

Analysis of Electrical Grounding Standards: NBR 16527:2016 e 157751:2013

Analise das Normas de Aterramentos Elétricos: NBR 16527:2016 e 157751:2013

S. M. Campo¹, L Valdez², Tarriba-Lezama², and A. J. Burgos¹

¹Universidade Cooperativa de Colômbia UCC, sergio.martinez@campusucc.edu.co, arthur.burgos@campusucc.edu.co
²Fundación Universitaria Antonio de Arévalo², decano.fadi@unitecnar.edu.co, yesid.tarriba@unitecnar.edu.co.

Abstract— *The Study Commission EC 003:102:001 has as its scope to elaborate standards for grounding systems involving specification, definition of materials and measurement parameters, in electric power, generation, transmission, distribution, telephony and data installations and is subordinate ABNT/CB-003 and the Brazilian Committee for Electricity, Electronics, Lighting and Telecommunications (Cobei). The evolution of generation systems, especially in the area of alternative energy, with large wind farms and photovoltaic generation, requires new standards to be established. The interconnection of these systems to substations and to the power supply of the distribution system raises the need for new concepts to be studied.*

Keywords—grounding, measurement parameters, distribution, substation.

Resumo— *A Comissão de Estudos EC 003:102:001 tem como escopo elaborar normas para sistemas de aterramento envolvendo especificação, definição de materiais e parâmetros de medição, em instalações de energia elétrica, geração, transmissão, distribuição, telefonia e dados e é subordinada à ABNT/ CB-003 e Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações (Cobei). A evolução dos sistemas de geração, principalmente na área de energias alternativas, com grandes parques eólicos e geração fotovoltaica, exige que novos padrões sejam estabelecidos. A interligação destes sistemas às subestações e à alimentação do sistema de distribuição suscita a necessidade de estudo de novos conceitos.*

Palavras-chave—aterramento, parâmetros de medição, distribuição, subestação.

I. INTRODUÇÃO

A comissão de estudo CE 003:102:001 Aterramentos Elétricos, tem como escopo "elaborar normas de sistemas de aterramento envolvendo especificação, definição de materiais e parâmetros de medição, nas instalações de energia elétrica, geração, transmissão, distribuição, telefonia e de dados" e está subordinada à ABNT/CB-003 e ao Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicação (Cobei). A ABNT é o Foro Nacional de Normalização por reconhecimento da sociedade brasileira desde a sua fundação, em 28 de setembro de 1940, e confirmado pelo governo federal por meio de diversos instrumentos legais [1].

Os Comitês Técnicos são órgãos de coordenação, planejamento e execução das atividades de normalização técnica relacionadas com o seu âmbito de atuação, que devem

garantir que as CE representem toda a variedade de partes interessadas no assunto objeto de estudo. Os Comitês Técnicos possuem um foro específico, denominado Conselho Técnico, onde seus Superintendentes ou Gestores têm assento e debatem as principais questões relacionadas ao desenvolvimento de Normas Brasileiras e os processos envolvidos neste trâmite [1].

As normas de sistemas de aterramento devem sempre estar alinhadas às necessidades e às aplicações de outras normas que as referenciam, como ABNT NBR 5410, ABNT NBR 5419, ABNT NBR 14039, etc. Isso é importante, pois permite uma evolução contínua nos estudos de sistemas de aterramento elétrico. Novos assuntos foram desenvolvidos, inclusive, com a participação pública que enriqueceu tanto os estudos e os trabalhos [1],[2].

A evolução dos sistemas de geração, principalmente, na área de energia alternativa, com grandes parques eólicos e de geração fotovoltaica, exige que novas normas sejam estabelecidas. A interligação destes sistemas às subestações e à alimentação do sistema de distribuição, levanta a necessidade de que novos conceitos sejam estudados. Cada vez mais estudos e incorporação de novas técnicas alinhadas à evolução do conhecimento e dos dispositivos e equipamentos que devem ser protegidos [3].

Mas um sistema de proteção e aterramento não visa apenas atender às necessidades de proteção de equipamentos, mas, fundamentalmente, a proteção à vida. Por tanto, há que se estabelecer normas que tornem os sistemas mais seguros e confiáveis [3].

Neste artigo abordará-se inicialmente os objetivos y as diretrizes do aterramento de um sistema de distribuição, em tensões de até 34,5 kV, correspondente ao norma NBR 16527. Além disso, abordará-se os requisitos e recomendações geral da norma NBR 15751, correspondente a sistemas de aterramento de subestações. A seguinte Tabela I, mostra o cronograma das publicações de normas na área de aterramentos elétricos [3].

