

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo propor a revisão da metodologia de dimensionamento do sistema de aterramento de parques eólicos, que são plantas geradoras que ocupam grande área e são usualmente construídas em terrenos de elevada resistividade (praias ou topo de morros). Os aerogeradores são estruturas muito expostas à incidência de raios, devido à sua altura e aspecto geométrico, além de estarem situados em terrenos descampados. A elevada resistividade do solo resulta em altos valores de resistência de aterramento para os aerogeradores individualmente, e por este motivo o projeto do sistema de aterramento de um parque eólico precisa ser conduzido de forma integrada, considerando a interligação das armaduras das fundações dos aerogeradores entre si e, se for tecnicamente justificável, à malha de aterramento da subestação de interface com o sistema interligado.

Estudos e projetos de sistemas de aterramento de grandes instalações, como complexos industriais, petroquímicas, usinas de energia etc., com dimensões da ordem de centenas de metros, tem sido desenvolvidos utilizando a mesma metodologia utilizada para projetos de malhas de aterramento de subestações, que usualmente têm dimensões na ordem de dezenas de metros.

Neste trabalho são analisadas as limitações da metodologia atualmente em uso para o projeto de aterramento de parques eólicos, e os recursos disponíveis para a implementação de uma metodologia mais compatível com as características deste tipo de planta geradora, tais como:

- técnicas geofísicas para prospecção de resistividade do solo, considerando a modelagem de grandes volumes de solo;
- programas para simulação de aterramentos de grandes dimensões, com modelos de solo de camadas múltiplas e considerando a não-equipotencialidade da malha de aterramento, tendo em vista os cálculos de resistências de aterramento e o mapeamento de potenciais de passo e de toque, para a condição de falta para a terra; e
- recursos para reduzir a impedância transitória dos aterramentos dos aerogeradores, tendo em vista a melhoria do desempenho do aterramento frente a descargas atmosféricas diretas e indiretas.

1 CARACTERÍSTICAS DOS PARQUES EÓLICOS

O parque eólico típico possui a seguinte estrutura:

- diversas carreiras de aerogeradores separados entre si por cerca de 400m de distância, que geram energia em baixa tensão (400V a 600V);
- em um cubículo na base de cada aerogerador a tensão é elevada para 34,5 kV, e é feita uma interligação com uma rede subterrânea de média-tensão;
- cada parque é servido por três circuitos de média-tensão, cada um atendendo a um grupo de aerogeradores, que levam a energia gerada para uma subestação de interligação com o sistema (34,5 – 230 kV), podendo a linha de interligação com a SE ser subterrânea ou aérea;
- as bases dos aerogeradores são interligadas por cabo de cobre nu de 70 mm², que acompanham o mesmo encaminhamento da linha subterrânea de média-tensão, podendo esta linha de aterramento se estender ou não até a SE de interligação;
- o aterramento de cada aerogerador é constituído por dois anéis de cabos de cobre de 70 mm², interligados entre si e à armadura da fundação da estrutura, podendo estes anéis serem reforçados por hastes de aço-cobreado e também por condutores radiais adicionais, destinados à melhoria do desempenho para aterramentos impulsivos (quedas de raios).

¹ Engenheiro Eletricista e Mestre em Sistemas de Potência - PAIOL Engenharia

² Geofísico – Geoanalysis Consultoria Geofísica

³ Engenheiro Eletricista - CGT

A figura 1.1 apresenta dois modelos de aterramento de aerogeradores, para simulação em computador, tendo em vista o cálculo do valor de projeto da resistência de aterramento e o mapeamento de potenciais no solo, tendo em vista o cálculo dos valores de potenciais de passo e de toque. As resistências de aterramento típicas de bases de aerogeradores podem situar-se na faixa de 3Ω a 60Ω , dependendo da resistividade do solo local (que varia em uma ampla faixa de $350 \Omega.m$ a $7600 \Omega.m$).

