



10 a 13 de novembro de 2019

**Grupo de Estudo de Sistemas de Distribuição-GDI**

**Poste Autoaterrado para redes de distribuição de energia**

**RAFAEL GOMES BENTO(1); ANTONIO CARLOS DE ALMEIDA CANNABRAVA(1); BENEDITO EDMUNDO MOURA FERREIRA(2);**

**CPFL Energia(1);MF Engenharia(2);**

**RESUMO**

Diante de um surto de tensão na rede elétrica o aterramento exerce papel fundamental na condução da corrente elétrica para o solo e, conseqüentemente, na redução da sobretensão. Nas sobretensões de impulso atmosférico o poste de concreto armado deve ser tratado como um tipo de condutor e eletrodo de aterramento, sendo em muitos casos melhor que o aterramento convencional com hastes. Este trabalho apresenta uma tecnologia inovadora de aterramento de linhas de distribuição de energia elétrica focada em postes de concreto com aterramento estrutural, que garante vantagens no desempenho frente aos surtos de tensão de origem atmosférica.

**PALAVRAS-CHAVE**

Rede de distribuição, poste autoaterrado, aterramento, surtos de tensão

**1.0 - INTRODUÇÃO**

As descargas atmosféricas estão entre as principais causas de distúrbios na rede elétrica, provocando sobretensões e ocasionando uma parcela significativa das interrupções e danos, muitas vezes permanentes. A principal fonte de insatisfação de consumidores, independente de classe de consumo, é a interrupção no fornecimento de energia.

Se uma rede for atingida por uma descarga atmosférica diretamente em seus condutores e a uma grande distância de um para-raios ou subestação, o surto originado fluirá ao longo da linha em ambos os sentidos na velocidade da luz, podendo provocar arcos, trincas em isoladores, queima de transformadores e até mesmo destruir postes e cruzetas, como ilustrado na Figura 1, até que toda a sua energia seja gasta.

(\*)Rua Jorge de Figueiredo Correa, nº1.632 – Jardim Professora Tarcília – CEP 13.087-397, Campinas/SP – Brasil



Figura 1 - Dano causado em cruzeta por surto impulsivo de tensão

Os desligamentos 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, as descargas indiretas são as mais frequentes nas falhas que ocorrem nas linhas de distribuição (90%).

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, dependendo do nível de isolamento desta rede e do posicionamento do obstáculo em relação à mesma, o número de interrupções por tensões induzidas pode aumentar significativamente.

Diante de um surto de tensão na rede elétrica, o aterramento exerce papel fundamental na condução da corrente elétrica para o solo e conseqüentemente na redução da sobretensão. A resistência de aterramento é um dos mais importantes fatores para a análise de sobretensões em linhas de distribuição de energia elétrica.

Com a deterioração do sistema de aterramento, a segurança e proteção das linhas de distribuição de energia elétrica são reduzidas. O mau funcionamento do aterramento pode acarretar na queima de transformadores de rede de distribuição da concessionária de energia e também de equipamentos de consumidores, além de ocasionar desligamentos transitórios ou permanentes de energia e colocar pessoas e animais ao risco de choques elétricos. Além disso erros na instalação de hastes de terra, roubo de condutores de aterramento e locais de alta resistividade de solo comprometem a confiabilidade do aterramento.

Visando melhorar o desempenho das linhas de distribuição frente aos surtos de tensão de origem atmosférica, a CPFL Energia realizou uma série de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) tendo como objetivos garantir a segurança e confiabilidade do aterramento, melhorar a produtividade das equipes de instalação e diminuir a queima de transformadores, através da introdução de melhorias construtivas e nova técnica de utilização do poste de concreto armado. Desta forma, foi concebido um modelo de poste utilizando o conceito de aterramento estrutural, com concreto de baixa resistividade na sua base, denominado "Poste Autoaterrado de Base Condutiva".

Medições realizadas em laboratório e em campo qualificaram o produto e evidenciaram melhor desempenho dos postes autoaterrados em relação ao aterramento convencional com hastes, além da maior facilidade e produtividade na montagem da instalação. A observação de dados de ocorrências na rede, antes e após a instalação de postes autoaterrados, mostrou redução no índice de queimas de transformadores de distribuição.

O custo benefício proporcionado pelo projeto definido na fase de lote pioneiro e a certificação de qualidade do produto propiciou a implantação do poste autoaterrado em todas as distribuidoras do Grupo CPFL Energia. A aplicação do produto permitirá o aprimoramento da infraestrutura, geração de novos conhecimentos e melhoria da confiabilidade e segurança das instalações.

Dentro da Cadeia de Inovação do Programa de P&D do Setor Elétrico, esta nova tecnologia está em fase de disseminação às demais distribuidoras e fornecedores do setor, através de atividades de transferência de tecnologia e assistência técnica, ampliando os benefícios a todo o setor e à sociedade.

## 2.0 - SURTOS IMPULSIVOS DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A tensão de surto gerada por uma descarga atmosférica que cai diretamente na linha de distribuição pode ser facilmente obtida a partir da intensidade de corrente da descarga e da impedância de surto do sistema. Como a corrente se divide em duas no ponto de impacto, a tensão é dada por:

$$V = Z \frac{I}{2} \quad (1)$$

$I$  = Intensidade da corrente da descarga direta, em Ampères (A);  
 $Z$  = Impedância de surto do sistema, em Ohm ( $\Omega$ ).

