

POSTE AUTOATERRADO



CADERNO TÉCNICO: Especificações, conceitos técnicos e metodologia de aplicação do poste autoaterrado

Introdução

O poste autoaterrado de base condutiva é um poste de concreto com características elétricas apropriadas para desempenhar, por si só a função de aterramento da instalação elétrica a que pertence, frente aos surtos de tensão de baixa e alta frequência. A concepção do poste autoaterrado de base condutiva foi baseada na técnica de aterramento estrutural, sendo que a armadura de aço do poste é utilizada como condutor e eletrodo de aterramento. Para garantir a dissipação de altas correntes impulsivas para terra, sem dependência da umidade do solo e sem risco de danos ao poste, o concreto da base do poste autoaterrado é produzido com baixa resistividade elétrica e baixa permeabilidade.

Desenvolvido através de projetos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) do Setor Elétrico, a nova tecnologia do poste autoaterrado de base condutiva vem sendo difundida no setor elétrico nacional, especialmente, para empresas distribuidoras de energia e fabricantes de postes de concreto, através de seminários/congressos do setor elétrico, revistas especializadas, encontros técnicos presenciais ou virtuais e workshop webinar.

Para atender as expectativas geradas nas empresas interessadas na tecnologia e facilitar o acesso à informação, foi elaborado este documento técnico que engloba os principais conceitos, métodos, procedimentos e análise de viabilidade de instalação do poste autoaterrado de base condutiva nas linhas de distribuição de energia.

O Caderno Técnico: Especificações, conceitos técnicos e metodologia de aplicação do poste autoaterrado, é constituído pelas seguintes partes:

- **PARTE 1:** Parâmetros para Análise de Custo-Benefício do Poste Autoaterrado
- **PARTE 2:** Metodologia de aterramento das redes de distribuição com postes autoaterrados - Influência dos Postes Adjacentes
- **PARTE 3:** Comportamento do aterramento em solicitações de Baixa e Alta Frequência- Introdução ao Conceito de resistência e Impedância de Aterramento
- **PARTE 4:** Dúvidas e Esclarecimentos Referente aos conceitos e Utilização de Postes Autoaterrados.

Sumário

PARTE 1

1.	INTRODUÇÃO.....	5
2.	REPRESENTATIVIDADE DO SISTEMA DE ATERRAMENTO NO CUSTO DO POSTE CONVENCIONAL..	5
3.	POSTE AUTOATERRADO.....	8
4.	COMPARAÇÃO POSTE CONVENCIONAL X POSTE AUTOATERRADO.....	10
5.	BENEFICIOS NÃO CONTABILIZADOS.....	11
6.	CONCLUSÃO.....	11

PARTE 2

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	SURTOS DE ALTA FREQUÊNCIA.....	13
3.	FENÔMENOS TRANSITÓRIOS - ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO.....	14
4.	POSTES ADJACENTES ATERRADOS.....	16

PARTE 3

1.	INTRODUÇÃO.....	21
2.	SISTEMAS DE ATERRAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO.....	22
3.	RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	24
4.	IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO.....	30
5.	BIBLIOGRAFIA.....	42

PARTE 4

1.	INTRODUÇÃO.....	44
2.	DIFUSÃO NO SETOR ELÉTRICO.....	44
3.	DÚVIDAS E ESCLARECIMENTOS.....	45

PARTE 1

**Parâmetros para Análise
de Custo-Benefício do
Poste Autoaterrado**



1. INTRODUÇÃO

O poste autoaterrado foi desenvolvido de forma a não alterar significativamente o processo de fabricação do poste de concreto armado. Apenas duas características foram impactadas: a instalação de terminais de conexão na armadura do poste antes do enchimento da fôrma e a utilização do concreto condutivo na base do poste.

O concreto condutivo tem uma densidade menor que o concreto convencional e existe um procedimento diferente no enchimento da fôrma e, consequentemente, são necessárias duas equipes e equipamentos de produção, uma para o concreto condutivo e outra para o concreto convencional.

Em função do exposto, o poste autoaterrado de base condutiva tem um custo de fabricação um pouco superior comparado com o poste convencional sem sistema de aterramento sendo, portanto, o acréscimo no custo devido ao uso de terminais de conexão da armadura do poste, o uso de agregados especiais para produção da massa de concreto condutivo utilizada na base do poste e infraestrutura de equipamentos e mão de obra do processo produtivo.

Este raciocínio muda, entretanto, quando comparamos o custo do poste autoaterrado de base condutiva com o custo do poste de concreto convencional somado ao custo de material e mão-de-bra (MO) de instalação de um sistema de aterramento com uma ou três hastes terra.

O aumento no custo de fabricação pode variar entre fabricantes, considerando a diferença do ICMS, tamanho do lote e lucro do fabricante.

As características do poste autoaterrado não implicam em qualquer alteração na questão de cura, liberação para transporte ou logística de transporte, sendo as mesmas do poste de concreto convencional.

Este estudo visa fornecer parâmetros de custo do poste autoaterrado em relação ao custo do poste de concreto convencional com sistemas de aterramento, para uma referência preliminar de análise de viabilidade. Estudo mais detalhados deverão ser conduzidos por cada empresa, considerando suas particularidades e cadeia de fornecedores.

2. REPRESENTATIVIDADE DO SISTEMA DE ATERRAMENTO NO CUSTO DO POSTE CONVENCIONAL

O padrão de montagem utilizado no estudo foi o aterramento de transformadores em rede aérea nua. A demonstração analítica permite avaliar os acréscimos percentuais de custo ao valor de aquisição de tipos de postes convencionais, com a inclusão dos materiais e MO de instalação do sistema de aterramento.

O percentual de acréscimo é obtido pela relação entre o custo total dos materiais e MO de instalação do aterramento e o custo de aquisição do poste.

2.1. POSTE CONVENCIONAL + ATERRAMENTO COM 1 HASTE TERRA

Os materiais e mão-de-obra (MO) de instalação do aterramento com uma haste terra, foram avaliados para cada tipo de poste, conforme exemplo da Tabela 1, de referência, abaixo.

Tabela 1- Referência Aterramento de Transformador em rede aérea nua

Aterramento Transformador – 1 haste			
Item Material	Qtd.	Descrição	Custo total (R\$)
1	2,3 (kg)	Arame aço zinorado 6,05mm (4 BWG)	
2	1	Haste terra cantoneira de aço galvanizado a fogo 2,40m	
3	2	Conector tipo cunha alumínio CN12	
4	3	Conector Parafuso Fendido 16mm2	
5	0,15 (kg)	Cabo de cobre nu 16 mm ² meio duro	
6	0,2 (kg)	Massa calafetadora	
Item MO	Qtd.	Descrição	Custo total (R\$)
1	1	M.O Instalar Aterramento Simples Rede/Equipamento	
Item Poste	Qtd	Descrição	Custo total (R\$)
1	1	Poste de concreto tipo _____	

A Tabela 2 mostra o resultado percentual do custo de material e MO instalação de aterramento de transformador, para cada tipo de poste convencional e o percentual final do poste com aterramento instalado, em rede aérea nua.

Tabela 2 – Percentual de custo do sistema de aterramento em relação ao preço do poste convencional

Aterramento com 1 haste terra - Transformador							
tipo poste	11-200	11-400	11-600	11-1000	12-400	12-600	12-1000
MO + material de aterramento	0,40	0,30	0,23	0,16	0,27	0,23	0,15
Custo final do poste com aterramento instalado	1,40	1,30	1,23	1,16	1,27	1,23	1,15

Custo Poste base = 1,0

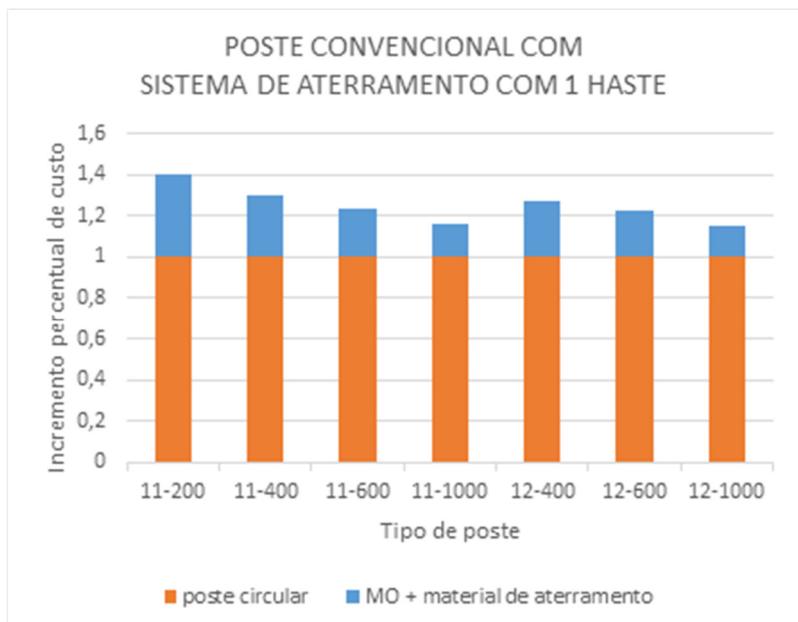


Figura 1 – Acréscimo no custo do poste devido ao aterramento com 1 haste terra

2.1. POSTE CONVENCIONAL + ATERRAMENTO COM 3 HASTES TERRA

Os materiais e MO de instalação do aterramento com três hastes terra, foram avaliados para cada tipo de poste conforme exemplo da tabela 3, de referência, abaixo.

Tabela 3 - Aterramento de transformador em rede aérea nua
Aterramento Transformador – 3 hastes

Item	Qtd.	Descrição	Custo total (R\$)
1	3,6 (kg)	Arame aço zinorado 6,05mm (4 BWG)	
2	3	Haste terra cantoneira de aço galvanizado a fogo 2,40m	
3	4	Conector tipo cunha alumínio CN12	
4	0,15 (kg)	Cabo de cobre nu 16 mm ² meio duro	
6	0,6 (kg)	Massa calafetadora	
7	3	Conector parafuso fendido 16mm2	
Item MO	Qtd.	Descrição	Custo total (R\$)
1	1	M.O Instalar Aterramento Simples Rede/Equipamento	
Item Poste	Qtd.	Descrição	Custo total (R\$)
1	1	Poste de concreto tipo _____	

A tabela 4 mostra o resultado percentual do custo de material e MO instalação de aterramento de transformador, para cada tipo de poste convencional e o percentual final do poste com aterramento instalado, em rede aérea nua.

Tabela 4 – Percentual de custo do sistema de aterramento em relação ao preço do poste convencional – Instalação transformadora

Aterramento com 3 hastas							
tipo poste	11-200	11-400	11-600	11-1000	12-400	12-600	12-1000
MO + material de aterramento	0,48	0,36	0,28	0,19	0,33	0,27	0,18
Custo final do poste com aterramento instalado	1,48	1,36	1,28	1,19	1,33	1,27	1,18

Custo Poste convencional base = 1,0

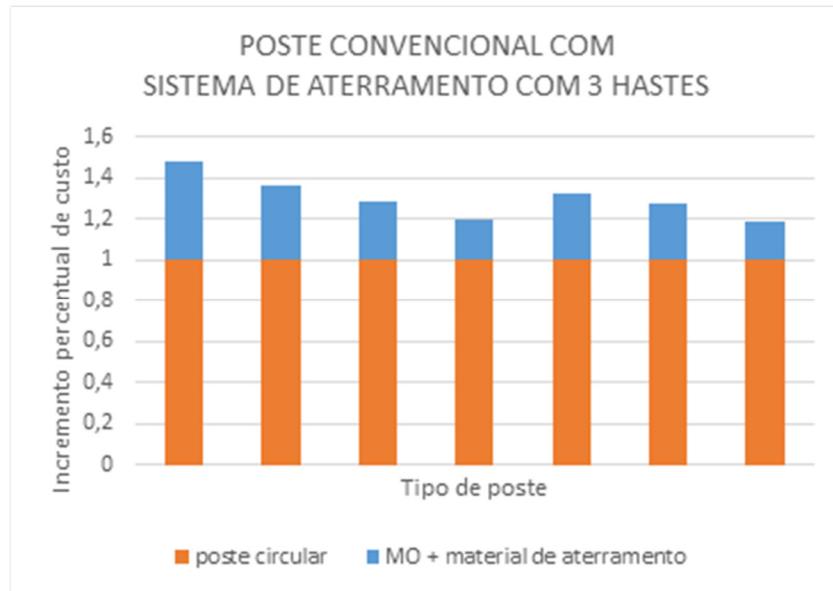


Figura 2 - Acréscimo no custo do poste devido ao aterramento com 3 hastas terra

3. POSTE AUTOATERRADO

Partindo do princípio que o poste autoaterrado, na maioria dos casos, realiza sozinho a função de aterramento, sem hastas terra, além do custo de fabricação (inclusive royalties) deve ser considerado o custo de material e MO de conexão dos condutores de aterramento dos equipamentos na instalação elétrica.

A base de royalties devido pelos fabricantes de postes que compõem o custo final dos postes autoaterrados de base condutiva é de 4,5%.

O custo de fabricação final do poste autoaterrado sugerido, inclusive royalties, é cerca de 15% maior que o poste de concreto convencional sem aterramento considerando o poste tipo 11/200. Embora este percentual diminua na comparação com os postes de maior capacidade, para efeito de compensação de desvios, vamos considerar o mesmo valor para todos os tipos de postes considerados neste trabalho.

O custo de materiais e MO de conexão do poste autoaterrado de base condutiva na rede de distribuição foi avaliado conforme exemplo da tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Poste autoaterrado - Aterramento de estrutura de transformador em rede aérea nua

Poste autoaterrado	Quantidade	Custo total R\$
Poste tipo _____	1	
Material de aterramento	Quantidade	Custo total R\$
Conector parafuso fendido de rabicho 35mm2	1	
Conector parafuso fendido 16mm2	3	
Fio de cobre Ø 16mm2 (kg)	0,8	
MO instalação	Quantidade	Custo total R\$
Mão de obra aterramento_eqto	1	

Custo Poste autoaterrado base (inclusive royalties) = 1,15

A tabela 6 mostra o resultado percentual do custo de material e MO instalação de aterramento de transformador e o percentual final do poste com aterramento instalado, para cada tipo de poste autoaterrado, em rede aérea nua.

Tabela 6 – Percentual de custo do sistema de aterramento em relação ao preço do poste autoaterrado

Tipo poste	11- 200	11- 400	11- 600	11- 1000	12- 400	12- 600	12- 1000
Material e MO aterramento	0,06	0,045	0,035	0,023	0,039	0,033	0,022
Poste autoaterrado instalado	1,21	1,195	1,185	1,173	1,189	1,183	1,172

4. COMPARAÇÃO POSTE CONVENCIONAL X POSTE AUTOATERRADO

Com base nos resultados mostrados nas tabelas 2, 4 e 6 temos:

Tabela 7 – Diferença percentual entre o poste autoaterrado e o poste convencional aterrado com 1 ou 3 hastes (valores médios de 2013)

tipo poste	11- 200	11- 400	11- 600	11- 1000	12- 400	12- 600	12- 1000
Poste convencional com 1 haste de terra instalado	1,40	1,30	1,23	1,16	1,27	1,23	1,15
Poste convencional com 3 hastes de terra instalado	1,48	1,36	1,28	1,19	1,33	1,27	1,18
Poste autoaterrado instalado	1,21	1,195	1,185	1,173	1,189	1,183	1,172
Diferença % PAA x P1h	-0,19	-0,105	-0,045	+0,013	-0,081	-0,047	+0,022
Diferença % PAA x P3h	-0,27	-0,165	-0,095	-0,017	-0,141	-0,087	-0,008

O gráfico da figura 3 mostra que o poste autoaterrado possui um custo final menor ou igual aos mesmos tipos de postes convencionais quando se considera o valor do aterramento instalado.