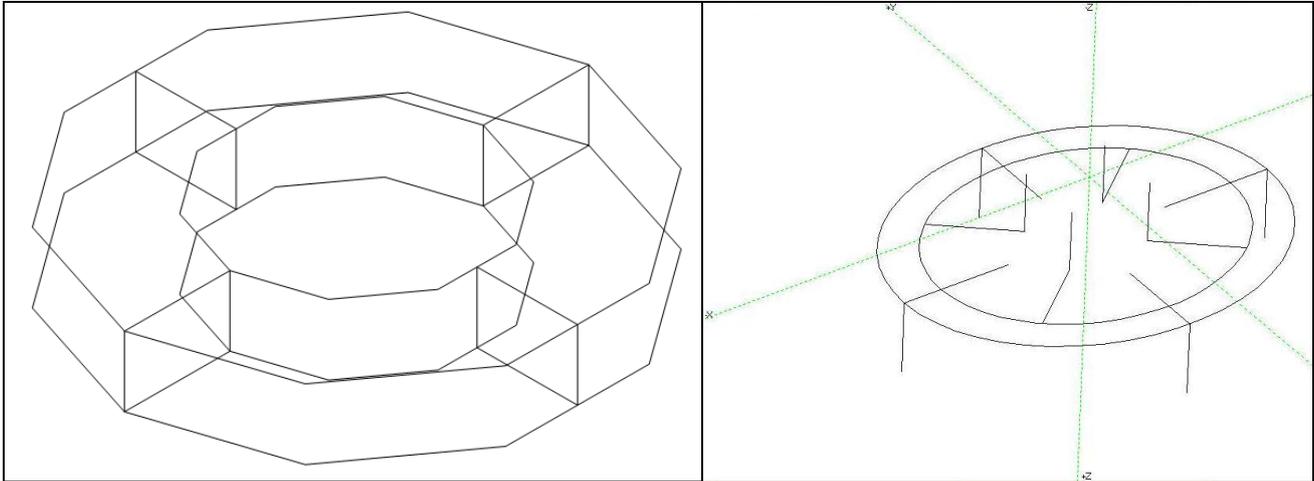


Figura 1.1: modelos de aterramentos de bases de aerogeradores.

2 RESTRIÇÕES DAS PRÁTICAS USUAIS DE PROJETO E COMISSONAMENTO

2.1 RESTRIÇÕES À METODOLOGIA DE PROJETO TÍPICA

Os pressupostos que são válidos para o dimensionamento da malha de aterramento de uma subestação, não se aplicam ao sistema de aterramento de uma planta de geração de energia com o porte de um parque eólico. Os modelos de solo são obtidos com base em poucas medições de resistividade (considerando as grandes áreas envolvidas), feitas usualmente pela técnica de Wenner com espaçamentos que tipicamente vão até 32m. Os estudos e projetos de sistemas de aterramento, quando utilizam programas digitais, consideram a malha equipotencial.

Também não é comum a consideração do efeito do acoplamento dos condutores de média-tensão com o condutor de aterramento, que costumam ser engerrados juntos, na mesma vala.

Entre os parâmetros que devem ser considerados para estas instalações que ocupam grande área, cabe destacar:

- não equipotencialidade da malha de aterramento, que devido às suas grandes dimensões, apresenta significativas diferenças de potencial, mesmo para curto-circuitos à frequência comercial (60Hz), e
- necessidade de modelos de solo que sejam representativos do volume de solo que efetivamente estará envolvido no processo de dissipação de corrente no solo, o que para malhas grandes podem atingir profundidades da ordem de até alguns quilômetros.

Dentre outros aspectos que devem ser considerados, vale ressaltar a contribuição das armaduras das fundações dos aerogeradores, além da necessidade de promover a integração dos aterramentos dos diversos aerogeradores entre si e, quando tecnicamente recomendável, à malha da subestação de integração com a rede básica.

O estudo da integração dos aterramentos dos aerogeradores entre si e com a subestação de interligação com o sistema deve ser realizado considerando as premissas acima citadas, de modo que se possa quantificar de forma realista a distribuição das parcelas das correntes de curto-circuito para a terra nos componentes do sistema.

O projeto de sistemas de aterramento considerando a premissa de não equipotencialidade da malha é prática corrente no exterior (USA e Canadá), sendo, porém, inédito no Brasil. O uso de técnicas de geofísica que permitam a obtenção de modelos de solo mais complexos, compatíveis com malhas de aterramento de grandes dimensões, é restrito a projetos específicos (sistemas de transmissão HVDC, por exemplo).

2.2 RESTRIÇÕES ÀS PRÁTICAS DE COMISSIONAMENTO UTILIZADAS

É frequente que as medições de resistência de aterramento de aerogeradores e de potenciais de passo e de toque, realizadas quando do comissionamento das instalações, sejam pouco confiáveis [Ref. 2].

Para a correta condução das medições de resistência de aterramento, há que se construir a curva de resistências medidas desde as proximidades da base do aerogerador, até as proximidades do eletrodo remoto de corrente. Se esta curva não apresentar um patamar bem definido, onde se possa fazer a leitura da resistência do aterramento, há que se deslocar o eletrodo remoto de corrente para mais longe do aerogerador e reiniciar o processo de medição.

O que se vê, na prática, é a montagem do arranjo de medição e a execução de no máximo três pontos de medição, sem a construção da curva, fazendo-se uma média do valor medido e tomando-se este valor como a resistência de aterramento do aerogerador.

Como os solos onde tipicamente são construídos os parques eólicos, apresentam resistividade elevada, especialmente em áreas arenosas, tem-se que usualmente o eletrodo remoto de corrente estará localizado a uma distância insuficiente para garantir o desacoplamento com a base do aerogerador, o que resulta que o valor de resistência medido é, na verdade, apenas uma fração do valor real. Toma-se então a parte pelo todo e conclui-se que a resistência é adequada.