Por exemplo, no caso de uma descarga da ordem de 12 kA atingindo diretamente uma rede de distribuição e, assumindo uma impedância de surto da ordem de  $400\Omega$  para esta rede, teríamos uma sobretensão da ordem de 2.400 kV, com uma frente de onda de alguns microssegundos, valores estes muito superiores à suportabilidade do sistema de distribuição.

A tensão induzida na linha em função de uma descarga atmosférica próxima pode ser estimada por [15]:

$$V = 38,8 \frac{I_0 h_a}{y} \quad (2)$$

$I_0$  = é a corrente de pico da descarga [kA],  
 $h_a$  = é a altura média da linha sobre o solo [m],  
 $y$  = é a distância mais próxima entre a linha o ponto de descarga [m];  
 $V$  = é máxima tensão induzida no condutor da linha [kV]

Ocorrerá disrupção e provavelmente desligamento do sistema sempre que:

$$V_{max} = 1,5NBI \quad (3)$$

$V_{max}$  é a tensão máxima induzida na linha, em kV, calculada pela equação (2);  
 $NBI$  - Nível Básico de Isolamento de impulso, em kV

Os dados estatísticos (CIGRÈ) [16] para a primeira descarga de retorno são:

- As descargas com polaridade negativa possuem a mediana das intensidades de correntes de 31,1 kA com desvio padrão de 0,48; o tempo de frente de 3,83  $\mu$ s com desvio padrão de 0,55 e o tempo de cauda possuindo 77,5  $\mu$ s com desvio padrão de 0,58.
- As descargas positivas, possuem a mediana do pico de corrente da ordem de 35 kA com desvio padrão de 1,21; um tempo de frente da ordem 22  $\mu$ s com desvio padrão de 1,23 e um tempo de cauda de 230  $\mu$ s com desvio padrão de 1,33.

90% das descargas tem polaridade negativa e 10% polaridade positiva.

### 3.0 - ATERRAMENTOS DA DISTRIBUIÇÃO

Para fenômenos transitórios, quanto menor a impedância de aterramento melhor a dissipação das correntes no solo e quanto melhor a dissipação das correntes no solo, menor é o gradiente de tensão gerado na superfície e, portanto, maior a segurança de pessoas e animais.

Em geral, o sistema de aterramento adotado nas redes aéreas de distribuição de energia elétrica, no Brasil, é constituído por condutores de cobre ou aço galvanizado e de uma ou mais hastes verticais cravadas no solo, dispostas de forma alinhada ou em anel. Podem ser utilizadas hastes cilíndricas de cobre ou aço revestidas de cobre, bem como hastes cantoneiras de aço zincado a fogo.

Para surtos de baixa frequência o aterramento pode ser representado por uma simples resistência equivalente.

A Equação 4 mostra o aterramento de uma

$$R_h = \frac{\rho_s}{2\pi L} \ln \left( \frac{4L}{d} \right) \quad (4)$$

modelo analítico da resistência de haste.

$\rho_s$  é a resistividade elétrica do solo ( $\Omega.m$ )  
 $d$  = diâmetro da haste (m)  
 $L$  = comprimento da haste (m)

Para representação do solo em correntes de baixa frequência e estado estático toma-se em consideração apenas a resistividade do solo ( $\rho_s$ ). Entretanto, para correntes de altas frequências e estado dinâmico, além da resistividade, deve ser levado em consideração a permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e a permeabilidade magnética do solo ( $\mu$ ). Também, em caso de fenômenos muito rápidos como uma descarga atmosférica, são dependentes da frequência a condutividade ( $\sigma$ ) e a permissividade relativa do solo ( $\epsilon_r$ ). Com o aumento da frequência a permissividade relativa do solo também aumenta e a impedância diminui.

Para surtos de alta frequência o aterramento deve ser representado como uma impedância. O modelo simples da Figura 2 pode ser aplicado para altas correntes impulsivas.

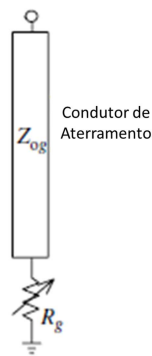


Figura 2 – Modelo simplificado de um sistema de aterramento

A impedância própria ( $Z_{og}$ ) do condutor vertical de aterramento sozinho é dada pela Equação 5:

$$Z_{og} = 60 \ln \frac{h}{e \cdot r} \quad (5)$$

$h$  = comprimento do condutor (m)

$r$  = raio do condutor (m)

$e$  = base do logaritmo natural

Na análise de surtos de tensão devido a sobretensões de descargas atmosféricas é necessário considerar a impedância de surto do condutor somada à resistência de aterramento.

É conhecido que as correntes impulsivas provocam ionização dos materiais. Isso significa que a corrente, ao circular pelas diversas partes do sistema de aterramento, produz um campo elétrico intenso que promove o rompimento dos dielétricos dos materiais que encontra em seu caminho. Isto significa que a resistência de terra quando submetida a correntes impulsivas é consideravelmente menor que a medida para a frequência industrial.

