \frac{455.802}{2,231 + j11,650 + 1,1423 + j5,6928}$$

$$\vec{I}_{cft} = \frac{455.802}{3,3733 + j17,3428} = 25.798 \text{ A}$$

g) Impedância do circuito que liga o transformador ao QGF

$$L_{c1} = 15 \text{ m}$$

$$N_{c1} = 4 \text{ condutores/fase}$$

$$S_c = 300 \text{ mm}^2$$

Resistência

$$R_{u\Omega} = 0,0781 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (valor da Tabela 3.22)}$$

$$R_{c1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \rightarrow R_{c1\Omega} = \frac{0,0781 \times 15}{4 \times 1.000} = 0,0002928 \Omega$$

$$R_{uc1} = R_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{V_b^2} = 0,0002928 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2} = 0,20277 \text{ pu}$$

Reatância

$$X_{u\Omega} = 0,1068 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (valor da Tabela 3.22)}$$

$$X_{c1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \rightarrow X_{c1\Omega} = \frac{0,1068 \times 15}{4 \times 1.000} = 0,0004005 \Omega$$

$$X_{uc1} = X_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,0004005 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$X_{uc1} = 0,27735 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{uc1} = R_{uc1} + jX_{uc1} = 0,20277 + j0,27735 \text{ pu}$$

h) Impedância do barramento do QGF

$$L_b = 5 \text{ m}$$

$$N_{b1} = 2 \text{ barras/fase de } 50 \times 10 \text{ mm (Tabela 3.38)}$$

Resistência

$$R_{b\Omega} = 0,0438 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (valor da Tabela 3.38)}$$

$$R_{b1\Omega} = \frac{0,0438 \times 5}{2 \times 1.000} = 0,00010 \Omega$$

$$R_{ub1} = R_{b1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,00010 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$R_{ub1} = 0,06925 pu$$

Reatância

$X_{b\Omega} = 0,1707 m\Omega/m$ (valor da Tabela 3.38)

$$X_{b1\Omega} = \frac{0,1707 \times 5}{2 \times 1.000} = 0,00042 \Omega$$

$$X_{ub1} = X_{b1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,00042 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$X_{ub1} = 0,29085 pu$$

$$\vec{Z}_{ub1} = R_{ub1} + jX_{ub1} = 0,06925 + j0,29085 pu$$

i) Impedância do curto-circuito até o barramento do QGF

$$R_{utot} = 0,0155 + 1,10 + 0,20277 + 0,06925 + 1,38752 pu$$

$$X_{utot} = j0,4452 + j5,38 + j0,27735 + j0,29085 = 6,3934 pu$$

$$\vec{Z}_{utot} = R_{utot} + jX_{utot} = 1,38752 + j6,39340 pu$$

j) Corrente de curto-circuito simétrica, valor eficaz, no barramento do QGF

Corrente de base

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} = \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 0,38} = 151.934 A$$

Corrente de curto-circuito trifásico

$$\bar{I}_{cs} = \frac{I_b}{\bar{Z}_{utot}} = \frac{151.934}{(1,38752 + j6,39340)} = 23.223 \text{ A}$$

Corrente de curto-circuito fase e terra

$$\bar{I}_{cft} = \frac{3 \times 151.934}{2 \times (1,38752 + j6,39340) + (0,0423 + j0,31284 + 1,10 + j5,38)}$$

$$\bar{I}_{cft} = \frac{455.802}{3,91734 + j18.4796} = 24.128 \text{ A}$$

k) Impedância do circuito que liga o QGF ao CCM3

$$L_{c2} = 130 \text{ m}$$

$$N_{c2} = 1 \text{ condutor/fase}$$

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

Resistência

$$R_{u\Omega} = 0,1868 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (valor da Tabela 3.22)}$$

$$R_{c2\Omega} = \frac{0,1868 \times 130}{1.000} = 0,02428 \text{ }\Omega$$

$$R_{uc2} = R_{c2\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,02428 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$R_{uc2} = 16,8144 \text{ pu}$$

Reatância

$$X_{u\Omega} = 0,1076 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (valor da Tabela 3.22)}$$

$$X_{c2\Omega} = \frac{0,1076 \times 130}{1.000} = 0,01398 \Omega$$

$$X_{uc2} = X_{c2\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,01398 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$X_{uc2} = 9,6814 pu$$

$$\vec{Z}_{uc2} = R_{uc2} + jX_{uc2} = 16,8144 + j9,6814 pu$$

l) Impedância total do circuito desde a fonte até o CCM3

$$R_{utot} = 1,38752 + 16,8144 = 18,2019 pu$$

$$X_{utot} = j6,39340 + j9,6814 = j16,0748 pu$$

$$\vec{Z}_{utot} = R_{utot} + jX_{utot} = 18,2019 + j16,0748 pu$$

m) Corrente de curto-circuito simétrica trifásica, valor eficaz

$$\vec{I}_{cs} = \frac{I_b}{\vec{Z}_{utot}} = \frac{151.934}{(18,2019 + j16,0748)} = 6.256 A$$

n) Corrente de curto-circuito assimétrica trifásica, valor eficaz

$$\frac{X_{utot}}{R_{utot}} = \frac{16,0748}{18,2019} = 0,88$$

$F_a = 1,02$ (valor da Tabela 5.1)

$$I_{ca} = F_a \times I_{cs} = 1,02 \times 6.256 = 6.381 A$$

o) Impulso da corrente de curto-circuito

$$I_{cim} = \sqrt{2} \times I_{ca} = \sqrt{2} \times 6.381 = 9.024 kA$$

p) Corrente de curto-circuito bifásico, valor eficaz

$$I_{cb} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cs} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 6.381 = 5.526 \text{ kVA}$$

q) Corrente de curto-circuito fase-terra máxima, valor eficaz

Cálculo da impedância de sequência zero do circuito que liga o transformador ao QGF

$R_{\Omega 0} = 1,8781 \text{ m}\Omega/\text{m}$ (valor da Tabela 3.22)

$$R_{\alpha 0} = \frac{1,8781 \times 15}{4 \times 1.000} = 0,00704 \text{ }\Omega$$

$$R_{u0c1} = R_{\alpha 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,00704 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$R_{u0c1} = 4,8752 \text{ pu}$$

$X_{\Omega 0} = 2,4067 \text{ m}\Omega/\text{m}$ (valor da Tabela 3.22)

$$X_{\alpha 0} = \frac{2,4067 \times 15}{4 \times 1.000} = 0,00902 \text{ }\Omega$$

$$X_{u0c1} = X_{\alpha 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,00902 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$X_{u0c1} = 6,2465 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{u0c1} = R_{u0c1} + jX_{u0c1} = 4,8753 + j6,2465 \text{ pu}$$

Cálculo da impedância de sequência zero do circuito que liga o QGF ao CCM

$R_{\Omega 0} = 1,9868 \text{ m}\Omega/\text{m}$ (valor da Tabela 3.22 - cabo de 120 mm^2)

$$R_{\alpha\Omega 0} = \frac{1,9868 \times 130}{1.000} = 0,25828 \Omega$$

$$R_{u0c2} = R_{\alpha\Omega 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,25828 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$R_{u0c2} = 178,8642 \text{ pu}$$