TABELA I
CRONOGRAMA DAS NORMAS PUBLICADAS NA ÁREA DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

Título		NBR	Data
Parâmetros de solo para projetos de aterramentos elétricos	Requisitos Gerais	7117 - 1	27/11/2020
Aterramento para sistemas de distribuição - Parte 1	Requisitos Gerais	16527 - 1	6/10/2016

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.825>
ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

Materiais para sistema de aterramento - Parte 1	Requisitos Gerais	16254 - 1	8/01/2014
Sistema de aterramentos de subestações - Parte 1	Requisitos Gerais	15751	21/01/2013
Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento	Requisitos Gerais	15749	13/08/2009

*Revista O Setor Elétrico (Edição 132 - Janeiro-2017)

II. NORMAS CE 003:102:001 ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

O processo de elaboração de um Documento Técnico ABNT é iniciado a partir de uma demanda, que pode ser apresentada por qualquer pessoa, empresa, entidade ou organismo regulamentador, que estejam envolvidos com o assunto a ser normalizado [4].

No caso de uma demanda relativa ao setor eletro-eletrônico, este é direcionado ao Comitê Técnico de Eletricidade (ABNT/CB-003) através de suas Comissão de Estudo onde estão os especialistas de cada assunto [4].

A. NBR 16527 - Aterramento para sistemas de distribuição

A origem dos sistemas de distribuição de energia elétrica está associada a redes isoladas de terra, cujos índices de disponibilidade eram otimizados pela redução do envolvimento de eventuais falhas, por meio da desenergização manual do menor trecho necessário à execução dos reparos [1].

Contudo, a necessidade de provimento de condições adequadas de segurança associada à progressiva elevação das tensões primárias utilizadas nesses sistemas (consequência da evolução das densidades de carga) passou a exigir utilização de sistemas primários aterrados como forma de viabilizar soluções técnico-econômicas para a proteção contra sobrecorrentes e sobretensões [1].

Tendo em vista o provimento das condições adequadas de segurança, o aterramento de um sistema de distribuição deve atingir, cumulativamente, os seguintes objetivos [1]:

1) Viabilizar adequado escoamento de sobretensões, limitando as tensões transferidas ao longo da rede, em consequência das descargas de surtos diretas ou indiretas;

2) Garantir a segurança dos usuários do sistema por meio da limitação das diferenças de potencial entre o condutor neutro e a terra, resultantes da circulação das correntes de desequilíbrio;

3) Garantir a efetividade do aterramento do sistema, limitando os deslocamentos do neutro, por ocasião da ocorrência de faltas à terra;

4) Asegurar a operação rápida e efetiva dos dispositivos de proteção de sobrecorrente, na ocorrência da faltas à terra, limitando as tensões resultantes da passagem das correntes de curto-circuito;

5) Outras condições, como [1]:

- Continuidade do fornecimento no caso específico dos sistemas MRT;
- Tensões de transferência compatíveis;
- Minimização de falhas de equipamentos por deficiência de aterramento;
- Qualidade do fornecimento (por exemplo, valor e configuração do aterramento dos para-raios).

Esses objetivos se cumpre, dependendo do tipo de sistema que se venha construir. Portanto, a elaboração do projeto específico para aterramento de um sistema de distribuição deve ser sempre precedida da definição do tipo de sistema que se pretende implantar. Além da vantagens e desvantagens de cada tipo de sistema de acordo com as características específicas da instalação [1].

A norma NBR 16527, aborda as metodologias que atende às determinações das condições mínimas a serem satisfeitas pelo projeto de aterramento da rede de distribuição, que visa garantir, entre outros, escoamento das sobretensões, tensão de toque e passo pela circulação da corrente de desequilíbrio, bem como, assegurar a operação rápida y efetiva dos dispositivos de proteção. Inclusive, em situações de defeito ou rompimento da isolamento dos equipamentos limitando a valores não perigosos durante a passagem da corrente à terra, principalmente em relação à tensão de toque e passo [1].

É muito importante e necessário ter um projeto específico para cada sistema de distribuição, considerando a análise técnico-econômica global, avaliar as vantagens e as desvantagens de cada tipo de sistema, considerando, nesta análise, os aspectos da tensão suportável de impulso, materiais empregados, equipamentos, estruturas de sustentação, distâncias de escoamento dos isoladores e níveis máximos de curto-circuito [1].

As metodologias adequadas às condições mínimas, abordagens neste artigo, da norma 16527, são:

a) Sistema trifásico a quatro fios, multiterrados e a três fios com secundário contínuo.

