



**Universidade Federal de Campina Grande**  
**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
**Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica**



## **Estudo sobre o Método de Poço Profundo de Aterramento**

Trabalho de Conclusão de Curso

Aluno: Jarson Amaral da Silva

Orientador: Tarso Vilela Ferreira

Campina Grande, Paraíba

Julho de 2010

JARSON AMARAL DA SILVA

# **Estudo sobre o Método de Poço Profundo de Aterramento**

*Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido à Unidade Acadêmica de  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande como parte  
dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.*

Campina Grande, Paraíba,

Junho de 2010

# **Estudo sobre o Método de Poço Profundo de Aterramento**

Data de Aprovação: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_

---

**Jarson Amaral da Silva**  
Autor

---

**Tarso Vilela Ferreira**  
Professor Orientador

---

**Professor Avaliador**

Campina Grande, Paraíba

Julho de 2010

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Francisca, por ter se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço, em particular, a algumas pessoas que contribuíram diretamente para realização deste sonho:

Meu pai Alfredo, minha irmã Silândia, que garantiu minha estadia em Campina Grande, minha namorada Gina, que me motivou e me apoiou durante toda a graduação, Leoemi e Kalina, pessoas que verdadeiramente me completaram, meus amigos que foram essenciais para me motivar e de certa forma minha família nesse período, e a toda a minha família que, com todo carinho e apoio, não mediram esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

A secretária Adail, pelos incentivos e pelos apoios constantes.

Ao professor e amigo Tarso, pela paciência na orientação, o apoio e inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram a execução e conclusão deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

# SUMÁRIO

1.	<i>Introdução</i>	1
1.1.	Motivação	1
1.2.	Objetivos	2
2.	<i>Revisão Bibliográfica</i>	3
2.1.	Aterramento Elétrico	3
3.	<i>Método do Poço Profundo de Aterramento</i>	11
3.1.	Influência da Água na Resistividade do Solo	11
3.2.	Princípio do PPA para a Diminuição da Resistência	12
3.3.	Influência do Poço na Umidade do Solo em seu Entorno	13
4.	<i>Análise do Mecanismo do PPA para Diminuir a Resistência do Aterramento</i>	15
4.1.	Direção do Movimento da Água para o PPA	15
4.2.	Formação de Canal de Baixa Resistividade Conectado à Camada do Solo com Água em Abundância	16
4.3.	Formação de Água Subterrânea com Baixa Resistividade	16
4.4.	Enchendo as Lacunas do Solo com Água	17
5.	<i>Instalação do PPA</i>	18
6.	<i>Aplicação do PPA</i>	19
6.1.	Descrição de Caso	19
6.2.	Método de Instalação	20
6.3.	Medição e Análise dos Resultados	20
7.	<i>Estimativa da Região de Baixa Resistividade Formada pelo PPA</i>	23
7.1.	Resistência Equivalente do Solo para o PPA	23
7.2.	Comparação entre Eletrodo Vertical de Aterramento e o PPA	24
8.	<i>Conclusões</i>	26
	<i>Referências Bibliográficas</i>	27

# 1. INTRODUÇÃO

O sistema de aterramento de uma subestação é muito importante, pois garante a segurança e a boa operação do sistema de potência, bem como a segurança das pessoas em situações de descargas para a terra (IEEE Std. 80-2000, 2000).

Quando ocorre uma falta para a terra, altas correntes podem ser injetadas no sistema de aterramento, e se a resistividade do solo for muito alta haverá um crescimento elevado do potencial do sistema de aterramento como um todo, pondo operadores em risco. Além disso, o alto potencial no aterramento pode destruir cabos de controle e danificar equipamentos mais sensíveis.

Com a rápida expansão da capacidade dos sistemas de potência, as correntes de falta para a terra cresceram bastante. Diante disto, a resistência do aterramento deveria ser baixa o suficiente para garantir a segurança do sistema de potência.

## 1.1. MOTIVAÇÃO

Visando garantir níveis baixos de resistência, vários métodos têm sido aplicados para a diminuição da resistência do sistema de aterramento. Métodos regulares incluem aumento da malha de aterramento, conexão da malha de aterramento principal a uma malha externa secundária, aumento da profundidade da malha de aterramento, utilização de objetos naturais de aterramento, como ferro da fundação das estruturas, aumento vertical dos eletrodos de aterramento, tratamento químico do solo e até mudança do solo em torno da malha de aterramento por materiais de baixa resistividade. Estes métodos são adequados para diferentes situações geográficas, mas não significa que eles devem ser usados independentemente. De fato, em um ambiente de solo específico, dois ou mais métodos devem ser usados para diminuir a resistência de aterramento. Uma alternativa aos métodos tradicionais de redução de resistência de aterramento é o método do Poço Profundo de Aterramento (PPA). Neste método, a diferença de pressão entre a água do terreno e a cavidade do poço garante uma elevação da condutividade no sistema de aterramento.

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar um método pouco utilizado no Brasil para redução da resistência de aterramento de subestações. Conhecido como Método de Poço Profundo de Aterramento, a técnica foi desenvolvida na China e apresenta resultados animadores.

Como objetivo secundário, pretende-se facilitar o contato dos alunos de graduação com o tema “aterramento”, bem como com a técnica PPA.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ATERRAMENTO ELÉTRICO

O termo aterramento se refere à terra propriamente dita ou a uma grande massa que se utiliza em seu lugar. Quando falamos que algo está “aterrado”, queremos dizer então que, pelo menos, um de seus elementos está propositalmente ligado à terra.

Em geral, os sistemas elétricos não precisam estar ligados à terra para funcionarem e, de fato, nem todos os sistemas elétricos são aterrados. Mas, nos sistemas elétricos, quando designamos as tensões, geralmente, elas são referidas à terra. Dessa forma, a terra representa um ponto de referência (ou um ponto de potencial zero) ao qual todas as outras tensões são referidas.

A terra é, portanto, uma boa escolha como ponto de referência zero, uma vez que ela nos circunda em todos os lugares. Quando alguém está de pé em contato com a terra, seu corpo está aproximadamente no potencial da terra. Se a estrutura metálica de uma edificação está aterrada, então todos os seus componentes metálicos estão aproximadamente no potencial de terra.

#### 2.1.1. Conceitos Básicos

O aterramento padrão consiste de uma estrutura condutora enterrada propositalmente e que garanta um bom contato elétrico com a terra. O aterramento constitui-se, basicamente, de três componentes:

- a. As conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos;
- b. Eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico colocado no solo);
- c. Terra que envolve os eletrodos.

O ponto do sistema que se deseja conectar ao solo pode ser de natureza variada. Dependendo da aplicação, ele pode constituir-se em uma trilha numa placa de circuito



impresso, na carcaça de um motor ou de um computador, um transformador de potência ou ainda, o neutro de um sistema elétrico.