$X_{\Omega 0} = 2,5104 \text{ m}\Omega/\text{m}$ (valor da Tabela 3.22 - cabo de 120 mm²)

$$X_{\alpha\Omega 0} = \frac{2,5104 \times 130}{1.000} = 0,32635 \Omega$$

$$X_{u0c2} = X_{\alpha\Omega 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,32635 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$X_{u0c2} = 226,0041 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{u0c2} = R_{u0c2} + jX_{u0c2} = 178,8642 + j226,0041 \text{ pu}$$

$$\vec{I}_{cftma} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \vec{Z}_{utot} + \vec{Z}_{a0t} + \sum_{i=1}^{i=n} \vec{Z}_{u0c}} = \frac{3 \times I_b}{\vec{Z}_t}$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{Z}_{u0c} = 4,8753 + j6,2465 + 178,8642 + j226,0041$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{Z}_{u0c} = 183,7395 + j232,2506$$

$$Z_t = 2 \times (18,2019 + j16,0748) + (1,10 + j5,38) + (183,7395 + j232,2506)$$

$$\vec{Z}_t = 221,2433 + j269,7802 \text{ pu}$$

$$\vec{I}_{cftma} = \frac{3 \times 151.934}{(221,2433 + j269,7802)} = 1.306 \text{ A}$$

r) Corrente de curto-circuito fase-terra mínima, valor eficaz

$$R_{\Omega ct} = 40 \, \Omega$$

$$R_{uct} = 40 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2} = 27.700 \, pu$$

$$R_{\Omega mt} = 10 \, \Omega$$

$$R_{umt} = 10 \times \frac{100.000}{1.000 \times 0,38^2} = 6.925 \, pu$$

$$\vec{I}_{cftmi} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \vec{Z}_{utot} + \vec{Z}_{a0t} + \sum_{i=1}^{i=n} \vec{Z}_{u0c} + 3 \times (R_{uct} + R_{umt} + R_{uat})}$$

$$\vec{I}_{cftmi} = \frac{3 \times 151.934}{221,2433 + j269,7802 + 3 \times (27.700 + 6.925)}$$

$$\vec{I}_{cftmi} = \frac{455.802}{104.096 + j269,7802} = 4,38 \, A$$

Nota: é muito difícil precisar o valor da corrente de curto-circuito fase-terra mínima em virtude da longa faixa de variação que a resistência de contato pode assumir nos casos práticos. Logo, em geral, pode-se considerar somente a parcela da resistência da malha de terra, cujo valor pode ser obtido, com a necessária precisão, a partir dos processos de cálculo admitidos no Capítulo 11.

Exemplo de aplicação (5.4)

Determinar as correntes de curto-circuito nos pontos A e B de uma instalação industrial mostrada no diagrama unifilar da Figura 5.18, suprida por uma unidade de geração de 2.500 kVA, alimentando um transformador elevador de 2.500 kVA – 2.400/13.800 V. As perdas do transformador elevador no ensaio de curto-circuito valem 28.000 W. O cabo que liga o

transformador elevador ao cubículo de média tensão é de 35 mm², com capacidade de corrente nominal de 151 A na condição de instalação em canaleta fechada, e cuja impedância ôhmica vale $0,6777 + j0,1128 \Omega/\text{km}$. A unidade de geração dista 80 m do quadro de média tensão. Os dados do sistema estão apresentados na Figura 5.18.

a) Impedância do gerador

Valores em *pu* tomados na base do gerador

Tensão nominal do gerador: $V_{ng} = 2,4 \text{ kV}$

Potência de base: $P_{ng} = 2.500 \text{ kVA}$

Resistência

$$R_{ug} = 0$$

Reatância

$$\bar{Z}_{ug} = R_{ug}'' + jX_{ug}'' = 0 + j0,15 \text{ pu}$$

b) Impedância do circuito que liga o gerador ao transformador elevador

Valores em *pu* tomados na base do gerador

Tensão nominal do gerador: $V_{ng} = 2,4 \text{ kV}$

Potência nominal do gerador: $P_{ng} = 2.500 \text{ kVA}$

$L_{c1} = 20 \text{ m}$

$N_{c1} = 2 \text{ condutores/fase}$

$S_c = 240 \text{ mm}^2$

Resistência

$R_u = 0,0958 \text{ m}\Omega/\text{m}$ (Tabela 3.22)

$$R_{c1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \rightarrow R_{c1\Omega} = \frac{0,0958 \times 20}{2 \times 1.000} = 0,000958 \Omega$$

$$R_{uc1} = R_{c1\Omega} \times \frac{P_{ng}}{1.000 \times V_{ng}^2} = 0,000958 \times \frac{2.500}{1.000 \times 2,4^2}$$

$$R_{uc1} = 0,00041 pu$$

Reatância

$X_{u\Omega} = 0,1070 m\Omega/m$ (Tabela 3.22)

$$X_{c1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \rightarrow X_{c1\Omega} = \frac{0,1070 \times 20}{2 \times 1.000} = 0,00107 \Omega$$