Cabe observar que quanto maior a resistividade do solo, mais distante precisa ser cravado o eletrodo remoto de corrente para que a medição seja correta. Para solos de elevada resistividade, a distância adequada entre o eletrodo de medição e a base do aerogerador pode ser de bem mais do que 15 vezes o diâmetro deste último.

Outra situação que ocorre no campo é das medições serem feitas sem que o pessoal encarregado das mesmas saiba se o aerogerador já está interligado ou não aos aerogeradores vizinhos, por meio de um cabo de cobre nu enterrado. A medição somente seria válida se este cabo ainda não tiver sido lançado, pois caso contrário, mesmo que seja feita a desconexão deste cabo, a sua presença já invalidará a medição.

No caso das medições de potenciais de passo e de toque a dificuldade é a mesma, já que a referência da fonte que é utilizada para simular o curto-circuito precisa ser igualmente distanciada da base do aerogerador, sob o risco de se medirem apenas frações dos verdadeiros valores de potenciais de passo e de toque. Também neste caso precisa-se levar em conta a existência do cabo terra de interligação com os demais aerogeradores, e o alinhamento do mesmo com relação ao arranjo de medição.

Pode-se concluir que a condução dos testes de comissionamento do sistema de aterramento de um parque eólico depende da etapa da construção em que as medições são conduzidas, da topologia do sistema de aterramento e das características de solo locais. A complexidade deste processo exige uma equipe que saiba muito bem o que está fazendo, que conheça bem o projeto de aterramento e os procedimentos de medição, e que disponha dos recursos necessários para a condução das medições considerando as diferentes restrições que serão encontradas no campo.

3 CIRCULAÇÃO DE CORRENTES NO SOLO

O globo terrestre está sujeito a inúmeros processos que, dentre outros efeitos, resultam em manifestações elétricas, e que dão origem a campos elétricos e magnéticos e à circulação de correntes (e, portanto, à ocorrência de diferenças de potenciais) nas diversas camadas da atmosfera, nos oceanos, na crosta terrestre, no manto (interno e externo) e na camada externa do núcleo da Terra.

Além das injeções no solo de correntes de natureza impulsiva, associadas às quedas de raios, cabe destacar dois tipos de correntes elétricas associadas à operação de redes de energia:

- correntes contínuas – com origem em sistemas de transmissão HVDC;
- correntes alternadas de baixa frequência – associadas a sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

No caso de uma linha monofásica de corrente alternada ou, mais tipicamente, uma linha de transmissão trifásica em condição de curto-circuito fase-terra em uma das suas extremidades, tem-se que o circuito fecha-se pelo solo, com a corrente circulando entre os dois pontos de aterramento, acompanhando o traçado da linha. Este efeito faz com que a corrente tenda a circular distribuindo-se a partir da superfície, conforme ilustrado nas figuras 3.1b e c, onde se pode observar que a seção de solo (área A1) por onde circulará a corrente será inversamente proporcional à frequência da corrente alternada. É interessante observar na Figura 3.1, que para uma mesma frequência, a área A1 cresce com a resistividade do solo de tal modo, que a sua resistência permanece constante.

$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 f}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$	$De = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$
--	----------------------------------

Tabela 3.1: profundidades de penetração da corrente (δ) e equivalente de retorno (De), em metros, em função da resistividade do solo (ρ) e da frequência (f).