Os eletrodos de aterramento podem ter configuração muito diversificada. Basicamente, os eletrodos constituem-se em qualquer corpo metálico enterrado no solo e podem ser divididos em alguns tipos:

- i. Eletrodos existentes (naturais):** Prédios com estruturas metálicas são normalmente fixados por meio de longos parafusos na base das fundações de concreto. Esses parafusos engastados no concreto servem como eletrodos, enquanto que a estrutura metálica funciona como condutor de aterramento (Figura 1a). Neste caso, deve-se assegurar perfeita continuidade entre todas as partes metálicas.
- ii. Eletrodos fabricados:** Normalmente, são hastes de aterramento (Figura 1b). Preferencialmente deve constituir um anel circundando o perímetro da edificação.
- iii. Eletrodos encapsulados em concreto:** Uma vez que o concreto sob o nível do solo mantém sempre certo grau de umidade, seu valor de resistividade é baixo (da ordem de  $30 \Omega \cdot m$  a  $20^\circ C$ ), geralmente muito menor que o valor da resistividade do próprio solo onde está sendo construída a edificação ou estrutura. Desta forma, o uso dos próprios metais da armadura da edificação, colocados no interior do concreto das fundações (Figura 1c), representa uma solução pronta e de ótimos resultados. Qualquer que seja o tipo de fundação, deve-se assegurar a interligação entre os ferros das diversas sapatas, formando um anel. Essa interligação pode ser feita com o próprio ferro da estrutura, embutido em concreto ou por meio do uso de cabo de cobre.
- iv. Outros eletrodos:** Quando o terreno é muito rochoso ou arenoso, o solo tende a ser muito seco e de alta resistividade. Caso não seja viável o uso das fundações como eletrodo de aterramento, fitas metálicas ou cabos enterrados são as soluções técnica e economicamente adequadas (Figura 1d).

Para se avaliar a natureza dos aterramentos, deve-se considerar que, em geral, uma conexão à terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para a terra. A perspectiva na qual o sistema “vê” o aterramento pode ser expressa através da sua impedância.

Essa impedância é denominada **Impedância de Aterramento** e pode ser definida como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica no mesmo, através dos eletrodos. Quantitativamente, ela é obtida através da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante.

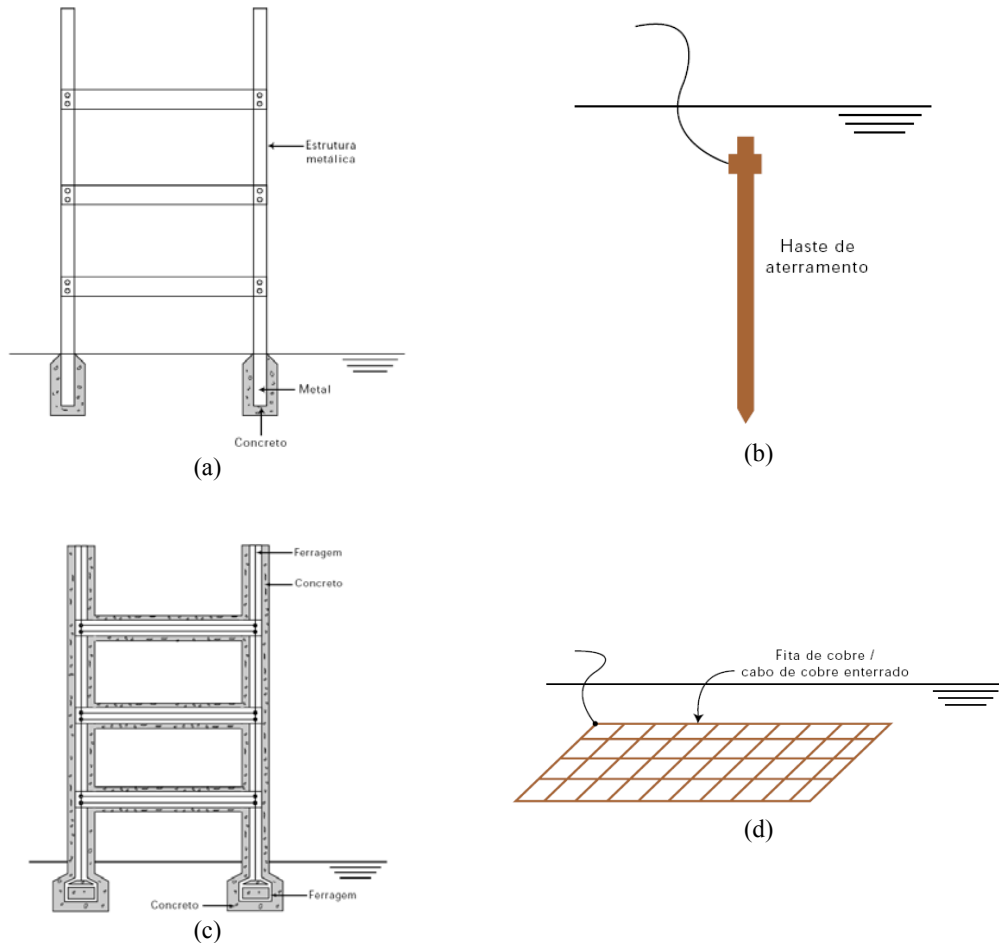


Figura 1: Esquemas dos tipos de eletrodos usados nos aterramentos:  
 (a) Eletrodos existentes; (b) Eletrodos Fabricados;  
 (c) Eletrodos encapsulados em concreto; (d) Outros eletrodos.

Segundo VISACRO FILHO (2005), a natureza da Impedância de Aterramento pode ser ilustrada pela Figura 2, que apresenta uma representação simplificada do aterramento por meio de um circuito equivalente.

Considerando uma porção limitada do eletrodo, observa-se que a corrente dissipada para o solo é composta por quatro componentes representadas na Figura 2. A corrente que é injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo. Em termos de um circuito equivalente, o cálculo das

energias correspondentes pode ser feito por meio de uma resistência e uma indutância em série.

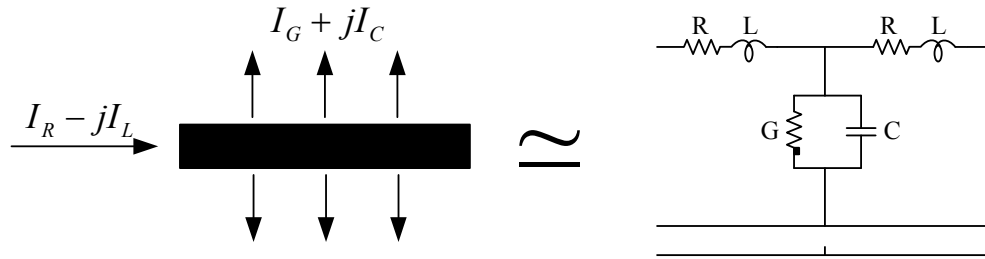


Figura 2: Componentes de corrente no solo (FILHO, S. V., 2005).

Por outro lado, o campo elétrico no solo (um meio de resistividade  $\rho$  e permissividade  $\epsilon$ ) determina o fluxo de correntes condutiva e capacitiva no meio. A relação entre tais correntes não depende da geometria dos eletrodos, e sim da relação  $\sigma/\omega\epsilon$ , em que  $\sigma$  refere-se à condutividade do solo e  $\omega$  à frequência angular. A energia associada ao fluxo das correntes transversais pode ser computada por meio de uma condutância e uma capacitância, colocadas em paralelo no circuito equivalente.

