

## Capítulo IV

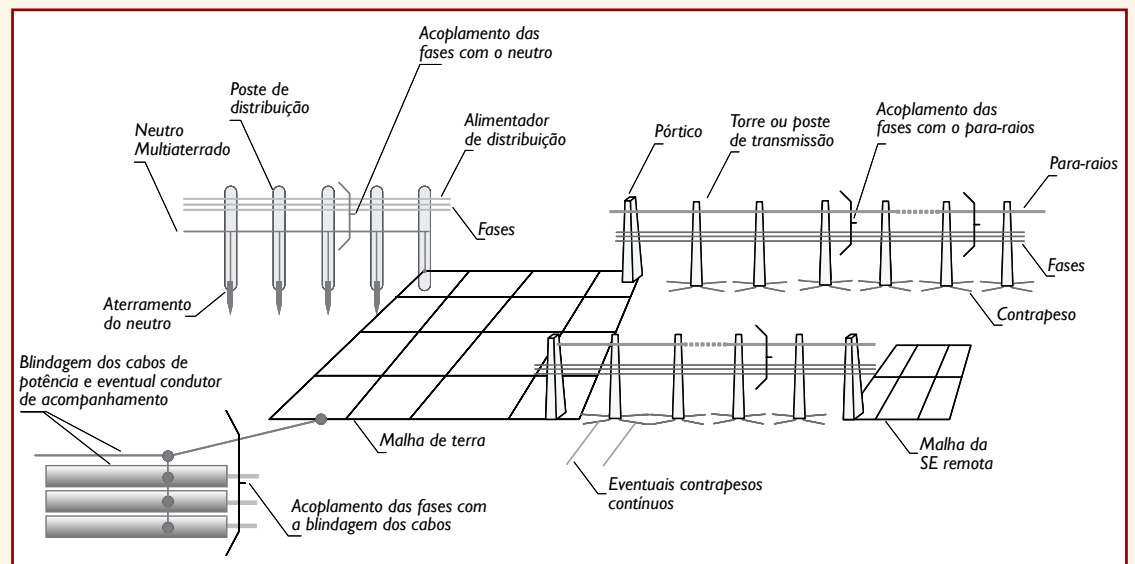
### Projeto de aterramento de malhas de subestações elétricas: cálculo da corrente de malha

Jobson Modena e Hélio Sueta \*

Dando continuidade ao nosso trabalho, este capítulo trata do cálculo da corrente de malha e parâmetros envolvidos, ou seja, no caso da ocorrência de uma falta, a corrente que circula pelo condutor de aterramento é dividida por alguns trechos do circuito, além de sofrer redução de seu valor modular em função das impedâncias existentes na instalação até chegar ao eletrodo de aterramento. Nessas condições, a parcela que atinge e se distribui pelo eletrodo de aterramento é efetivamente menor que a corrente no ponto em que ocorreu a falta. O cálculo correto desse valor pode implicar uma significativa redução de custos no

projeto do sistema de aterramento, principalmente no que concerne ao quesito “materiais envolvidos” no eletrodo mantendo a margem de segurança.

Quando tratamos do sistema de aterramento de uma subestação de energia podemos admitir que ele é constituído pelo eletrodo de aterramento (malha), pelos rabichos de aterramento e por todos os elementos metálicos e interconectados (cabos para-raios, torres e postes metálicos, blindagem de cabos de energia, condutores PEN ou neutro multiterrado e eletrodos de aterramento circunvizinhos). A Figura 1 corresponde à Figura 6 da ABNT NBR 15751 e ilustra a descrição.



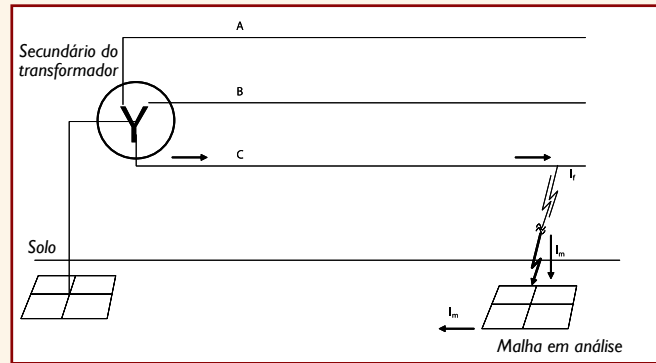
**Figura 1 – Principais elementos físicos a serem considerados em cálculos e simulações para o dimensionamento de uma malha de terra.**

Quando ocorre uma falta de curta duração, a corrente de defeito ( $I_f$ ) se divide por todo o sistema de aterramento, cabendo então a cada um dos componentes interligados a função da dispersão de partes da corrente. A parcela da corrente de falta que escoar para o solo pelo eletrodo de aterramento é denominada corrente de malha ( $I_m$ ).