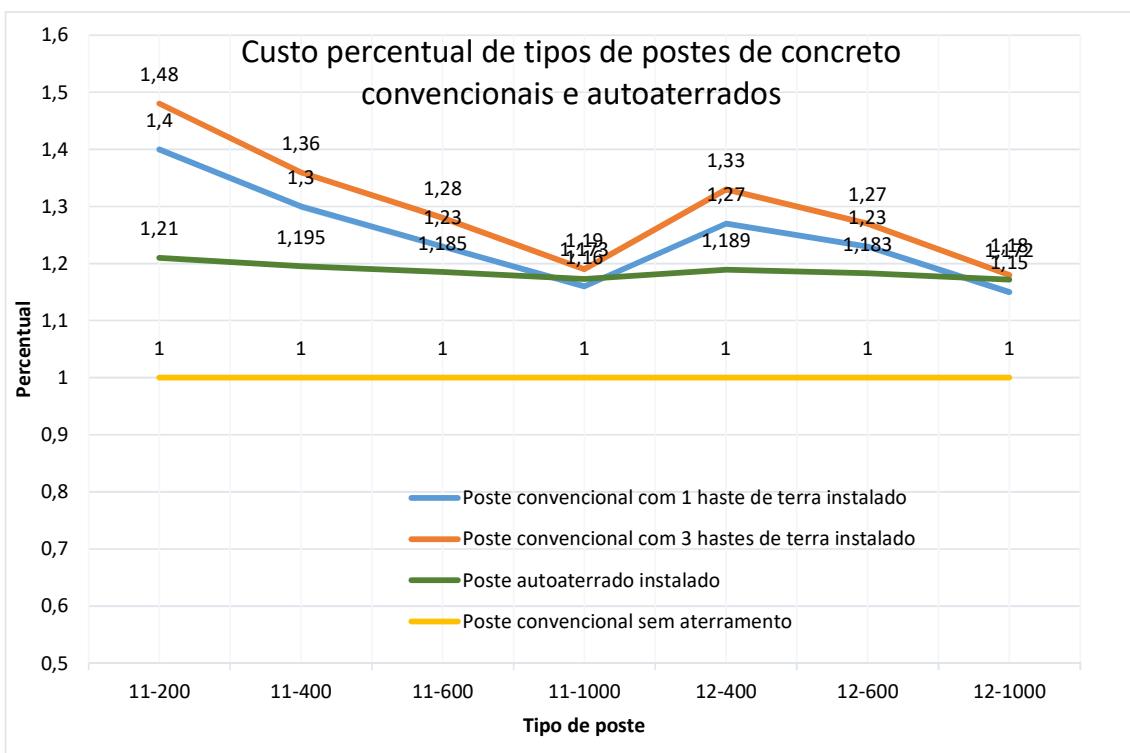


Figura 3 - Custo percentual comparativo entre postes de concreto convencionais e postes autoaterrados

5. BENEFÍCIOS NÃO CONTABILIZADOS

- Produtividade da equipe de construção na instalação do poste autoaterrado comparado com a instalação do poste convencional + sistema de aterramento (em média economiza-se 40 minutos por poste);
- Redução no índice de queima de transformadores, para-raios e reguladores de tensão;
- Redução no índice de desligamentos transitórios e permanentes da rede de energia;
- Redução no índice de pedidos de ressarcimento de danos a consumidores devido a descargas atmosféricas;
- Vantagem nos aspectos de investimento (BRR) com o uso do poste autoaterrado: redução de despesas em materiais classificados como Componentes Menores (COM). Valor do poste autoaterrado reconhecido integralmente como investimento.

6. CONCLUSÃO

A taxa de retorno do investimento em postes autoaterrados torna-se extremamente atrativa se considerarmos a sua contribuição para a melhoria de desempenho da linha de distribuição, e a contabilização de benefícios importantes como, diminuição de furtos de cabos terra, diminuição de despesas de manutenção corretiva, diminuição de queima de equipamentos, diminuição do ressarcimento de danos a terceiros, a diminuição das interrupções da linha de distribuição.

PARTE 2

**Metodologia de
aterramento das redes de
distribuição com postes
autoaterrados - Influência
dos Postes Adjacentes**



1. INTRODUÇÃO

Um surto de tensão na rede de energia elétrica pode ser provocado por ondas de baixa frequência e regime permanente ou ondas de alta frequência e regime transitório. Os surtos de baixa frequência são os provocados por curtos-circuitos ou por manobras de equipamentos e os surtos de alta frequência são os provocados pelas descargas atmosféricas.

Para sistemas de distribuição os surtos causados por descargas atmosféricas serão preponderantes, causando maiores solicitações à isolação. Os surtos de 60Hz e de manobras serão atenuados rapidamente pelas maiores resistências e baixas capacitâncias da rede.

Em geral, a proteção contra surtos no sistema de distribuição é feita por para-raios e aterramentos instalados ao longo da linha. Diante de um surto de tensão na rede elétrica, os para-raios e os aterramentos exercem papel fundamental na condução da corrente elétrica para o solo e consequentemente na redução da sobretensão.

2. SURTOS DE ALTA FREQUÊNCIA

Se uma rede for atingida por uma descarga atmosférica diretamente em seus condutores, o surto originado fluirá ao longo da linha em ambos os sentidos, na velocidade da luz, podendo provocar arcos elétricos, danos em isoladores, queima de transformadores e para-raios e, até mesmo, destruir postes e cruzetas, até que toda a sua energia seja gasta.

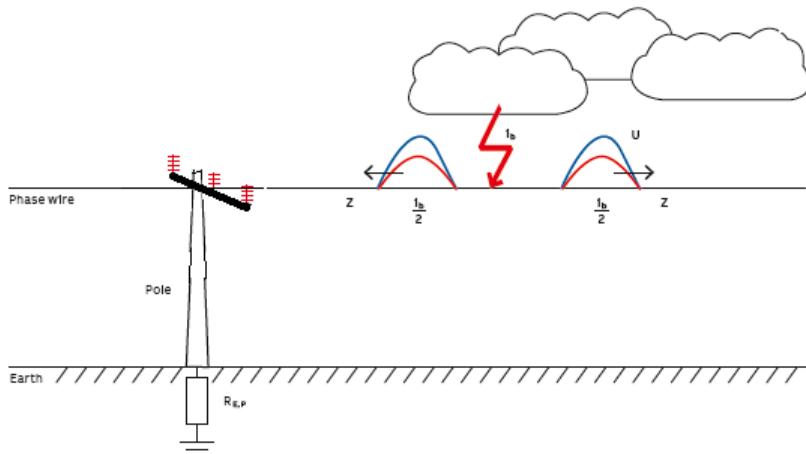


Figura 4 – Sobretensão na linha por descarga direta sobre a condutor

A menos que a rede possua cabo guarda ou para-raios, a quase totalidade das descargas diretas implicam em falha dielétrica do sistema, com grande probabilidade de queima de equipamentos e também danos físicos e materiais.

Por exemplo, uma descarga de 30KA caindo no condutor de uma linha com impedância de 400 ohms, provocará uma sobretensão de cerca de 6.000 kV, enormemente acima da capacidade de isolação da linha.

As falhas nas linhas de distribuição podem ocorrer pelo impacto direto da descarga sobre a linha, como também pela tensão induzida na linha por uma descarga que ocorra próximo a ela. Apesar de serem menos severas que as descargas diretas, 90% das falhas que ocorrem nas linhas de distribuição são devidas às descargas indiretas.

Como por exemplo, uma descarga de 30KA caindo a 50m de uma linha a 10m do solo provocará uma sobretensão de cerca de 232,8 kV, muito acima da capacidade de isolamento da linha.

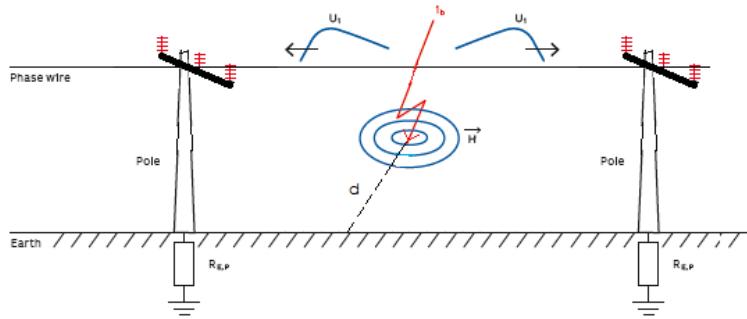


Figura 5 – Sobretensão na linha por descarga próximo à linha

Redes de distribuição localizadas em centros urbanos ou em regiões de floresta possuem proteções naturais, tais como árvores e edifícios, formando uma espécie de blindagem que reduz o número de descargas diretas sobre as mesmas. Por outro lado, para sistemas com nível de isolamento <230 kV (como no caso de sistemas de distribuição de energia) e dependendo do posicionamento do obstáculo em relação à linha, o número de interrupções por tensões induzidas pode aumentar significativamente.

Em qualquer ponto da rede que haja disruptão nos isoladores, assim como onde exista a presença de para-raios e pontos de aterramento, estes vão provocar uma atenuação das ondas de surto (reflexão) minimizando e até evitando os danos em equipamentos.

3. FENÔMENOS TRANSITÓRIOS - ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO

Quando a linha é submetida a fenômenos transitórios de alta frequência, o fenômeno da interação eletromagnética entre a linha e um condutor deve ser caracterizado no âmbito da eletrodinâmica e, assim, o processo de propagação de ondas eletromagnéticas radiadas e conduzidas é dominante. Este fenômeno é denominado acoplamento eletromagnético.

Considerando apenas o acoplamento em regime permanente, se o condutor é isolado do solo, o efeito capacitivo pode predominar e a influência da corrente da linha pode ser desprezada nessa situação. Por outro lado, se o condutor onde se tem uma tensão induzida é conectado ao solo (aterrado),

predomina o acoplamento capacitivo. Acoplamento capacitivo é a transferência de corrente entre dois condutores sem contato metálico.

Na existência de terminações à terra próximas, o surto induzido no cabo sofre reflexão no solo nas posições destas terminações. Isto resulta em substancial modificação das ondas de tensão e corrente no cabo aterrado e, pelo efeito de acoplamento entre cabos, promove a redução da tensão induzida nas fases.

A existência de maior número de ligações intencionais para terra ao longo da linha de energia elétrica provoca o aumento do nível de proteção da linha contra surtos de tensão e melhora o desempenho da linha em regime transitório. Quanto maior o número de aterramentos (e menor a impedância de aterramento) menor é o número de desligamentos e o percentual de descargas diretas ou indiretas que causam desligamentos nas redes de distribuição.

Cabos aterrados podem ser utilizados posicionado acima das fases ou abaixo das fases como blindagem e proteção contra os surtos de alta frequência. O cabo colocado abaixo das fases é um componente de blindagem para tensões induzidas por descargas indiretas ao passo que o cabo colocado acima das fases (cabو guarda) é efetivo tanto para os surtos de descargas diretas como para descargas indiretas.

No caso de redes compactas o cabo mensageiro aterrado é um cabo de proteção contra surtos de descargas diretas e indiretas.

Redes de distribuição aéreas normalmente tem um condutor neutro de BT multiaterrado abaixo da linha. O neutro multiaterrado funciona como uma proteção contra sobretensões induzidas e permite um caminho de retorno para cargas desbalanceadas e faltas fase-terra. Em geral, o condutor neutro fica posicionado entre 3 e 4m abaixo dos condutores fase da rede primária e os circuitos primário e secundário compartilham o neutro.

O condutor neutro multiaterrado pode reduzir a sobretensão no isolador por um fator que depende do valor do aterramento e da proximidade do condutor aterrado com o condutor fase primário.

A proximidade dos condutores fase do condutor aterrado melhora o acoplamento eletromagnético e como consequência a diminuição da tensão induzida. Tal redução é significativa apenas quando os cabos aterrados estão muito próximos do condutor energizado e conectados a aterramentos próximos aos pontos de observação. Em linhas com 4 m de distância entre os cabos energizados e de blindagem, estima-se uma redução de 10% na tensão induzida entre as fases e o solo.

No caso de condutores energizados estarem mais próximos aos cabos de blindagem, essas reduções da tensão induzida podem ultrapassar a 40%.

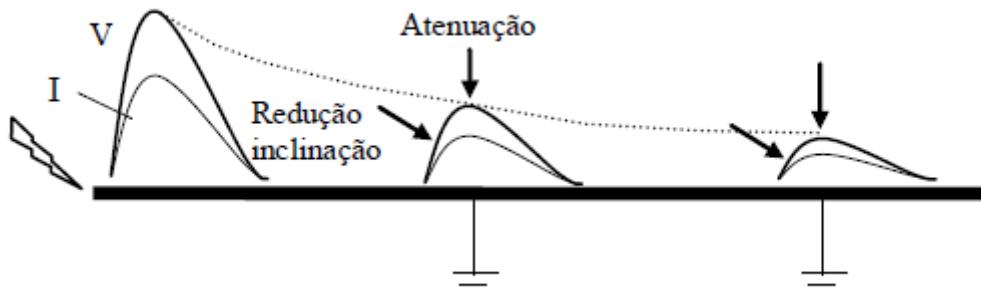


Figura 6 - atenuação da sobretensão ao longo da linha devido a aterramentos

4. POSTES ADJACENTES ATERRADOS

A influência dos postes adjacentes nas tensões de surto resultantes ao longo da linha de distribuição é maior para menores distâncias entre vãos e a existência de terminações à terra.

Para linhas de distribuição / transmissão, as tensões são calculadas somente em $2\mu s$. É assumido que as reflexões nos postes adjacentes reduzem a cauda da onda de forma que o ponto de $2\mu s$ determina a falha de isolamento (IEEE Std 1410 - *Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*). Daí a necessidade de existir proteção contra surtos na linha em múltiplas distâncias de 200 m.

As reflexões da onda de surto nos postes adjacentes ao transformador reduzirão grandemente a tensão no isolador, diminuindo o risco de fhashtover e queima de transformadores.

Também existirá uma redução brusca na energia nos para-raios quando da existência de postes adjacentes aterrados, melhorando a funcionalidade e durabilidade dos para-raios.

A existência de múltiplas terminações à terra em vãos menores que 200m com cabos de blindagem *underbuilt*, cabos para-raios ou condutor neutro, próximos dos condutores fase, podem ter a mesma eficiência de linhas com para-raios, portanto a adoção de postes autoaterrados com sua funcionalidade elétrica instalada em todos os postes de uma linha de distribuição dispensa o uso de para-raios intermediários.

4.1. PROTEÇÃO EM ÁREAS URBANAS

Em redes urbanas de alta densidade ou baixa densidade, a distância entre os para-raios e aterramentos pode variar entre 40m a 400m conforme os critérios adotados pelas empresas distribuidoras de energia elétrica locais.

Como, em geral, não são utilizados aterramentos intermediários na linha primária nua em área urbana em função da densidade de transformadores, o primeiro poste aterrado atingido pelo campo eletromagnético gerado em decorrência de fenômenos transitórios de alta frequência sempre será um poste de um transformador. Os aterramentos simples em final de circuito primário funcionam para que a refração da onda de surto seja menor, mas não protegem diretamente os transformadores.

A utilização de postes autoaterrados adjacentes ao transformador gera substancial redução da sobretensão nas cadeias de isoladores, melhorando a proteção do para-raios e do transformador, bem como, reduz a impedância de aterramento do trecho do transformador, reduzindo também, a sobretensão transferida para a rede BT, e consequentemente, ao consumidor.