Adicionalmente, devem ser considerados os efeitos mútuos (capacitivos, condutivos e indutivos) entre os diversos pontos dos eletrodos de aterramento. O equacionamento dessa questão contém certa complexidade, devido aos efeitos da propagação no solo.

Muitas aplicações não se referem à impedância de aterramento, mas a sua resistência devido aos efeitos reativos serem reduzidos para baixas frequências. Assim, a configuração resultante para o circuito equivalente se aproxima de um conjunto de condutâncias colocadas em paralelo. Esse é o caso de ocorrências próximas às condições de regime em sistemas de potência, como curtos-circuitos.

O valor da resistência de aterramento pode ser quantificado pela relação entre a tensão aplicada a um aterramento e a corrente resultante (neste caso, entende-se por tensão o potencial adquirido pelo aterramento referido ao infinito):

$$R_T = V/I. \quad (1)$$

Assim, é considerada como **Resistência de Terra** a resistência oferecida à passagem de uma corrente elétrica para o solo através de um aterramento. Para se estabelecer uma idéia da ordem de grandeza, deve-se considerar inicialmente que a terra não é um bom condutor de eletricidade, isto é, possui alta resistividade.

A presença do aterramento se manifesta na perspectiva do sistema quando há corrente nos seus eletrodos. Na ausência da mesma tem-se um potencial nulo nos eletrodos (mesmo potencial de um ponto infinitamente afastado). A resistência de aterramento pode afetar o sistema de duas formas. Primeiramente, através de uma influência ativa, o seu valor pode ser determinante na limitação do valor da corrente que se estabelece rumo ao solo. Por outro lado, numa perspectiva passiva, deve-se considerar que ao existir corrente no aterramento resulta em uma elevação de potencial no solo, transmitido ao ponto de aterramento do sistema, e que o valor da elevação de potencial  $V_T$  é diretamente proporcional ao valor da resistência de aterramento.

$$V_T = R_T \cdot I. \quad (2)$$

### **2.1.2. Funções Básicas**

O aterramento pode desempenhar várias funções em um sistema e também assumir configuração muito diversificada em termos do posicionamento dos seus eletrodos no solo e de sua dimensão. Entretanto, suas aplicações estão sempre associadas a dois fatores fundamentais:

- a. Desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado;
- b. Questões de segurança (de seres vivos) e proteção (de equipamentos).

No primeiro caso, pode-se citar o uso do solo como condutor efetivo de retorno, quando uma corrente alternada ou contínua é injetada no aterramento ou, ainda, as funções associadas à proteção do sistema. No segundo caso, o aterramento pode ser um fator de segurança, por permitir o escoamento para a terra de cargas e, ainda, ao promover a distribuição segura de potenciais na superfície do solo, quando há corrente em seus eletrodos.

É possível caracterizar um conjunto de aplicações em que se recorre ao uso do solo como condutor de eletricidade, associando-se às mesmas os aspectos de maior interesse, (VISACRO FILHO, S., 2005). Consegue-se, por meio de tal prática, evitar ou pelo menos minimizar os efeitos indesejáveis de:

- i. Energização (acidental ou por falha de isolamento) de partes metálicas de sistemas, expostas ao contato de pessoas e animais;
- ii. Carregamento de cargas estáticas em corpos ou equipamentos industriais, cuja descarga pode originar arcos elétricos ou irradiação eletromagnética. Pode-se citar o caso das fábricas de tecidos, onde o atrito entre materiais diferentes costuma carregar estaticamente os equipamentos, com risco de incêndio, na eventualidade de ocorrência do arco;
- iii. Descargas atmosféricas (pelo uso do pára-raios).
- iv. É possível limitar os níveis de potenciais ou a distribuição dos seus patamares a níveis seguros, por meio de práticas adequadas de aterramento:
- v. Tensões induzidas em corpos metálicos por fenômenos atmosféricos ou linhas energizadas próximas (por exemplo, tensões induzidas em cercas de arame por linha de transmissão paralela às mesmas) podem ser minimizadas pela conexão dos mesmos ao solo;
- vi. Pode-se alcançar uma minimização dos gradientes de potencial na superfície do solo, por ocasião do fluxo de corrente no aterramento, pelo posicionamento adequado dos eletrodos no solo, com redução dos riscos para pessoas e animais presentes ao local, durante essas ocorrências.
- vii. Uso da terra como um condutor de retorno.

Em diversas aplicações, recorre-se ao solo como um condutor efetivo no circuito de alimentação. Podem ser citados, como exemplos, o sistema Monofásico com Retorno pela Terra (MRT), empregado na distribuição rural, os sistemas de transmissão em corrente contínua (CC) e diversos sistemas de tração elétrica.

Particularmente, a prática de se aterrar o neutro de sistemas polifásicos pode apresentar diversos aspectos de interesse, associados à filosofia de proteção do sistema. Quando ocorre uma falta no sistema, o desequilíbrio resultante gera correntes no solo, entre os pontos de aterramento. A proteção dos sistemas baseia-se justamente na detecção dessas correntes, que sensibilizam os dispositivos adequados, permitindo isolar prontamente os circuitos ou equipamentos faltosos. O aterramento do neutro permite, ainda, em certos casos, limitar a níveis inferiores as sobretensões surgidas no sistema de alimentação, em relação à condição de sistema isolado. A definição dos níveis de solicitação do sistema é um importante fator econômico, em função do custo associado ao nível de isolamento.

### **2.1.3. Requisitos Básicos de um Aterramento**

Segundo VISACRO FILHO (2005), um aterramento deve apresentar basicamente três características:

- a. Capacidade de condução;
- b. Baixo valor de resistência;
- c. Configuração de eletrodos que possibilite o controle do gradiente de potencial.

De uma forma geral, espera-se que um aterramento tenha suficiente capacidade de dispersão para o solo de determinados valores de corrente, sem, contudo, permitir que os potenciais na superfície deste solo atinjam níveis comprometedores à segurança do pessoal, por ocasião de uma falta. Nessa perspectiva, é possível agrupar os aterramentos em: “aterramentos de serviço”, quando desempenham efetivamente uma função elétrica no sistema ou circuito elétrico, e “aterramento de segurança”, quando sua finalidade é evitar riscos para a vida no local.

Em algumas situações, não é possível alcançar valores reduzidos de resistência de aterramento, para as restrições impostas em condições práticas (por exemplo, valores elevadíssimos de resistividade do solo e restrições na dimensão da planta onde o aterramento deve ser instalado). Nesses casos, o valor absoluto da resistência de aterramento deixa de ser o fator mais importante, logo é possível assegurar o desempenho eficiente do sistema, através da adoção de abordagens mais abrangentes de proteção, que podem incluir práticas de equipotencialização e o recurso a técnicas e dispositivos específicos, como transformadores isoladores e supressores de surto.

### **2.1.4. Técnicas para Melhoria da Resistência de Aterramento**

Muitas vezes, após a instalação de um aterramento, observa-se através de medições que o valor da sua resistência é superior ao valor desejado. Nesses casos empregam-se normalmente algumas técnicas capazes de melhorar (diminuir) o valor da resistência de terra. Essas técnicas atuam, basicamente, modificando a resistividade do solo nas proximidades do eletrodo, ou alterando as condições dos eletrodos de aterramento, ou ainda, fazendo aplicação dessas duas possibilidades simultaneamente.