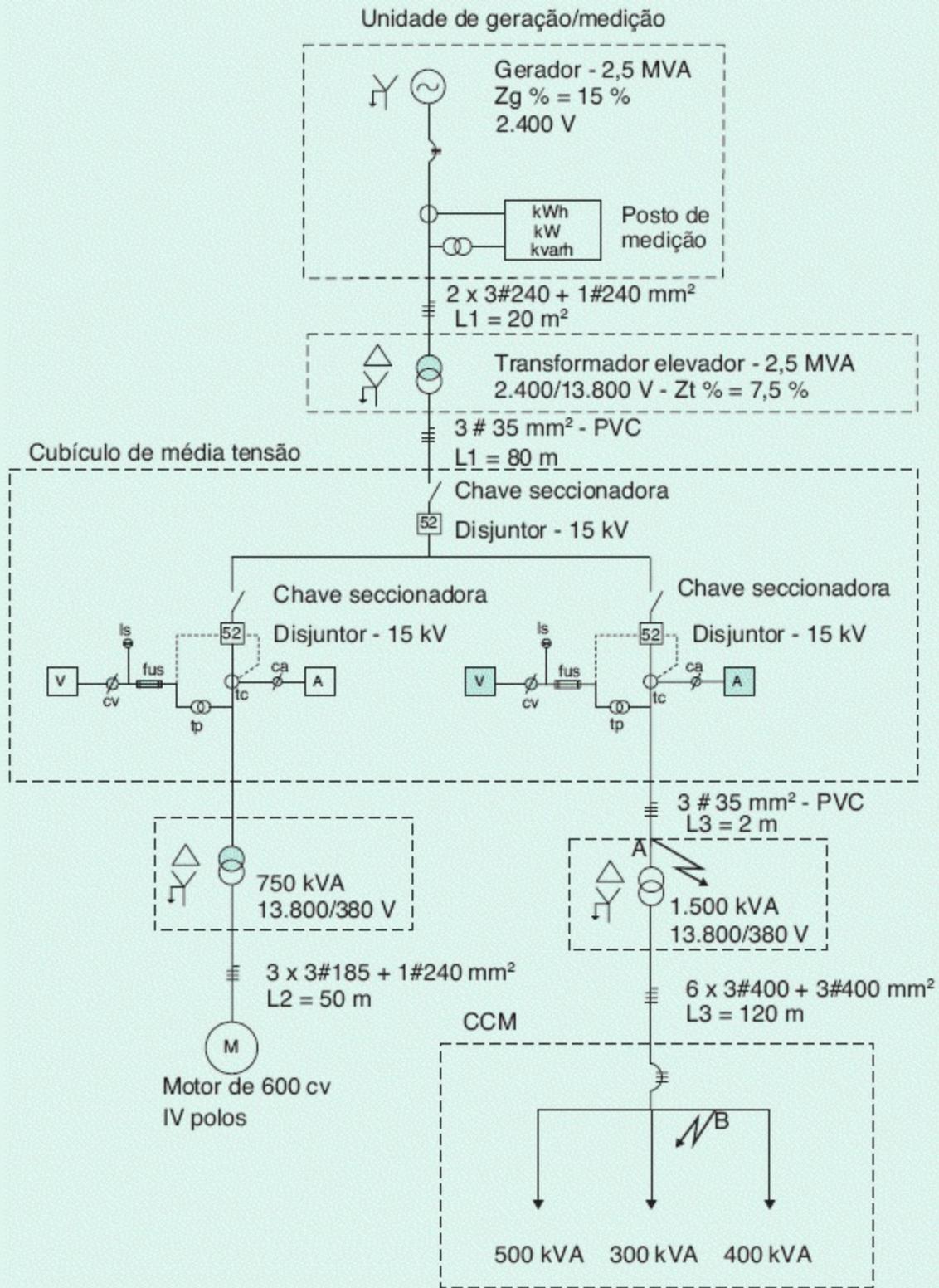


Figura 5.18 Diagrama unifilar de planta industrial com geração independente.

$$X_{uc1} = X_{c1\Omega} \times \frac{P_{ng}}{1.000 \times V_{ng}^2} = 0,00107 \times \frac{2.500}{1.000 \times 2,4^2}$$

$$X_{uc1} = 0,00046 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{uc1} = R_{uc1} + jX_{uc1} = 0,00041 + j0,00046 \text{ pu}$$

c) Impedância do transformador elevador

Valores em *pu* tomados na base do transformador elevador

Potência nominal do transformador: $P_{nte} = 2.500 \text{ kVA}$

Resistência

$P_{cu} = 28.000 \text{ W}$ (dado de placa do transformador)

$$R_{ute} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{nte}} = \frac{28.000}{10 \times 2.500} = 1,12 \% = 0,0112 \text{ pu}$$

Reatância

$$X_{ute} = \sqrt{Z_{ute}^2 - R_{ute}^2} = \sqrt{0,075^2 - 0,0112^2} = 0,074 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{ute} = R_{ute} + jX_{ute} = 0,0112 + j0,074 \text{ pu}$$

d) Impedância do circuito que liga o transformador elevador ao cubículo de média tensão

Valores em *pu* tomados na base do transformador elevador

Tensão nominal do transformador: $V_{nte} = 13,80 \text{ kV}$

Potência nominal do transformador: $P_{nte} = 2.500 \text{ kVA}$

$L_c = 80 \text{ m}$

$N_c = 1 \text{ condutor/fase}$

$S_c = 35 \text{ mm}^2$

Resistência

$R_{u\Omega} = 0,6777 \text{ m}\Omega/\text{m}$ (valor da Tabela 4.29 do livro *Manual de Equipamentos Elétricos*, do autor)

$$R_{c2\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c2}}{1.000 \times N_{c2}} \rightarrow R_{c2\Omega} = \frac{0,6777 \times 80}{1.000 \times 1} = 0,0542 \Omega$$

$$R_{uc2} = R_{c2\Omega} \times \frac{P_{nte}}{1.000 \times V_{nte}^2} = 0,0542 \times \frac{2.500}{1.000 \times 13,8^2} = 0,00071 \text{ pu}$$

Reatância

$X_{u\Omega} = 0,1838 \text{ m}\Omega/\text{m}$ (valor da Tabela 4.25 do livro *Manual de Equipamentos Elétricos*, do autor)

$$X_{c2\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c2}}{1.000 \times N_{c2}} \rightarrow X_{c2\Omega} = \frac{0,1838 \times 80}{1.000 \times 1} = 0,0147 \Omega$$

$$X_{uc2} = X_{c2\Omega} \times \frac{P_{nte}}{1.000 \times V_{nte}^2} = 0,0147 \times \frac{2.500}{1.000 \times 13,8^2}$$

$$X_{uc2} = 0,00019 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{uc2} = R_{uc2} + jX_{uc2} = 0,00071 + j0,00019 \text{ pu}$$

e) Impedância do circuito que liga o cubículo de média tensão ao transformador abaixador

Por tratar-se de um circuito muito pequeno sua impedância será desprezada.

f) Impedância do transformador abaixador

Valores em *pu* tomados na base do transformador abaixador

Potência nominal do transformador: $P_{nta} = 1.500 \text{ kVA}$

Resistência

$$R_{uta} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{nta}} = \frac{16.000}{10 \times 1.500} = 1,06 \% = 0,0106 \text{ pu}$$

Reatância

$$P_{cu} = 16.000 \text{ W (dado de placa do transformador)}$$

$$X_{t\%} = 7,5 \% \text{ (dado de placa do transformador)}$$

$$X_{uta} = \sqrt{Z_{uta}^2 - R_{uta}^2} = \sqrt{0,075^2 - 0,0106^2} = 0,074 \text{ pu}$$

$$Z_{uta} = 0,0106 + j0,074 \text{ pu}$$

g) Impedância do circuito que liga o transformador abaixador ao CCM

Valores em *pu* tomados na base do transformador abaixador

Tensão nominal do transformador: $V_{nta} = 0,38 \text{ kV}$

Potência nominal: $P_{nta} = 1.500 \text{ kVA}$

$$L_{c3} = 120 \text{ m}$$

$$N_{c3} = 6 \text{ condutores/fase}$$

$$S_c = 400 \text{ mm}^2$$

Resistência

$$R_{u\Omega} = 0,0608 \text{ m}\Omega/\text{m (Tabela 3.22)}$$

$$R_{c3\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c3}}{1.000 \times N_{c3}} \rightarrow R_{c3\Omega} = \frac{0,0608 \times 120}{6 \times 1.000} = 0,0012 \text{ }\Omega$$

$$R_{uc3} = R_{c3\Omega} \times \frac{P_{nta}}{1.000 \times V_{nta}^2} = 0,0012 \times \frac{1.500}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$R_{uc3} = 0,0124 \text{ pu}$$

Reatância

$$X_{c3\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c3}}{1.000 \times N_{c3}} \rightarrow X_{c3\Omega} = \frac{0,1058 \times 120}{6 \times 1.000} = 0,0021 \Omega$$

$$\vec{Z}_{uc3} = R_{uc3} + jX_{uc3} = 0,0124 + j0,0021 pu$$

$$X_{uc3} = X_{c3\Omega} \times \frac{P_{nta}}{1.000 \times V_{nta}^2} = 0,0021 \times \frac{1.500}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$X_{uc3} = 0,0218 pu$$

$X_u = 0,1058 m\Omega/m$ (Tabela 3.22)

h) Mudança de base

Como cada componente do sistema foi determinado em uma base diferente, é necessário calcular todas as impedâncias em uma única base, escolhida aleatoriamente, neste caso, igual à base do transformador abaixador, ou seja:

Valores em *pu* tomados na base em estudo

Tensão de base: $V_b = 13,80 kV$

Potência de base: $P_b = 1.500 kVA$

Impedância do gerador

$$R_{ugb} = 0$$

$$X_{ugb} = X_{ug} \times \frac{P_b}{P_{ng}} \times \left(\frac{V_{ng}}{V_b} \right)^2 = 0,15 \times \frac{1.500}{2.500} \times \left(\frac{2,40}{13,80} \right)^2$$

$$X_{ugb} = 0,0027 pu$$

$$\vec{Z}_{ugb} = R_{ugb} + jX_{ugb} = 0,0 + j0,0027 pu$$

Impedância do circuito que liga o gerador ao transformador elevador

$$R_{uc1b} = R_{uc1} \times \frac{P_b}{P_{ng}} \times \left(\frac{V_{ng}}{P_b} \right)^2 = 0,00041 \times \frac{1.500}{2.500} \times \left(\frac{2,40}{13,80} \right)^2$$

$$R_{uc1b} = 0,000007 \text{ pu}$$

$$X_{uc1b} = X_{uc1} \times \frac{P_b}{P_{ng}} \times \left(\frac{V_{ng}}{V_b} \right)^2 = 0,00046 \times \frac{1.500}{2.500} \times \left(\frac{2,4}{13,80} \right)^2$$

$$X_{uc1b} = 0,000008 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{uc1b} = R_{uc1b} + jX_{uc1b} = 0,000007 + j0,000008 \text{ pu}$$

Impedância do transformador elevador (2.500 kVA)

$$R_{uteb} = R_{ute} \times \frac{P_b}{P_{nte}} \times \left(\frac{V_{nte}}{P_b} \right)^2 = 0,0112 \times \frac{1.500}{2.500} \times \left(\frac{13,80}{13,80} \right)^2$$

$$R_{uteb} = 0,0067 \text{ pu}$$

$$X_{uteb} = X_{ute} \times \frac{P_b}{P_{nte}} \times \left(\frac{V_{nte}}{V_b} \right)^2 = 0,074 \times \frac{1.500}{2.500} \times \left(\frac{13,80}{13,80} \right)^2$$

$$X_{uteb} = 0,0444 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{uteb} = R_{uteb} + jX_{uteb} = 0,0067 + j0,0444 \text{ pu}$$

Impedância do circuito que liga o transformador elevador ao cubículo de média tensão

$$R_{uc2b} = R_{uc2} \times \frac{P_b}{P_{nte}} \times \left(\frac{V_{nte}}{V_b} \right)^2 = 0,00071 \times \frac{2.500}{2.500} \times \left(\frac{13,80}{13,80} \right)^2$$

$$R_{uc2b} = 0,00071 \text{ pu}$$

$$X_{uc2b} = X_{ute} \times \frac{P_b}{P_{bte}} \times \left(\frac{V_{nte}}{V_b} \right)^2 = 0,00019 \times \frac{2.500}{2.500} \times \left(\frac{13,80}{13,80} \right)^2$$

$$X_{uc2b} = 0,00019 \text{ pu}$$

$$\bar{Z}_{uc2b} = R_{c2eb} + jX_{uc2b} = 0,00071 + j0,000019 \text{ pu}$$

Impedância do transformador abaixador (1.500 kVA)

$$R_{utab} = R_{uta} \times \frac{P_b}{P_{bta}} = 0,0106 \times \frac{1.500}{1.500} = 0,0106 \text{ pu}$$

$$X_{utab} = X_{uta} \times \frac{P_b}{P_{bta}} = 0,074 \times \frac{1.500}{1.500} = 0,074 \text{ pu}$$

$$\bar{Z}_{utab} = R_{utab} + jX_{utab} = 0,0106 + j0,074 \text{ pu}$$

Impedância do circuito que liga o transformador abaixador ao CCM

$$R_{uc3b} = R_{uc3} \times \frac{P_{nt}}{P_b} \times \left(\frac{V_{nta}}{V_b} \right)^2 = 0,0124 \times \frac{1.500}{1.500} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2$$

$$R_{uc3b} = 0,0124 \text{ pu}$$

$$X_{uc3b} = X_{uta} \times \frac{P_b}{P_{bta}} \times \left(\frac{V_{bta}}{V_b} \right)^2 = 0,0218 \times \frac{1.500}{1.500} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2 = 0,0218 \text{ pu}$$

$$\bar{Z}_{uc3b} = R_{uc3b} + jX_{uc3b} = 0,0124 + j0,0218 \text{ pu}$$

i) Corrente de base

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} = \frac{1.500}{\sqrt{3} \times 13,80} = 62,7 \text{ A}$$

j) Cálculo da corrente de curto-circuito no ponto A (terminais primários do transformador abaixador)

Impedância total do circuito

$$\begin{aligned} Z_{totA} &= Z_{ugb} + Z_{uc1b} + Z_{uc2b} = (0,0 + j0,0027) + \\ &(0,000007 + j0,000008) + (0,0067 + j0,0444) + \\ &(0,00071 + j0,000019) \end{aligned}$$

$$Z_{tot} = 0,00742 + j0,04444 \text{ pu}$$

Corrente de curto-circuito simétrica, valor eficaz

$$I_{cs} = \frac{1}{Z_{tot}} = \frac{1}{0,00742 + j0,04444} = 22,40 \text{ pu}$$

A corrente de curto-circuito em A vale:

$$I_{csA} = I_b \times I_{cs} = 62,7 \times 22,40 = 1.404,48 \text{ A}$$

k) Cálculo da corrente de curto-circuito no ponto B (terminais de entrada do CCM)

Impedância total do circuito

$$\begin{aligned} Z_{totA} &= Z_{ugb} + Z_{uc1b} + Z_{uc2b} + Z_{utab} + Z_{uc3b} \\ &= (0,0 + j0,0027) + (0,000007 + j0,000008) + \\ &(0,0067 + j0,0444) + (0,00071 + j0,000019) + \\ &(0,0106 + j0,074) + (0,0124 + j0,0218) \end{aligned}$$

$$Z_{tot} = 0,00742 + j0,04444 \text{ pu}$$

Corrente de curto-circuito simétrica, valor eficaz

$$I_{cs} = \frac{1}{Z_{tot}} = \frac{1}{0,0342 + j0,1429} = 6,8 \text{ pu}$$

A corrente de curto-circuito em B vale:

$$I_{bb} = \frac{1.500}{\sqrt{3} \times 0,38} = 2.279 \text{ A}$$

$$I_{csaB} = I_{bb} \times I_{cs} = 2.279 \times 6,84 = 15.588,36 \text{ A}$$

5.6 Contribuição dos motores de indução nas correntes de falta

Como nas instalações, em geral, há predominância de motores de indução no total da carga, em alguns casos pode ser relevante a contribuição da corrente destas máquinas no cálculo das correntes de curto-circuito do projeto.

Durante uma falta, os motores de indução ficam submetidos a uma tensão praticamente nula, provocando sua parada. Porém, a inércia do rotor e da carga faz com que estes continuem em operação por algum instante, funcionando agora como *gerador*. Como em operação normal os motores são alimentados pela fonte de tensão da instalação, no momento da falta, pela rotação que ainda mantém, associada ao magnetismo remanescente do núcleo de ferro e de curta duração, passam a contribuir com a intensidade da corrente de curto-circuito no ponto de defeito.

Os motores de potência elevada, alimentados em tensão superior a 600 V, influem significativamente no valor da corrente de curto-circuito e, por isso, devem ser considerados individualmente como reatância no diagrama de impedância, cujo valor corresponde à reatância subtransitória da máquina. As [Figuras 5.19](#) e [5.20](#) mostram, esquematicamente, uma instalação de motores

de grande potência e o respectivo bloco de impedância.