Em áreas urbanas de alta densidade de transformadores, a utilização deste método, também diminui a indução eletromagnética nos condutores fase da rede secundária reduzindo a necessidade de uso de supressores de surto na baixa tensão.

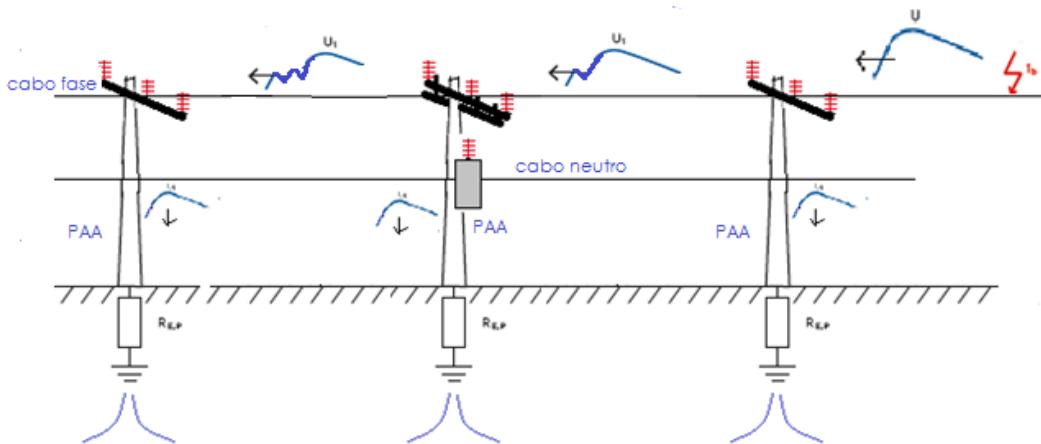


Figura 7 - Postes adjacentes ao transformador em área urbana

4.2. PROTEÇÃO EM ÁREA RURAL

Na existência de neutro contínuo na linha primária, o cabo neutro exercerá o papel de cabo de blindagem da rede pelo acoplamento magnético com os condutores fase. Na inexistência do condutor neutro, os postes autoaterrados adjacentes e o poste do transformador devem ser interligados por um condutor terra de blindagem abaixo da rede primária.

Preferencialmente o cabo de blindagem deve ser posicionado a uma distância de 1,20m a 1,5m da cruzeta primária para se obter um melhor desempenho frente aos surtos de tensão induzida por descargas atmosféricas.

O cabo terra ou neutro próximo dos condutores fase proporcionará uma atenuação significativa na onda de surto da linha nos vãos interligados diminuindo o risco de *flashover* nos isoladores e de danos em transformadores e para-raios.

A interligação de postes autoaterrados também diminui a impedância do aterramento no trecho considerado dispensando o uso de hastes terra complementar mesmo em solos de alta resistividade.

O uso desta alternativa gera substancial redução da sobretensão nas cadeias de isoladores, maior proteção do transformador e do para-raios e, diminui a sobretensão induzida na rede de baixa tensão e consequentemente no consumidor.

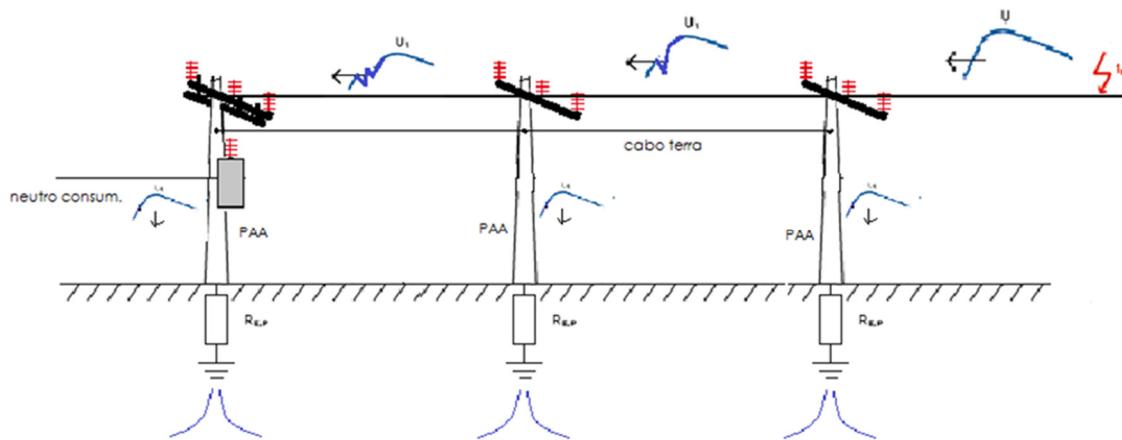


Figura 8 - Postes adjacentes em área rural

4.3. POSTE AUTOATERRADO SEM FUNCIONALIDADE ELÉTRICA

As ondas de surto atmosférico se propagam ao longo da linha na velocidade da luz. Ao alcançarem a primeira estrutura aterrada, o isolador que separa o condutor energizado da estrutura fica submetido à sobretensão e a um intenso campo elétrico. Essa sobretensão pode ser capaz de romper o isolamento da linha, com estabelecimento de um arco elétrico conectado entre o condutor e a estrutura aterrada. O arco elétrico constitui usualmente num arco superficial de contorno do isolador através do ar ou raramente num arco volumétrico, que pode destruir o isolador.

Através do arco, a corrente de descarga flui em direção ao solo, conduzido pela armadura interna da estrutura de concreto, e cessa após um breve período de tempo, devido à sua natureza impulsiva e de curta duração. Contudo, em muitas situações, o campo eletromagnético no topo do poste não é substancialmente reduzido pela reflexão da onda no solo e o arco pode se manter, sustentado pela própria tensão de operação da linha. Uma vez estabelecido o arco, o valor da impedância de percurso da corrente é reduzido e uma tensão de amplitude relativamente baixa pode ser capaz de manter o nível da corrente o suficiente para assegurar a ionização da região correspondente ao percurso do arco e sustentá-lo. Mantendo-se o arco, configura-se um curto-círcuito que pode ser muito destrutivo para o sistema, pois a corrente de baixa frequência passa a fluir pelo arco elétrico em direção ao solo. Nesses

casos, após um período de fluxo da corrente, o sistema de proteção cujos relés são sensibilizados por essa corrente, atuam, causando o desligamento da linha.

O poste autoaterrado instalado ao longo da rede e sem funcionalidade elétrica (sem conexão com o condutor neutro ou cabo de blindagem) deixa de ser efetivo como aterramento. No caso de ser conectado aos componentes metálicos no topo do poste (mão francesa, cinta, cruzeta metálica) e ao neutro ou cabo de blindagem ele pode ajudar na diminuição da sobretensão no topo do poste pelo mesmo motivo citado no item 3, ou seja, o acoplamento capacitivo, sem necessidade de para-raios.

PARTE 3

**Comportamento do
aterrramento em
solicitações de Baixa e Alta
Frequência - Introdução ao
Conceito de resistência e
Impedância de Aterramento**



1. INTRODUÇÃO

Um surto de tensão na rede de energia elétrica pode ser provocado por ondas de baixa frequência ou ondas de alta frequência. Os surtos de baixa frequência são os provocados por curtos-circuitos ou correntes de longa duração e os surtos de alta frequência são os provocados pelas descargas atmosféricas.

Os surtos de tensão de alta frequência são preponderantes e as principais causas de falhas em circuitos de distribuição. Entretanto, os sistemas de aterramento utilizados em redes de distribuição são projetados e desenvolvidos para se obter valores de resistência de aterramento que não comprometam o sistema de proteção para eventuais correntes de curto-circuito em 60 Hz, ou seja, sob a ótica de surtos de tensão de baixa frequência.

No Brasil, a densidade de incidência de descargas atmosféricas é a maior do mundo (80 milhões de descargas elétricas por ano). Além disso, o solo brasileiro apresenta um valor médio de resistividade elétrica superior a $1.000 \Omega \cdot m$ na maior parte do território, o que é bem elevado se comparados com valores característicos de outros países. A título de comparação, o solo Europeu possui valor médio da ordem de $100 \Omega \cdot m$.

Em geral, a proteção contra surtos no sistema de distribuição de energia elétrica é feita por para-raios e aterramentos instalados nos equipamentos e ao longo da linha. Diante de um surto de tensão na rede elétrica, os para-raios e os aterramentos exercem papel fundamental na condução da corrente elétrica para o solo e, consequentemente, na redução da sobretensão.

Os sistemas de aterramento apresentam um comportamento em regime permanente e outro em regime transitório. A resposta do aterramento às solicitações de baixas frequências, como por exemplo, um curto-circuito e correntes de longa duração, é caracterizada em regime permanente e estado estático. Já a resposta do aterramento às solicitações de altas frequências, como por exemplo, as ondas impulsivas de descargas atmosféricas, é caracterizada em regime transitório e estado dinâmico.

Para baixas frequências, o estudo da análise comportamental do aterramento é relativamente simples visto que este tipo de análise é baseado na aproximação das equações eletromagnéticas, considerando o estado estacionário. Logo, em frequências industriais o aterramento é representado apenas por uma resistência, considerando-se apenas a resistividade do solo (ρ). As resistências dos condutores e conexões são pequenas e podem ser desprezadas.

Porém, para frequências mais altas existe uma maior complexidade pois, para este tipo de análise onde se considera o aterramento frente a fenômenos de natureza rápida, como as descargas

atmosféricas, é preciso considerar os efeitos de propagação da corrente no solo e a dependência dos parâmetros do solo com a frequência, pois estes influenciam de forma significativa no desempenho do aterramento. Quando se trata de alta frequência a indutância do aterramento deve ser considerada, já que esta começa a desempenhar um papel mais importante e, neste caso, o aterramento deve ser visto como uma impedância. A característica indutiva do condutor de descida do aterramento também tem influência no cálculo da impedância.

2. SISTEMAS DE ATERRAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO

Em redes de distribuição os sistemas de aterramento utilizados pelas concessionárias, em geral, são os de hastes verticais alinhadas e interligadas por condutores de cobre. As hastes podem ser do tipo cantoneira de aço com comprimento variando entre 1,5 a 2,4 metros. No entanto, devido a problemas de corrosão, atualmente observa-se uma preferência das concessionárias pelas hastes do tipo aço-cobre de 13 ou 19 mm de diâmetro e comprimento de 2 ou 2,4 metros. Os condutores utilizados na interligação das hastes e descida das estruturas são de cobre ou aço galvanizado, com bitolas variando entre o fio 6AWG até cabos de 35mm². As conexões são feitas por conectores de parafuso, conectores do tipo cunha ou soldas exotérmicas.

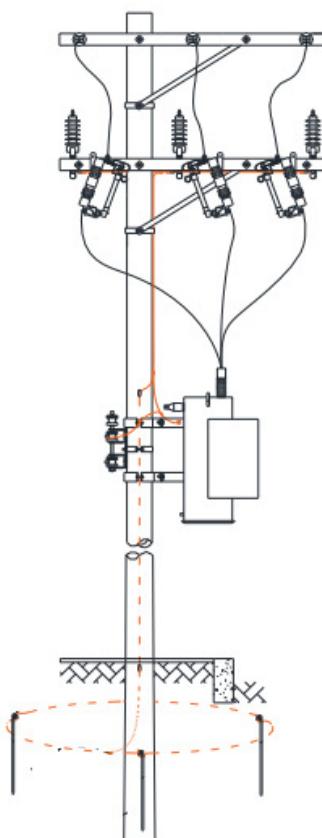


Figura 1 - Aterramento com hastes

Os padrões normativos de aterramento sugerem o número máximo de 5 hastes interligadas, haja vista as resistências mútuas entre as hastes que tornam ineficientes aterramentos de grandes dimensões [4].

- Sistemas de aterramento com hastes apresenta limitações devido a diversos fatores, como:
- Roubo de condutores neutro ou terra;
- Erros de instalação;
- Danos em aterramentos causados por máquinas em área rural;
- Danos em cabos e conexões causados pela corrosão do solo;
- Mal desempenho em solos de alta resistividade;
- Alta impedância frente às solicitações de alta frequência.

Atualmente, a tecnologia de aterramento com postes autoaterrados se apresenta como uma promissora técnica de aterramento, pois soluciona todos estes problemas.

O comportamento do poste autoaterrado em solicitações de baixa frequência equivale a de um sistema de aterramento com até 3 hastes terra.

Para solicitações de alta frequência, devido à baixa impedância da armadura, ao fenômeno da ionização do solo e à dependência dos parâmetros do solo com a frequência da onda de surto, o poste autoaterrado é melhor que um sistema de aterramento convencional, independentemente do número de hastes em paralelo, principalmente em solos de alta resistividade. Esta característica se fundamenta no fato que, em regime transitório, o acréscimo de hastes não possui efeito prático no aterramento, pelos seguintes motivos:

- a) Interpretando-se o aterramento como uma linha de transmissão com perdas, percebe-se que as hastes afastadas do ponto de injeção da corrente praticamente não interferem no processo de transferência da corrente de surto para a terra. Este efeito torna-se maior quanto menor a resistividade do solo e maior a corrente de surto [4].
- b) Devido aos efeitos mútuos entre os eletrodos adjacentes, os eletrodos mais externos são sempre mais eficazes na dissipação da corrente de impulso que os eletrodos intermediários. O índice de impulso dinâmico é melhor para um menor número de hastes. Maior número de hastes não só reduz a efetividade de cada haste na dissipação da corrente, mas também faz o comportamento transitório do sistema de aterramento piorar [7].

Desta forma, em regime transitório, na maioria das aplicações o poste autoaterrado não precisa de haste terra em paralelo.

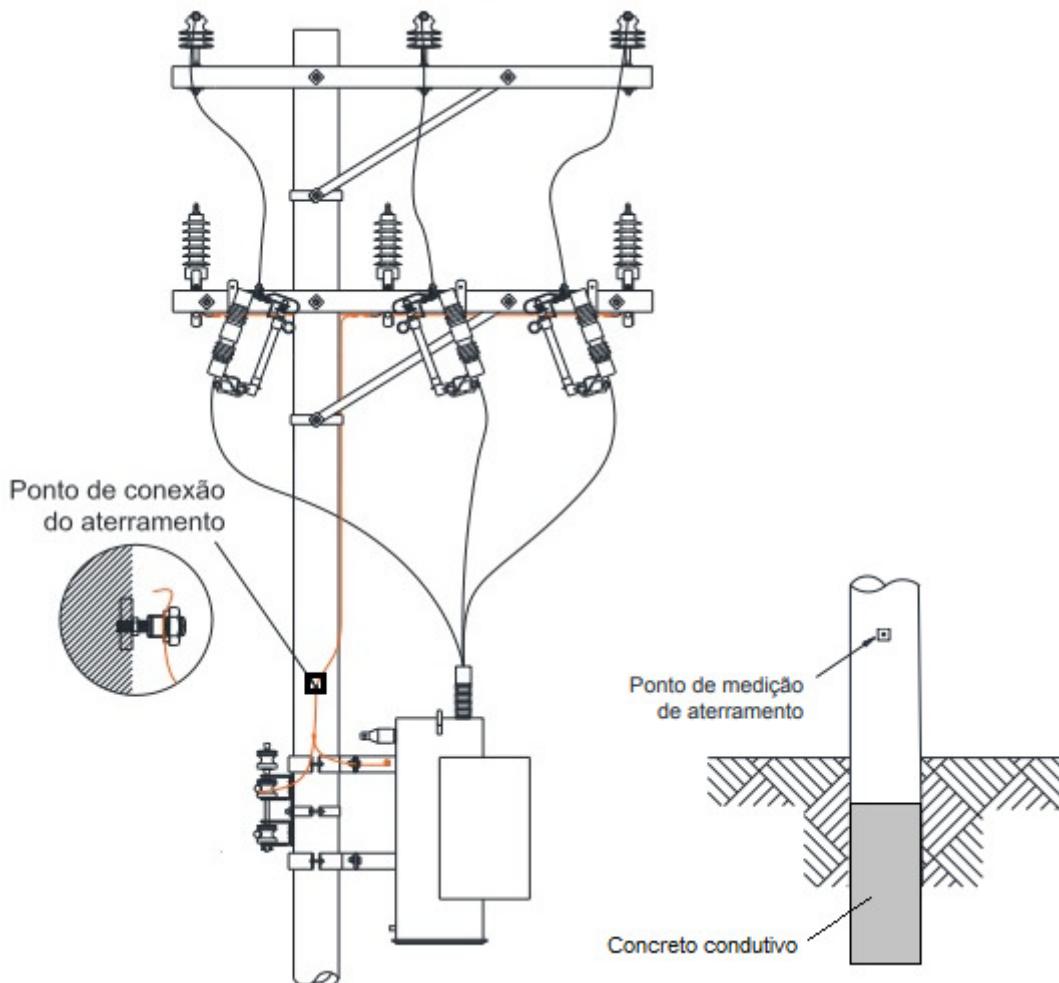


Figura 2 - Aterramento com poste autoaterrado

3. RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

A resposta de um aterramento a correntes elétricas é um importante parâmetro para a proteção e o bom desempenho dos sistemas elétricos aterrados. A várias décadas essa resposta tem sido quantificada pela resistência ou pela impedância de aterramento e determinadas por cálculos analíticos ou por meio de simulações computacionais ou medições em campo.