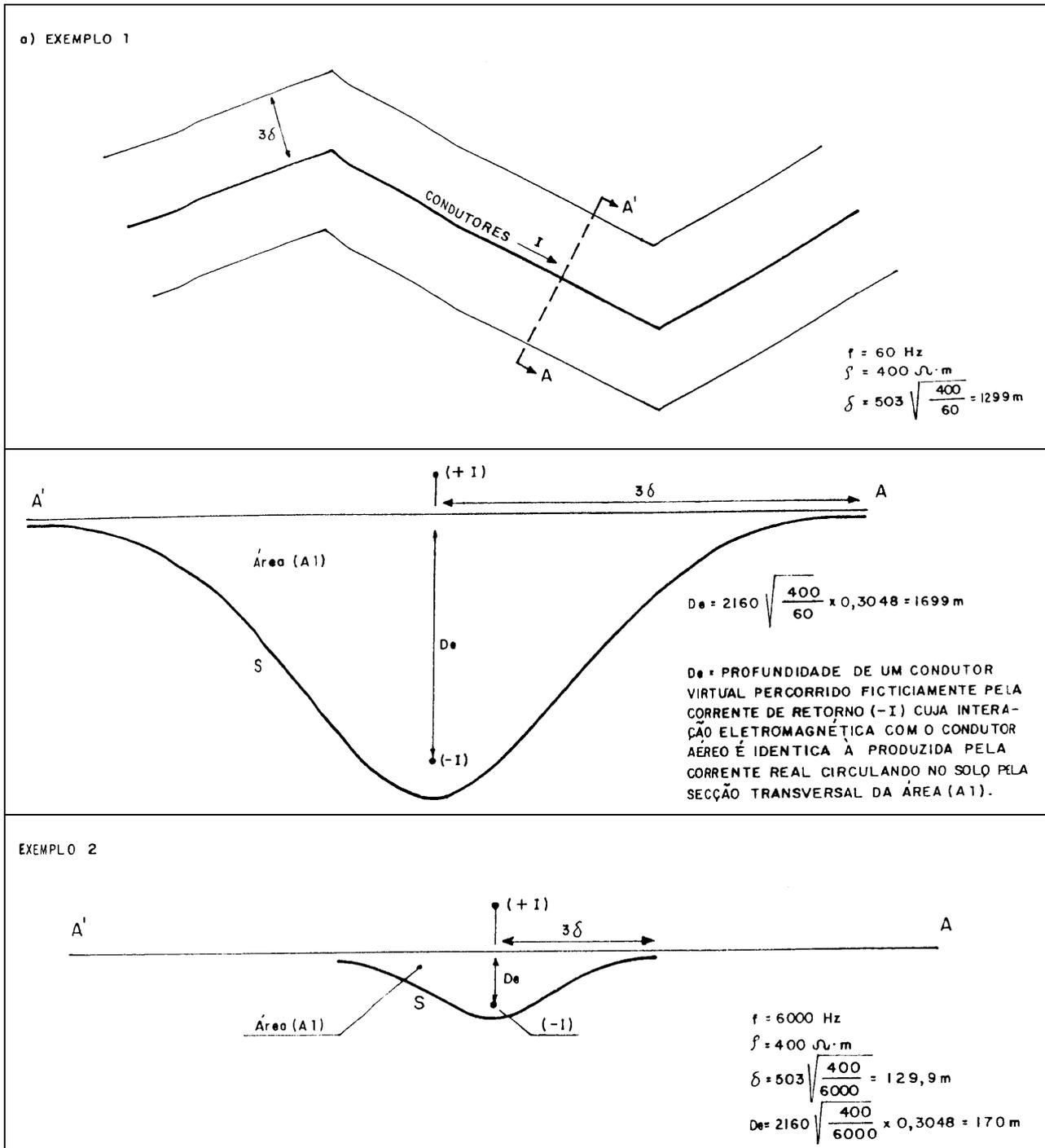


Figura 3.1: padrão de circulação de corrente de retorno pelo solo de uma linha de transmissão em baixa frequência.

A seção de solo envolvida na circulação de correntes alternadas de retorno pode ser avaliada por dois parâmetros, a profundidade de penetração (δ) e a profundidade equivalente de retorno (D_e), que podem ser calculados pelas expressões constantes da figura 3.1.

O parâmetro δ caracteriza o efeito “skin”, que se manifesta sob a forma de redução na profundidade de penetração da corrente no solo, e representa a profundidade (em metros) em que a densidade de corrente por unidade de seção de solo é reduzida pelo fator $1/e = 1/2,718 = 0,3679$. Este decaimento exponencial da densidade de corrente também se manifesta lateralmente, definindo a largura da faixa de circulação de corrente sob a LT, podendo-se dizer que a densidade de corrente no solo será desprezível a uma distância superior a 3δ , para cada lado do eixo da linha.

D_e é um termo conhecido como Profundidade Equivalente de Retorno, e fisicamente representa a profundidade de um condutor virtual que transporta a corrente de retorno $-I$, cuja interação eletromagnética com o condutor aéreo da LT é idêntica à produzida pela corrente que circula pela seção transversal de solo (área A_1), e que acompanha o traçado da LT, conforme ilustrado na figura 3.1. Este parâmetro tem origem na formulação de Carson, para a correção de parâmetros de linhas de transmissão para um solo não ideal (de resistividade não nula).

Estes conceitos são fundamentais para o cálculo de parâmetros longitudinais de linhas de transmissão (resistência e indutância), que são influenciados pela resistividade do solo na região por onde a linha passa.

A aplicação destas expressões para a corrente contínua (frequência zero) resulta em valores infinitos para estes dois parâmetros, o que pode ser interpretado como o desacoplamento entre os eletrodos situados nas duas extremidades da linha HVDC.

Os exemplos de cálculo 1 e 2 apresentados na figura 3.1 demonstram que se a resistividade do solo sob uma linha de transmissão operando à frequência de 60 Hz for de $400 \Omega \cdot m$, então as profundidades de penetração da corrente e de retorno desta linha serão, respectivamente, de 1300 m e 1700 m. Se por hipótese esta linha estivesse operando a uma frequência de 6000Hz, então as profundidades de penetração da corrente e de retorno desta linha se reduziriam, respectivamente, para 130 m e 170 m.

Na prática a análise é bem mais complexa, pois o subsolo nunca tem resistividade uniforme, apresentando camadas e volumes de diferentes resistividades, em função da geologia de cada região.