No caso de instalações industriais, em que há sensível predominância de pequenos motores — alimentados, geralmente, em tensões de 220 V, 380 V e 440 V —, e não se pode determinar o funcionamento de todas as unidades no momento da falta, considera-se uma reatância equivalente do agrupamento de motores igual a 25 % na base da soma das potências individuais, em cv. A [Figura 5.20](#) mostra, esquematicamente, esta configuração, enquanto a [Figura 5.19](#) indica o respectivo bloco de impedância.

Quando a instalação possui motores de potência elevada, na tensão inferior a 600 V, é conveniente tomar sua impedância separadamente das demais, considerando seu valor em 28 % nas bases da potência e tensão nominais. Se a tensão do motor for igual ou superior a 600 V, a impedância do motor pode ser tomada igual a 25 % nas mesmas bases anteriormente citada.

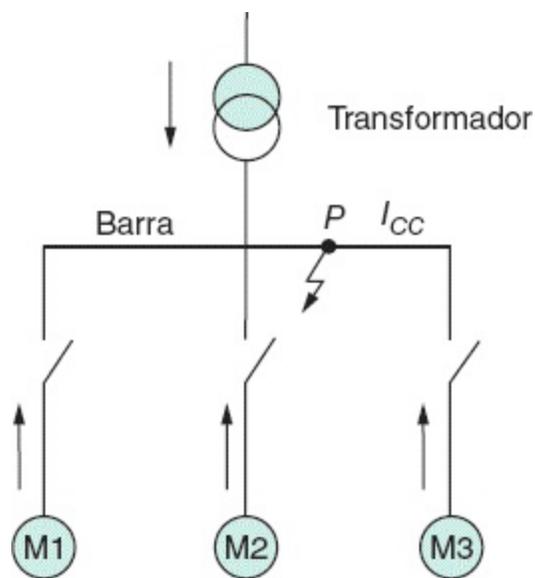


Figura 5.19 Diagrama unifilar básico.

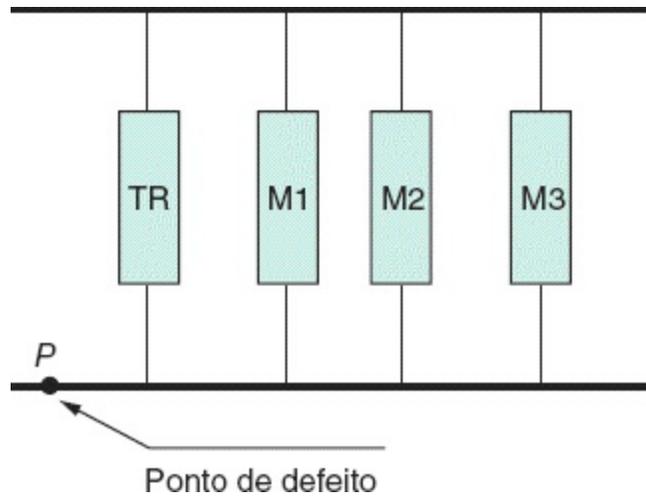


Figura 5.20 Impedâncias em paralelo.

Exemplo de aplicação (5.5)

Considerar a instalação industrial representada na Figura 5.14. Determinar as correntes de curto-circuito na barra do CCM3, levando em conta somente a contribuição dos motores a ela ligados. As potências dos motores ali instalados são:

Motores de C1 a C12: 5 cv/380 V – IV polos.

Motor D1: 100 cv/380 V – IV polos.

Considerar os condutores de isolamento XLPE.

A Figura 5.21 mostra o diagrama unifilar simplificado da Figura 5.14. Já a Figura 5.22 mostra o diagrama de bloco de impedâncias.

a) Impedâncias até o barramento do CCM3

De acordo com o exemplo 5.3, e considerando as mesmas bases ali adotadas, tem-se:

$$\vec{Z}_{\text{utot}} = 18,2019 + j16,0748 \text{ pu}$$

b) Impedância dos motores de pequena potência (de C1 a C12)

Resistência

$$R_{um1} \cong 0$$

Reatância

$$X_{pm1} = 25 \% = 0,25 pu \text{ (nas bases de } \Sigma P_{cv} \text{ e } V_{nm})$$

$$\Sigma P_{cv} = 12 \times 5 = 60 cv$$

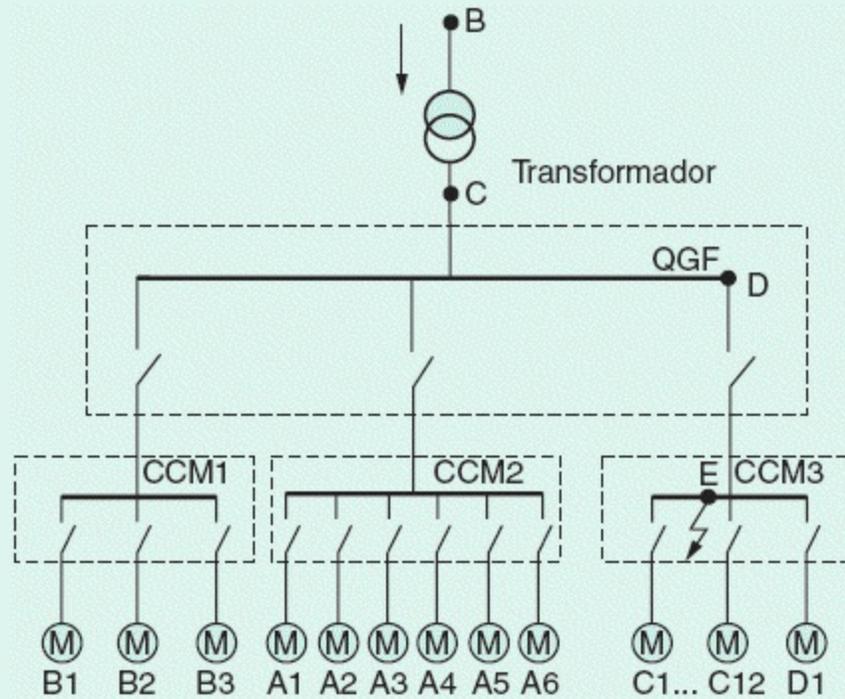


Figura 5.21 Diagrama unifilar.