As empresas de energia elétrica em todo o mundo buscam projetar suas linhas com aterramentos que tenham os valores de resistência de aterramento compatíveis com o desempenho desejado, sendo a medição da resistência de aterramento o método mais utilizado para verificar as características do solo associadas à sua capacidade de dissipar cargas elétricas.

A resistência de aterramento é um parâmetro que encontra respaldo em muitas aplicações de engenharia onde as correntes são de baixa frequência, como nos casos de curto-circuito. Entretanto, quando submetido à uma solicitação impulsiva, como uma descarga atmosférica, o aterramento possui características de uma impedância e não de uma resistência. A resposta do aterramento a correntes

impulsivas pode ser bem diferente daquela situação em que o aterramento é submetido a uma corrente na frequência industrial.

O uso generalizado da resistência de aterramento como parâmetro de desempenho das linhas, inclusive frente às descargas atmosféricas, acontece devido às dificuldades de ordem técnica e prática ainda hoje existentes para se medir a impedância de aterramento.

3.1. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

A resistência de aterramento é diretamente proporcional à resistividade do solo em que os eletrodos estão colocados. Os fatores que influenciam a resistividade do solo e consequentemente a resistência de aterramento, são: tipos de solo, estrutura geológica, granulometria, temperatura e umidade do solo, concentração e sais dissolvidos na água, capacidade do solo, anisotropia e sua estratificação.

O sistema de aterramento tende a obter a mais baixa resistência de solo para as correntes de falta, mantendo os níveis de correntes em uma faixa adequada e sensível aos equipamentos de proteção, além de segura para os potenciais gerados no solo.

Para determinação da resistência de aterramento são aplicadas as equações de Maxwell em regime estático. Para sistemas de aterramento com hastes verticais ou com poste autoaterrado, são utilizadas as seguintes expressões matemáticas:

Poste Autoaterrado	Haste de terra
$R = \frac{\rho_c}{2\pi L} \ln\left(\frac{r_c}{r_{fe}}\right) + \frac{\rho_s}{2\pi L} \left(\ln\left(\frac{4L}{r_c}\right) - 1\right)$ <ul style="list-style-type: none">• ρ_c = resistividade do concreto em $\Omega \cdot \text{m}$• L = comprimento do eletrodo em metros• r_c = raio do concreto base em metros• r_{fe} = raio do cilindro equivalente a todos os aços da armadura em metros• ρ_s = resistividade do solo em $\Omega \cdot \text{m}$	$R = \frac{\rho_s}{2\pi L} \left(\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1\right)$ <ul style="list-style-type: none">• L = comprimento do eletrodo em metros• r = raio do eletrodo em metros• ρ_s = resistividade do solo em $\Omega \cdot \text{m}$

No caso de várias hastes alinhadas deve-se considerar a resistência mútua entre elas.

Resistencia mútua entre hastes:

$$R_{xy} = 0,183 \frac{\rho_s}{L} \left[\ln \left(\frac{(b+L)^2 - e^2}{e^2 - (b-L)^2} \right) \right]$$

$$b = \sqrt{L^2 + e^2}$$

- L = comprimento do eletrodo em metros
- e = espaçamento entre eletrodos em metros
- ρ_s = resistividade do solo em $\Omega \cdot m$

O gráfico da figura 3 mostra o comportamento do aterramento em baixa frequência e estado estático em configurações com poste autoaterrado e com hastes terra, em diversos tipos de solo.

Dados:

- Poste autoaterrado 12m/600 daN, resistividade do concreto da base = 30 $\Omega \cdot m$
- Hastes verticais aço-cobre de 2,4m x 13mm

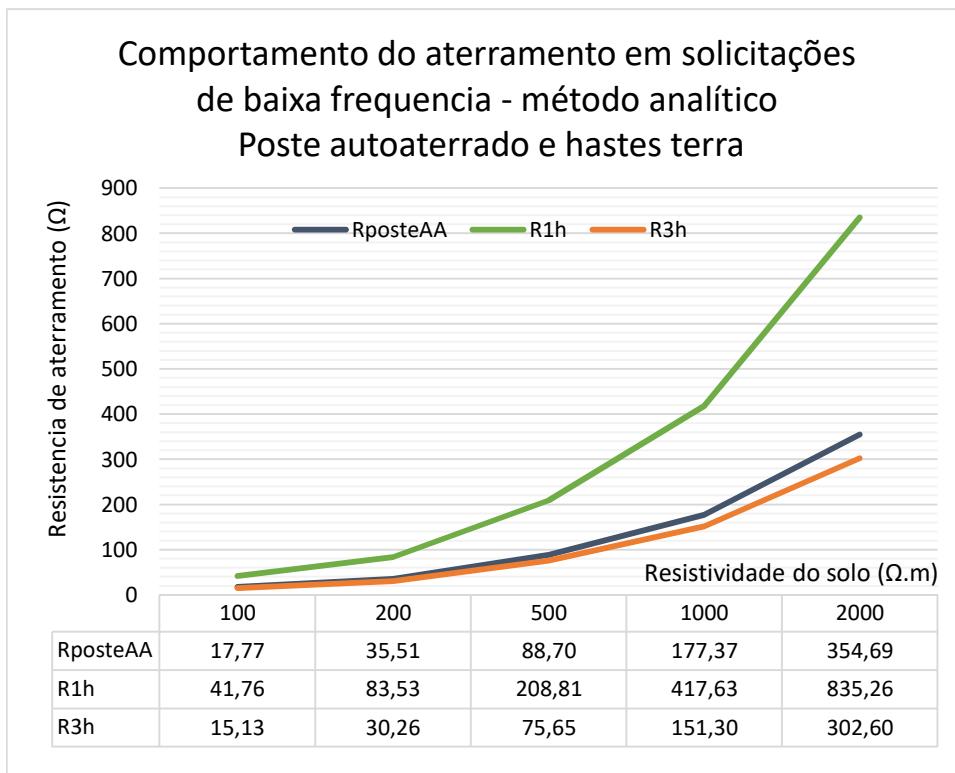


Figura 3 – Comportamento do aterramento em solicitações de baixa frequência

3.2. MÉTODOS DE MEDAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Os métodos de medição da resistência de aterramento são normalizados pela ABNT NBR 15749

- Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento.

As práticas mais comuns de medição da resistência de aterramento são os métodos da Queda de Tensão e método do terrômetro alicate.

Os equipamentos de medição, em geral, não apresentam um valor que expresse a verdade única e absoluta para a resistência, mas sim algo apenas aproximado. Considerando, ainda, os procedimentos práticos da técnica usada na medição, como o método da queda de tensão, fica evidente que a precisão representada por um valor único deve ser usada apenas como uma referência. Portanto, parece ser razoável e inevitável que a precisão dos resultados obtidos por meio de medição, sobretudo em condições de campo, venha acompanhada de certa flexibilidade.

3.2.1. Método da queda de tensão ou método de Wenner

O método da queda de potencial consiste na aplicação de uma corrente no sistema de aterramento pelo eletrodo de teste (T) fazendo a corrente circular através do eletrodo (C). Devido à passagem desta corrente, surge uma queda de tensão (potenciais na superfície do solo). Estes potenciais são medidos através do eletrodo (P). O aparelho utilizado para esta medição é conhecido como medidor de resistência de terra ou terrômetro.

O valor da resistência de aterramento é obtido pela relação entre a tensão medida e a corrente aplicada.

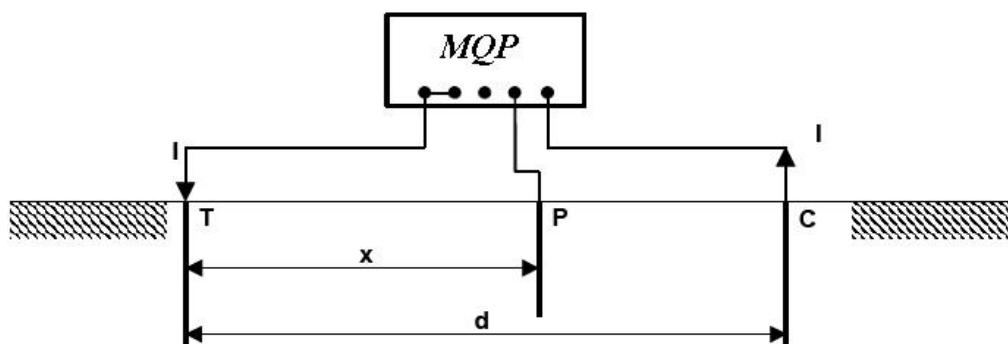


Figura 4 - Medições da resistência de aterramento

Diversos fatores podem conduzir a erros de medição que são:

- Distanciamento do eletrodo de corrente (C) - O eletrodo de corrente deve estar a uma distância d da periferia do sistema sob ensaio, de pelo menos três vezes a maior dimensão deste sistema;

- b) Distanciamento do eletrodo de potencial (P) - Para um solo homogêneo e sistemas de aterramento com dimensões menores que 10m, o eletrodo de potencial deve estar a 62% de d;
- c) Solos não homogêneos e/ou sistemas de aterramento complexos;
- d) Interferência de elementos metálicos enterrados no solo;
- e) Alinhamento dos eletrodos de corrente e potencial;
- f) Acoplamento entre os cabos dos circuitos de corrente e potencial;
- g) Resistência do eletrodo de corrente;
- h) Interferência de potenciais galvânicos, polarização e correntes contínuas parasitas em medições de corrente contínua;
- i) Interferência de correntes alternadas parasitas circulantes no solo;
- j) Instalações urbanas ou densamente povoadas;
- k) Sistemas de aterramento de grandes dimensões;
- l) Erro intrínseco ao instrumento de ensaio.

3.2.2. Método do terrômetro alicate

A maior parte desses medidores é construída na forma de um alicate de dois núcleos partidos e com dimensões para envolver os condutores do sistema de aterramento. Um dos núcleos gera uma força eletromotriz (f.e.m) que, por sua vez, produz a corrente elétrica que circula pelo circuito de ensaio e o outro é um transformador para medida de corrente. O valor da resistência de aterramento é obtido pela relação entre a tensão gerada e a corrente circulante.

Visando atenuar perturbações os equipamentos geralmente trabalham com frequências de medição entre 1,5 kHz e 2,5 kHz da frequência industrial.



Figura 5 - Terrômetro alicate

A vantagem do método do terrômetro alicate em relação ao método de queda de potencial é que a medição do aterramento pode ser feita com a linha de energia ligada e o aterramento interligado.

O princípio de funcionamento do terrômetro alicate é o de envolver o condutor de aterramento, entretanto, no caso do poste autoaterrado o condutor de aterramento é a ferragem da armadura embutida no concreto, e não pode ser enlaçada. Em função disso o método apropriado para ser utilizado para medição da resistência de aterramento do poste autoaterrado é o método dos 3 pontos, onde o terrômetro alicate é utilizado para medir a resistência de um circuito fechado ao invés de circuito com múltiplos pontos de resistência de aterramento.

3.3. MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO - MÉTODO DE WENNER

Existem basicamente duas formas de se medir a resistividade do solo: medição por amostragem e medição em campo. A medição por amostragem ocorre em laboratório através de amostras de diversos tipos de solos retirados em campo. Neste tipo de medição deve existir controle do ambiente em que se encontram as amostras de solo. Em campo as medições estão sujeitas às variações dos parâmetros do solo (composição geológica, umidade, temperatura e salinidade), que influenciam diretamente o resultado das medições, o que não ocorre no laboratório.

A medição em campo utiliza o método de Wenner que é muito difundido pela engenharia na estratificação do solo. O método de Wenner consiste na cravação de quatro hastes onde se pretende medir a resistividade do solo em linha, ou seja, os eletrodos devem estar colocados em linha e igualmente espaçados. O espaçamento entre os eletrodos geralmente é igual ao seu comprimento.

A Figura 6 mostra a configuração para medição da resistividade do solo pelo método de Wenner, onde, a é o espaçamento entre as hastes, p a profundidade de cravação das hastes e ρ a resistividade em solo homogêneo..

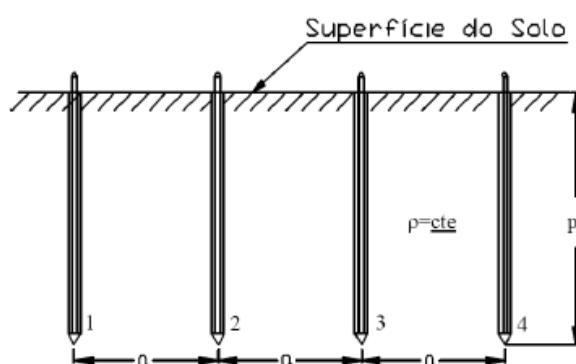


Figura 6 - Configuração para medição da resistividade do solo

A corrente de teste é injetada no ponto 1 e coletada no ponto 4. Esta corrente, passando pelo solo, produz uma diferença de potencial entre os eletrodos 2 e 3. Sendo assim, dividindo a diferença de potencial pela corrente de teste (I), obtém-se o valor da resistência elétrica (R) do solo.

A equação da resistividade elétrica do solo, através do método de Wenner, é obtida pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}}$$

Para os casos onde $a > p$, a equação de Wenner é simplificada para a seguinte equação:

$$\rho = 2\pi Ra$$

Sabendo-se que o solo apresenta características anisotrópicas, as medições deverão ser levantadas em várias direções, pois a resistividade pode variar dependendo da direção considerada. Sendo assim, atribuiu-se um valor médio às resistividades para diversas partes que compõem o solo estratificado.

4. IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

Todo sistema de aterramento elétrico pode ser caracterizado, eletromagneticamente, por uma impedância de aterramento. Esta impedância de aterramento é a oposição oferecida à entrada e dispersão de corrente para o solo.

Para frequências mais baixas (até aproximadamente 60 Hz) o módulo da impedância é constante e o ângulo é aproximadamente zero, características essas que se aproximam do conceito de resistência de aterramento. Neste caso, os efeitos reativos podem ser desprezados. Logo, no caso de análises em baixas frequências, o sistema de aterramento pode ser caracterizado eletromagneticamente por meio de uma resistência de aterramento.