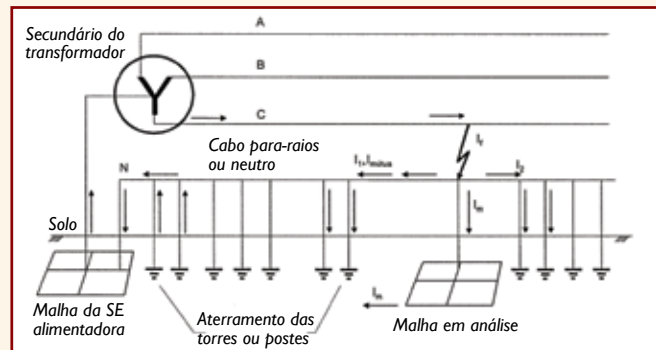
Uma parcela considerável deve ser atribuída às correntes que retornam ao sistema pelo eletrodo e que são provenientes de sistemas monofásicos com retorno pela terra ou qualquer outra configuração capaz de gerá-la (rede de distribuição com transformadores monofásicos ligados entre fase e neutro, transformadores trifásicos com primário em estrela aterrada, etc.). A essa parcela de corrente dá-se o nome de corrente de malha de longa duração ( $I_{mld}$ ).

*Para se dimensionar o eletrodo de aterramento deve-se considerar o circuito compreendido por condutores de fase, de neutro e a terra, mutuamente acoplados. As fases contribuem para a corrente de falta; o neutro (dependendo do esquema de aterramento adotado) e o eletrodo de aterramento são caminhos de escoamento dessa corrente (ou fração dela) para o solo.*

A ABNT NBR 15751 apresenta duas situações para a distribuição de  $I_m$  pelos caminhos possíveis de retorno à fonte em sistemas de potência típicos quando há a ocorrência de uma falta. São mostrados sistemas de transmissão ou distribuição, radial, com alimentação unilateral. O ponto da falta está na subestação em que o eletrodo é analisado.



**Figura 2 – Sem cabo para-raios ou neutro (corresponde à Figura 7a da ABNT NBR 15751). A corrente  $I_f$  flui integralmente do eletrodo para o solo, então  $I_m = I_f$**



**Figura 3 – Com cabo para-raios ou neutro (corresponde à Figura 7b da ABNT NBR 15751). Além das correntes já vistas também são mostradas as correntes que fluem pelo circuito formado pelos cabos para-raios e torres da linha de transmissão.**

Para a condição de falta ocorre o acoplamento magnético entre a fase e, por exemplo, os cabos para-raios. Dessa forma pode-se decompor a corrente circulante em duas componentes:

- 1- o componente devido ao acoplamento ( $I_{mutua}$ );
- 2- o componente devido à impedância dos cabos para-raios (ou neutro) multiterrados (representados por  $I_1$  e  $I_2$ ).

Analisando a situação verifica-se que o condutor para-raios drena parte da corrente de falta, diminuindo  $I_m$ .

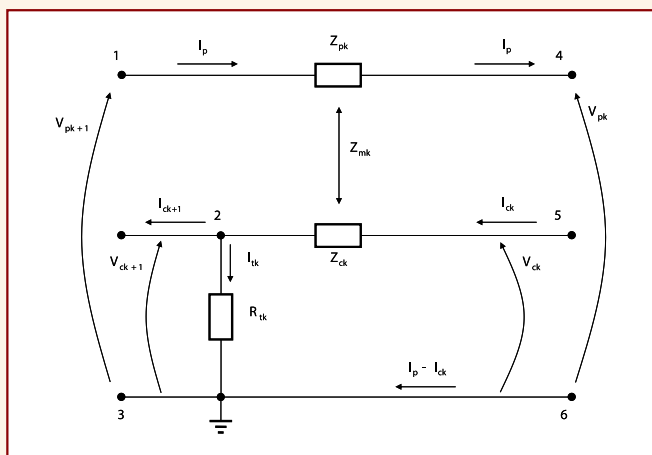
### Cálculo da corrente simétrica eficaz de malha

Quando  $I_m$  e  $I_f$  são diferentes, deve-se calcular a corrente eficaz de malha. Calcular esta corrente exige o modelamento do sistema por meio de um circuito equivalente. É importante lembrar que a terra pode ser um dos caminhos de retorno para a corrente de falta.