A resistência de aterramento é fortemente dependente do valor de crista da corrente aplicada e torna-se quase a mesma para altos valores de corrente impulsiva acima de 10 kA, apesar da diferença da resistividade do solo [1].

A resistência de aterramento dependente da corrente pode ser determinada considerando a dimensão e resistividade da zona de ionização do solo, substituindo a dimensão equivalente do eletrodo de aterramento na forma da resistência de aterramento estática.

O raio equivalente é obtido da zona de ionização do solo, no qual o esforço do campo elétrico excede o valor crítico  $E_c$ . O modelo de Liew-Darveniza [1] consiste de um cilindro e um hemisfério dado pelo raio equivalente igual a:

$$r(i) = \frac{L}{2}$$

Onde,

$i$  = corrente instantânea injetada (A);

$L$  = comprimento do eletrodo (m);  $e$

$E_c = 400$  kV/m (CIGRÉ)

A resistência de aterramento dependente da corrente é obtida substituindo o raio equivalente (6) na equação (4) ou (7). Para correntes de surto iguais ou maiores a 10 kA e solos de alta resistividade, verifica-se uma redução na resistência de aterramento de até 5 vezes.

### 3.1 Influência dos postes de concreto no aterramento de linhas de distribuição

Postes de concreto armado são usados em linhas de distribuição para sustentar condutores e equipamentos elétricos. O concreto seco possui alta resistividade e as características elétricas do poste de concreto nas linhas de distribuição em geral são negligenciadas.

Até meados da década de 90 as características elétricas dos postes de concreto armado das redes de energia elétrica ainda não eram suficientemente conhecidas para a análise de surtos de descargas atmosféricas.

A partir de 1994, resultados experimentais das características elétricas de postes de concreto armado foram obtidos, principalmente no Japão e na Tailândia, que evidenciaram a importância das características de surto do

poste de concreto armado na análise de sobretensões de descargas atmosféricas nas linhas de distribuição e subtransmissão. Estes estudos baseados na teoria do campo eletromagnético mostraram que, decorrente de um surto de descarga atmosférica na linha, pode ocorrer uma disrupção entre o condutor de aterramento e a armadura do poste de concreto. A corrente de surto impulsiva da linha de energia, então, é conduzida para terra através da ferragem da armadura interna do poste de concreto [1] [2] [3] [4] [5] [6] e [7].

O condutor de aterramento de para-raios e de equipamentos podem ser isolados do poste ou estarem em contato com o poste. Mesmo isolados do poste de concreto pode ocorrer uma disrupção provocando um curto-circuito entre o condutor de aterramento através do poste de concreto, decorrente da sobretensão de descarga atmosférica.

Este fenômeno ocorre em surtos de descargas diretas sobre a linha e também podem ocorrer em surtos induzidos de descargas que ocorrem próximas da linha. A tensão disruptiva depende da configuração do sistema de aterramento e da tensão de impulso suportada pelo condutor de aterramento. Um exemplo de tensão disruptiva é 20 kV [1].

O campo eletromagnético gerado pela corrente de surto no condutor de aterramento localizado próximo do poste de concreto, é afetado pela estrutura. Como resultado, a impedância de surto do condutor de aterramento diminui pela existência do poste de concreto. A resistência de aterramento do poste de concreto é, em muitos casos, menor que a do eletrodo de aterramento do para-raios e/ou de aterramento de equipamentos.

A partir destas constatações, em diversos países, as análises de *flashover* em linhas de distribuição passaram a incluir os postes de concreto armado na modelagem de aterramento.

A armadura interna do poste pode ser considerada como um condutor singelo quando a corrente de surto flui pelo poste. A parte acima do engastamento do poste e a parte enterrada do poste são representadas pela impedância de surto e a resistência de aterramento.

A Equação 7 mostra o modelo analítico da resistência de aterramento da base de um poste de concreto.

$$R_p = \frac{\rho_c}{2\pi L} \ln\left(\frac{r_c}{r_{fe}}\right) + \frac{\rho_s}{2\pi L} \ln\left(\frac{2L}{r_c}\right) \quad (7)$$

Onde,

$R_p$  é a resistência de aterramento ( $\Omega$ );

$r_c$  e  $r_{fe}$  são o raio equivalente da seção de concreto e condutor (m);

$\rho_c$  e  $\rho_s$  são a resistividade elétrica do concreto e do solo ( $\Omega.m$ );

$L$  é a profundidade da base do poste (m)

A Figura 3 ilustra um modelo simplificado de análise surto de descarga atmosférica consistindo de um poste de concreto armado e um condutor e aterramento, onde  $Z_o$  é a impedância de surto,  $R$  é a resistência de aterramento e  $c, g, m$  são os sufixos para poste de concreto, condutor de aterramento e componente mútuo [1].

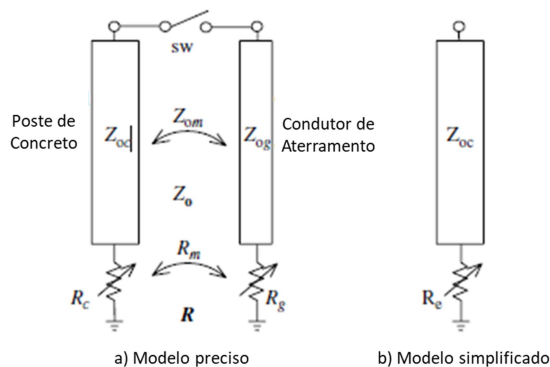


Figura 3 - Modelo de análise de surto de descarga atmosférica com poste de concreto

A resistência série entre o condutor de aterramento e o poste de concreto são usualmente negligenciadas. A velocidade do surto no condutor de aterramento e no poste de concreto é igual à velocidade da luz no espaço.