Pode-se conseguir diminuir bastante a resistência de aterramento aumentando o número de eletrodos em paralelo. Contudo, deve-se lembrar que os eletrodos devem estar suficientemente afastados para minimizar os efeitos da resistência mútua. A partir de certo número de eletrodos em paralelo, a colocação de novos eletrodos torna-se ineficaz (KINDERMANN-CAMPAGNOLO, 1995).

Quando o solo apresenta camadas mais profundas de menor resistividade, o aprofundamento dos eletrodos se torna uma técnica bastante eficaz, pois com a emenda de hastes verticais consegue-se atingir camadas de melhor condução. Se o solo é homogêneo, a eficácia da técnica é reduzida para profundidades superiores a 3,5 m (KINDERMANN-CAMPAGNOLO, 1995).

Existem vários produtos que podem ser colocados no solo antes ou depois da instalação de hastes para diminuirmos a resistividade do solo. A Betonita e o Gel são os mais utilizados. De qualquer forma, o produto a ser utilizado para essa finalidade deve ter as seguintes características:

- i. Não ser tóxico;
- ii. Deve reter umidade;
- iii. Bom condutor de eletricidade;
- iv. Ter pH alcalino (não corrosivo);
- v. Não deve ser solúvel em água.

Vale salientar que é proibido (por norma), no que se refere a instalações de baixa tensão, o tratamento químico do solo para equipamentos a serem instalados em locais de acesso público. Essa medida visa à segurança das pessoas nesses locais.

Além dos métodos supracitados, existem técnicas menos difundidas, mas igualmente funcionais. Uma delas é o Método de Poço Profundo de Aterramento (PPA), que será tratado a seguir.

### 3. MÉTODO DO POÇO PROFUNDO DE ATERRAMENTO

#### 3.1. INFLUÊNCIA DA ÁGUA NA RESISTIVIDADE DO SOLO

A chave para a diminuição da resistência do aterramento é a mudança da resistividade do solo em torno do sistema de aterramento, pois a resistência de aterramento de uma subestação, por exemplo, é principalmente determinada pela resistividade do solo da região em torno do sistema de aterramento (MENG et al., 1999).

A resistividade do solo em natura é decidida pela água contida no mesmo, as propriedades e a densidade da solução eletrolítica, bem como pelas características da condução iônica. Em geral, a resistividade do solo com mais água é pequena, e a resistividade do solo seco é alta.

A resistividade do solo sofre alterações com a umidade. Esta variação ocorre em virtude da condução de cargas elétricas no mesmo ser predominantemente iônica. Uma percentagem de umidade maior faz com que os sais, presentes no solo, se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem da corrente iônica. Assim, um solo específico, com concentração diferente de umidade, apresenta uma grande variação na sua resistividade. A Tabela I apresenta a variação da resistividade com a umidade de um solo arenoso.

Tabela I: Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade (YU et al., 2005).

<b>Índice de umidade (% por peso)</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega.m</math>, para solo arenoso)</b>
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Em geral, a resistividade ( $\rho$ ) varia acentuadamente com a umidade no solo, como apresentado na Figura 3.



Conclui-se, portanto, que o valor da resistividade do solo acompanha os períodos de seca e chuva de uma região. Os aterramentos melhoram a sua qualidade com o solo úmido, e pioram no período de seca (KINDERMANN-CAMPAGNOLO, 1995).

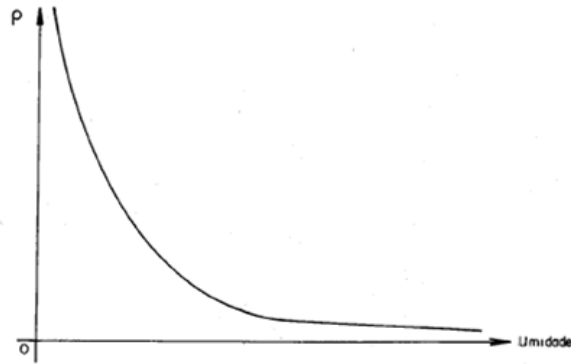


Figura 3: Resistividade ( $\rho$ ) versus umidade percentual do solo arenoso (KINDERMANN-CAMPAGNOLO, 1995).

### 3.2. PRINCÍPIO DO PPA PARA A DIMINUIÇÃO DA RESISTÊNCIA

Como analisado anteriormente, a água contida é um fator importante para a diminuição da resistividade do solo, o aumento da umidade resulta na diminuição da resistividade do solo (YU et al., 2005).

Como é sabido, ao cavar-se um poço a água contida na terra se moverá para o poço. O princípio de um poço pode ser explicado pela Figura 4: no plano do solo com profundidade  $h$ , a pressão  $P_1$  no interior do poço é a pressão atmosférica, a pressão  $P_2$  na molécula de água no solo com profundidade  $h$  é a pressão atmosférica mais a pressão do solo na localização com profundidade  $h$ , e obviamente,

$$P_2 > P_1. \quad (3)$$

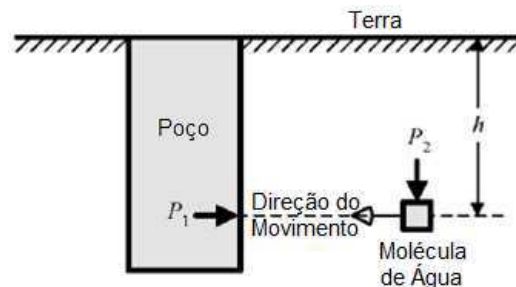


Figura 4: Diagrama do princípio do poço d'água (YU et al., 2005).

Então, as moléculas de água do solo movem-se para o poço devido à diferença de pressão, e a água do solo é acumulada no poço. Com isso, a resistividade de toda a região do solo umidificado é diminuída. Se for implantado um eletrodo de metal tubular como as paredes do poço d'água, então o eletrodo terá baixa resistência de aterramento. Naturalmente, para manter a diferença de pressão do sistema, devem ser feitos vários pequenos furos no tubo.

Durante o processo de movimentação da água para o poço, uma força de arraste é exercida no solo. Então, o nível final de água no poço é determinado pelo balanço entre a diferença de pressão e a força de arraste.

Em suma, o princípio do método de poço profundo de aterramento é mudar a direção do movimento da água subterrânea por PPA para diminuir a resistência do aterramento em torno do eletrodo, e usar a gravidade, o efeito capilar da água e vapor de água no solo para aumentar a umidade do solo em torno do eletrodo de aterramento, o que vai diminuir a resistividade do solo e, conseqüentemente diminuir a resistência do aterramento.

### 3.3. INFLUÊNCIA DO POÇO NA UMIDADE DO SOLO EM SEU ENTORNO

Se o poço não atingir um aquífero ou não existir um aquífero, a água armazenada no solo move-se para o poço, e a região do solo em torno do poço torna-se bastante úmida, como apresentado na Figura 5. A umidade do solo próximo ao poço é alta. O efeito da umidade em torno do poço não afeta a região distante ao mesmo.