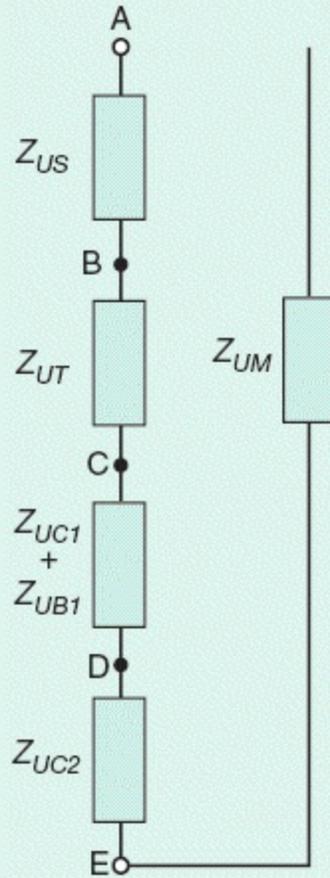


Figura 5.22 Impedâncias série/paralelo.

$$V_{nm} = 380 \text{ V}$$

$$F_p = 0,83 \text{ (Tabela 6.3)}$$

$$\eta = 0,83 \text{ (Tabela 6.3)}$$

$$\sum P_{nm} = \frac{\sum P_{cv} \times 0,736}{F_p \times \eta} = \frac{60 \times 0,736}{0,83 \times 0,83} = 64,1 \text{ kVA}$$

$$X_{um1} = X_{pm1} \times \frac{P_b}{\sum P_{nm}} \times \left(\frac{V_{nm}}{V_b} \right)^2$$

$$X_{um1} = 0,25 \times \frac{100.000}{64,1} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2 = 390,01 \text{ pu (nas bases de } P_b \text{ e } V_b)$$

$$\vec{Z}_{um1} = R_{um1} + jX_{um1} = 0 + j390,01 \text{ pu}$$

c) Impedância do motor D1 (100 cv)

Resistência

$$R_{um2} \cong 0$$

Reatância

$X_{pm2} = 25\%$ (nas bases de P_{nm} e V_{nm})

$$P_{nm} = \frac{P_{cv} \times 0,736}{F_p \times \eta} = \frac{100 \times 0,736}{0,87 \times 0,92} = 91,95 \text{ kVA}$$

$$X_{um2} = X_{pm2} \times \frac{P_b}{\sum P_{nm}} \times \left(\frac{V_{nm}}{V_b} \right)^2$$

$$X_{um2} = 0,25 \times \frac{100.000}{91,95} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2 = 271,88 \text{ pu (nas bases de } P_b \text{ e } V_b)$$

$$\vec{Z}_{um2} = R_{um2} + jX_{um2} = 0 + j271,88 \text{ pu}$$

d) Impedâncias em paralelo dos motores C1 a C12 e D1

$$\bar{Z}_{ump} = \frac{(R_{um1} + jX_{um1}) \times (R_{um2} + jX_{um2})}{R_{um1} + jX_{um1} + R_{um2} + jX_{um2}}$$

$$\bar{Z}_{ump} = \frac{(0 + j390,01) \times (0 + j271,88)}{0 + j390,01 + 0 + j271,88} = \rightarrow \bar{Z}_{ump} = 0 + j160,2017 \text{ pu}$$

e) Impedância em paralelo dos motores e do sistema

$$\bar{Z}_{ump1} = \frac{Z_{utot} \times Z_{ump}}{Z_{utot} + Z_{ump}} = \frac{(18,2019 + j16,074) \times (0 + j160,2017)}{(18,2019 + j16,074) + (0 + j160,2017)}$$

$$\bar{Z}_{ump1} = \frac{-2.575,08 + j2.915,97}{18,2019 + j176,2757} = 14,8750 + -j16,1442 \text{ pu}$$

f) Corrente de curto-circuito na barra do CCM3, com a contribuição dos motores

$$I_{cc} = \frac{I_b}{Z_{ump1}} = \frac{151.934}{(14,8750 - j16,442)} = \frac{151.934}{21,9} = 6.937 \text{ pu}$$

Observar que a contribuição dos motores fez elevar a corrente de curto-circuito de 6,38 kA para 6,93 kA, correspondendo, neste caso, a um incremento de 8,3 %. Outrossim, o curto-circuito no QGF recebe contribuição de todos os motores ligados aos diferentes CCMs. Por simplicidade, não foi considerada esta hipótese no presente Exemplo de aplicação.

5.7 Aplicação das correntes de curto-circuito

As correntes de curto-circuito são de extrema importância em qualquer projeto de instalação elétrica. Entre suas aplicações práticas importantes, iremos particularizar a determinação das capacidades térmicas e dinâmicas dos barramentos de subestações e conjuntos de manobra.

5.7.1 Solicitação eletrodinâmica das correntes de curto-

circuito

As correntes de curto-circuito que se manifestam em determinada instalação podem provocar sérios danos de natureza mecânica nos barramentos, isoladores, suportes e na própria estrutura dos conjuntos de manobra.

Quando as correntes elétricas percorrem dois condutores (barras ou cabos), mantidos paralelos e próximos entre si, aparecem forças de deformação que, dependendo de sua intensidade, podem danificar mecanicamente estes condutores. Os sentidos de atuação destas forças dependem dos sentidos em que as correntes percorrem os condutores, podendo surgir forças de atração ou repulsão. Se as correntes fluem no mesmo sentido, os barramentos se atraem; se as correntes fluem em sentidos contrários, os barramentos se afastam. A força entre os condutores tem o dobro da frequência comparativamente à frequência natural do sistema. Para sistemas de 60 Hz, a força exercida sobre os barramentos tem frequência de 120 Hz, conforme pode ser observado na [Figura 5.23](#).

Considerando-se duas barras paralelas e biapoiadas nas extremidades, percorridas por correntes de forma de onda complexa, a determinação das solicitações mecânicas pode ser obtida resolvendo-se a seguinte expressão:

$$F_b = 2,04 \times \frac{I_{dm}^2}{100 \times D} \times L_b \text{ (kgf)} \quad (5.43)$$

F_b - força de atração ou repulsão exercida sobre as barras condutoras, em kgf;

D - distância entre as barras, em cm;

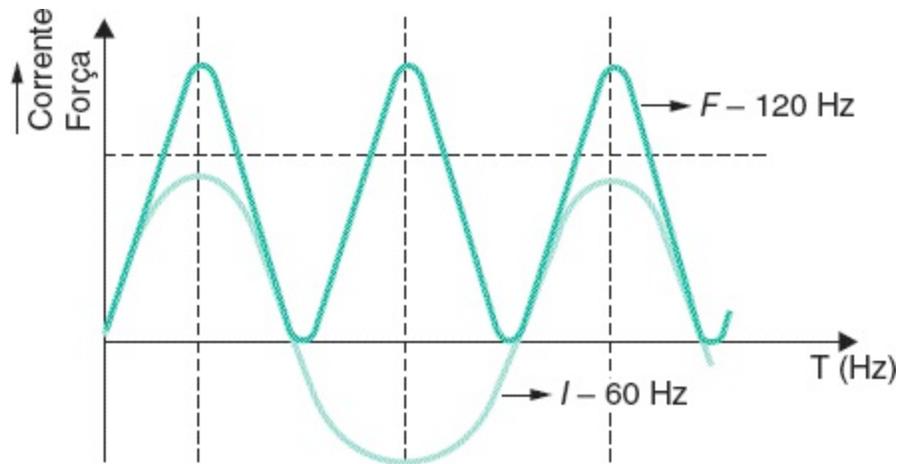


Figura 5.23 Frequência do sistema e da força para circuitos de

L_b - comprimento da barra, isto é, distância entre dois apoios sucessivos, em cm;

I_{cim} - corrente de curto-circuito, tomada no seu valor de crista, em kA, e dada pela Equação (5.36).

A seção transversal das barras deve ser suficientemente dimensionada para suportar a força F , sem deformar-se. Os esforços resistentes das barras podem ser calculados pelas Equações (5.44) e (5.45).

$$W_b = \frac{B \times H^2}{6.000} \text{ (cm}^3\text{)} \quad (5.44)$$

$$M_f = \frac{F_b \times L_b}{12 \times W_b} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (5.45)$$

W_b - momento resistente da barra, em cm³;

M_f - tensão à flexão, em kgf/cm²;

H - altura da seção transversal, em mm;

B - base da seção transversal, em mm.