Considerando que as medições de resistividade do solo, tendo em vista projetos de aterramento de instalações de grande porte, nunca são feitas com espaçamentos superiores a 64m, tem-se que os modelos de solo usualmente obtidos são completamente inadequados, pois não são capazes de representar sequer uma pequena fração do volume de solo envolvido no processo de dissipação de correntes.

4 MODELOS DE SOLO PARA ESTUDOS DE ATERRAMENTO

Para o engenheiro, o termo solo identifica todos os sedimentos não consolidados acima do substrato rochoso. Na engenharia civil, a mecânica dos solos estuda o comportamento do solo quando submetido a cargas e esforços associados a estruturas de engenharia. Para o engenheiro electricista, o solo é o meio por onde podem circular correntes elétricas associadas à operação de redes de energia, ou onde serão enterrados eletrodos de sistemas de aterramento, assim como todo o volume deste meio eletricamente influenciado por este sistema de aterramento.

Uma classificação mais simples, mais adequada do ponto de vista da engenharia, divide a superfície da crosta terrestre em três camadas:

- solo - camada superficial, que contém matéria orgânica e que pode suportar a vida;
- subsolo – zona de rochas fragmentadas e parcialmente decompostas; e
- substrato rochoso - rocha matriz maciça ou fissurada, mas não fragmentada.

A resistividade é o parâmetro mais importante na análise do comportamento elétrico do solo, sendo determinante do desempenho de eletrodos de aterramento à baixa frequência. Estudos e projetos de aterramento exigem o conhecimento da resistividade do solo, parâmetro este essencial para o cálculo de resistências de aterramento e de potenciais na superfície do solo.

As medições de resistividade do solo subsidiam a obtenção de um modelo de solo, que consistirá na melhor representação possível do meio no qual estão imersos os eletrodos de aterramento, para efeito de cálculos de resistências ou para simulação digital. O modelo a ser obtido será limitado pela quantidade e qualidade das medições de resistividade do solo disponíveis, e pelos recursos a serem utilizados nos cálculos e simulações.

A norma ABNT que regulamenta a metodologia de medição de resistividade para a modelagem do solo, tendo em vista estudos de aterramento, é a NBR-7117/1981. A revisão desta norma foi concluída este ano (2012), e o seu texto recomenda medições com espaçamentos de eletrodos que vão até 64m, mas que podem ser expandidos na dependência das características específicas do aterramento. Esta norma está focada em modelos de solo para instalações não muito grandes, tipicamente subestações de energia, sites de telecomunicações etc.

Os projetos de aterramento de parques eólicos têm sido desenvolvidos com base em modelos de solo obtidos a partir de medições com espaçamentos bastante limitados (chegando ao máximo de 32m), completamente incompatíveis com as dimensões dos empreendimentos. Não se pode afirmar se estes projetos apresentam resultados conservativos ou pessimistas, já que é totalmente desconhecida a resistividade das camadas mais profundas do solo em cada local. Cabe observar, porém, que como na maioria das vezes as medições de resistividade são muito superficiais para atingir o substrato rochoso, pode-se desconfiar que a maioria dos projetos de aterramento faz uso de modelos de solo mais otimistas do que a realidade. Com relação à aproximação de equipotencialidade da malha para aterramentos de grandes dimensões, sabe-se que é uma premissa que também resulta em cálculos otimistas, com resistências de aterramento mais baixas do que as reais.

A geofísica dispõe de um amplo leque de tecnologias para prospectar o subsolo a partir da superfície ou para a perfilação de poços – sísmico, gravimétrico, magnético, elétrico, eletromagnético e radiométrico. Os métodos elétricos e eletromagnéticos incluem diversas técnicas de medição (Wenner, Schlumberger, TDEM, Magneto-Telúrico etc.), que combinadas permitem a obtenção de modelos de solo profundos (da ordem de quilômetros de profundidade).

4.1 MODELOS ELÉTRICOS DA LITOSFERA (CROSTA TERRESTRE + MANTO SUPERIOR)

Uma modelagem elétrica da crosta terrestre, na sua forma mais simples e tendo o manto como substrato, foi proposta por Kimbark [Ref. 4], em 1971, com o seguinte modelo genérico de três camadas:

- 1ª camada – resistividade média (10 a $10^4 \Omega.m$) - com até 10 quilômetros de profundidade, composta por solo e rochas com fissuras e poros, contendo água com sais minerais dissolvidos, que atua como um eletrólito fraco;
- 2ª camada – resistividade elevada (10^4 – $10^8 \Omega.m$) – com espessura da ordem de 10 a 30 km, consistindo de rocha submetida à tamanha pressão, que os poros e fissuras estão compactados e não contém quase nenhuma água;
- 3ª camada – resistividade baixa (1 a $100 \Omega.m$) – até a interface crosta-manto, não tem umidade mas as rochas são condutivas devido à temperatura elevada.