Se o poço atingir um aquífero, como apresentado na Figura 6, uma grande região do solo se torna saturada de água.

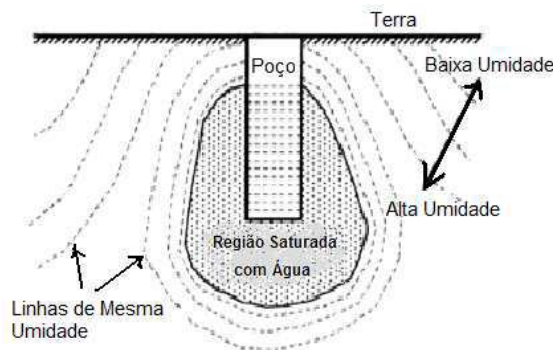


Figura 5: Região do solo com saturação de água formada pelo PPA (YU et al., 2005).

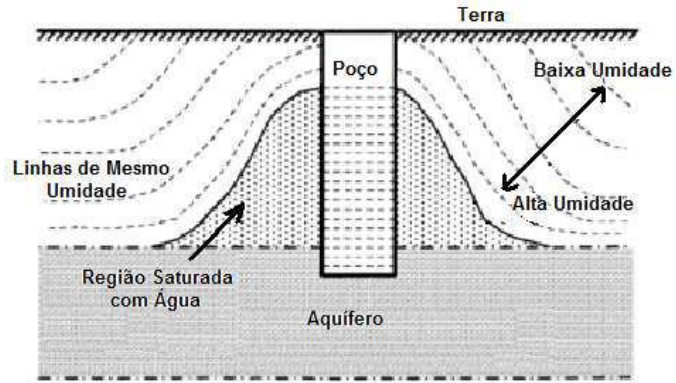


Figura 6: Região do solo com saturação de água formada pelo PPA quando o mesmo atinge um aquífero (YU et al., 2005).

## 4. ANÁLISE DO MECANISMO DO PPA PARA DIMINUIR A RESISTÊNCIA DO ATERRAMENTO

### 4.1. DIREÇÃO DO MOVIMENTO DA ÁGUA PARA O PPA

Como discutido anteriormente, a diferença de pressão entre o interior e o exterior do poço faz com que a água da terra se mova para o interior do poço. Esta diferença de pressão mantém a energia de movimento da água em direção ao poço. Como apresentado na Figura 5, se existir uma camada do solo com água em abundância, então a água passará através dos pequenos furos no tubo de metal e será acumulada no poço (Figura 7, região “a”). Concomitantemente, a água acumulada no interior do poço passará através do tubo, mover-se-á para fora do poço e umidificará a região em torno do mesmo (Figura 7, região “b”), e formará linhas de mesma umidade.

Se existir uma camada impermeável de solo acima de um aquífero, quando o poço for instalado haverá um caminho de baixa pressão para que a água do aquífero possa ascender. A água no poço então passará pelos furos no tubo metálico do poço, umidificando camadas do solo superiores à camada impermeável. Assim, percebe-se a viabilidade da técnica em regiões com água subterrânea.

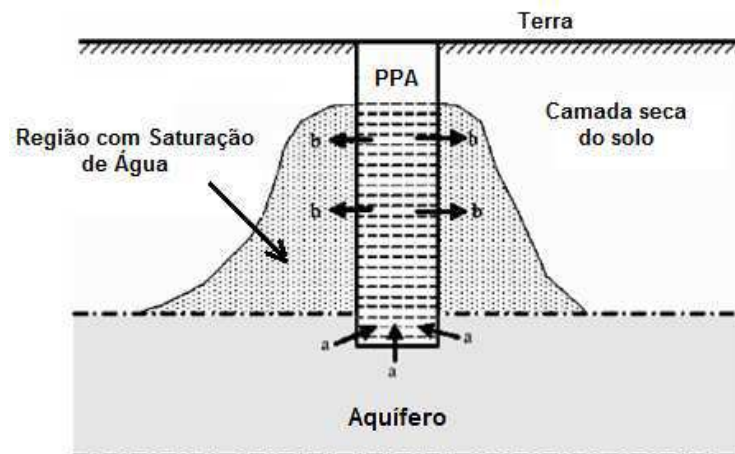


Figura 7: Diagrama esquemático do movimento da água subterrânea para o PPA (YU et al., 2005).

## 4.2. FORMAÇÃO DE CANAL DE BAIXA RESISTIVIDADE CONECTADO À CAMADA DO SOLO COM ÁGUA EM ABUNDÂNCIA

Se existe uma camada do solo com água em abundância, a água desta move-se para o poço e forma uma região saturada nos arredores do poço. A região que conecta o poço à camada do solo saturada com água forma um canal de baixa resistividade entre as mesmas, como representado na Figura 8. Quando uma corrente de falta estabelece-se no poço, ela é facilmente dispersada através desse canal de baixa resistividade e a camada de solo saturada com água.

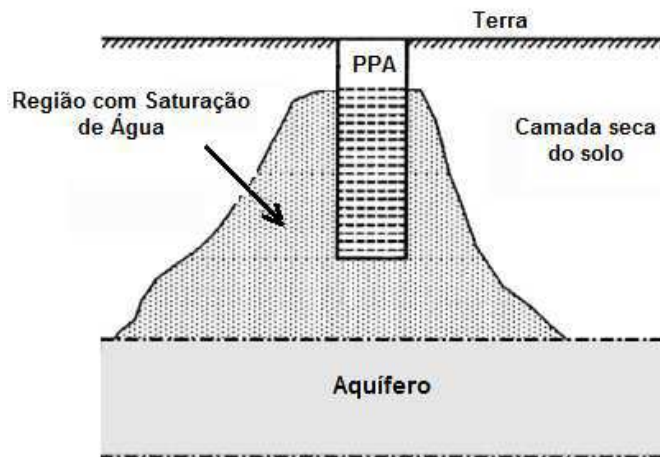


Figura 8: Formação de canal de baixa resistividade de conexão com o aquífero (YU et al., 2005).

## 4.3. FORMAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA COM BAIXA RESISTIVIDADE

O solo contém diferentes substâncias minerais, e essas substâncias minerais formam diferentes íons. Durante o movimento da água em direção ao poço, esses íons são dissolvidos na água. Com isso, a água passa a ter boa condutividade, e a região úmida do solo, formada em torno do poço, tem baixa resistividade.

#### 4.4. ENCHENDO AS LACUNAS DO SOLO COM ÁGUA

Se existem lacunas no solo seco, como apresentado na Figura 9a e 9c, tais lacunas afetam a dispersão da corrente no solo pelo eletrodo de aterramento, pois a dispersão da corrente é menor nas lacunas. Porém, essas lacunas do solo nas regiões próximas ao poço são preenchidas com água, com isso a corrente pode passar diretamente por essas lacunas, como apresentado na Figura 9b e 9d. Assim, a resistência de dispersão da corrente é diminuída.