A impedância de surto do condutor de aterramento é dada pela Equação (5).

A impedância de surto do circuito paralelo poste de concreto e condutor de aterramento da Figura 3 (a) é dada por:

$$Z_{og} = Z_{oc} - (0.096r_c + 13,95)\ln\left(1 + \frac{r_c}{D}\right) \quad (8)$$

Onde,

$Z_{oc}$  = Impedância do circuito ( $\Omega$ )

$r_c$  = raio do poste de concreto (m);

$D$  = distância entre os lados do poste de concreto e o condutor de aterramento (m)

A impedância de surto mútua entre dois condutores verticais é dada por:

$$Z_{om} = 60\ln\left(\frac{h}{e \cdot d}\right) \quad (9)$$

$h$  = comprimento do condutor (m)

$e$  = base do logaritmo natural

$d$  = distância entre os centros dos condutores (m)

A impedância de surto do circuito paralelo do poste de concreto e o condutor de aterramento da Figura 3 (a) é dada por:

$$Z_{op} = \frac{Z_{oc}Z_{og} - Z_{om}^2}{Z_{oc} + Z_{og} - 2Z_{om}} \quad (10)$$

Quando o condutor de aterramento é localizado muito próximo do poste de concreto temos das equações (5) e (9)  $Z_{om} \approx Z_{oc}$ , pois  $d \approx r_c$ . Conseqüentemente, a impedância de surto do circuito paralelo entre o poste de concreto e o condutor de aterramento torna-se quase igual ao do poste de concreto sozinho. Portanto, o circuito paralelo pode ser modelado como na Figura 3 (b) onde  $R_e$  é a resistência equivalente entre  $R_c$  e  $R_g$ .

Os postes de concreto armado, portanto, devem ser tratados como um condutor e eletrodo de aterramento para correntes de descargas atmosféricas.

O poste de concreto armado tem baixa impedância de surto quando a corrente é injetada na armadura do poste, porque o raio do poste é muito maior que o raio de um eletrodo de aterramento convencional (haste terra). A resistência de aterramento de um poste de concreto também é baixa porque o poste está parcialmente enterrado no solo e o concreto úmido tem baixa resistividade.

O concreto é meio semiconductor com resistividade elétrica de 10.000 a 15.000  $\Omega \cdot \text{cm}$  a 20° C (concreto seco). Solos de baixa resistividade elétrica apresentam valores típicos em torno de 10.000  $\Omega \cdot \text{cm}$ .

Tabela 1- Resistência de hastes e postes de concreto convencionais de acordo com as equações (4) e (7).

Resistividade do solo ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	Resistência de aterramento ( $\Omega$ )			
	1 haste cilíndrica 2,40 x 0,01588m	3 hastes alinhadas	1 poste circular 11m (*)	3 postes paralelos (*)
100	47,07	27,64	50,72	16,90
300	141,20	59,11	107,46	35,82
500	235,34	90,51	164,20	54,73
1000	470,62	168,99	306,05	102,01
2000	941,24	325,89	589,74	196,58

\*Resistividade do concreto = 75 $\Omega \cdot \text{m}$  (concreto úmido)

Entretanto, em função das altas correntes de surto atmosférico, a disrupção entre o condutor de aterramento e a armadura do poste de concreto armado pode causar danos ao poste, tanto na parte aérea como na parte enterrada e, decorrente do curto-circuito causado, a tensão no circuito de baixa tensão pode tornar-se alta. A Figura 4 e a Figura 5 exemplificam alguns danos que podem ocorrer nestas situações.



Figura 4 - Dano causado no poste por descarga disruptiva [7]



Figura 5 - Dano na parte enterrada do poste por descarga atmosférica [7]

Por outro lado, verifica-se que a deterioração de um aterramento convencional com hastes leva o poste de concreto armado, naquele ponto, a se tornar o condutor e eletrodo de aterramento efetivo para as sobretensões de descargas atmosféricas, que contribui para evitar uma situação alarmante para o desempenho do sistema elétrico.

Os postes de concreto armado das linhas de energia elétrica, até então considerados como um aterramento virtual de pouca importância na análise de sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas, passaram a representar um importante componente na proteção e no desempenho de redes de energia.

#### 4.0 - POSTE COM ATERRAMENTO ESTRUTURAL

Postes de concreto com aterramento estrutural são postes que exercem intencionalmente a função de condutor e eletrodo de aterramento de forma contínua através de uma concepção construtiva onde a armadura do poste é integrada ao sistema de aterramento da instalação.

No poste com aterramento estrutural o condutor de aterramento é conectado diretamente na barra da armadura interna, na parte superior do poste, e a dissipação da corrente de surto no solo é feita pelo próprio poste.