Medições feitas na Suécia, com eletrodos espaçados de até 1100 km, revelaram um modelo de solo consistente com o acima proposto:

- 1ª camada (crosta) – $4000 \Omega.m$ – 1 km de espessura;
- 2ª camada (crosta) – $14000 \Omega.m$ (granito) – espessura de 30 km; e
- 3ª camada (manto) – $800 \Omega.m$ – infinita.

Mais recentemente (2007) Thunehed [Ref. 6] propôs um modelo de solo genérico estratificado em 4 camadas:

- 1ª camada – material não consolidado de baixa resistividade (areia, argila etc.), com 10 a 40 m de espessura;
- 2ª camada – sedimentos mais antigos, consolidados, dentro do lençol freático, de baixa resistividade - 40 a $200 \Omega.m$, com 50 a 1000m de espessura;
- 3ª camada – embasamento rochoso, composto de granitos, gnaisses e rochas semelhantes, de elevada resistividade - 2500 a $25000 \Omega.m$, com 5 a 100 km de espessura; e
- 4ª camada – litosfera - camadas inferiores da crosta e camada superior rígida do manto – de resistividade de 500 a $5000 \Omega.m$.

A diferença entre os modelos de Kimbark e de Thunehed é que este último dividiu a 1ª camada do Kimbark em duas – sedimentos não consolidados e consolidados.

5 MÉTODOS DE EXPLORAÇÃO GEOFÍSICA

Geofísica pode ser definida como “ciência que se ocupa do estudo das estruturas do interior da Terra, e da localização nesta, de corpos delimitados pelos contrastes de algumas de suas propriedades físicas com o meio circundante, usando medidas tomadas em sua superfície, interior de furos de sondagens e levantamentos aéreos”. É uma ciência embasada na Geologia e na Física, utilizando os recursos da Física para resolver problemas de Geologia. Os fenômenos físicos associados aos processos na Terra são: campo magnético terrestre, fluxos geotérmicos, propagação de ondas sísmicas, gravidade, campos elétrico e eletromagnético, correntes elétricas telúricas e radioatividade.

Em função do parâmetro físico utilizado, a Geofísica utiliza vários métodos, com destaque para Gravimétrico, Sísmico, Magnetoelétrico e Geométrico. Os processos elétricos que ocorrem no subsolo podem ser utilizados para estudos de geologia básica, aplicada (prospecção de reservas minerais) e ambiental, para a hidrogeologia, geotecnia etc.

São abordados a seguir os métodos de geofísica que mensuram a resistividade elétrica do solo, que é o parâmetro necessário para a obtenção de modelos de solo para estudos de aterramentos de grandes dimensões, como malhas de instalações industriais e eletrodos de aterramento de sistemas de transmissão em corrente contínua. Apesar dos métodos que medem a resistividade do solo (eletroresistividade e magnetotelúrico) serem os de aplicação mais direta, pois já tem como saída o parâmetro resistividade, tem-se que os outros métodos podem ajudar complementando o mapeamento do subsolo e para calibrar o modelo de solo obtido (espessuras dos estratos de solo, localização de falhas etc.).

Os recursos de prospecção geofísica podem ser complementados com as seguintes investigações:

- levantamento da história geológica da região;
- mapeamento geológico de superfície, para o conhecimento da litografia local;
- perfuração de poços e perfilagem elétrica dos mesmos, para a verificação do modelo geológico obtido;
- coleta de informações levantadas pela geotecnia (sondagens à percussão etc.), utilizadas para o projeto das fundações dos aerogeradores.

5.1 ELETRORESISTIVIDADE

A eletroresistividade parte do conhecimento do aspecto geométrico formado por arranjos de eletrodos de corrente e de tensão, e de um conjunto de valores de correntes injetadas e de potenciais medidos, para inferir a estrutura do subsolo. As técnicas de Wenner e Schlumberger enquadram-se nesta categoria de levantamento geofísico.

O método da Eletroresistividade (ER) emprega uma fonte artificial de corrente elétrica contínua (I) ou de frequência muito baixa (poucos ou fração de Hz), e 4 eletrodos, dois de corrente e dois de potencial, com arranjos diversos, que resultam em diferentes recursos de mapeamento da resistividade do solo. As técnicas de aquisição de dados podem ser de sondagens, caminhamentos ou perfilagens:

- sondagem elétrica vertical (SEV) - unidimensional (1D) – quando se deseja, para um mesmo ponto, a prospecção da variação vertical (em profundidade) da resistividade do solo;
- caminhamento elétrico (tomografia do subsolo) - com arranjo dipolo-dipolo (CE-DD) com aquisições bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D) - quando o objeto de interesse é o mapeamento da resistividade do subsolo; e
- perfilagem – quando as medições são realizadas em poços.