Porém, para frequências superiores e observando o ângulo, isto já não ocorre mais, pois a impedância apresenta características capacitivas e indutivas. Sendo assim, não é adequado caracterizar a resposta do aterramento apenas por uma resistência quando o fenômeno solicitante é de natureza impulsiva, como aqueles associados a descargas atmosféricas.

Na análise no domínio do tempo, o comportamento do aterramento frente a ondas de correntes impulsivas normalmente é determinado em termos da impedância impulsiva, ZP. Esta impedância é definida como a razão entre os picos de tensão e de corrente no ponto de injeção (mesmo que os picos não sejam simultâneos, o que na maior parte dos casos não serão). A máxima sobretensão resultante no ponto de injeção pode ser determinada simplesmente pela multiplicação do valor do pico de corrente por ZP. A impedância impulsiva, diferentemente do conceito original de impedância no domínio da frequência, depende da forma de onda do fenômeno solicitante, sobretudo do seu tempo de frente.

Fica clara a importância de considerar a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Estes parâmetros influenciam de forma significativa na resposta do sistema de aterramento elétrico ao longo do espectro de frequência, como por exemplo, na redução da impedância de aterramento.

Para análise do aterramento quando solicitado pela injeção de correntes impulsivas típicas de descargas atmosféricas, são consideradas constantes a condutividade e a permissividade elétrica do solo, no caso de adoção da metodologia de solo linear ou de variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo com a frequência.

Estas formulações, para cálculo da condutividade e a permissividade em função da frequência, são expressas em função do valor da resistividade do solo em baixa frequência (ρ_0).

A análise da impedância de aterramento mostra que a consideração dos parâmetros eletromagnéticos do solo variáveis com a frequência resulta em diminuição do módulo desta impedância em relação aos parâmetros considerados constantes.

Quando a onda de tensão atinge uma estrutura aterrada, ou seja, seu aterramento, duas novas ondas são originadas correspondentes aos fenômenos de reflexão e refração de ondas. A intensidade dessas ondas depende da impedância de surto do condutor de aterramento e da impedância de aterramento.

4.1. DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO NO ESTADO ESTÁTICO

Como a impedância de aterramento não é um dado fácil de se obter analiticamente, para maior facilidade, a maioria dos estudos técnicos utilizam os conceitos de impedância de aterramento no estado estático, ou seja, utilizando o valor da resistência de aterramento. Desta forma, considera-se a impedância de surto do condutor de aterramento e a resistência de aterramento propriamente dita, como mostrado a seguir. O sistema de aterramento de um poste autoaterrado é constituído pela armadura de aço do poste até o solo, como condutor de aterramento, e o trecho da armadura e o concreto enterrado no solo, como eletrodo de aterramento.



Figura 7 – Impedância de aterramento – Poste Autoaterrado

A impedância de surto do poste autoaterrado (Z_{op}) no estado estático é obtida pela seguinte equação

$$Z_{op} = Z_{oc} + Z_{og}$$

A impedância própria de um condutor simples vertical é dada por:

$$Z_{oc} = 60 \ln \frac{H}{e \cdot r}$$

- H = comprimento do condutor de aterramento (armadura) (m)
- r = raio do condutor (raio do cilindro equivalente aos aços da armadura) (m)
- e = base do logaritmo neperiano

A resistência de aterramento de um poste de concreto autoaterrado, no estado estático, é obtida por:

$$R = \frac{\rho_c}{2\pi L} \ln \left(\frac{r_c}{r_{fe}} \right) + \frac{\rho_s}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{r_c} \right) - 1 \right]$$

- ρ_s = resistividade do solo
- ρ_c = resistividade do concreto
- L = profundidade da base
- r_c = raio do poste
- r_{fe} = raio do condutor (raio do cilindro equivalente representando todos os aços dentro do poste)

O gráfico da Figura 8 mostra a impedância de aterramento no estado estático considerando a impedância do condutor para terra para um poste autoaterrado e para aterramentos com 1 e 3 hastes, e demais características descritas abaixo.

- Poste autoaterrado 12m/600 daN, resistividade do concreto da base = 30 $\Omega \cdot m$; engastamento $e=2m$
- Cilindro equivalente dos aços da armadura do poste $\rightarrow d=0,351m$
- Comprimento da armadura até engastamento do poste no solo $h= 10m$
- Hastes verticais aço-cobre de 2,4m x 13mm

- Comprimento do condutor de aterramento até a haste terra $h=10m$
- Condutor do aterramento para hastes: cabo de aço galvanizado 6 AWG $\rightarrow d=0,04115mm$
- Condutor do aterramento para hastes: cabo de cobre 35 mm² $\rightarrow d=0,075mm$

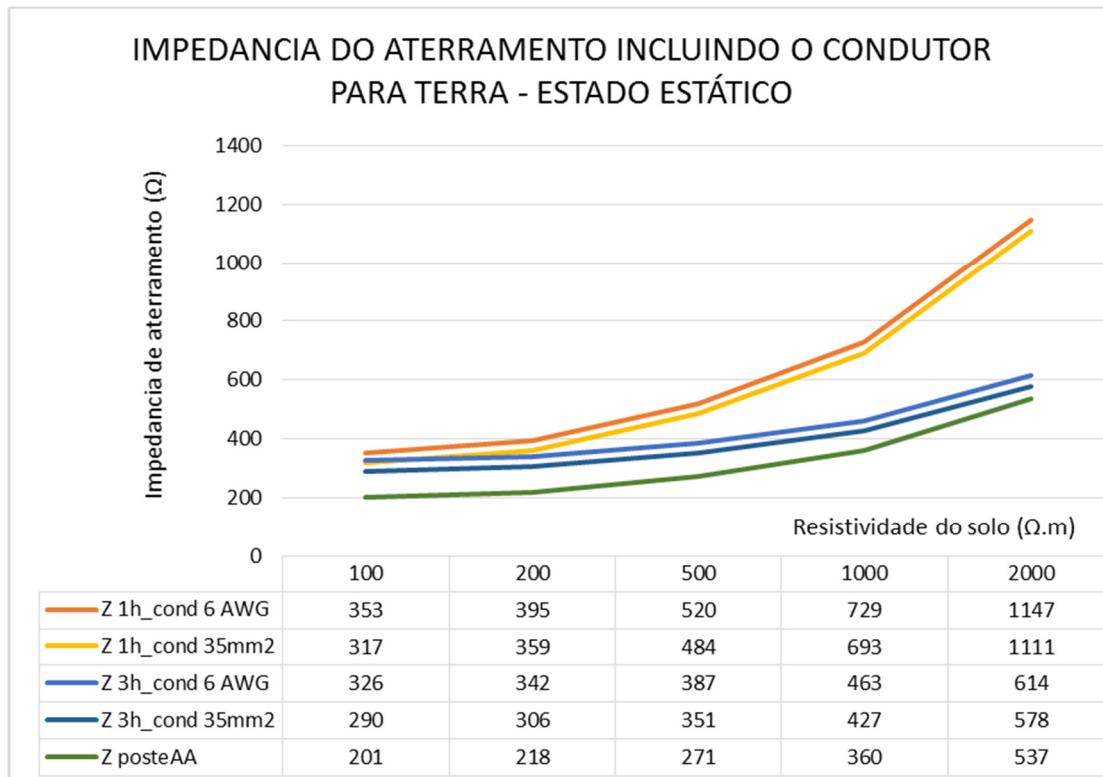


Figura 8 - Impedância de aterramento no estado estático considerando o condutor para terra

Considerando-se o condutor para terra verifica-se que o poste autoaterrado é melhor que um sistema de aterramento com 3 hastes.

Configuração de poste autoaterrado com hastes de terra em paralelo:



Figura 9 – Impedância de aterramento – Poste Autoaterrado mais haste paralela

A impedância de surto de um poste de concreto autoaterrado com hastes em paralelo é dada por:

$$Z_{op} = \frac{Z_{0c}Z_{0g} + Z_{0c}Z_g + Z_{0g}Z_g}{Z_g + Z_{0g}}$$

A figura 10 mostra o comportamento do poste autoaterrado com hastes em paralelo considerando-se que o solo apresenta um efeito puramente resistivo. A indutância mútua do aterramento foi calculada com a haste a 1m do poste.

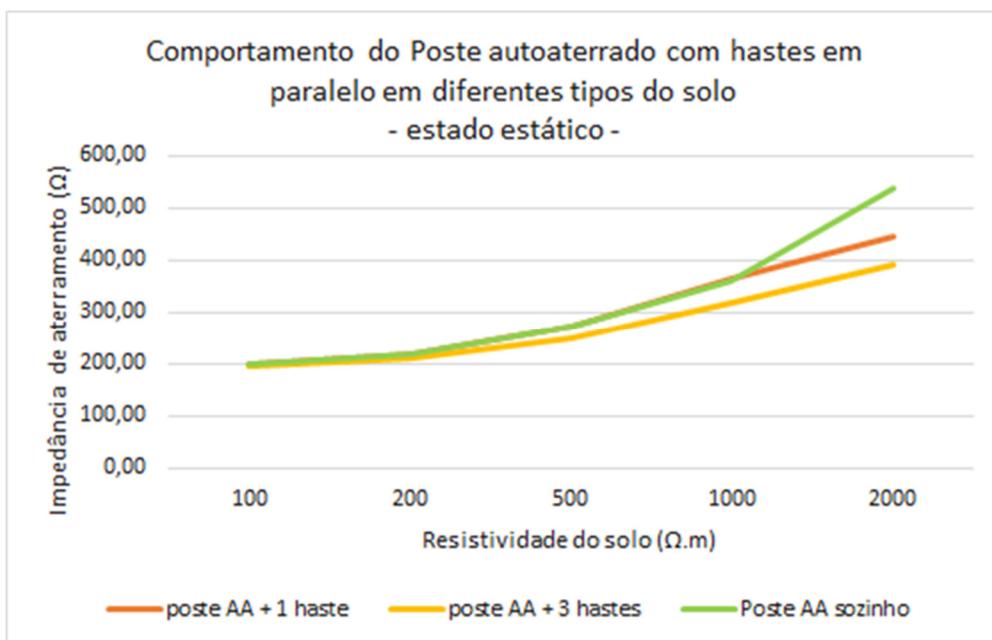


Figura 10 - Poste autoaterrado com hastes em paralelo

Em função da indutância mútua entre a(s) haste(s) terra em paralelo e o poste autoaterrado, o aterramento complementar deve estar situado a pelo menos 3m de distância do poste.

A influência do paralelismo do poste autoaterrado é menor em solicitações de alta frequência e estado dinâmico em função da dependência das características do solo com a corrente e a frequência da onda de surto apresentado no item 4.2.

4.2. IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO NO ESTADO DINÂMICO - DEPENDÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO COM A FREQUÊNCIA

De um modo geral, grande parte dos trabalhos referentes ao estudo de desempenho de sistemas de transmissão/distribuição de energia e aterramentos elétricos assume o solo como um meio predominantemente condutivo. Neste caso, as correntes de deslocamento, capacitivas, não são consideradas. Considera-se que o solo apresenta comportamento puramente resistivo, onde o valor da

característica dielétrica é desprezível comparada com a condutividade (σ_s). Deste modo, o solo é representado apenas pela condutividade elétrica, ou pela resistividade elétrica (ρ_s), definida como $\rho_s = 1/\sigma_s$. Se tratando de fenômenos lentos esta hipótese é razoável, porém, para fenômenos rápidos, não.

Quando se trata de fenômenos rápidos a corrente capacitiva pode alcançar a mesma amplitude da resistiva, principalmente em solos com alto valor de resistividade. A partir de dados experimentais, sabe-se que o quociente entre as correntes de condução e capacitiva no solo sofrem uma grande variação no domínio de frequências, o qual é representativo das correntes de descargas ($0,5 < \sigma/\omega_e < 10^3$). Portanto, na modelagem de aterramentos elétricos para frequência superiores, é pertinente e necessário admitir a dependência da condutividade elétrica (σ_s) e permissividade elétrica (ϵ_s) em relação à frequência. Já para permeabilidade eletromagnética, como mencionado anteriormente, essa dependência não é verificada, sendo a mesma daquela encontrada no vácuo. Assim, as características dielétricas do solo devem ser inseridas e, com isso, o fenômeno físico da condutividade deste passa a ser associado a um processo dissipativo, e não mais às características físico-químicas, como ocorre em baixas frequência.

Existe uma frequência limite abaixo da qual a resposta do aterramento não varia, não existindo, portanto, dependência da frequência. Acima desta frequência existe dependência, tendo a resposta características indutivas ($|Z| > R$) e/ou capacitivas ($|Z| < R$). Essa frequência foi denotada frequência característica, F_c , por Geri, tendo sido definida a partir do modelo TC (teoria de campo). Grcev também propôs uma fórmula empírica para F_c tendo sido desenvolvida a partir do modelo TCE (teoria de campo eletromagnético), sendo:

$$F_c = \rho \left(\frac{0,6}{l} \right)^{2,3}$$

onde,

F_c é a frequência característica (MHz), ρ é a resistividade do solo (Ωm) e l o comprimento do eletrodo (m)

A característica indutiva/capacitiva da resposta do aterramento é fortemente dependente da resistividade do solo, ficando evidente a importância do efeito capacitivo em solos de resistividade elevada.

A suposição de valores constantes para a resistividade do solo e permissividade elétrica leva a erros muito significativos na resposta de eletrodos de aterramento quando submetidos a descargas atmosféricas [9].

A impedância de surto de descargas atmosféricas de um poste de concreto armado depende da constante dielétrica relativa (ϵ_r) e da condutividade elétrica do concreto (σ). A impedância de surto também é dependente da frequência da onda de impulso gerada na rede elétrica.

A impedância de surto do poste em função do meio e da frequência pode ser definida pela equação:

$$Z_{poste} = \frac{60}{\sqrt{\frac{\epsilon_r - j\sigma}{\omega\epsilon_0}}} \ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 + R^2}}{R}\right)$$

- ϵ_0 : permissividade do espaço, 8.854×10^{-12} F/m,
- ϵ_r : permissividade do meio,
- σ : condutividade elétrica do meio, mS/m
- ω : frequência angular, rad/m = $2\pi f$
- h : altura do poste, metro
- R : espessura do concreto, metro

Segundo Hintamai [8] a constante dielétrica do concreto decresce com o aumento da frequência na faixa de 1 a 100 MHz, ou seja, a condutividade elétrica do concreto aumenta com a frequência (figura 11) e, consequentemente, a impedância do poste de concreto também diminui.