As barras podem ser dispostas com as faces de maior dimensão paralelas ou com as faces de menor dimensão paralelas. No primeiro caso, a tensão à

flexão, M , assume um valor inferior ao valor encontrado para o segundo caso.

Sendo o cobre o material mais comumente utilizado nos conjuntos de manobra industriais, os esforços atuantes nas barras ou vergalhões não devem ultrapassar a $M_{fcu} \leq 2.000 \text{ kgf/cm}^2 (= 20 \text{ kgf/mm}^2)$, que corresponde ao limite à flexão. Para o alumínio, o limite é $M_{fal} \leq 900 \text{ kgf/cm}^2 (= 9 \text{ kgf/mm}^2)$.

O dimensionamento dos brramentos requer especial atenção quanto às suas estruturas de apoio, principalmente o limite dos esforços permissíveis nos isoladores de suporte.

Exemplo de aplicação (5.6)

Considerar o CCM3 da Figura 5.14 que representa a indústria já analisada no cálculo de curto-circuito. Com os dados já obtidos, pede-se determinar a força de sollicitação nas barras para o curto-circuito trifásico. A Figura 5.24 esquematiza a disposição das barras e seus respectivos apoios.

$I_{cm} = 9,0 \text{ kA}$ (valor já calculado).

Aplicando-se a Equação (5.43), tem-se:

$$F_b = 2,04 \times \frac{9,0^2}{100 \times 8} \times 150 = 30,9 \text{ kgf}$$

Portanto, a resistência mecânica das barras deve ser superior ao valor do esforço produzido por F_b antes calculado. Os isoladores e suportes também devem ter resistências compatíveis com o mesmo esforço de sollicitação.

O valor da resistência mecânica das barras dispostas com as faces de maior dimensão paralelas vale:

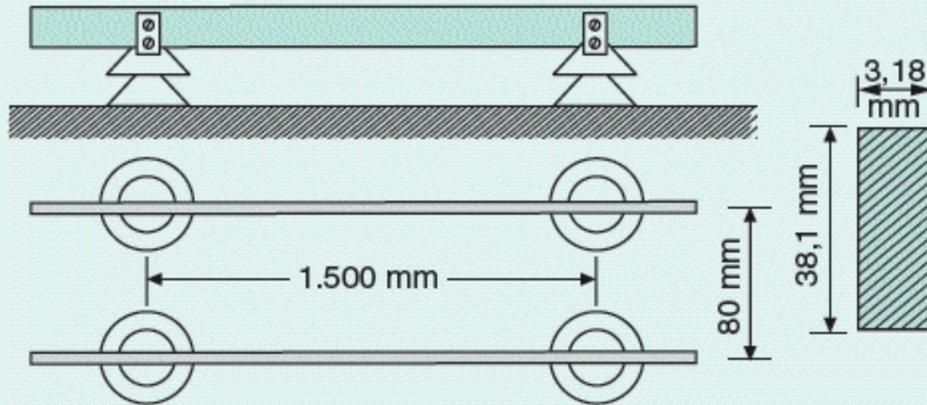


Figura 5.24 Barramento.

$B = 40 \text{ mm}$ (aproximadamente $1 \frac{1}{2}''$)

$H = 3 \text{ mm}$ (aproximadamente $\frac{1}{8}''$)

$L_b = 1.500 \text{ mm} = 150 \text{ cm}$

O momento resistente da barra vale:

$$W_b = \frac{B \times H^2}{6.000} = \frac{40 \times 3^2}{6.000} = 0,06 \text{ cm}^3$$

A tensão à flexão vale:

$$M_f = \frac{F_b \times L_b}{12 \times W_b} = \frac{30,9 \times 150}{12 \times 0,06} = 6.437,5 \text{ kgf/cm}^2$$

Comparando-se o valor de M_f com o máximo permissível para o cobre, observa-se que a barra não suporta os esforços resultantes, isto é: $M_f > M_{f_{cu}}$.

Variando-se a disposição das barras, isto é, colocando-as com as faces de menor dimensão paralelas, tem-se:

$$H = 40 \text{ mm}$$

$$B = 3 \text{ mm}$$

$$W_b = \frac{B \times H^2}{6.000} = \frac{3 \times 40^2}{6.000} = 0,8 \text{ cm}^3$$

A tensão à flexão vale:

$$M_f = \frac{F_b \times L_b}{12 \times W_b} = \frac{30,9 \times 150}{12 \times 0,8} = 482,81 \text{ kgf/cm}^2$$

Então:

$$M_f < M_{rcu} \text{ (logo, a barra suportará os esforços resultantes)}$$

As Tabelas 5.2 e 5.3 fornecem os esforços mecânicos a que ficam submetidos os barramentos dos conjuntos de manobra durante a ocorrência de um curto-circuito. A Tabela 5.2 é aplicada quando as barras estão com as faces de maior dimensão em paralelo, enquanto a Tabela 5.3 se destina aos barramentos em que as faces de menor dimensão estão em paralelo. As dimensões das barras de cobre foram convertidas das medidas inglesas (polegadas) para o sistema internacional.

Tabela 5.2 Dimensionamento de barramentos pelo esforço mecânico (faces de maior dimensão em paralelo)

Esforços mecânicos em kgf/mm ²									
Barramento		Corrente de curto-circuito em kA							
B	H	5	10	15	20	30	40	50	60
19,0	1,59	107,5	430,0	967,5	1.720,0	3.870,0	6.880,1	10.750,2	15.480,3
25,4	1,59	80,4	321,6	723,7	1.286,6	2.894,9	5.146,5	8.041,5	11.579,7

12,7	3,18	40,2	160,8	361,8	643,3	1.447,4	2.573,2	4.020,7	5.789,8
19,0	3,18	26,8	107,5	241,8	430,0	967,5	1.720,0	2.687,5	3.870,0
25,4	3,18	20,1	80,4	180,9	321,6	723,7	1.286,6	2.010,3	2.894,9
38,1	3,18	13,4	53,6	120,6	214,4	482,4	857,7	1.340,2	1.929,9
25,4	4,77	8,9	35,7	80,4	142,9	321,6	571,8	893,5	1.286,6
38,1	4,77	5,9	23,8	53,6	95,3	214,4	381,2	595,6	857,7
50,8	4,77	4,4	17,8	40,2	71,4	160,8	285,9	446,7	643,3
25,4	6,35	5,0	20,1	45,3	80,6	181,5	322,6	504,1	726,0
38,1	6,35	3,3	13,4	30,2	53,7	121,0	215,1	336,1	484,0
50,8	6,35	2,5	10,0	22,6	40,3	90,7	161,3	252,9	363,0
63,5	6,35	2,0	8,0	18,1	32,2	72,6	129,0	201,6	290,4
70,2	6,35	1,8	7,3	16,4	29,2	65,6	116,7	182,4	262,6
88,9	6,35	1,4	5,7	12,9	23,0	51,8	92,1	144,0	207,4
101,6	6,35	1,2	5,0	11,3	20,1	45,3	80,6	126,0	181,5
25,4	12,70	1,2	5,0	11,3	20,1	45,3	80,6	126,0	181,5
50,8	12,70	0,6	2,5	5,6	10,1	22,6	40,3	63,0	90,7
76,2	12,70	0,4	1,6	3,7	6,7	15,1	26,8	42,0	60,5
101,6	12,70	0,3	1,2	2,8	5,0	11,3	20,1	31,5	45,3