Como citado no item 3.1 quando um *flashover* ocorre em isoladores de linhas de distribuição devido à uma descarga atmosférica, uma sobretensão é aplicada ao poste de concreto, a isolação entre a superfície do poste e a armadura interna do poste falha e uma corrente elétrica flui pelas barras da armadura para terra, podendo causar danos no poste ou em equipamentos. Entretanto, no poste de concreto com aterramento estrutural, em função do condutor de aterramento estar conectado diretamente na armadura do poste de concreto, isso garante que não haja a disrupção, evitando danos no poste e aliviando a sobretensão nos isoladores, para-raios e equipamentos.

Além disso, para alguns autores [7] na análise da disrupção entre a superfície e a armadura interna do poste de concreto devido a sobretensões de descargas atmosféricas é necessário também considerar a impedância da zona de disrupção somada à impedância de surto convencional e à resistência de aterramento. No caso do poste com aterramento estrutural esta condição não é necessária.

A impedância de aterramento do poste de concreto armado depende das características elétricas do concreto. A pequena espessura do concreto de cobertura da armação do poste de concreto, a resistividade elétrica, capacidade de ruptura, adensamento e permeabilidade do concreto na base do poste são fatores importantes que devem ser considerados no aspecto construtivo do poste com aterramento estrutural.

A resistividade elétrica do concreto depende principalmente da pasta de cimento, mas mudanças no tipo e no teor do agregado influenciam o valor da resistividade elétrica do concreto. É possível obter valores bastante inferiores de resistividade na massa de concreto com utilização de massa condutiva. Neste caso, a resistividade chega a apresentar valores da ordem de 1.500  $\Omega$ .cm.

Os postes de concreto armado que possuam conexão do condutor de aterramento ou das ferragens externas, tais como escada, cruzeta metálica, mão francesa, etc., com a armadura do poste ou através de vergalhão auxiliar embutido preso na armadura, são considerados postes com aterramento estrutural e, portanto, conduzem a corrente de surto para terra através da ferragem da armadura.

## 5.0 - POSTE AUTOATERRADO DE BASE CONDUTIVA - DESENVOLVIMENTO CPFL

Postes autoaterrados, basicamente, são postes de concreto armado com aterramento estrutural e baixa resistividade da massa de concreto, principalmente na base do poste, de forma a desempenhar por si só com confiabilidade a função de condutor e eletrodo de aterramento.

A CPFL Energia em 2004 introduziu os postes autoaterrados em entradas de energia de consumidores e, a partir de 2012, iniciou o desenvolvimento dos postes autoaterrados de base condutiva, apresentando importantes vantagens em relação ao sistema tradicional com hastes.

O poste autoaterrado de base condutiva desenvolvido pela CPFL possui 2 terminais especiais embutidos no corpo do poste e conectados na barra de aço principal da armadura, sendo um superior para o condutor de aterramento e outro inferior para medição do aterramento. Ainda, possui uma base de massa condutiva com resistividade de 30  $\Omega$ .m para facilitar a passagem das correntes de surto para o solo sem danos no poste.

A massa de concreto convencional é composta por cimento, areia e pedra. A areia e a pedra são altamente resistivas à passagem da corrente elétrica, assim, a pasta de cimento é a maior responsável pela condução da corrente. A existência de vazios e poros na massa e pontos de má formação de produtos da hidratação podem contribuir para a ocorrência de danos no poste durante a passagem de uma corrente impulsiva.

A massa de concreto condutiva desenvolvida pela CPFL no projeto do poste autoaterrado substituiu os agregados de alta resistividade por agregados condutivos e pozzolânicos, o que elevou o padrão de qualidade da massa para classe III (NBR12655). Desta forma, garante-se que o concreto da parte enterrada tenha ao mesmo tempo: (i) baixa permeabilidade para evitar contaminações que possam causar a corrosão do aço; (ii) alto adensamento para evitar vazios e poros e; (iii) baixa resistividade para facilitar a passagem da corrente para o solo sem depender da umidificação ambiente do concreto.

Para qualificação do concreto condutivo também foram realizados os ensaios de penetração acelerada de cloretos, difusão de íons cloretos, carbonatação, capacidade de ruptura e resistividade aparente. O poste autoaterrado não utiliza terminais de conexão abaixo da linha de engastamento do poste para evitar a ocorrência de corrosão galvânica entre os metais da conexão e, conseqüentemente, danos ao aço da armadura do poste.

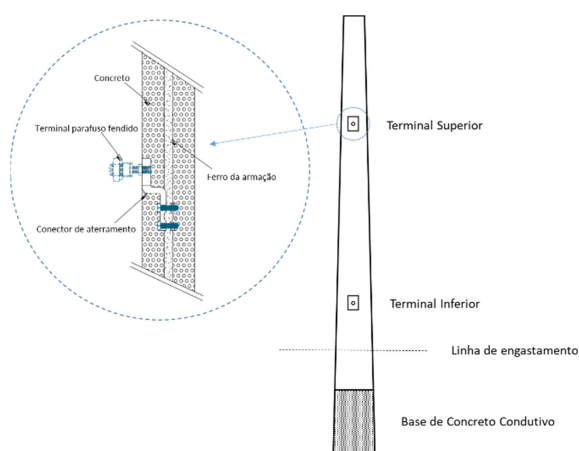


Figura 6 - Configuração do poste autoaterrado de base condutiva



O poste de concreto armado com aterramento estrutural tem as mesmas características de fabricação e ensaios, previstas na ABNT NBR 8451 [17] para os postes de concreto armado de distribuição e transmissão, além das particularidades que são específicas para este tipo de poste, tais como tipo e posicionamento dos terminais de aterramento e de medição na armadura, tipo e resistividade do concreto na base enterrada no solo, método de medição da resistividade de corpos de prova de concreto, especificação de agregados especiais e bitola mínima da barra de aço mestre da armadura.