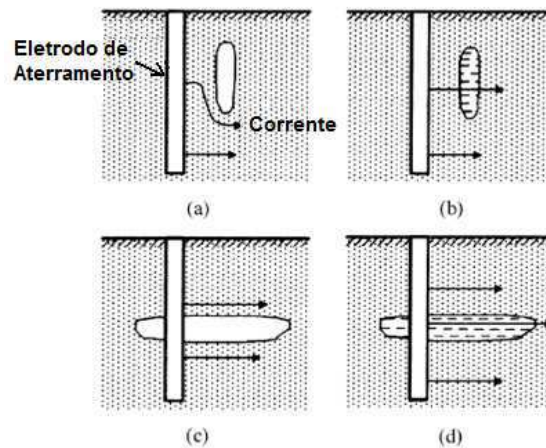


Figura 9: Influência das lacunas verticais. (a) Em solo seco; (b) Com água e lacunas horizontais; (c) Em solo seco; (d) Com água na dispersão de corrente (YU et al., 2005).

## 5. INSTALAÇÃO DO PPA

Como ilustrado na Figura 10a, durante a instalação do poço, primeiro um buraco vertical é perfurado no solo. Normalmente, um tubo de aço inoxidável ou de aço galvanizado é adotado como eletrodo de aterramento, com diâmetro em torno de 50 mm. São feitos pequenos furos no tubo, para permitir a circulação de água através do mesmo.

O tubo de aço é inserido no buraco perfurado. O poço profundo é constituído por diversos pequenos tubos de aço, dois tubos são conectados juntos e a região de conexão é soldada, como apresentado na Figura 10b. O espaço entre a parede do buraco perfurado e o tubo de aço é preenchido com pó de carbono, com resistividade muito baixa, por pressão. O preenchimento de carbono em pó tem boa absorção de água, o que faz com que tal região e a região em torno do poço sejam mantidas úmidas. Por outro lado, o pó de carbono tem boa permeabilidade, o que permite que a água mova-se facilmente através do mesmo para dentro do poço.

Para impedir que o pó de carbono seja arrastado pela água para dentro do tubo de aço, um filtro especial é usado para cobrir os furos permeáveis no tubo de aço. Outros materiais como *loess*<sup>1</sup> ou bentonita, podem ser usados para preencher os espaços entre as paredes do buraco perfurado e o tubo de aço. O topo do tubo de aço fica enterrado a 1m de profundidade, um pequeno buraco de aeração é feito para manter a pressão no poço igual à pressão atmosférica.

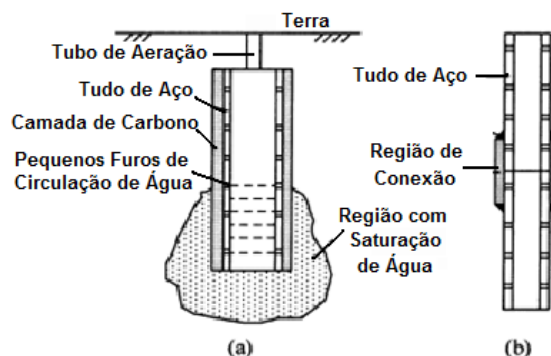


Figura 10: (a) Diagrama esquemático do PPA;  
(b) Conexão de dois tubos de aço para PPA (YU et al., 2005).

<sup>1</sup> Loess é um termo geológico que designa depósitos de sedimento rochoso criados por ação eólica (LINEBACK, 1979).

## 6. APLICAÇÃO DO PPA

Nas seções a seguir será apresentado um estudo de caso que empregou a técnica do PPA. O trabalho foi desenvolvido por Gang Yu e Jingping Yuan, em 1995, na subestação de Luohu (110 kV), na cidade Heyuan, província de Guandong, sul da China.

### 6.1. DESCRIÇÃO DE CASO

Apesar de localizar-se em região montanhosa, a subestação Luohu possui um aquífero subterrâneo sob si. A antiga malha de aterramento da subestação foi construída em setembro de 1984, e a área original dessa malha de aterramento era de  $90 \times 90 \text{ m}^2$ . A resistência de aterramento testada na época foi de  $1,79 \Omega$ . Em 1989, a área dessa malha de aterramento foi aumentada para  $90 \times 120 \text{ m}^2$  e, ao mesmo tempo, eletrodos de aterramento horizontais foram conectados aos dispositivos de aterramento das linhas de transmissão, como ilustrado na Figura 11. A área adicionada foi de  $2700 \text{ m}^2$ , e a resistência de aterramento testada foi de  $1,35 \Omega$ .

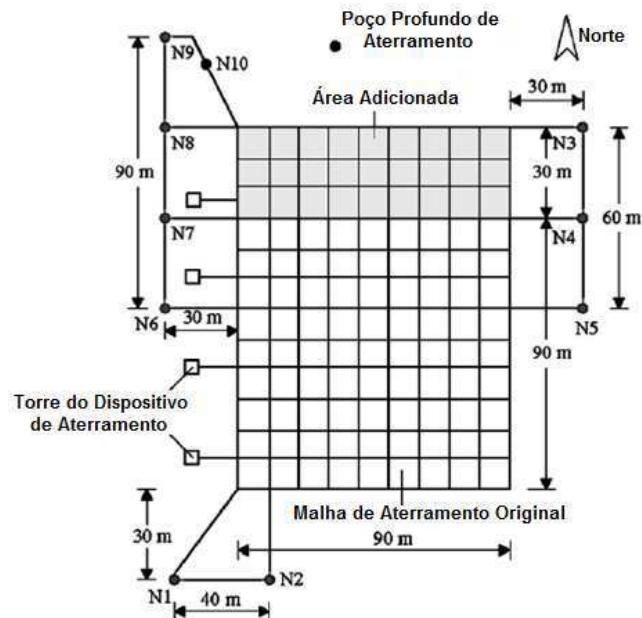


Figura 11: Diagrama esquemático do sistema de aterramento com o PPA para a Subestação de Luohu (YU et al., 2005).



O sistema de aterramento da subestação de Luohu foi reconstruído no fim do ano de 1999 pela aplicação desse novo método de PPA, cujo diagrama esquemático é apresentado na Figura 11. Dez PPA foram adicionados, com comprimentos entre 11 m e 15 m. Desta forma para o aumento do efeito de proteção da malha de aterramento, os PPA foram arranjados em torno da subestação. O comprimento total dos dez PPA foi de 130 m, e o comprimento total dos eletrodos de aterramento horizontais para conectar os PPA à malha de aterramento foi de 600 m.

## 6.2. MÉTODO DE INSTALAÇÃO

Uma máquina perfuradora foi usada para fazer os buracos de 150 mm de diâmetro para os PPA. Tubos de aço galvanizado com diâmetro interno de 40 mm e espessura de 5 mm foram usados como eletrodo de aterramento do poço. Furos para permitir a circulação de água foram feitos uniformemente no tubo de aço. O PPA tem segmentos de tubos de aço de comprimento de 6 m e as uniões entre estes foi feita com pequenos tubos, com diâmetro superior, que funcionaram como luvas. Pó de carbono com boa condutividade foi aplicado a alta pressão para preencher os espaços entre o tubo de aço e o buraco perfurado.