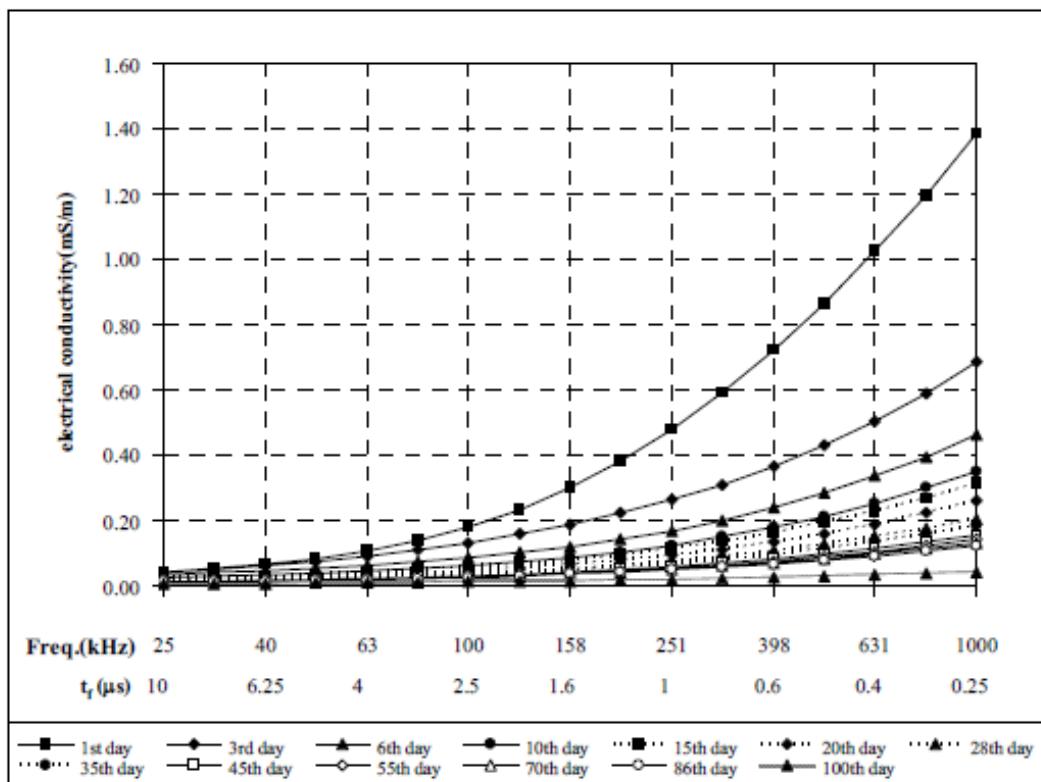


Figura 11 - Condutividade dielétrica do concreto em função da frequência

4.2.1. ELEVAÇÃO DE POTENCIAL EM RELAÇÃO AO TERRA REMOTO (GROUND POTENTIAL RISE - GPR)

A consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência resulta em valores reduzidos de GPR, quando se compara com o caso dos parâmetros elétricos do solo independentes da frequência, principalmente para solos com maiores valores de resistividade.

Isto significa que os potenciais gerados no solo serão menores para ondas de alta frequência em função da maior condutividade elétrica do solo.

4.3. IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO NO ESTADO DINÂMICO - EFEITO DA INTENSIDADE DA CORRENTE

De um modo geral, para uma ampla faixa de intensidades de corrente, o solo apresenta comportamento linear onde a relação entre a tensão desenvolvida e a corrente injetada no ponto de entrada do eletrodo é linear. Em outras palavras, a função de transferência que descreve o sistema independe da onda injetada. Porém, dependendo da intensidade da corrente imposta ao aterramento, da área de dissipação dos eletrodos e da resistividade do solo, o campo elétrico no solo circunvizinho aos eletrodos pode ultrapassar o valor crítico (campo elétrico crítico, E_{cr}) e romper a rigidez dielétrica do meio, ocorrendo o fenômeno de ionização. Para este caso, o solo possui comportamento não-linear. Mousa, a partir da análise do mecanismo da disruptão no solo e de diferentes fatores associados, propôs o valor de 300 kV/m como campo elétrico crítico. Já o Grupo de Trabalho do CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) recomenda o valor de 400 kV/m. Mas, usualmente utiliza-se o valor proposto por Mousa.

Quando os campos elétricos superam o valor de E_{cr} , se inicia uma disruptão na superfície do eletrodo, onde a densidade de corrente de dispersão é maior. Este processo se prolonga por todo o eletrodo e se mantém até que o campo elétrico seja menor que o crítico. Com o aumento aparente da condutividade na região do solo onde o fenômeno de ionização se processa ocorre um crescimento da corrente de dispersão nesta região. Tal efeito é classicamente modelado mediante uma ampliação do raio equivalente do eletrodo. Em termos práticos, a ocorrência do fenômeno de ionização se traduz na redução da impedância de aterramento.

Para hastes de aterramento, levando em conta a ionização do solo temos as seguintes equações:

$$R_o = \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{4h}{d_o}$$

$$d_o = \frac{12,53\rho I}{hE_o}$$

Onde,

- R_o = resistência de aterramento em Ω
- d_o = diâmetro efetivo da haste em m
- d = diâmetro equivalente da haste em m
- ρ = resistividade do solo em $\Omega \cdot m$
- I = corrente de surto em kA
- h = comprimento da haste em m
- E_o = gradiente de disruptão do solo = 300 kV/m

No caso do poste autoaterrado a dependência da corrente pode ser calculada pelas equações de R substituindo-se r_c por $r(i)$:

$$R = \frac{\rho_c}{2\pi L} \ln\left(\frac{r_c}{r_{fe}}\right) + \frac{\rho_s}{2\pi L} \left(\ln\left(\frac{4L}{r_c}\right) - 1 \right)$$

Onde,

- r_c = raio equivalente do concreto da base enterrada do poste
- r_{fe} = raio equivalente de todos os ferros da armadura do poste
- ρ_s = resistividade do solo em $\Omega \cdot m$
- L = comprimento da base enterrada do poste em m

$$r(i) = \frac{L}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2\rho I}{\pi L^2 E_c}} \right)$$

(equação de Liew-Darveniza)

Onde,

- I = corrente instantânea injetada
- E_c = gradiente de disruptão do solo = 300 kV/m

As figuras 12, 13 e 14 mostram o comportamento do aterramento realizado com hastes e com poste autoaterrado em função da intensidade da corrente de surto, utilizando-se o conceito de ionização do solo.

Impedância de aterramento dependente da corrente $I = 10 \text{ kA}$

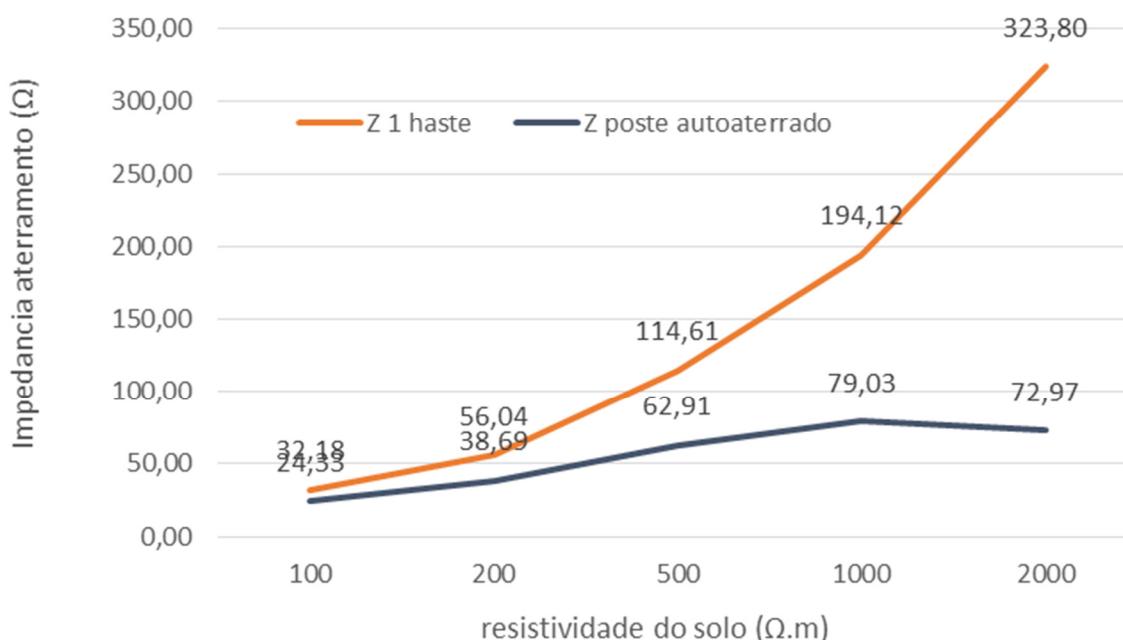


Figura 12 – Impedância de aterramento dependente da corrente sendo $I=10 \text{ kA}$

Impedância de aterramento dependente da corrente $I = 20 \text{ kA}$

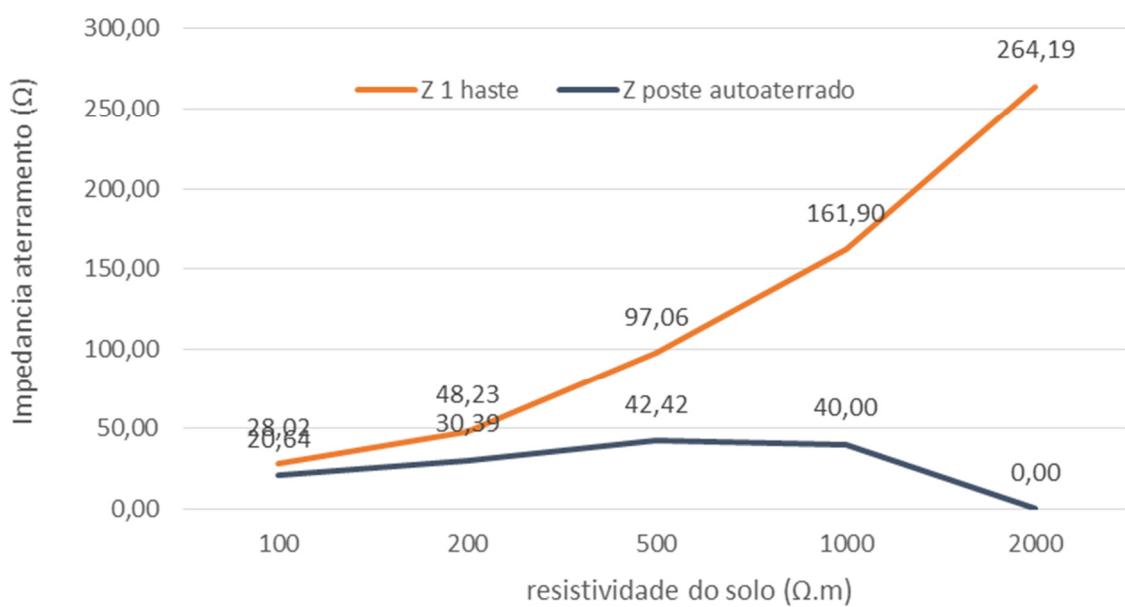


Figura 13 – Impedância de aterramento dependente da corrente para $I=20\text{kA}$

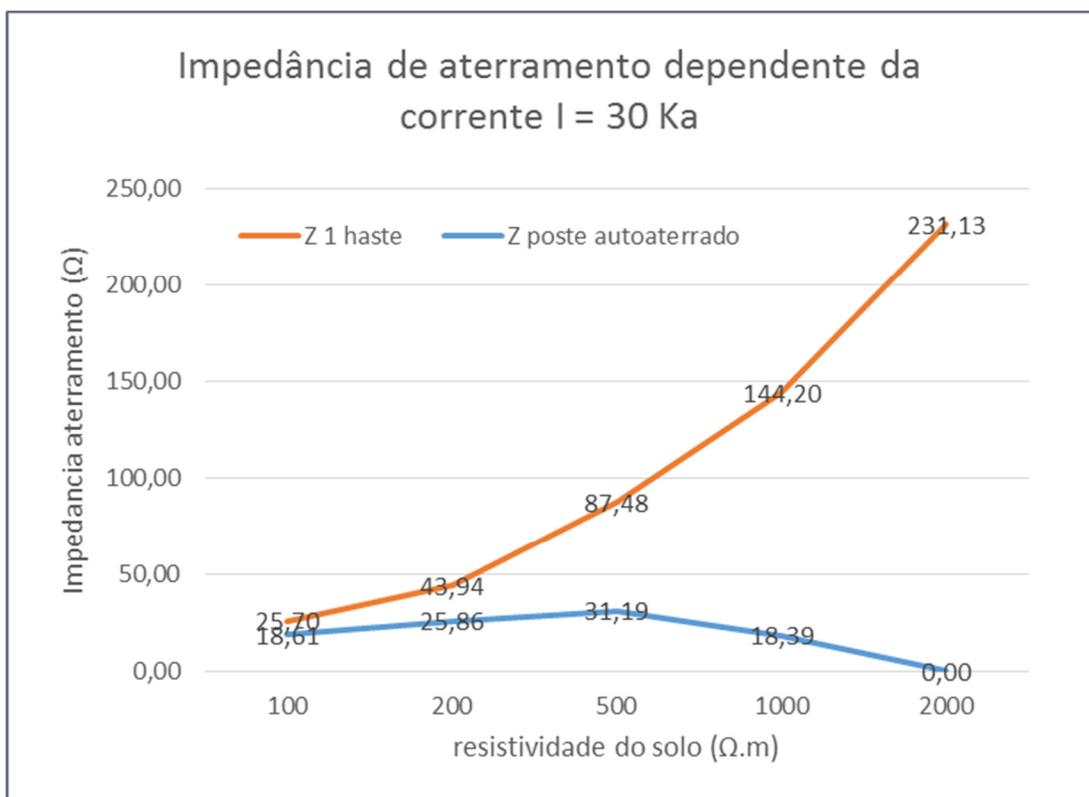


Figura 14 – Impedância de aterramento dependente da corrente paa I=30kA

Verifica-se pelas figuras 12, 13 e 14 que em altas correntes impulsivas um poste autoaterrado (11m) apresenta um comportamento melhor que uma haste de terra ($5/8 \times 2,40\text{m}$) principalmente em solos de alta resistividade.

Este comportamento é similar, quando se compara o poste autoaterrado a um sistema de várias hastes em paralelo, devido à indutância mútua que ocorre entre as hastes e hastes – poste concreto. Segundo Nguyen [7], devido aos efeitos mútuos entre os eletrodos adjacentes, os eletrodos mais externos são sempre mais eficazes na dissipação da corrente de impulso que os eletrodos intermediários. O índice de impulso dinâmico é melhor para um menor número de hastes. Maior número de hastes não só reduz a efetividade de cada haste na dissipação da corrente, mas também faz o comportamento transiente do sistema de aterramento piorar. Também, segundo Coelho [4], nos casos de correntes impulsivas, não se pode representar sistemas de aterramento de grandes dimensões simplesmente como uma resistência equivalente por alguns motivos:

- Interpretando-se o aterramento como uma linha de transmissão com perdas, percebe-se que as hastes afastadas do ponto de injeção da corrente praticamente não interferem no processo de transferência da corrente de surto para a terra. Este efeito torna-se maior quanto menor a resistividade do solo e maior a corrente de surto.
- Fenômeno da ionização do solo.

4.4. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

As práticas de proteção contra descargas atmosféricas requerem o conhecimento da resposta do aterramento a um evento de natureza impulsiva. Neste caso, a impedância de aterramento é o parâmetro que quantifica de maneira mais adequada essa resposta.

Contudo, a resposta de um aterramento a correntes impulsivas, como aquelas associadas às descargas atmosféricas, pode apresentar características bem distintas de uma resistência. Isto porque o espectro de frequências desse sinal é bastante amplo. Portanto, é preciso que a resposta seja definida para cada uma das componentes de frequência que compõe o sinal. Assim, o conceito de impedância de aterramento, em essência, é definido no domínio da frequência para excitações com variações senoidais.

Um procedimento que tem sido adotado para a medição da impedância de aterramento, é aquele em que se utiliza um sinal impulsivo produzido por um gerador de impulsos. Neste caso, o impulso gerado tem a forma de uma onda do tipo dupla-exponencial. Apesar dessa forma de onda não ser absolutamente idêntica ao da corrente de descarga atmosférica, ela apresenta um conteúdo espectral bastante amplo que é representativo para uma onda real. Uma vez aplicada a onda impulsiva, o osciloscópio faz a leitura tanto da corrente como da tensão no ponto onde o pulso é aplicado.