A Tabela 2 compara a resistência de aterramento do poste autoaterrado em paralelo com configurações de aterramento utilizando hastes de terra.

Tabela 2- Resistência de hastes e postes autoaterrado de base condutiva de acordo com as equações (4) e (7).

Resistividade do solo ( $\Omega.m$ )	Resistência de aterramento ( $\Omega$ )			
	1 haste	3 hastes alinhadas	1 poste (*)	3 postes paralelos (*)
100	47,07	27,64	34,60	11,53
300	141,20	59,11	85,91	28,63
500	235,34	90,51	137,22	45,74
1000	470,62	168,99	265,50	88,50
2000	941,24	325,89	522,07	174,02

\*Resistividade do concreto =  $30\Omega.m$  (concreto condutivo)

### 5.1. Medições em campo

A CPFL possui um acervo de mais de 300 medições da resistência de aterramento de postes autoaterrados instalados entre 2014 e 2018, em solos de diferentes resistividades, comparadas com uma ou três hastes de terra existentes no mesmo local, que comprovam melhores resultados do poste autoaterrado. Algumas destas medições podem ser vistas nos gráficos da Figura 7 e da Figura 8.

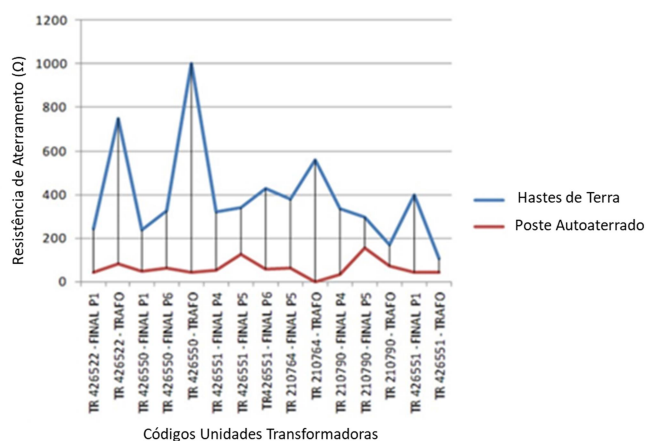


Figura 7 – Comparação da Resistência de aterramento antes e após a instalação dos postes autoaterrados (hastes de terra versus postes autoaterrados)

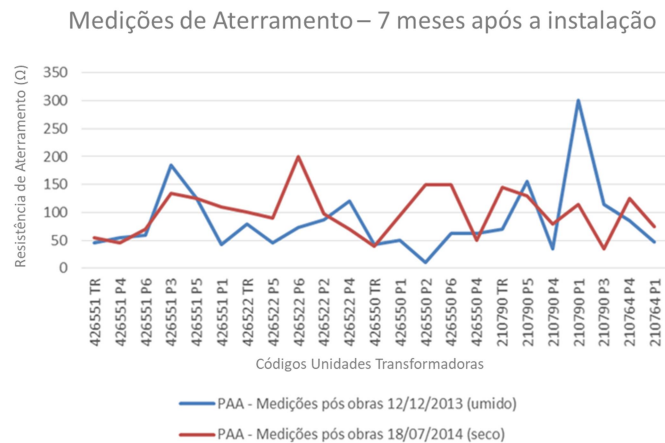


Figura 8 - Resistência de aterramento de postes autoaterrados em tempo seco e úmido

### 5.2. Ensaio em laboratório

A CPFL realizou em laboratório de Alta Tensão mais de 200 aplicações de onda de impulso atmosférico com tempo de frente/ cauda de 0,3/0,8 $\mu$ s (cortada na frente), diretamente no conector superior ligado na armadura dos postes. Foram utilizados modelos de postes de concreto de 9m circulares e duplo T autoaterrados, ambos com base condutiva. Para efeitos de comparação, também foram ensaiados postes autoaterrados de 9m circulares inteiramente de concreto convencional. As aplicações dos impulsos ocorreram para tensões na faixa de 20 a 60 kV, com correntes de 1 a 2kA, em protótipos de 5 fabricantes diferentes.

A impedância do poste autoaterrado de base condutiva medida nos ensaios de impulso atmosférico foi de 31,6  $\Omega$ , considerando um solo ideal.



Figura 9 - Ensaio de impulso atmosférico em poste autoaterrado

O poste autoaterrado de base condutiva comprovou a eficiência como condutor e eletrodo de aterramento frente às ondas impulsivas, não apresentando qualquer problema. Entretanto, o poste de concreto convencional não suportou a passagem da corrente impulsiva em tensões maiores que 30 kV e correntes de 1 kA, sofrendo danos na base do poste.



Figura 10 – Danos na base do poste autoaterrado com concreto convencional

### 5.3. Resultados de desempenho da rede de energia elétrica

A CPFL fez um acompanhamento do desempenho de um trecho rede de distribuição em função da ocorrência de falhas em transformadores antes e depois da instalação dos postes autoaterrados.