A resolução e profundidade dependem do arranjo e dos espaçamentos adotados entre os eletrodos em superfície. Dentre os arranjos possíveis dos quatro eletrodos em superfície destacam-se:

- Wenner e Schlumberger – mais adequados para sondagens elétricas verticais - onde os eletrodos são alinhados, sendo os de corrente externos e os de tensão internos, sendo deslocados dois a dois, simetricamente com relação ao centro do arranjo; e
- dipolo-dipolo – adequado para caminhamento elétrico - com os eletrodos de corrente e tensão agrupados dois a dois, permanecendo os eletrodos de corrente fixos, com o deslocamento dos eletrodos de tensão.

Os profissionais de engenharia elétrica estão acostumados à utilização da técnica de Wenner, para a medição de resistividade do solo, tendo em vista a elaboração de estudos de aterramento de subestações. Os espaçamentos utilizados nestas medições raramente atingem 64m, o que significa um distanciamento máximo de 192m entre os eletrodos de corrente. Para este espaçamento, pode-se dizer, grosso modo (uma vez que a profundidade de penetração da corrente será função da resistividade do solo e da frequência de operação do equipamento de medição), que foi prospectada uma camada de solo da ordem de até 64m de profundidade.

Os profissionais de geofísica utilizam mais a técnica de Schlumberger, especialmente quando estão envolvidos espaçamentos maiores (que podem chegar até 2000m entre eletrodos de corrente). Esta técnica movimenta, a cada medição, apenas os dois eletrodos externos. Os eletrodos internos tem o espaçamento aumentado apenas quando o sinal de potencial do solo torna-se muito pequeno, devido ao grande espaçamento entre os eletrodos de corrente.

6 ASPECTOS ESPECÍFICOS DO ATERRAMENTO DE PARQUES EÓLICOS

6.1 NÃO-EQUIPOTENCIALIDADE DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

A figura 6.1 apresenta duas simulações de aplicação de um curto-circuito fase terra na malha de aterramento de uma subestação (360 x 60 m). Ambas foram realizadas com os programas desenvolvidos pela SES - Safe Engineering Services & technologies Ltd. (www.sestech.com), empresa canadense desenvolvedora de software [Ref. 3].

No primeiro caso a simulação foi feita com um programa que considera potencial constante na malha (MALT - que simula condutores ideais e injeção de corrente contínua). No segundo caso foi utilizado um programa mais sofisticado (MALZ), considerando uma malha de cabos de cobre 4/0 AWG e injeção de corrente na frequência comercial (60 Hz) e em um ponto específico da malha.

Pode-se observar que os resultados das duas simulações são bastante distintos. Mesmo para uma subestação que tem dimensão inferior ao espaçamento típico entre dois aerogeradores, o efeito da não equipotencialidade da malha já é significativo. Com muito mais intensidade este efeito será observado em um sistema de aterramento com dimensão da ordem de quilômetros, como é o caso de um parque eólico.

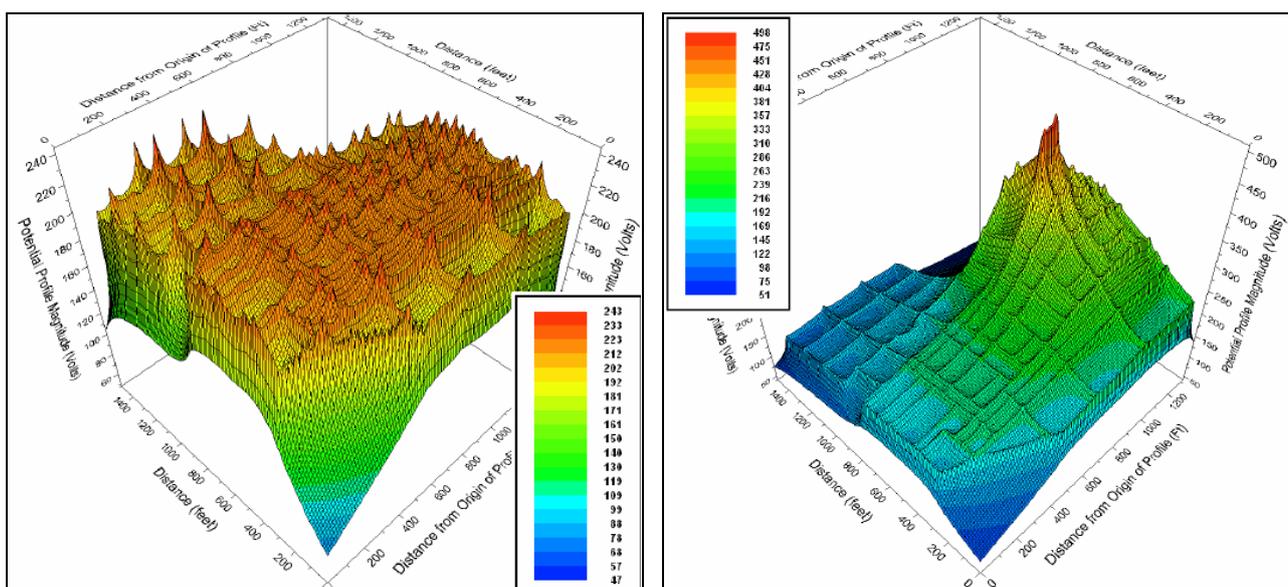


Figure 6.1: perfis de potenciais no solo acima de uma malha de aterramento (360 x 60 m) para duas condições diferentes – malha ideal e malha de cabos de cobre 4/0 AWG.