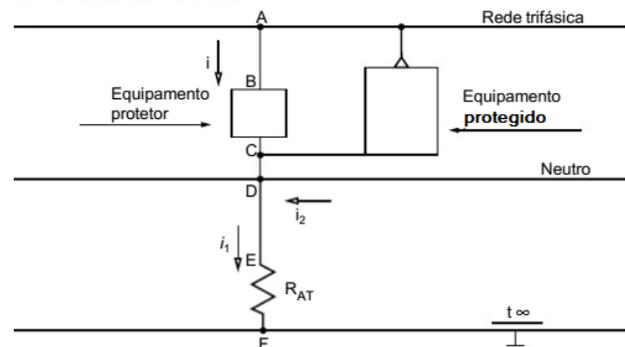


Fig. 1 Esquema simplificado da ligação de um equipamento

Neste tipo de sistema, Fig. 1, os aterramentos do neutro da rede e efetivados ao longo da rede, além de propiciarem o adequado escoamento e dos surtos, devem satisfazer aos requisitos básicos como [1]:

- Garantir a efetividade do aterramento do sistema; condição, na prática, satisfeita quando a resistência do aterramento equivalente se situar na faixa de $0,1 \Omega$ a $0,3 \Omega$;
- Garantir a manutenção do neutro, em condições normais de operação, a um potencial inferior a 10 V em relação à terra, condição que assegura a não alcançar o limite de 10 mA , quando de um eventual toque no condutor neutro;
- Garantir a manutenção dos potenciais de passo dentro de limites toleráveis, em condições de defeito; condição restrita aos potenciais de passo, por não ser sempre viável a manutenção dos potenciais de toque e de transferência, em condições de defeito, dentro dos limites toleráveis, tendo em vista os tempos de operação dos dispositivos de proteção usuais. A proteção parcial para os potenciais de toque é possível ser obtida instalando o condutor de aterramento interno ou externo ao poste; no caso de instalação externa, o condutor deve ter uma proteção eletromecânica por meio de canaletas até a altura de 3 m . Esta proteção é totalmente inviável nos casos de postes metálicos, em que a própria estrutura é utilizada como condutor de aterramento.

No caso de sistemas a três fios com secundário contínua, em condições normais de operação, o potencial do neutro deve ser inferior a 10 V em relação à terra, já que a circulação da corrente de desequilíbrio (no caso de rede secundária BT) restringe-se à zona de influência de cada transformador de distribuição, implicando no seu confinamento, quase que total, ao neutro do circuito [1].

b) Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo.

Neste caso, Fing. 2, devido ao fato de ser inviável a limitação das tensões passíveis de serem transferidas pelo neutro para as entradas consumidoras atendidas pela rede secundária de distribuição (BT), como alternativa, é necessário que os transformadores e demais equipamentos ligados na rede primária de distribuição (MT) sejam contemplados com aterramento independente, bem como o aterramento do neutro da rede secundária de distribuição (BT), ou seja [1]:

- Do lado da rede de distribuição primária ou de média tensão (MT), aterrar as carcaças e/ou as ferragens de todos os equipamentos, garantindo as condições operacionais e de segurança e, em cada ponto, interligar as malhas de terra por meio de condutores de aterramento independente para o sistema primário (MT) e secundário (BT).
- O lado da rede secundária deve ser provido de aterramento como hastes alinhadas nos pontos de instalação dos transformadores de distribuição, no mínimo, com três hastes distribuídas em relação ao condutor de descida de aterramento, a intervalos de até

150 metros , mantendo o afastamento em relação ao aterramento de MT;

- Todo fim da rede distribuição secundária (BT) deve ser aterrado, no mínimo, com uma haste.

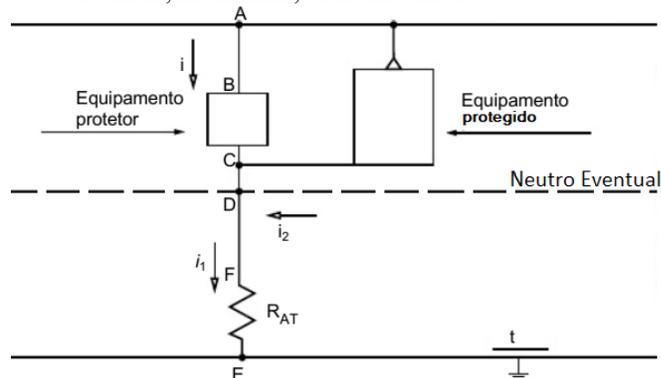


Fig. 2 Esquema simplificado da ligação de um equipamento

c) Sistemas monofiliares com retorno por terra (MRT)

As redes de média tensão (MT) no sistema monofilar com retorno por terra (MRT) são providas de um único condutor-fase que alimenta um ou mais transformadores de distribuição, sendo o retorno da corrente feito pelo solo. O circuito secundário é composto de três condutores (duas fases e neutro) nas tensões de $230/115 \text{ V}$.

Na rede de média tensão (MT) devem ser projetados aterramentos somente nos pontos de instalação das subestações de isolamento e distribuição, salva a necessidade de instalação de dispositivos de proteção contra sobretensão em outros pontos da rede [1].