No início de 2017 foram instalados 450 postes autoaterrados em um trecho rural do alimentador de 15 kV, IBI04, na localidade de Ibiúna-SP, região com alta incidência de descargas atmosféricas e alto índice de queima de transformadores.

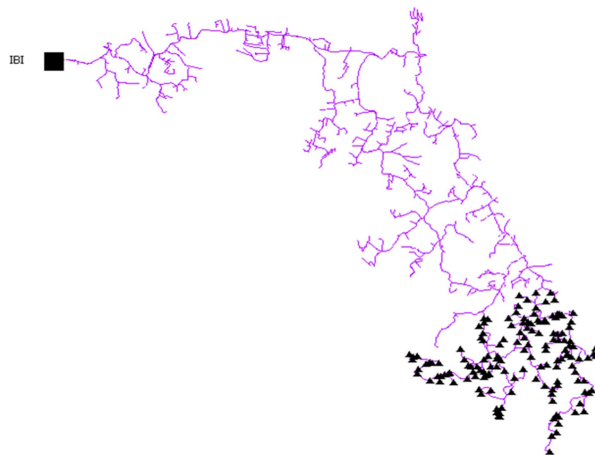


Figura 11 – Localização dos postes autoaterrados do alimentador IBI04

Os postes autoaterrados foram instalados em substituição aos postes de 150 transformadores existentes e de seus dois postes adjacentes.

Todos os postes autoaterrados foram conectados ao cabo neutro da rede secundária. Em locais onde não havia rede secundária os postes adjacentes e o poste do transformador foram interligados por cabo aéreo aterrado ao terminal de aterramento de cada poste, como visto na Figura 12.

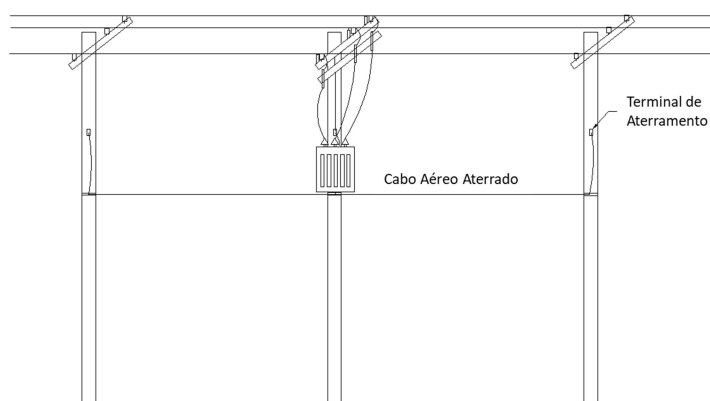


Figura 12 - Configuração de rede com postes autoaterrados sem rede secundária

Da análise de falhas verificou-se que entre 2014 e 2016 a taxa média de falhas de transformadores do alimentador IBI04 foi de 7,8%, portanto, em 2017 a expectativa de falhas de transformadores do trecho considerado era de 11,7 transformadores. Os postes autoaterrados foram instalados no período de 12/2016 a 07/2017. No ano de 2017 antes da substituição dos postes ocorreu 1 queima de transformador no trecho e após a instalação dos postes autoaterrados não foi verificada, neste trecho, nenhuma falha de transformadores. A taxa de falhas do alimentador neste ano foi de 6,8%.

#### 5.4. Inserção de Mercado

A CPFL está desenvolvendo um programa de inserção de mercado do poste autoaterrado através de um projeto de P&D, visando difundir a tecnologia para outras empresas de energia elétrica no Brasil, para benefício da Sociedade.

Este programa prevê apresentações técnicas nas empresas de energia elétrica e apoio técnico para fabricação de protótipos, realização de projetos piloto e implantação no sistema de energia. O projeto ainda prevê a transferência de tecnologia e licenciamento de fabricantes de postes.

#### 6. CONCLUSÃO

O uso de postes de concreto autoaterrado de base condutiva como estrutura de aterramento mostrou ser uma alternativa técnico-economicamente viável para ser aplicada em sistemas de aterramento de redes de distribuição.

A fabricação do poste autoaterrado de base condutiva apresenta um custo levemente superior quando comparado ao custo de um poste de concreto armado convencional, entretanto, o custo de instalação é significativamente menor considerando a produtividade das equipes de montagem, principalmente nos casos que não forem utilizados condutores de aterramento e hastes de aterramento paralelos ou, quando houver redução no número de hastes.

A resistência de aterramento de postes de concreto armado devem ser consideradas para melhorar o modelo de análise de sobretensões de descargas atmosféricas em sistemas de distribuição de energia elétrica. O poste de concreto armado por si só é um bom condutor e eletrodo de aterramento frente às sobretensões de impulso atmosférico, apresentando impedância de surto significativamente melhor que o sistema tradicional com hastes, principalmente em solos de alta resistividade.

Este trabalho mostra que o poste autoaterrado de base condutiva com resistividade do concreto de 30  $\Omega.m$  consolida as vantagens do poste de concreto armado como condutor e eletrodo de aterramento, eliminando a ocorrência de disrupção do condutor de aterramento externo através do concreto, evitando danos no poste e o risco de elevação de tensão na baixa tensão, gerada pelo curto-circuito.