A ABNT NBR 15751 utiliza a formulação encontrada na teoria de Carson para a modelagem de linhas de transmissão e de distribuição. Esta modelagem deve incluir o acoplamento magnético entre os cabos de fase e de para-raio (ou fase-neutro em linha de distribuição) durante o curto-circuito, por meio da impedância mútua. Este acoplamento é importante, pois drena pelos cabos para-raios (ou neutro) parte da corrente de defeito, diminuindo a corrente de malha.

As impedâncias próprias e mútuas dependem da resistividade do solo, da frequência do sistema, dos tipos de cabos utilizados e da disposição desses cabos na torre de transmissão (ou no poste, para linhas de distribuição).

O circuito mostra o modelamento de um vão (entre postes ou torres) de uma linha de transmissão ou de distribuição.



**Figura 4 — Modelo completo de um vão de linha de transmissão ou rede de distribuição (Figura 8 da ABNT NBR 15751).**

Em que:

$k$  Representação genérica do vão, sendo  $k = 1$  na torre em falta e  $k = n$  na subestação de alimentação.

$V_{pk+1}$  Tensão de fase entre pontos 1 e 3,  $V_{13}$  (valor complexo).

$V_{pk}$  Idem, entre pontos 4 e 6,  $V_{46}$ .

$I_p$  Corrente de falta para terra ( $3 I_0 = I_f$ , valor complexo).

$I_{ck}$  Corrente complexa no vão  $k$  do cabo guarda.

$I_{ik}$  Corrente complexa que penetra a terra na torre  $k$ .

$I_{ck+1}$  Corrente complexa no cabo guarda do vão  $k + 1$ .

$(I_p - I_{ck})$  Corrente complexa que retorna pela terra no vão  $k$ .

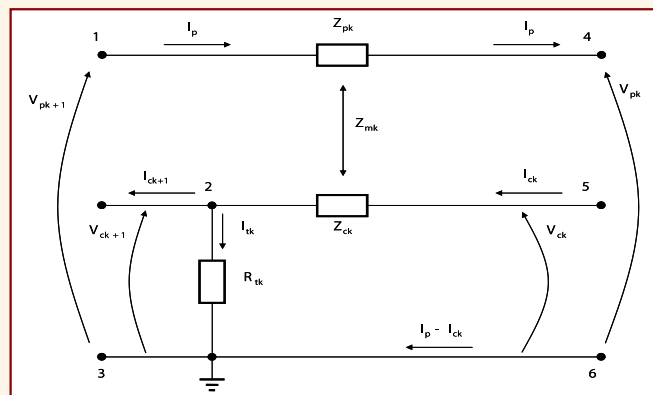
$Z_p$  Impedância própria, com retorno pela terra, do cabo fase (impedância própria de Carson).

$Z_c$  Idem cabo guarda.

$Z_m$  Impedância mútua entre o cabo fase em falta e o cabo guarda (impedância mútua de Carson).

$R_f$  Resistência de aterramento da torre ligada ao nó 2 (resistência ôhmica, valor real, não complexo).

Ao modelarmos o sistema mostrado na Figura 3, teremos o seguinte circuito elétrico:

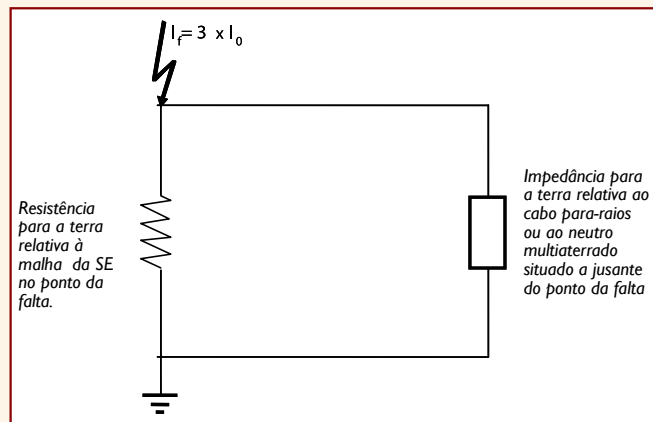


**Figura 5 – Circuito elétrico para cálculo da corrente de malha considerando o sistema de potência da Figura 2 (Figura 9 da ABNT NBR 15751).**

Se houver geradores e motores contribuindo para a corrente de curto-circuito fase-terra, devem ser utilizadas suas respectivas impedâncias subtransitórias.

Com o sistema modelado e o circuito montado, calcula-se a corrente que passa pela resistência representativa da malha  $R_{m'}$  obtendo-se assim a corrente simétrica eficaz de malha. Para a resolução do circuito elétrico há vários métodos oriundos da teoria de circuitos elétricos, e cada método assume determinadas hipóteses para simplificação. A escolha mais conveniente é feita considerando-se estas hipóteses e a topologia da rede.

O  $Z_{eq}$  da Figura 5 é a associação em paralelo dos elementos constantes na Figura 6.



**Figura 6 – Circuito do  $Z_{eq}$  da Figura 5 (Figura 10 da ABNT NBR 15751).**

A corrente simétrica eficaz de malha, que será o parâmetro utilizado no dimensionamento do eletrodo de aterramento, deve ser multiplicada por um fator que leva em consideração a componente contínua da corrente de curto-circuito ( $D_f$ ) e o crescimento do sistema ( $C_p$ ), que serão tratados adiante.

### Corrente de Falta $I_f$

Qualquer método de cálculo de obtenção de  $I_f$  necessita do fornecimento das potências de curto-circuito trifásica e de fase para a terra no ponto em que será construído o sistema de aterramento, bem como as contribuições das linhas envolvidas no curto-circuito. Deve-se calcular também a corrente de malha de longa duração ( $I_{mld}$ ).

A primeira etapa do cálculo dessa corrente consiste em definir a maior corrente permissível no neutro de um ou mais transformadores, que possam fluir permanentemente no sistema de aterramento e que devem servir de parâmetro para o ajuste das proteções de sobrecorrente de neutro dessa subestação.

A segunda etapa consiste em determinar a parcela de corrente que flui pela malha de terra da subestação, bem como aquela que flui pelo aterramento das linhas de transmissão e dos neutros dos alimentadores que estiverem em paralelo com esse eletrodo, na proporção inversa de suas impedâncias de aterramento vistas por essa corrente.

*Com o resultado de  $I_{mld}$  deve-se verificar se os limites admissíveis pelo corpo humano, em regime de longa duração ( $t > 3$  s) das tensões superficiais, conforme 7.1 da ABNT NBR 15751, não foram ultrapassados. Caso essa condição não seja atendida em qualquer ponto da subestação, ou arredores, o projeto do eletrodo de aterramento deve ser refeito, de forma a suprimir a condição de risco.*

### Considerações quanto ao cálculo da corrente de malha

Utilizar  $I_f$  ao invés de  $I_m$  para o dimensionamento do eletrodo de aterramento significa, na maioria dos casos, superdimensionamento. Há casos em que o uso de  $I_f$  no dimensionamento do eletrodo pode inviabilizar sua construção em função da topologia e do espaço existente para a instalação do eletrodo, assim é importante entender que a utilização de  $I_m$  pode ser a diferença para que o projeto seja executado sem deixar de oferecer a segurança exigida.

Outro parâmetro que, se considerado individualmente, pode levar a um dimensionamento inadequado do eletrodo é a corrente de suportabilidade de equipamentos. Então, deve-se considerar  $I_m = I_f$  apenas em casos específicos, por exemplo, em sistemas elétricos de transmissão sem condutor para-raio, ou sistemas de distribuição sem cabo neutro conectado ao eletrodo.