O condutor; neutro deve ser contínuo entre o transformador e as instalações consumidoras, não vinculando ao aterramento do poste do transformador e sim ao do poste da entrada do consumidor [5].

Por questões de segurança, o poste do consumidor deve situar-se a uma distância mínima de 30 metros do aterramento do poste do transformador [5].

Para o confinamento das correntes que retornam pelo solo, deve-se utilizar um transformador de isolamento para evitar as possíveis interferências na proteção da linha supridora. Sua relação de transformação depende do planejamento elétrico da área podendo ser ainda utilizado o transformador de isolamento para adequar as tensões na linha supridora, bem como as derivações MRT, apresentando, para tanto, um enrolamento primário adequado às tensões de fase da linha supridora e um enrolamento secundário ao qual liga-se o ramal MRT [5].

Nos sistemas MRT, as correntes de carga dos transformadores de distribuição passam necessária e continuamente pelos aterramentos destes. Dessa forma, pela função essencial que cumprem para o desempenho do sistema e para a segurança de pessoas e animais, os aterramentos devem ser executados de forma criteriosa, envolvendo a medição da resistividade do solo, o projeto, a construção e o acompanhamento periódico [5].

As características necessárias ao sistema de aterramento dos transformadores nas redes MRT, sejam eles de distribuição ou de isolamento, são determinadas em função de segurança, levando-se em consideração a corrente de carga e a máxima corrente de falta prevista para o ponto [5].

B. NBR 15751 – Sistemas de Aterramento de subestações - requisitos

Esta norma estabelece os requisitos para dimensionamento do sistema de aterramento de subestações de energia elétrica, acima de 1kV; garantindo as condições de segurança para pessoas e instalações dentro e fora dos limites da subestação.

A norma aborda os seguintes itens: modelagem do solo, estabelecimento de uma geometria básica de malha, dimensionamento do condutor da malha, cálculo das tensões permissíveis, cálculo da corrente de malha, cálculo de potenciais no solo [2].

1) Modelagem do solo

Um dos primeiros passos para o projeto de aterramento de uma subestação de energia elétrica é a obtenção de dados para a modelagem do solo. De forma geral, a determinação de um modelo matemático equivalente para o solo em uma dada região onde será implantada a subestação exige a realização de diversas medidas, dentre elas a execução de medições para a determinação de um parâmetro conhecido por resistividade do solo [2].

A resistividade do solo é definida como a resistência entre as faces opostas (ambas metálicas) de um cubo de aresta unitária, preenchido com material retirado do local. A resistividade depende do tipo, da umidade, da temperatura, da salinidade, da contaminação e da compactação do solo, entre outras variáveis. Estas medições, geralmente realizadas com um terrômetro de quatro terminais (dois externos para corrente e dois internos para tensão), devem ser realizadas em um período do ano em que a umidade no solo seja a menor possível [2].

É recomendável que o local já tenha sido terraplanado e compactado, e efetuar mais de um conjunto de medições em diferentes épocas do ano [2].

O Método de medição por contato com o arranjo de Wenner, é o mais conhecido para obtenção de valores de resistência por metro que possibilitem calcular a resistividade do solo [2].

A determinação do número de medições depende de:

- Locais com grandes dimensões, basta dividir esses locais em segmentos;
- As variações nas características do solo locais, devendo-se medir separadamente a resistividade nos diferentes tipos de terreno existentes;
- As variações entre os resultados obtidos nas diversas linhas de medição para uma mesma distância entre eletrodos;
- Quando maior a discrepância entre os resultados, maior deve ser o número de linhas de medição;

- Pontos de uma mesma área em que sejam obtidos valores de resistividade com desvio superior a 50% em relação ao valor médio das medições realizadas podem vir a caracterizar uma subárea específica, devendo ser realizadas medições complementares ao seu redor para ratificação do resultado. Se isso não for possível, considerar a conveniência de descartar a linha de medição.
- A presença de elementos metálicos enterrados próximos às áreas de medição pode ocasionar erros sensíveis nos valores obtidos. Um dos fatores que indica a presença de interferências externas pode ser caracterizado pela não variação do valor da resistência medida para os diversos espaçamentos.

A interpretação dos resultados obtidos no campo é a parte mais crítica do processo e, conseqüentemente, necessita de maiores cuidados na sua validação. A variação da resistividade do solo pode ser grande para alguns casos pode-se estabelecer uma equivalência simples com os valores referentes na norma NBR 7117 [4].

2) Estabelecimento de uma geometria básica de malha

Na subestação, o aterramento do neutro do transformador e das massas metálicas fornece um caminho de retorno de baixa impedância para essa corrente de curto-circuito, o que possibilita a maior segurança na operação da proteção. Dessa forma, o projeto do sistema de aterramento de uma subestação é definido para a condição de falta para a terra, sendo que o dimensionamento do condutor da malha está diretamente ligado à capacidade deste de suportar os esforços térmicos e dinâmicos oriundos das altas correntes de curto-circuito. Além disso, a geometria da malha deve ser adequada para que os potenciais de passo e de toque, causados pelo processo de dissipação das correntes da malha para o solo, estejam dentro de limites toleráveis e definidos pelas normas [6].