## 6.3. MEDIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A reconstrução foi concluída em dezembro de 1999. Após um mês, as resistências de aterramento de todos os dez PPA foram medidas. Antes da medição, os condutores de conexão entre a malha de aterramento e o PPA foram desligados; os resultados das medições de todos os dez PPA são apresentados na Tabela II.

A resistividade aparente do solo, para diferentes distâncias de passo do eletrodo, foi medida pela configuração de quatro eletrodos de Wenner (DAWALIBI et al., 1993). Os resultados medidos no oeste e sul da subestação foram diferentes dos resultados medidos no nordeste. Os dados obtidos são apresentados na Figura 12. Os resultados analisados mostram a estrutura geológica do solo que pode ser representada como três camadas horizontais. A resistividade e espessura da primeira camada são de 112,5  $\Omega.m$  e 2,05 m, a resistividade e espessura da segunda camada são de 452,5  $\Omega.m$  e 4,5 m, e a resistividade da terceira camada é de 161,5  $\Omega.m$ .

Tabela II: Resultados das Resistências de Aterramento de Dez PPA testadas (YU et al., 2005).

Nº.	Profundidade do PPA (m)	Nível da Água no Poço (m)	Resistência de Aterramento
N1	12	1,0	5,3
N2	12	1,2	5,2
N3	11	0,8	8,4
N4	12	0,6	6,3
N5	15	0	8,5
N6	12	1,0	5,1
N7	12	1,0	5,2
N8	14	0,7	5,3
N9	15	0,5	5,0
N10	15	0,5	5,1

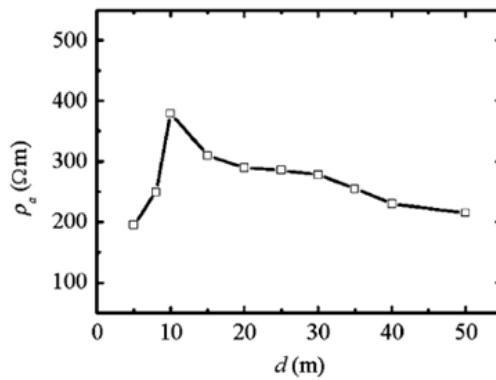


Figura 12: Ralação entre a resistividade aparente do solo e a distância de passo do eletrodo (YU et al., 2005).

De acordo com o solo perfurado, os primeiros 2 m são de areia preta, depois uma camada de cascalho e uma camada de *loess* com espessura de 3 a 5 m alternadamente, como apresentado na Figura 13. Abaixo da segunda camada de cascalho, o solo é úmido. A camada de cascalho é cheia de pequenos espaços, o que faz com que essa camada tenha boa capacidade de armazenar água. A primeira camada de *loess* é compacta, o que previne o escoamento da água.

Antes da adição dos dez PPA, a resistência da malha de aterramento era de 1,35 Ω, e a área era em torno de 11.000 m<sup>2</sup>, então a resistividade equivalente estimada era de 283,2 Ω.m. Depois da adição dos dez PPA à malha de aterramento, a resistência de aterramento testada foi de 0,5 Ω pelo método da queda de potencial (DAWALIBI et al., 1993). Este valor se manteve constante em muitos outros testes realizados nos anos seguintes. A área total do

sistema de aterramento era de 14.600 m<sup>2</sup>, a resistividade equivalente diminuiu para 120,8 Ω.m. Comparando como o valor de antes da instalação dos poços, 1,35 Ω, a resistência do aterramento diminuiu em torno de 63%. Isto mostra que esses poços de aterramento são muito eficientes para diminuição da resistência de aterramento.

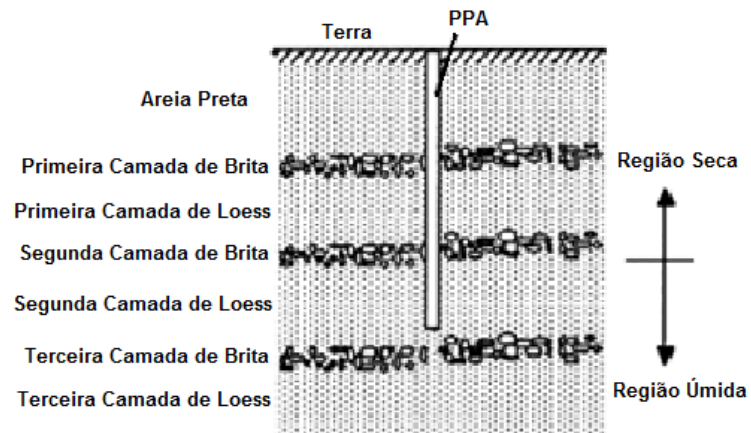


Figura 13: Estrutura geológica da área da subestação (YU et al., 2005).

## 7. ESTIMATIVA DA REGIÃO DE BAIXA RESISTIVIDADE FORMADA PELO PPA

O PPA pode ser tratado como um eletrodo de aterramento vertical com região de baixa resistividade em torno do mesmo, o qual pode ser modelado por uma região cilíndrica. A região do alicerce é modelada como uma região semi-esférica, como apresentado na Figura 14a. Porém, a resistência de aterramento desse sistema equivalente é difícil de ser calculada. Então, uma região cilíndrica é usada para simular a região de baixa resistividade em torno do poço de aterramento, como apresentado na Figura 14b:  $d$  é o diâmetro do tubo de aço, e  $D_e$  é a largura da região de baixa resistividade.

A resistência de aterramento de um poço de aterramento pode ser calculada por software de análise numérica, de acordo com o modelo horizontal de multicamadas do solo (KINDERMANN-CAMPAGNOLO, 1995).

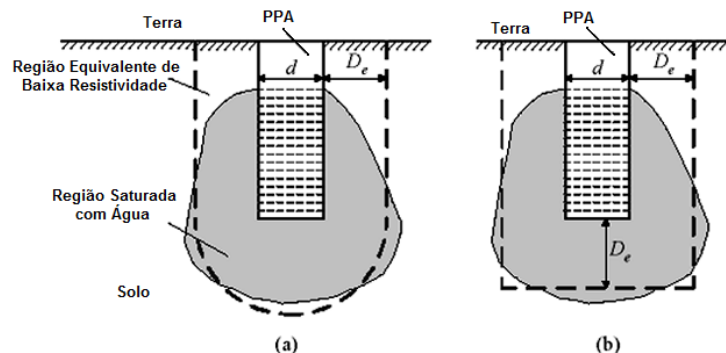


Figura 14: Região equivalente de baixa resistividade do PPA com forma de (a) cilindro e semi-esfera na base e (b) cilindro (YU et al., 2005).

### 7.1. RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DO SOLO PARA O PPA

Como discutido anteriormente, o PPA pode ser analisado como um eletrodo vertical de aterramento. Se o solo é considerado como uniforme, então a resistividade equivalente da terra para o poço de aterramento pode ser calculada por (ANSI/IEEE Std. 81-1983, 1983):

$$\rho_e = \frac{2\pi RL}{\ln \frac{4L}{r} - 1}. \quad (4)$$

em que,  $R$  é a resistência de aterramento do PPA,  $r$  e  $L$  são o raio e o comprimento do poço, respectivamente. Se a resistividade equivalente analisada de um PPA é menor que de outro, então esse PPA tem melhor efeito de decréscimo da resistência de aterramento. As resistividades equivalentes do solo dos dez PPA foram analisadas e apresentadas na Tabela III, as quais são muito menores do que a resistividade analisada de resultados de testes. A razão disto é que o efeito da região do solo com saturação de água deve ser considerado.