A utilização de postes autoaterrados no sistema de distribuição de energia elétrica contribui para reduzir as sobretensões nos isoladores e transformadores, evitando danos nestes equipamentos e, conseqüentemente, redução das interrupções no fornecimento de energia a consumidores.

Um razoável baixo valor de impedância de aterramento do poste autoaterrado sozinho pode ser esperado devido à propriedade de ionização do solo.

Alem disso, a melhor performance do poste autoaterrado de base condutiva para dissipação das correntes de

surto em solos de média e alta resistividade leva a menores tensões geradas no solo e maior segurança de pessoas e animais.

Os autores agradecem ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico, regulado pela ANEEL, pelo fomento aos recursos utilizados para o desenvolvimento deste projeto.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Lightning Surge Analysis Model of Reinforced Concrete Pole and Grounding Lead Conductor in Distribution Line - S. Sekioka, Transactions on electrical and electronic engineering, IEEJ Trans 2008;
- 2) Measurements of a Concrete Pole Impedance with an Impulse Current Source – S. Sekioka, K. Yamamoto, S. Yokoyama, International Conference on Power Systems Transients – 1995
- 3) An empirical formula for the Surge Impedance of a Grounding Conductor along a Reinforced Concrete Pole in a Distribution Line – T. Mozumi, N. Nagaoka, A. Ametani, S. Sekioka, Doshisha University – Japan – 2001
- 4) Surge Impedance of Concrete Pole using the Electromagnetic Field Method – S. Hintamai, J. Hokierti, Department of Electrical Engineering, Ksesart University – Thailand – 2003
- 5) Lightning Surge Response of Concrete Pole due to Effect of the Electrical Properties of Concrete based on the Electromagnetic Field Method, S. Hintamai, J. Hokierti – Thailand – 2004
- 6) Lightning Surge Impedance of Concrete Pole, S. Hintamai, Department of Electrical Engineering, Sripatum University, Thailand – 2007
- 7) Study of Flashover Model on Overhead Distribution Lines, Kentaro Asano,1 Kenji Miyazato,1 Kazuhiko Hara,2 Tetsuro Shimomura,2 and Yusaku Horinouchi3 1Kansai Electric Power Co., Ltd., Japan 2Mitsubishi Electric Corp., Japan 3TM T&D Corp., Japan, Electrical Engineering in Japan, Vol. 150, No. 1, 2005.
- 8) Transmission Mains Earthing Design and Concrete Pole Deployments, M. Nassereddine, J. Rizk, A. Hellany and M. Nagrial, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical and Computer Engineering, Austrália, 2012
- 9) Avaliação da Influência da Resistência de Aterramento e Impedância de Surto na operação do Sistema de Distribuição da Concessionária – A. Raizer e outros, Universidade Federal de Santa UFSC – 2007
- 10) A Simplified Model to represent typical Grounding Configurations Applied in medium voltage and low voltage Distribution Lines – A. Conti, S. Visagro, IX International Symposium on Lightning Protection – 2007
- 11) Comportamento dos sistemas de Aterramento quando submetidos às Descargas Atmosféricas – A. C. Colombini, R. A. C. Altafim – Universidade de São Paulo – USP – 2010
- 12) Estudo do Comportamento elétrico do concreto utilizado em Sistemas de aterramento Estrutural – O. Vicente, Universidade Estadual de Londrina – 2010
- 13) Sistema de aterramento elétrico com hastes envolvidas em concreto – S.R.C. Bezerra, A. G. Kanashiro – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo – 2010
- 14) Aterramento de redes de distribuição com utilização de postes autoaterrados – Desenvolvimento e Implantação, A.C.A. Cannabrava, B.E.M. Ferreira, L.P. Pasqua, XXII Seminário Nacional de Energia Elétrica – SENDI, 2016
- 15) IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines," in IEEE Std 1410-2004 (Revision of IEEE Std 1410-1997) , vol., no., pp.1-50, 12 July 2004. Doi: 10.1109/IEEESTD.2004.94577
- 16) CIGRÉ Working Group 33.01. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. CIGRÉ Technical Brochure 63. 1991.
- 17) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8451. Postes de concreto armado para redes de distribuição de energia elétrica-especificação. Rio de Janeiro, 2011.

## 8. DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael Gomes Bento - Analista de Projetos de Inovação na CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pelo Centro Universitário Salesiano de São Paulo (2015) e formação técnica em eletroeletrônica pelo Colégio Técnico de Campinas (2008). Atua na prospecção, formatação e gerenciamento de projetos de inovação tecnológica no âmbito do Programa de P&D do Setor de Energia Elétrica, regulado pela ANEEL.



Benedito Edmundo Moura Ferreira - Graduado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia de Bauru, atual UNESP, em 1975. Especialista em Sistemas de Potência, Gerenciamento de Manutenção da Distribuição e Transmissão e em Pesquisa e Desenvolvimento de Novos Produtos e

Materiais para Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.



Antonio Carlos de Almeida Cannabrava - Possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (1982). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Engenharia Elétrica. Atua como Engenheiro de Normas e Padrões Senior, na Coordenação de Normas e Padrões do Grupo CPFL Energia