A etapa inicial do dimensionamento de uma malha de aterramento consiste na seleção de uma geometria básica, que deve considerar a delimitação da área da subestação elétrica - SE a ser abrangida pela malha e o arranjo inicial dos condutores. O critério de definição da geometria inicial da malha deve levar em consideração a distribuição dos equipamentos e edificações existentes no interior da área em questão, bem como o modelo de solo (já previamente determinado) [6].

A ABNT NBR -15751, recomenda a seguinte características de geometria básica:

- Profundidade de enterramento mínima de 0,5 m, recomendado por razões mecânicas, sendo admitida uma profundidade mínima de 0,25 m em áreas de piso concretado ou devido a um substrato rochoso muito superficial;
- Condutor periférico no entorno das edificações.

3) Dimensionamento do condutor da malha

O condutor da malha de aterramento de uma subestação é dimensionado levando em conta os efeitos térmicos e

mecânicos das correntes elétricas que por ele possam passar principalmente as correntes de curto-circuito [2].

Para o dimensionamento mecânico, a norma ABNT NBR 15751;2009 indica as bitolas mínimas para condutores de cobre e de aço, que, neste caso, devem ser protegidos contra corrosão conforme as normas aplicáveis;

- Para cobre – 50 mm²;
- Para aço (protegido contra corrosão) – 38 mm² (5/16”). Caso não haja essa proteção, a ABNT NBR 5410:2008 e a ABNT NBR 5419;2005 determinam uma seção transversal mínima de 80 mm².

Para o dimensionamento térmico, a ABNT NBR 15751 fornece a equação de Onderdonk, que permite o cálculo da seção do condutor [2].

$$S = I_f \sqrt{\frac{t \times \alpha_t \times \rho_t \times 10^4}{TCAP \times \ln \frac{(k_0 + T_m)}{(k_0 + T_a)}}} \quad (1)$$

Em que:

- S é a seção expressa em milímetros quadrados (mm²);
- I_f é a corrente de falta fase-terra expressa em quiloampères (kA);
- t é o tempo expresso em segundos (s);
- α_t é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a $t^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{C} - 1$);
- ρ_t é a resistividade do condutor de aterramento a $t^\circ\text{C}$ expressa em ohm x centímetro ($\Omega \times \text{cm}$);
- $TCAP$ é o fator de capacidade térmica em joule por centímetro cúbico vezes graus Celsius [$\text{J}/(\text{cm}^3 \times ^\circ\text{C})$];
- T_m é a temperatura máxima suportável expressa em graus Celsius ($^\circ\text{C}$);
- T_a é a temperatura ambiente expressa em graus Celsius;
- k_0 é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0°C , $k_0 = 1/\alpha_0$ ou $(1/\alpha_0) - T_r$;
- T_r é a temperatura de referência das constantes do material em graus Celsius ($^\circ\text{C}$).

O condutor da malha de aterramento deve ter uma seção (S) capaz de suportar a circulação de uma corrente máxima (I_f), em quiloampères, durante um tempo (t), em que a temperatura se eleve acima de um valor-limite suportável (T_m), considerando uma temperatura ambiente (T_a) e que toda energia térmica fica retida no condutor devido à pequena duração da corrente de curto-circuito [2].

4) Cálculo das tensões permissíveis

Estabelecem os valores máximos permissíveis para as tensões de passo e toque em condições locais preestabelecidas. Estes parâmetros são importantes para que um sistema de aterramento seja considerado seguro em uma condição de defeito na instalação elétrica [2].

Os valores máximos permissíveis são estabelecidos em função do tempo de eliminação do defeito (t) e da resistividade da camada superficial do solo. Nesse sentido, ressalta-se a importância dos diferentes tipos de recobrimento do solo (natural, terra ou grama, brita, concreto, asfalto, etc.), tanto no interior como na periferia das instalações [2].

O tempo t deve ser escolhido de forma conservativa, de acordo com a filosofia de proteção adotada e com as características dos equipamentos de proteção utilizados. Devem ser considerados dos casos [2]:

- Defeitos com duração determinada pelo sistema de proteção; a corrente permissível pelo corpo humano (I_{chcd}) é dada pela seguinte equação:

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

Corrente de choque de curta duração, é a corrente máxima de não fibrilação (para 99,5% das pessoas de 50 kg) no intervalo de tempo $0,03\text{s} \leq t \leq 3\text{s}$.