Condições: Espaçamento entre dois apoios consecutivos das barras: 550 mm. Distância entre as barras: 80 mm

Tabela 5.3 Dimensionamento de barramentos pelo esforço mecânico (faces de menor dimensão em paralelo)

Esforços mecânicos em kgf/mm ²									
Barramento		Corrente de curto-circuito em kA							
B	H	5	10	15	20	30	40	50	60
1,59	19,0	9,0	35,9	80,9	143,9	323,8	575,7	899,6	1.295,4
1,59	25,4	5,0	20,1	45,3	80,5	181,2	322,1	503,3	724,8
3,18	12,7	10,0	40,2	90,6	161,0	362,4	644,3	1.006,7	1.449,7
3,18	19,0	4,5	17,9	40,4	71,9	161,9	287,8	449,8	647,7
3,18	25,4	2,5	10,0	22,6	40,2	90,6	161,0	251,8	362,4
3,18	38,1	1,1	4,4	10,0	17,9	40,2	71,6	111,8	161,0
4,77	25,4	1,6	6,7	15,1	26,8	60,4	107,4	167,8	241,6
4,77	38,1	0,7	2,9	6,7	11,9	26,8	47,7	74,5	107,4
4,77	50,8	0,4	1,6	3,7	6,7	15,1	26,8	41,9	60,4
6,35	25,4	1,2	5,0	11,3	20,1	45,3	80,6	126,0	181,5
6,35	38,1	0,5	2,2	5,0	8,9	20,1	35,8	56,0	80,7
6,35	50,8	0,3	1,2	2,8	5,0	11,3	20,1	31,5	45,4

6,35	63,5	0,2	0,8	1,8	3,2	7,2	12,9	20,1	29,0
6,35	70,2	0,2	0,6	1,5	2,6	5,9	10,5	16,5	23,7
6,35	88,9	0,1	0,4	0,9	1,6	3,7	6,6	10,2	14,8
6,35	101,6	-	0,3	0,7	1,2	2,8	5,0	7,8	11,3
12,70	25,4	-	2,5	5,6	10,0	22,6	40,3	63,0	90,7
12,70	50,8	-	0,6	1,4	2,5	5,6	10,0	15,7	22,6
12,70	76,2	-	0,2	0,6	1,1	2,5	4,4	7,0	10,0
12,70	101,6	-	0,1	0,3	0,6	1,4	2,5	3,9	5,6

Condições: Espaçamento entre dois apoios consecutivos das barras: 550 mm. Distância entre as barras: 80 mm

Exemplo de aplicação (5.7)

Dimensionar o barramento de um QGF, no qual a corrente de curto-circuito simétrica tem valor eficaz de 15 kA, considerando-se que a distância entre os apoios isolantes é de 550 mm e a distância entre as barras é de 80 mm. As barras estão com as faces de maior dimensão em paralelo.

Para que os esforços na barra não ultrapassem o limite de 20 kgf/mm^2 ($= 2.000 \text{ kgf/cm}^2$), toma-se a barra de $63,5 \times 6,35 \text{ mm}$ na Tabela 5.2.

5.7.2 Solicitação térmica das correntes de curto-circuito

As correntes de curto-circuito provocam efeitos térmicos nos barramentos, cabos, chaves e outros equipamentos, danificando-os, caso não estejam

suficientemente dimensionados para suportá-las.

Os efeitos térmicos dependem da variação e da duração da corrente de curto-circuito, além do valor de sua intensidade. São calculados pela Equação (5.46).

$$I_{th} = I_{cis} \times \sqrt{M + N} \text{ (kA)} \quad (5.46)$$

I_{cis} - corrente eficaz inicial de curto-circuito simétrica, em kA;

M - fator de influência do componente de corrente contínua, dado na [Tabela 5.4](#);

N - fator de influência do componente de corrente alternada, dado na [Tabela 5.5](#);

I_{th} - valor térmico médio efetivo da corrente instantânea.

Em geral, os fabricantes indicam os valores da corrente térmica nominal de curto-circuito que seus equipamentos, barramentos etc. podem suportar durante um período de tempo T_{th} , normalmente definido em 1 s.

Tabela 5.4 Fator de influência do componente contínuo de curto-circuito (M)

Duração $T_d(s)$	Fator de assimetria								
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
0,01	0,50	0,64	0,73	0,92	1,07	1,26	1,45	1,67	1,80
0,02	0,28	0,35	0,50	0,60	0,72	0,88	1,14	1,40	1,62
0,03	0,17	0,23	0,33	0,41	0,52	0,62	0,88	1,18	1,47
0,04	0,11	0,17	0,25	0,30	0,41	0,50	0,72	1,00	1,33
0,05	0,08	0,12	0,19	0,28	0,34	0,43	0,60	0,87	1,25
0,07	0,03	0,08	0,15	0,17	0,24	0,29	0,40	0,63	0,93
0,10	0,00	0,00	0,00	0,01	0,15	0,23	0,35	0,55	0,83
0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,10	0,15	0,30	0,52
0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,19	0,20

1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tabela 5.5 Fator de influência do componente alternado de curto-circuito (N)

Duração $T_d(s)$	Relação entre I_{cis}/I_{cs}								
	6,0	5,0	4,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,25	1,0
0,01	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	1,00	1,00
0,02	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98	1,00	1,00
0,03	0,84	0,87	0,89	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00	1,00
0,04	0,78	0,84	0,86	0,90	0,93	0,96	0,97	0,99	1,00
0,05	0,76	0,80	0,84	0,88	0,91	0,95	0,97	0,99	1,00
0,07	0,70	0,75	0,80	0,86	0,88	0,92	0,96	0,97	1,00
0,10	0,68	0,70	0,76	0,83	0,86	0,90	0,95	0,96	1,00
0,20	0,53	0,58	0,67	0,75	0,80	0,85	0,92	0,95	1,00
0,50	0,38	0,44	0,53	0,64	0,70	0,77	0,87	0,94	1,00
1,00	0,27	0,34	0,40	0,50	0,60	0,70	0,84	0,91	1,00
2,00	0,18	0,23	0,30	0,40	0,50	0,63	0,78	0,87	1,00
3,00	0,14	0,17	0,25	0,34	0,40	0,58	0,73	0,86	1,00

Exemplo de aplicação (5.8)

Em uma instalação industrial, a corrente inicial eficaz simétrica de curto-circuito no barramento do QGF é de 32 kA, sendo a relação X/R igual a 1,80. Calcular a corrente térmica mínima que devem ter as chaves seccionadoras ali instaladas.

$$I_{cis} = I_{cs}$$

Como já foi mencionado anteriormente, esta relação só é válida quando o ponto de geração está distante do ponto de defeito.

$$\frac{X}{R} = 1,80 \rightarrow F_a = 1,16 \text{ (Tabela 5.1)}$$

Para $F_a = 1,16$ e $T_d = 1 \text{ s} \rightarrow M = 0$ (Tabela 5.4).

Para $I_{cis}/I_{cs} = 1$ e $T_d = 1 \text{ s} \rightarrow N = 1$ (Tabela 5.5).

$$I_{th} = I_{cis} \times \sqrt{N+M} = 32 \times \sqrt{1+0} = 32 \text{ kA}$$