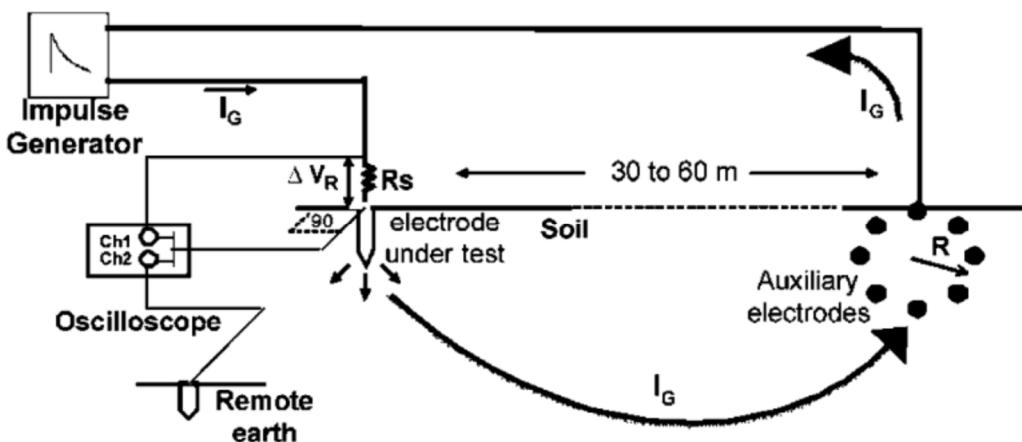


Figura 15 - Esquema de medição da impedância de aterramento com gerador de impulso

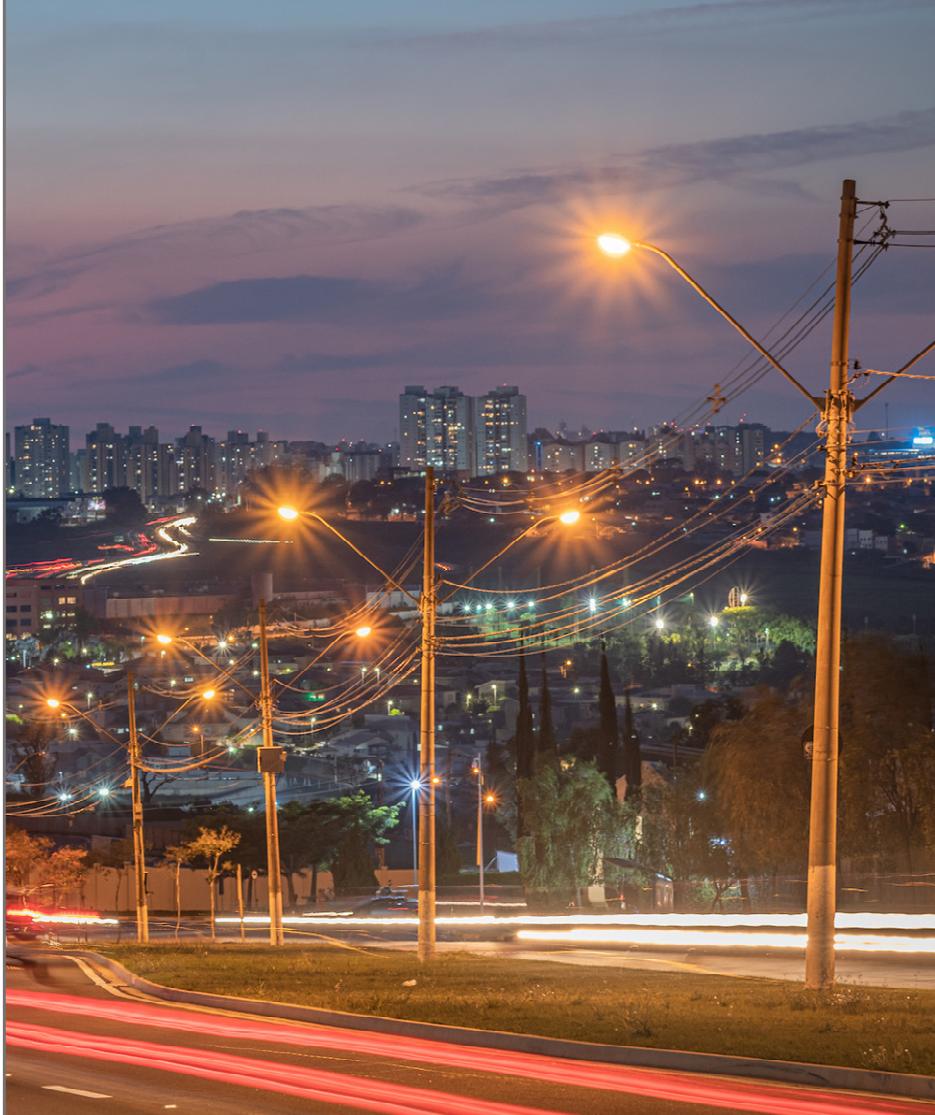
Contudo, para esta aplicação, talvez esse arranjo não expresse de forma completa o evento eletromagnético que se deseja avaliar. Isto porque a corrente da descarga desce por um condutor em direção ao solo, de forma que o acoplamento entre o condutor e o aterramento deve, também, ser computado.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Lima, A. B., Medição da Impedância e da Resistência de Aterramento Utilizando Ondas Impulsivas e Cabos de Pequeno Comprimento nos Circuitos de Tensão e de Corrente, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais –UFMG, 2015
- [2] Amaral, A. B., Comportamento Transitório de Aterramentos Elétricos: Teoria de Campo versus Teoria de Linhas de Transmissão, UFSJ – Universidade Federal de São Del Rei, 2017
- [3] Lima, A.B., Método para cálculo da impedância de malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, 2010
- [4] Coelho, V. L., Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas, Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de pós-graduação em Engenharia elétrica, 2010
- [5] Arend, E. R., Estudo de aterramento em baixas frequências usando a formulação eletrocinética associada ao método de elementos finitos, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2009
- [6] Sekioka, S., Lightning Surge Analysis Model of Reinforced Concrete Pole and Grounding Lead Conductor in Distribution Line - Transactions on electrical and electronic engineering, IEEJ Trans 2008
- [7] Neguyen P., Mutual coupling between driven rods in grounding system of transmission lines, Conference Proceedings of ISEIM, 2017
- [8] Hintamai S., Lightning Surge Impedance of Concrete Pole Effect to the Overvoltage on 115 kV Pole, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum University, Thailand, 2018
- [9] VISACRO, S., The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency dependent soil resistivity and permittivity, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, May 2011.

PARTE 4

**Dúvidas e Esclarecimentos
Referente aos conceitos e
Utilização de Postes
Autoaterrados.**



1. INTRODUÇÃO

Fenômenos eletromagnéticos, como as descargas atmosféricas, são destacadamente os maiores responsáveis pelas principais solicitações dos sistemas de aterramentos, assim como pela maior parte dos desligamentos não programados e avarias de equipamentos das redes de distribuição de energia elétrica.

Quando o sistema de aterramento não está adequado, a incidência de uma descarga atmosférica na linha, ou próximo a ela, pode gerar elevadas sobretensões e arcos elétricos, que podem destruir equipamentos e colocar em risco os seres humanos localizados nas proximidades, além de gerar uma falha no sistema elétrico.

Contribuem para o mal desempenho do aterramento:

- erros de instalação
- corrosão de cabos, hastes e conexões enterradas no solo
- furtos de cabos
- projetos inadequados
- condições do solo

Para resolver estes problemas a CPFL Energia, através de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), desenvolveu o “Poste Autoaterrado com base condutiva”, introduzindo a tecnologia de aterramento estrutural no setor elétrico. O Poste autoaterrado realiza sozinho a função de aterramento, utilizando a armadura de aço interna como condutor e eletrodo de aterramento, possuindo a performance otimizada decorrente da base feita de concreto condutivo com resistividade elétrica $\leq 30 \Omega \cdot m$ sem dependencia da umidade do solo.

2. DIFUSÃO NO SETOR ELÉTRICO

Finalizando o ciclo de P&D do poste autoaterrado a CPFL vem desenvolvendo ações de divulgação e transferência de tecnologia da nova técnica de aterramento da distribuição, para outras empresas distribuidoras do setor elétrico nacional, objetivando atingir benefícios para a Sociedade.

Dentre as ações realizadas destacam-se as apresentações técnicas e debates com profissionais das empresas distribuidoras do setor elétrico brasileiro.

3. DÚVIDAS E ESCLARECIMENTOS

A seguir são apresentadas as principais dúvidas e esclarecimentos sobre a tecnologia de aterramento com postes autoaterrados abordados nas reuniões de difusão do poste autoaterrado com as diversas empresas distribuidoras de energia elétrica a nível nacional.

3.1. QUAL É A METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DO POSTE AUTOATERRADO NA CPFL?

A CPFL implantou o poste autoaterrado nas redes primárias e secundárias, urbanas e rurais, com apenas duas alterações em relação ao padrão tradicional de aterramento: a utilização de dois postes autoaterrados adjacentes ao poste do transformador e utilização de postes autoaterrados sem hastes de terra em áreas urbanas.

No caso de redes existentes a instalação dos postes autoaterrados é feita em decorrência de obras de reforma ou de avarias em postes ou equipamentos. No caso de redes novas, todos os postes são autoaterrados.

A evolução na metodologia e implementação de novos conceitos de aterramento das linhas de distribuição com postes autoaterrados está diretamente ligada aos resultados de estudos específicos e mitigação do desempenho da rede ao longo do tempo. Dentre os estudos podemos citar: desempenho do aterramento sujeito a fenômenos transitórios, acoplamento eletromagnético linha x condutor neutro BT, utilização de cabo guarda ou cabo *underbuilt*, utilização de para-raios MT, utilização de para-raios BT, aterramento de redes compactas, impedância de condutores de aterramento, ionização do solo em correntes de alta frequência, dentre outros.

3.2. O POSTE AUTOATERRADO POSSUI CARACTERÍSTICAS DIFERENTES EM RELAÇÃO AO POSTE CONVENCIONAL?

Em geral, os postes autoaterrados, mantém as mesmas características físicas e mecânicas em relação ao poste de concreto convencional, tais como, capacidade de ruptura, altura, conicidade, peso do aço e configuração da armadura, previstas nas normas pertinentes da ABNT.

Em relação ao processo de fabricação o poste autoaterrado possui três diferenças em relação ao poste convencional que são: existência de terminais de conexão ao terra, fixados na armadura, utilização de concreto condutivo na base do poste e qualidade do concreto classe III em relação à agressividade ambiental.

3.3. QUAL É A IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE POSTES AUTOATERRADOS EM POSTES ADJACENTES AO POSTE DO TRANSFORMADOR?

Nas linhas primárias de distribuição, a existência de um condutor aterrado acima ou abaixo das fases, em regime transitório, provocará o fenômeno do acoplamento magnético entre eles. Na existência de terminações à terra próximas, o surto induzido no cabo aterrado sofre reflexão no solo nas posições destas terminações. Isto resulta em substancial modificação das ondas de tensão e corrente no cabo aterrado e, pelo efeito de acoplamento entre cabos, promove a redução da tensão induzida nas fases.

A existência de maior número de ligações intencionais para terra ao longo da linha de energia elétrica provoca o aumento do nível de proteção da linha contra surtos de tensão e melhora o desempenho da linha em regime transitório. Quanto maior o número de aterramentos (e menor a impedância de aterramento) menor é o número de desligamentos e o percentual de descargas diretas ou indiretas que causam desligamentos nas redes de distribuição, mesmo que seja desprezado o uso de para-raios nestes trechos.

A influência dos postes adjacentes nas tensões resultantes ao longo da linha é maior para menores distâncias entre vãos e a existência cabos de blindagem e de terminações à terra. Por causa dos vãos serem menores em linhas de distribuição, as reflexões dos postes adjacentes ao ponto de incidência, reduzirão grandemente a tensão no isolador, diminuindo o risco de *flashover* e queima de transformadores. Também existirá uma redução brusca da energia nos para-raios quando da existência de postes adjacentes aterrados, melhorando a funcionalidade dos para-raios.

Em geral, nas redes de distribuição urbanas existirão aterramentos com para-raios nos postos transformadores e final da linha, entretanto, dependendo da densidade demográfica da região a distância entre transformadores da linha primária pode variar de 40 a 400m.

Na linha primária urbana, o aterramento adjacente ao ponto de incidência de um surto devido a fenômenos transitórios de alta frequência, será quase sempre o aterramento de um transformador.

Basicamente, o condutor neutro fica posicionado cerca de 4m abaixo dos condutores fase da linha primária e, desta forma, estima-se uma redução de apenas 10% na tensão induzida entre as fases e o solo, portanto, o isolador, o para-raios e o transformador absorverão praticamente toda a energia do surto, transferindo ainda uma parte para a rede secundária. Apesar da maioria dos surtos impulsivos na rede urbana serem de descargas indiretas e possuírem frente de onda menores que as das descargas diretas, a maioria das causas de desligamentos da rede são devidas aos surtos de tensão induzida. O

grande número de edificações e árvores próximas, mais altas que a rede elétrica, aumenta a probabilidade de surtos de tensões induzidas na linha de distribuição urbana.

Da mesma forma, em áreas rurais, na existência de neutro continuo na linha primária, ele exercerá o papel de proteção da rede pelo acoplamento magnético com os condutores fase em regime transitório. Na inexistência do condutor neutro ou cabo de blindagem a proteção somente será feita pelos para-raios e aterramentos dos postes intermediários e do poste do transformador.

Em geral, as empresas adotam nas linhas primárias rurais aterramentos intermediários a cada 200 ou 300m, que é a distância crítica para ocorrência de disruptão nos isoladores dos postes adjacentes. Entretanto, muitas vezes ocorre a queima do para-raios e esta proteção deixa de ser válida e toda a energia do surto pode continuar no sistema, causando danos em equipamentos e o desligamento da linha.

3.4. COMO É O PADRÃO COM POSTES ADJACENTES? QUAL É O TAMANHO DO VÃO ENTRE POSTES ADJACENTES?

A CPFL adotou o critério de utilização de postes autoaterrados em dois postes adjacentes ao transformador, tanto na área rural como na área urbana. O vão entre postes não sofre alteração em relação ao padrão da rede.

No caso de transformadores em final da linha primária, utiliza-se o critério de instalação de postes autoaterrados em dois postes antecedentes ao poste do transformador.

Caso a linha de distribuição não possua condutor neutro instalado nos vãos dos postes autoaterrados adjacentes é instalado um cabo terra aéreo entre os postes, o mais próximo possível dos condutores fase, para existir o máximo acoplamento magnético entre eles e a redução da onda de surto pela reflexão nos pontos aterrados antes do equipamento.

Esta técnica acarreta maior proteção aos equipamentos da linha de distribuição e, consequentemente, aumenta da vida útil destes equipamentos e diminui o número de interrupções de energia da linha.

3.5. PARA UTILIZAÇÃO DO POSTE AUTOATERRADO O CONDUTOR NEUTRO MULTIATERRADO TEM QUE SER CONTÍNUO?

O condutor neutro multiaterrado, exerce uma influência na redução da cauda da onda de surto de alta frequência presente na linha de distribuição primária, devido ao acoplamento eletromagnético,

entretanto, esta influência será mais importante quanto mais próximo o condutor neutro estiver do condutor fase primário e quanto maior for o número de aterramentos do neutro no trecho considerado.

Quando o condutor neutro é segmentado ou inexistente ou não existe aterramento com para-raios no trecho, esta proteção deixa de existir e, a linha primária, devido ao fenômeno das ondas viajantes, fica sujeita a disruptões e curtos-circuitos que podem avariar isoladores, para-raios e transformadores e ocasionar o desligamento da linha.

A utilização de postes autoaterrados é uma excelente alternativa para aumentar o número de aterramentos ao longo do condutor neutro da rede nua, ou do cabo mensageiro da rede compacta ou de cabos de blindagem acima ou abaixo da linha, a um baixo custo, pois o poste autoaterrado pode ser utilizado sozinho sem necessidade de hastes terra ou de para-raios MT, aumentando o vetor do acoplamento magnético entre os condutores da linha.