- Defeitos de longa duração que não sensibilizam os dispositivos de proteção; a corrente permissível pelo corpo humano (I_{chcd}) é dada pela seguinte Tabela:

TABELA II
LIMITES DE CORRENTE ELÉTRICA SUPOSTADOS PELOS SERES HUMANOS

Corrente limite de larga de longa duração (I_{chcd})		
Porcentagem da população que suporta	Homens	Mulheres
99,5%	9 mA	6 mA
50%	16 mA	10,6 mA

ABNT NBR 15751: 2009. ISBN 978-85-07-01691-5

Corrente de choque de longa duração, é a corrente de choque provocada por uma tensão de toque ou passo devido a uma corrente de defeito de longa duração. É o máximo valor de corrente, permissível, que circula pelo corpo sem provocar fibrilação [2].

Tensão de passo

É a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1 metro (em função do sistema internacional de unidades) [2], como descreve Fig. 3.

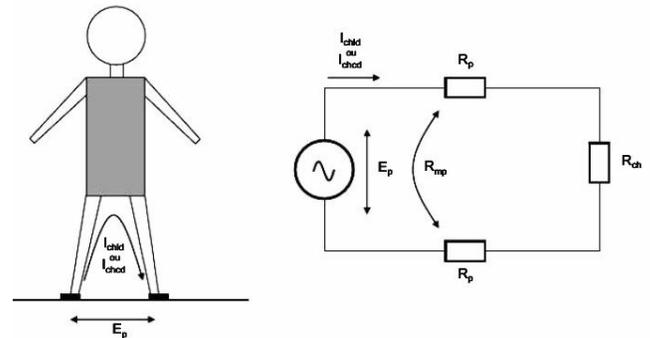


Fig. 3 Conceito de tensão de passo

A Fig. 3, mostra uma pessoa é representada por um circuito elétrico equivalente aos parâmetros resistivos envolvidos. A partir deste é apresentada uma equação para se definir a máxima tensão de passo permissível [2].

Dessa forma, a máxima tensão de passo permissível pelo corpo humano é dada pela equação:

$$E_p = [R_{ch} + 2(R_p - R_{mp})] \times I_{chcd} \quad (3)$$

Onde

R_{ch} é a resistência do corpo humano, adotada como sendo 1000 Ω , expressa em ohms (Ω);

R_p é a resistência própria de cada pé com relação ao terra remoto, expressa em ohms (Ω);

R_{mp} é a resistência mútua entre dois pés, expressa em ohms (Ω);

I_{chcd} é a máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

As resistências próprias de cada pé e mútuas entre os pés são dadas por:

$$R_p = \left(\frac{\rho_s}{4b}\right) \times C \quad (\Omega) \quad (4)$$

$$R_{mp} = \left(\frac{\rho_s}{2 \times \pi \times R_p}\right) \quad (\Omega) \quad (5)$$

Onde

R_{mp} é a resistência mutua entre dois pés, expressa em ohms (Ω);

b é a constante igual a 0,083 m (raio de um disco metálico estabelecido como modelo para representar o pé do ser humano);

d_p é a distância padronizada entre os dois pés (1 m);

ρ_s é a resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega \times m$);

C é o fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento.

Tensão de toque

É a diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa. Distancia convencional igual a 1 metro [2]. como descreve Fig. 4.

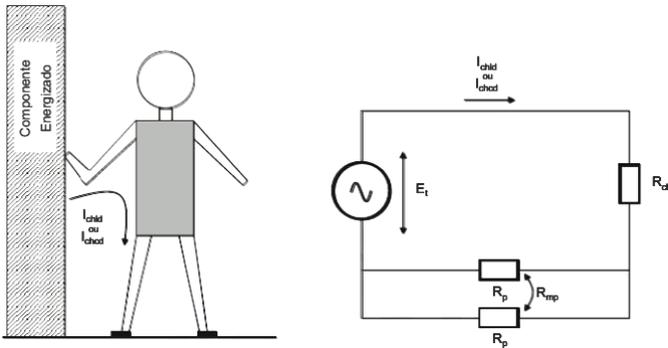


Fig. 4 Conceito de tensão de toque

A tensão de toque em uma subestação acontece quando uma pessoa toca um componente energizado (não importando se em um tempo curto ou longo) [2].

A Fig. 4, descreve um circuito elétrico equivalente com os parâmetros resistivos envolvidos. A partir deste modelo é apresentada uma equação para se definir a máxima tensão de toque permissível. A máxima tensão de toque permissível pelo corpo humano é dada por [2]:

- Curta duração

$$E_{tcd} = R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \times I_{chcd} \quad (V) \quad (6)$$

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 \times \rho_s \times C) \times I_{chcd} \quad (V) \quad (7)$$

- Longa duração

$$E_{tld} = R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \times I_{chld} \quad (V) \quad (8)$$

$$E_{tld} = (R_{ch} + 1,5 \times \rho_s \times C) \times I_{chld} \quad (V) \quad (9)$$

O fator de redução é calculado pela equação simplificada:

$$C \cong 1 - a \times \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 \times h_s + a} \right] \quad (10)$$

Em que a é igual a 0,106 m.