Tabela III: Resistividades Equivalentes do Solo do PPA (YU et al., 2005).

Nº.	Profundidade do PPA (m)	Resistência de Aterramento do PPA ( $\Omega$ )	Diâmetro do Eletrodo de Aterramento (m)	Resistência Aparente Equivalente ( $\Omega.m$ )
N1	12	5,3	0,05	60,8
N2	12	5,2	0,05	59,7
N3	11	8,4	0,05	77,7
N4	12	6,3	0,05	72,3
N5	15	8,5	0,05	118,1
N6	12	5,1	0,05	58,6
N7	12	5,2	0,05	59,7
N8	14	5,3	0,05	69,4
N9	15	5,0	0,05	69,5
N10	15	5,1	0,05	70,9

Não há água armazenada no PPA número 5, por isso sua resistividade equivalente é maior do que as dos outros poços. Mas, ainda continua sendo muito menor do que a resistividade equivalente obtida do sistema de aterramento antes da adição dos PPA. A razão disso, é que o PPA faz com que a água se mova para a região próxima ao mesmo, e ainda que não haja água armazenada no PPA, a umidade do solo é aumentada na região em torno do mesmo.

## 7.2. COMPARAÇÃO ENTRE ELETRODO VERTICAL DE ATERRAMENTO E O PPA

De acordo com o modelo de múltiplas camadas de solo (KINDERMANN-CAMPAGNOLO, 1995), considerando os PPA como sendo eletrodos

verticais de aterramento<sup>2</sup> e suas respectivas resistências de aterramento analisadas por software de análise numérica, as resistências de aterramento dos eletrodos verticais de aterramento são 1,57 a 3,27 vezes às dos poços de aterramento. Os resultados analisados são ilustrados na Tabela IV.

Tabela IV: Resistências de Aterramento Analisadas dos Eletrodos Verticais de Aterramento (YU et al., 2005).

Nº.	Profundidade do PPA (m)	Resistência de Aterramento do PPA (A)	Resistência de do Eletrodo de Aterramento Popular (B)	A/B
N1	12	5,3 Ω	16,64 Ω	3,14
N2	12	5,2 Ω	16,64 Ω	3,20
N3	11	8,4 Ω	18,19 Ω	2,17
N4	12	6,3 Ω	16,64 Ω	2,64
N5	15	8,5 Ω	13,32 Ω	1,57
N6	12	5,1 Ω	16,64 Ω	3,27
N7	12	5,2 Ω	16,64 Ω	3,20
N8	14	5,3 Ω	14,26 Ω	2,69
N9	15	5,0 Ω	13,32 Ω	2,66
N10	15	5,1 Ω	13,32 Ω	2,61

A resistência de aterramento medida na subestação após a adição de dez PPA à malha de aterramento é 0,5 Ω. Se a resistência de aterramento da malha de aterramento da subestação deveria ser diminuída para 0,5 Ω por dez eletrodos verticais de aterramento, então os comprimentos de todas as hastes deveria ser de 40 m. Isto mostra que o PPA é muito eficiente para a diminuição da resistência de aterramento da subestação. Para o sistema de aterramento com PPA, apresentado na Figura 11, a análise numérica da resistência de aterramento do sistema de aterramento é 0,528 Ω, o que é muito próximo de 0,5 Ω, medida por teste de campo.

Como o princípio do PPA é de absorver a água subterrânea para sua proximidade, só deve ser usado em regiões com água subterrânea. Se não existe água subterrânea, o PPA terá a mesma eficácia de eletrodos verticais de aterramento.

<sup>2</sup> O eletrodo vertical de aterramento significa uma haste de aterramento com o mesmo comprimento e diâmetro do PPA.

## 8. CONCLUSÕES

Este trabalho trouxe à esfera da graduação um método alternativo de aterramento elétrico e redução de resistência de terra, bem como realizou uma breve revisão bibliográfica sobre estes temas.

A utilização dos PPA para diminuição da resistência de aterramento é, principalmente, para mudar a direção do movimento da água subterrânea em torno do eletrodo de aterramento. Para tanto, toma-se proveito da gravidade, do efeito capilar da água e do vapor de água no solo para aumentar a umidade, reduzindo a resistividade do solo no entorno do PPA.

Os PPA usam tubos de metal como eletrodos, reunindo boas características dos vários tipos de aterramento para sistemas de potência, tais como robustez mecânica e capacidade anticorrosiva. Uma grande quantidade de água é filtrada através dos furos feitos no tubo de aço, que além de condutores de aterramento são também as paredes dos PPA.

O experimento de campo relatado por Gang Yu e Jingping Yuan foi executado com a reconstrução da malha de aterramento de uma subestação de 110kV. Os resultados experimentais indicam que os desenhos dos eletrodos de aterramento podem fazer uso eficaz da água subterrânea para diminuir a resistência do aterramento. O diâmetro da região equivalente com baixa resistividade, obtido de análises numéricas com o modelo das multicamadas do solo (KINDERMANN-CAMPAGNOLO, 1995) foi de 0,57 m a 4,13 m, e a média dos diâmetros foi de 2,93 m. O diâmetro dos PPA foi de 50 mm, então os diâmetros equivalentes foram de 11,4 a 40,8 vezes o dos PPA. Com isso podemos concluir que os PPA são muito eficazes para solo que contém alguma quantidade de água subterrânea, boa permeabilidade e grande fração de espaço vazio, especialmente com estrutura de multicamadas.

Todavia, o método tem desvantagens, pois depende da água subterrânea. Se não existe água subterrânea, o PPA terá a mesma eficácia de eletrodos verticais de aterramento. Além disso, o custo de implantação do método é elevado frente a outras alternativa, pois exige máquina perfuradora para instalação dos tubos de aço, e é preciso se fazer um estudo geológico do terreno da subestação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HE, J.; YU, G.; YUAN, J.; ZENG, R.; ZHANG, B.; ZOU, J.; GUAN, Z. **Decreasing Grounding Resistance of Substation by Deep-Ground-Well Method**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, Abril 2005.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System**, ANSI/IEEE Std. 81-1983, 1983.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**, IEEE Standard 80-2000, 2000.

KINDERMANN, G., CAMPAGNOLO, J, **Aterramento Elétrico**, 3<sup>a</sup> Ed. Sagra Luzatto, 1995.

LINEBACK, J.A., **Quaternary Deposits of Illinois**. Champaign, IL: Illinois State Geological Survey, 1979. Disponível em: <http://www.museum.state.il.us/exhibits/larson/loess.html>

MENG, Q. B.; HE, J. L., DAWALIBI, F. P.; MA, J., **A new methods to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity regions**, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, no. 2, pp. 911–916, 1999.

VISACRO FILHO, S., **Aterramentos Elétricos**, Artliber Editora Ltda, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Medição de Resistividade do Solo: Método dos Quatro Pontos**, ABNT NBR-7117, Dez. 1981.