3.6. SE FAZ MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO EM POSTES AUTOATERRADOS? AS MEDIÇÕES ATENDEM OS VALORES LIMITES ESTABELECIDOS? QUAIS SÃO OS VALORES PADRÃO DA CPFL?

Durante os testes do poste autoaterrado a CPFL fez medições de resistência de aterramento ao longo do tempo nos cerca de 850 postes autoaterrados do projeto piloto e do lote pioneiro.

Foram realizadas medições na instalação de todos os postes obtendo resultados em média 65% melhores que os medidos no mesmo ponto com aterramento com 1 ou 3 hastes. Também foram feitas medições por amostragem, após um ano da instalação, neste mesmo grupo, que mostraram que não ocorreu variações significativas nos resultados iniciais, tanto para solo seco como para solo úmido. Na grande maioria das medições da resistência de aterramento dos postes autoaterrados obteve-se valores ≤ 50 ohms.

O poste autoaterrado possui um terminal de conexão ao terra próximo da linha de engastamento para medições da resistência de aterramento. Para efetuar a medição de postes autoaterrados já interligados na rede de distribuição é necessário utilizar o método dos 3 pontos, descrito no manual do poste autoaterrado, com uso do terrômetro alicate. Para medições do poste autoaterrado ainda não interligado na rede pode ser utilizado o método de medição tradicional, com terrômetro de 3 terminais.

A medição do aterramento em baixa corrente e baixa frequência características dos aparelhos de medição tradicionais é excelente para avaliação do aterramento em regime permanente, entretanto, em regime transitório, como por exemplo nas solicitações de correntes de surto atmosférico, o aterramento deve ser avaliado pela impedância de aterramento, e neste caso, deve-se considerar

também a impedância do condutor de aterramento. Em geral, pode-se dizer que a impedância do aterramento decorrente de fenômenos transitórios é cerca de 10 vezes menor que a resistência de aterramento obtida em baixa frequência.

Atualmente a CPFL ainda utiliza o critério de medição da resistência de aterramento tradicional, entretanto, com base em estudos do comportamento do aterramento em solicitações transitórias, alterou os valores limites estipulados para o sistema de aterramento, passando a adotar um limite de 50 ohms.

3.7. COMO FUNCIONA O POSTE AUTOATERRADO COM A MUDANÇA DE POSICIONAMENTO DOS PÁRA-RAIOS MT PARA A TAMPA DO TRANSFORMADOR?

Quando alteramos o posicionamento do posicionamento do para-raios MT da cruzeta primária para a tampa do transformador, estamos diminuindo o comprimento do condutor de aterramento que é o cabo de descida até o solo e, consequentemente reduzindo o tempo de reflexão da onda de surto no aterramento e, portanto, aumentando a redução da sobretensão incidente no transformador instalado. Esta redução será tanto maior quanto maior for a capacidade do aterramento para dissipação das correntes no solo.

Como o poste autoaterrado possui um terminal de conexão para terra na altura do transformador este benefício será o mesmo que o de um aterramento tradicional com hastes, entretanto, no caso do poste autoaterrado o ganho é maior, pois a impedância do qualquer trecho da armadura é menor que a impedância do mesmo do mesmo trecho de um condutor de aterramento convencional.

3.8. QUAL É A DIFERENÇA DA IMPEDÂNCIA DE SURTO DO POSTE AUTOATERRADO EM RELAÇÃO À IMPEDÂNCIA DE SURTO DO ATERRAMENTO COM HASTES?

Usualmente, em redes de distribuição de energia elétrica, o aterramento é projetado e avaliado como uma simples resistência. Este tipo de configuração é uma ótima opção em baixa frequência, porém, quando se trata de alta frequência, caso das descargas atmosféricas, a indutância do aterramento começa a desempenhar um papel mais importante e, neste caso, o aterramento deve ser visto como uma impedância.

Quando falamos em impedância de aterramento ou impedância de surto, temos que levar em consideração a influencia do condutor de aterramento e do aterramento propriamente dito. No caso do

poste autoaterrado temos que considerar a influência da armadura até o solo e a influência da armadura e do concreto condutivo na parte enterrada do poste.

Empiricamente, a impedância de um condutor de aterramento é dada pela relação logarítmica entre o comprimento e o raio deste condutor. Como os ferros longitudinais da armadura do poste autoaterrado apresentam um diâmetro equivalente muito maior que o diâmetro do condutor de descida de um aterramento com hastes, a impedância da armadura do poste autoaterrado será sempre menor e, portanto, melhor que a de um condutor de descida de um aterramento tradicional com hastes.

A impedância de surto do aterramento é dada pela relação entre a tensão e a corrente no domínio da frequência. A impedância de surto diminui com o aumento da frequência devido ao aumento da permissividade elétrica do solo. Também, altas correntes impulsivas (10 kA e acima) provocam a ionização do solo e a impedância diminui pelo aumento das correntes capacitivas no solo, independente da resistividade elétrica aparente do solo.

Experimentos internacionais mostram que o aterramento com hastes paralelas, independente da dimensão, quando solicitados por correntes impulsivas, somente as hastes extremas vão funcionar adequadamente para conduzir as correntes no solo, devido à impedância mútua entre elas. Em função disso, o poste autoaterrado sozinho, aliado às características do concreto condutivo e maior área de dissipação da base enterrada no solo, é melhor eletrodo para dissipação das correntes impulsivas no solo que um sistema tradicional de hastes em paralelo.

3.9. COMO SE REALIZA O LICENCIAMENTO DE FABRICANTES DE POSTES AUTOATERRADOS PARA OUTRAS DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA?

Os fabricantes de postes autoaterrados são licenciados por interessa próprio ou atendendo o interesse das empresas distribuidoras locais.

A metodologia de licenciamento de um fabricante de postes de concreto prevê as seguintes atividades:

- Transferência de tecnologia de fabricação e ensaios pela CPFL ao fabricante de postes e visita técnica à fábrica, se necessário;
- Confecção de protótipos para ensaios, pelo fabricante;
- Realização de ensaios mecânicos nos protótipos pelo próprio fabricante, conforme NBR 8451 e especificação técnica CPFL, com acompanhamento de consultor técnico indicado pela CPFL, se necessário;

- Realização de ensaios em amostras de concreto convencional e condutivo conforme especificação técnica CPFL;
- Elaboração dos relatórios de ensaios pelo fabricante;
- Elaboração do relatório de qualificação da unidade fabril pela CPFL;

O contrato de licenciamento para fabricação de postes autoaterrados é feito pela CPFL após aprovação da inspeção e ensaios de protótipos em fábrica ou gerenciamento à distância.

A Matos Ferreira Engenharia e Serviços Ltda é a empresa consultora, parceira da CPFL no desenvolvimento do P&D Poste Autoaterrado e que mantém compromisso para fornecer apoio técnico, se necessário, para os novos fabricantes em fase de licenciamento.

3.10. O POSTE AUTOATERRADO É UM PRODUTO PATENTEADO? EXISTE COBRANÇA DE ROYALTIES?

A CPFL possui direitos de patente do “Poste Autoaterrado com base condutiva” e do “Poste com conectores embutidos”. O percentual total de royalties destas duas patentes é devido apenas pelo fabricante de postes e está especificado no contrato de licenciamento do fabricante.

Não existe cobrança de royalties para outras empresas Distribuidoras, a nível nacional, relativo uso de postes autoaterrados adquiridos de fabricantes licenciados.

3.11. QUAL É O PERCENTUAL DE ACRÉSCIMO NO CUSTO DO POSTE AUTOATERRADO EM RELAÇÃO AO POSTE CONVENCIONAL? QUAL É O CUSTO-BENEFÍCIO?

O poste autoaterrado tem um custo de fabricação um pouco superior comparado com o poste convencional sem sistema de aterramento.

Este acréscimo no custo é devido ao custo de terminais de conexão que são fixados na armadura do poste, o custo do processo produtivo do poste com concreto condutivo (mão de obra e material) e royalties. Este custo pode variar entre fabricantes, mas podemos estimar um percentual de acréscimo de cerca de 15% para os fabricantes localizados no sul/sudeste do Brasil, e, que já possuem tecnologia e infraestrutura para a fabricação de postes autoaterrados.

As características do poste autoaterrado não implicam em qualquer alteração na questão de cura, liberação para transporte ou logística de transporte, sendo as mesmas do poste de concreto convencional.

Por outro lado, analisando o benefício, de mão de obra e material, na instalação do poste autoaterrado comparado com o poste convencional com aterramento com 1 ou 3 hastes, uma vez que

não será necessário instalar o condutor de aterramento e nem as hastes terra no solo, ocorre uma ligeira vantagem do custo do poste autoaterrado em relação ao custo do poste convencional com hastes.

A taxa de retorno do investimento em postes autoaterrados torna-se extremamente atrativa se considerarmos a sua contribuição para a melhoria de desempenho da linha de distribuição, e a contabilização de benefícios importantes como, diminuição de furtos de cabos terra, diminuição de despesas de manutenção corretiva, diminuição de queima de equipamentos, diminuição do resarcimento de danos a terceiros e a diminuição das interrupções da linha de distribuição.

3.12. EXISTE DIFERENÇA NA QUESTÃO REGULATÓRIA COM O USO DO POSTE AUTOATERRADO?

Existe uma diferença significativa caso o poste autoaterrado seja utilizado sozinho, sem hastes terra em paralelo: como o sistema de aterramento já vem incorporado no poste autoaterrado, os itens de aterramento (componentes menores), passam a pertencer ao “conjunto poste” que é classificado como investimento e, portanto, os “componentes” do aterramento passam a ser remunerados como ativos, o que também contribui para uma vantagem competitiva do poste autoaterrado.

3.13. COMO É O PROCESSO FABRIL COM CONCRETO CONDUTIVO? COMO É FEITA A SEPARAÇÃO DO CONCRETO CONDUTIVO COM O CONCRETO CONVENCIONAL?

O poste autoaterrado foi desenvolvido de forma a não alterar significativamente o processo de fabricação do poste.

Desta forma apenas duas características foram impactadas, que foram: a instalação de terminais de conexão na armadura do poste antes do enchimento e a utilização do concreto condutivo na base do poste.

Como o concreto condutivo tem uma densidade menor que o concreto convencional e existe um procedimento diferente no enchimento da fôrma e necessita de duas equipes uma para o concreto condutivo e outra para o concreto convencional.

O enchimento da fôrma começa com a colocação de cerca de 70% do volume do concreto condutivo na base do poste e, em seguida, com a colocação do concreto convencional no restante da forma. Completa-se os 100% do concreto condutivo junto com o enchimento completo do concreto convencional, controlando-se a intensidade de vibração para que não ocorra a expulsão do concreto condutivo para fora da fôrma.

No ponto de separação entre os dois tipos de concreto é prevista a utilização de elementos separadores, tais como, tela ou espaçadores, para bloqueio parcial do escoamento do concreto

condutivo durante o enchimento da fôrma. Não é permitida a separação física entre os concretos, mesmo com uso de concreto autoadensável.

3.21. EXISTE MUDANÇA NAS CARACTERÍSTICAS DA ARMADURA DO POSTE AUTOATERRADO?

A armadura do poste autoaterrado não sofreu nenhuma modificação de projeto ou confecção, podendo ser soldada ou amarrada e, de preferência, possuir os aços longitudinais sem emendas. Agrega-se na armadura somente os terminais de aterramento que são fixados mecanicamente, após a montagem da armadura e a sua colocação na fôrma do poste.

3.14. A CONDUÇÃO DE CORRENTES PARA TERRA NÃO É UM AGRAVANTE PARA A CORROSÃO DO AÇO DA ARMADURA DOS POSTES AUTOATERRADOS?

A passagem de corrente é um agravante quando existe a presença de eletrólito entre dois metais de potenciais diferentes pois, vai aumentar a pilha elétrica entre eles. Isto não ocorre na armadura do poste autoaterrado principalmente, porque no concreto seco não existe a presença de eletrólito e no concreto úmido, caso da base enterrada no solo, existe o eletrólito mas não existe a presença de terminais ou de conexões.

Entretanto, a principal causa de corrosão da armadura é a presença de oxigênio que permeia o concreto. O estudo de corrosão realizado no processo de desenvolvimento do poste autoaterrado concluiu pela elevação da classificação, tanto do concreto convencional do corpo do poste e como do concreto condutivo da base do poste, com referência à agressividade ambiental, de classe II para classe III, melhorando as características de permeabilidade do concreto de modo a evitar a penetração de contaminantes externos.

Foram realizados ensaios de laboratório em amostras de concreto convencional e de concreto condutivo para avaliar a qualidade do concreto, tais como, carbonatação acelerada e ataque de cloretos e sulfatos obtendo resultados altamente satisfatórios. Além disso, o concreto condutivo funciona como proteção catódica do aço da armadura.

3.15. AS TENSÕES GERADAS NO SOLO PELO POSTE AUTOATERRADO ATENDEM AS NORMAS DE SEGURANÇA CONTRA CHOQUE?

Em linhas de distribuição, tanto na ocorrência de surtos de baixa frequência como de surtos de alta frequência, a reflexão do surto de tensão no aterramento apresenta maiores gradientes de tensão,

notadamente em solos de alta resistividade, devido que a corrente dissipada no solo será baixa. Quanto maior a corrente dissipada pelo aterramento, menores serão os gradientes de tensão gerados no solo.

Experimentos internacionais mostram que o poste autoaterrado é melhor que um aterramento com hastes, principalmente, em solos de alta resistividade. Analiticamente, no estado estático e um solo de 500 ohms.m, o poste autoaterrado possui uma impedância de surto da ordem de 270 ohms melhor que 380 ohms da impedância de um sistema de aterramento convencional com 3 hastes terra alinhadas. Empiricamente este comportamento também é observado, acentuando-se em solos de alta resistividade.

Estudos recentes mostram que em regime transitório a dissipação de corrente no solo em um sistema de $n > 1$ hastes alinhadas, somente a haste conectada ao condutor de aterramento é a mais efetiva, sendo as demais prejudicadas pela indutância mútua entre elas. Isto significa que em função da melhor impedância de surto, a corrente dissipada para o solo por um poste autoaterrado sozinho será maior que a de um sistema com hastes em paralelo independentemente do seu tamanho.

Como consequência temos que, em regime transitório, as tensões geradas no solo pelo poste autoaterrado sempre serão menores que as de um sistema tradicional com hastes. Além disso, em altas correntes impulsivas existirá a ionização do solo, formando um sistema equipotencial em uma área de aproximadamente 3 a 4m de diâmetro em torno do poste, que protege contra potenciais de toque e passo.

3.16. NA INSTALAÇÃO DOS POSTES AUTOATERRADOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO FORAM SOMENTE SUBSTITUÍDOS OS POSTES OU HOUVERAM OUTRAS MELHORIAS NA REDE?

Na instalação dos postes autoaterrados na rede, foi feita a inspeção dos para-raios MT dos transformadores, sendo substituído o conjunto no caso de constatação de queima ou avarias e, também, providenciada a interligação dos postes adjacentes ao transformador por cabo terra aéreo quando da inexistência de condutor neutro entre eles. Todos os postes autoaterrados foram instalados sem hastes de terra.

3.17. FOI FEITA A ANÁLISE DE DESEMPENHO DO POSTE AUTOATERRADO EM ORLA MARÍTIMA?

Sim. A CPFL fez diversos projetos piloto em áreas urbanas e periféricas de cidades em orla marítima de sua área de concessão tais como, Santos, Praia Grande e Guarujá, com resultados altamente satisfatórios.



ANEEL

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

Programa de Pesquisa e
Desenvolvimento