ρ_1 é a resistividade da 1ª camada ($\Omega \times m$);

ρ_s é a resistividade do recobrimento da camada superficial em ($\Omega \times m$);

h_s é a espessura da camada de revestimento superficial (m);

Todos os parâmetros e cálculo básicos abordados, têm extrema importância para a confecção de um eletrodo de aterramento eficiente. Porém, as equações podem ser substituídas por modelos matemáticos complexos, executados em software que oferecem resultados mais completos e abrangentes [2].

5) Cálculo da corrente de malha

O cálculo correto da corrente de malha, pode implicar uma significativa redução de custos no projeto do sistema de aterramento, principalmente no que concerne aos materiais envolvidos no eletrodo, mantendo a margem de segurança. No caso de uma falta, a corrente (corrente de defeito I_f) 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 [6].

O sistema de aterramento de uma subestação é tipicamente constituído pela sua malha de aterramento e por todos os elementos metálicos a ela conectados, tais como cabos para-raios, aterramentos de torres e postes de linhas de transmissão e subtransmissão, blindagem de cabos de energia, neutro multiterrado de linhas de distribuição e malhas de aterramento de subestações vizinhas [6].

A ABNT NBR 15751 apresenta duas situações para a distribuição de corrente de defeito I_f pelos caminhos possíveis de retorno à fonte em sistemas de potência típicos quando há ocorrência de uma falta. A parcela da corrente de falta que escoar para o solo pelo eletrodo de aterramento é denominada corrente de malha I_m [2].

Deve-se considerar também a presença de corrente de malha de longa duração (I_{mld}) que retorna ao sistema pela malha, proveniente de sistemas monofásicos com retorno por terra ou qualquer outra configuração capaz de gerar tal corrente, tais como rede de distribuição com transformadores monofásicos ligados entre fase e neutro, transformadores trifásicos com primário em estrela aterrada, etc [2].

As Figuras 5 e 6 apresentam duas situações, os esquemas de um sistema de potência de transmissão ou distribuição, radial,

com alimentação por apenas um lado, com uma falta à terra em uma subestação [2].

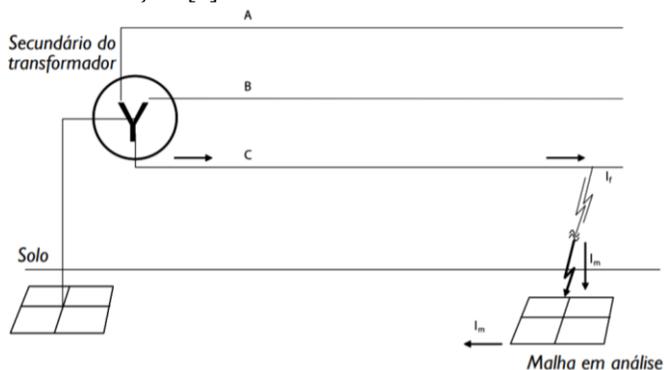


Fig. 5 Sem cabo pára-raios ou neutro

Na Fig 5, apresenta uma linha de transmissão ou de distribuição que não possui cabos pára-raios, a corrente I_f flui integralmente da malha para o solo, sendo então $I_m = I_f$. Neste caso, a corrente de malha I_m tem um valor superior ao verificado no cabo pára-raios ou neutro multiterrado [2].

Na Fig 6, apresenta uma corrente total de falta I_f , a corrente de malha I_m objeto do estudo, e a corrente que flui pelo circuito formado pelos cabos pára-raios e torres da linha de transmissão. Cabe observar que devido ao acoplamento magnético entre a fase em condição de falta e os cabos pára-raios, pode-se decompor a corrente que circula por estes últimos em duas parcelas, a parcela devida a este acoplamento (I_{mutua}) e a corrente devida à impedância dos cabos pára-raios (ou neutro) multiterrados (representados por I_1 e I_2). Verifica-se que o condutor pára-raios vai drenar parte da corrente da falta, diminuindo desta forma a corrente de malha I_m [2].

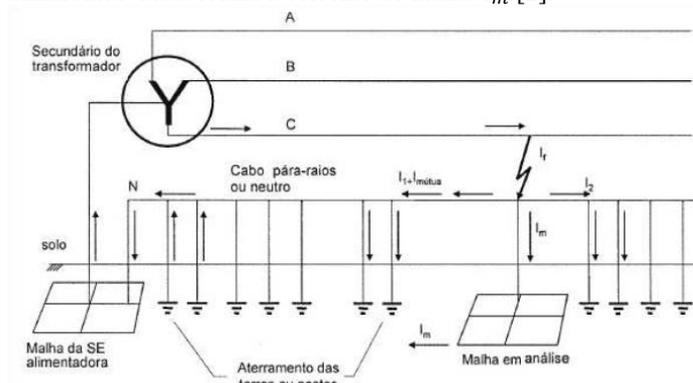


Fig. 6 Conceito de tensão de toque

6) 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 meios de um circuito equivalente. É importante lembrar que a terra pode ser um dos caminhos de retorno para a corrente de falta [2].