### Fator de decremento $D_f$

Fator que permite a obtenção do valor eficaz equivalente da corrente assimétrica de falta para um determinado tempo

de corte e deve considerar os efeitos do componente contínua. Obtém-se  $D_f$  a partir da equação mostrada a seguir ou com a Tabela 1.

$$D_f = \sqrt{1 + \left(\frac{T_a}{t_f}\right) \times \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)}$$

**TABELA 1 – FATOR DEVIDO À ASSIMETRIA DA CORRENTE DE FALTA (TABELA 10 DA ABNT NBR 15751).**

DURAÇÃO DA FALTA $t_f$		FATOR DE DECREMENTO $D_f$			
s	CICLOS A 60 Hz	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0,008 33	0,5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,10	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,20	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,30	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,40	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,50	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1,00	60	1,013	1,026	1,039	1,052

Esse valor varia inversamente com o tempo de eliminação da falta e aumenta com a relação X/R do sistema. Para a faixa de tempo de eliminação de falta normalmente considerada igual ou superior a 0,5 s, o fator adotado pode ser de  $D_f = 1$ .

### Fator de Projeção $C_p$

O fator de projeção  $C_p$  considera o aumento da corrente de falta ao longo da vida útil da instalação em função do crescimento da rede de transmissão e de geração de energia elétrica. Analisando os critérios adotados pelo planejamento das unidades geradoras, transformadoras e transmissoras, é possível prever a evolução do nível de curto-circuito do sistema, o que será quantificado pelo fator  $C_p$  que multiplica a corrente de malha simétrica eficaz.

Em algumas situações, pode-se identificar uma correlação entre os fatores  $C_p$  e  $S_p$ , considerando, por exemplo, que um incremento no número de linhas de transmissão chegando a uma subestação resulta no aumento do nível de curto-circuito, o que pode acarretar a redução do fator de divisão, em função do maior número de caminhos para o solo, via cabos para-raios e torres de linhas de transmissão.

Devido a esse fator, recomenda-se que os estudos de aterramento considerem os níveis de corrente de falta previstos até o ano horizonte disponível no planejamento e que reavaliações futuras sejam feitas quando houver alterações significativas no estudo realizado ou evoluções do sistema, além do ano horizonte inicialmente estudado.

### Cálculo final da corrente de malha

Com os fatores já mencionados, utilizamos a seguinte equação:

$$I_{\text{malha}} = I_{\text{malha sim ef}} \times D_f \times C_p$$

$$S_f = \frac{I_{malha\ sim\ ef}}{I_{falta}}$$

### Fator de distribuição $S_f$

Fator que fornece a parcela da corrente de falta que dispersa na terra pelo eletrodo de aterramento da subestação de energia.

$$I_m = I_{malha} = I_f \times S_f \times C_p \times D_f$$

Para os casos em que a topologia da rede é muito simples ou quando a impedância mútua for desprezível em relação à impedância própria pode ser mais conveniente calcular-se  $S_f$ . Obtém-se  $I_f$  por métodos convencionais, considerando-se os circuitos sequenciais e, diretamente da relação abaixo, a corrente de malha:

### Condição de segurança para futuras expansões

O eletrodo de aterramento dimensionado com a "corrente de malha final", calculada conforme o procedimento que consta da ABNT NBR 15715, aqui mostrado, garantirá segurança às

pessoas, desde que não sejam feitas expansões que provoquem uma corrente de curto-circuito fase-terra superior à [corrente de falta antes da expansão]  $\times C_p$ . Havendo qualquer expansão no sistema, essa condição deve ser verificada.

No dimensionamento de malhas de aterramento é necessária a verificação do surgimento de potenciais perigosos, interna e externamente a essa malha, quando da ocorrência de curtos-circuitos ou na existência de correntes de desequilíbrio entre neutro e terra do sistema. Para tanto, devem-se calcular os valores máximos de tensão de toque e de passo que podem ocorrer, bem como verificar possibilidades de ocorrência de transferência de potencial para ambas as situações.

---

*JOBSON MODENA é engenheiro electricista, membro do Comitê Brasileiro de Eletricidade (Cobei), CB-3 da ABNT, em que participa atualmente como coordenador da comissão revisora da norma de proteção contra descargas atmosféricas (ABNT NBR 5419). É diretor da Guismo Engenharia.*

*HÉLIO SUETA é engenheiro electricista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica, diretor da divisão de potência do IEE-USP e secretário da comissão de estudos que revisa a ABNT NBR 5419:2005.*

#### Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)