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-raios (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 [2].

7) Recomendações gerais

O projeto de aterramento deve garantir níveis de corrente de curto-circuito fase-terra suficientes para permitir a atuação da proteção de retaguarda, assim como potenciais de passo e de toque suportáveis, o que pode ser obtido por uma geometria de malha de aterramento compatível com a resistividade de solo local, com a parcela da corrente de falta dissipada pela malha e com os tempos de atuação da proteção. Cabe observar que baixas resistências de aterramento não garantem um projeto seguro, e que altas resistências de aterramento não significam, necessariamente, um projeto inseguro [2].

III. CONTEXTO ATUAL

A Comissão de Estudo de Aterramentos Elétricos (CE-003:102.001) do Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-003) está revisando diversas normas publicadas, visando adequar-se ao avanço tecnológico, bem como elaborar normas atualizadas com as plantas de geração de energias renováveis, que vão refletir os critérios já estabelecidos pela normalização internacional [6].

As modernas plantas de geração renovável, como parques eólicos e usinas fotovoltaicas, constituem as instalações providas dos maiores sistemas de aterramento, com dimensões que atingem quilômetros. Com relação à topologia do sistema de aterramento, no entanto, cabe destacar que apresentam marcantes diferenças [7]:

- Parques eólicos – topologia linear, definida pelos traçados das linhas de média-tensão (usualmente de 34,5 kV) que interligam aterramentos concentrados nas bases das torres dos aerogeradores [7];
- Plantas solares – topologia matricial, com uma ampla rede subterrânea de linhas de baixa- tensão (em corrente contínua e alternada) e de média-tensão (usualmente de 34,5 kV), com aterramentos distribuídos por toda a área [7].

IV. CONCLUSÕES

Toda instalação industrial, independentemente de seu ramo de atuação e tamanho, possui um sistema de distribuição de energia elétrica. Dependendo do tamanho, do layout da planta, da fonte de energia e operação, o sistema pode ser mais o menos complexo.

Seja qual for o caso, o projeto, a operação e a manutenção desse sistema passa pela análise de uma série de normas técnicas, ensaios elétricos e boas práticas que juntos colaboram para uma melhor eficiência na utilização da energia elétrica e baixo custo de manutenção do sistema e de equipamentos, sejam eles parte integrante do sistema de distribuição, como

cabos e transformadores, sejam eles cargas elétricas, como dispositivos eletroeletrônicos e motores elétricos.

Além disso, tais observações são de vital importância para a garantia da segurança pessoal e patrimonial durante a utilização da energia elétrica dentro do ambiente industrial, aspectos fundamentais que podem acarretar num impacto financeiro e social danoso à indústria.

Planos futuros, tem-se a revisão da norma ABNT NBR 15751, focando: valores permissíveis de segurança, considerações gerais, e melhoria de aterramento de equipamentos. Além, elaborar a norma de aterramento de Aerogeradores, considerando [8]:

- Procedimento de medições com baixas e altas frequências;
- Equalização de trafos com equipamentos nos diversos níveis e procedimentos para minimizar sobretensões;
- Características mínimas do sistema de proteção contra descargas atmosféricas visando atender ao modelo da esfera rolante.

REFERENCES

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA (NBR) 16527. Aterramento para sistemas de distribuição. Rio de Janeiro, 2016.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA (NBR) 15751. Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.
- [3] Revista O Setor Elétrico. Atitude Editorial. Edição 132 – Janeiro, 2017.
- [4] COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE, ELETRÔNICA, ILUMINAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES Cobei. Disponível em: <http://cobei.org.br/>. Acesso em 08/21.
- [5] Rousseau, Alain. Como obter um aterramento adequado para proteção contra raios?. Eletricidade Moderna, São Paulo, p. 118-127, jan. 2004.
- [6] CEMIG. Instrução para aterramento de suportes de linhas de transmissão. Manual técnico da diretoria de projetos e construções. [S.l.]. 1998.
- [7] Surtees, Antony John; ROUSSEAU, Alain; MARTZLOFF, François. Resistência de aterramento versus impedância de aterramento. Eletricidade Moderna, São Paulo, p. 170-179, fev. 2007.
- [8] ABRADÉE. Redes e energia Elétrica. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-elétrico/redes-de-energia-elétrica>. Acesso em 08/21.