6.2 QUEDA DE TENSÃO NO CONDUTOR TERRA E ACOPLAMENTO COM AS FASES

Seja uma linha de média-tensão de um parque eólico, acompanhada por um condutor de cabo de cobre nu de 70mm², ambos diretamente enterrados em solo arenoso e seco, de elevada resistividade (7600 Ω.m). As características de uma destas linhas de média-tensão podem ser assim resumidas:

- distância média geométrica entre o cabo terra e os cabos fase – 0,165 metros;
- resistência de aterramento de um trecho de 100m de cabo terra - 92Ω (calculada por simulação no programa AutoGrid, desenvolvido pela SES);
- máximo comprimento a partir da SE de interligação – 6,3km.

Brazil Windpower 2012 – conference & exhibition

O programa AutoGrid calcula os seguintes parâmetros para o conjunto cabo de aterramento – cabo fase de média-tensão:

— Impedância Série (Ω) – $0,6067 + j1,1185 = 1,272\Omega/\text{km}$;

— Impedância Mútua (Ω) - $0,0592 + j0,8069 = 0,809\Omega/\text{km}$.

A relação entre as impedâncias mútua fases - cabos terra e própria do cabo terra resulta na proporção da corrente de falta que é retirada pelo condutor do aterramento devido ao acoplamento com a fase em condição de falta:

— $Z_{mf-gw}/Z_{pgw} = 0,809/1,272 = 0,64$.

Para esta configuração de linha de média-tensão tem-se um fator de 64%, que é a parcela da corrente de falta fase-terra conduzida de volta para o sistema supridor pelos cabos terra, sem circulação pelo solo. Observa-se, portanto, que o condutor de aterramento que acompanha a linha de média-tensão, retira da circulação pelo solo mais da metade da corrente de falta. A consequência deste efeito é a redução dos potenciais de passo e de toque junto às bases dos aerogeradores.

A Constante de Espaço, que define o decaimento da tensão aplicada a uma das extremidades do condutor, pode ser calculada a partir da impedância longitudinal do condutor (z_l) e da sua resistência para a terra (r_t):

— Impedância Série (Ω) = $z_l = 0,0607 + j0,1119 \Omega/100\text{m}$;

— $r_t = 92 \text{ Ohms}/100\text{m}$;

— Constante de Propagação - $\gamma = \sqrt{z_l/r_t} = \alpha + j\beta$

— $CE = 1/\alpha = 1/0,0319 = 31 \times 100\text{m} = 3,1\text{km}$.

Uma constante de espaço de 3,1km para um condutor de 70mm^2 enterrado a 0,9m de profundidade significa que a esta distância da origem, a tensão no condutor será apenas 37% daquela aplicada na sua extremidade.

Se a resistividade do solo for 10 vezes menor, da ordem de $760 \Omega\cdot\text{m}$, então o valor de CE reduz-se para algo da ordem de 0,9 km. Isto significa que não se pode admitir equipotencialidade nem para dois aerogeradores vizinhos, e muito menos para um parque eólico inteiro.

7 METODOLOGIA PROPOSTA PARA O PROJETO DE ATERRAMENTO

O projeto de aterramento de um parque eólico deve iniciar-se com uma campanha de medições de resistividades do solo, abrangendo o seguinte conjunto de medições:

— medições realizadas pela técnica de Wenner com até 64m de espaçamento, no local de construção da subestação de interligação com o sistema e nas locações dos aerogeradores; e

— medições realizadas pela técnica de Schlumberger, com grande espaçamento (se possível com até 2000m entre eletrodos de corrente), em alinhamentos selecionados, preferencialmente coincidentes com as carreiras de aerogeradores.

Estas medições devem ser complementadas com o relatório de avaliação das formações geológicas e da litologia local, elaborado por geólogo, e pelos levantamentos e sondagens feitos pelo pessoal da geotecnia e/ou engenharia civil.

Com base neste conjunto de informações será possível a obtenção de modelos de solo que sejam efetivamente representativos de todo o volume de solo que estará envolvido nos processos de dissipação de correntes elétricas para o solo, quando da ocorrência de curto-circuitos para a terra em algum ponto da rede elétrica.

A partir dos anteprojetos elétrico e civil do parque, será possível então, a definição das alternativas de implantação de sistema de aterramento para o parque eólico, a serem estudadas. Nesta etapa dos trabalhos faz-se necessária a elaboração do estudo de curto-circuito, contemplando a ocorrência de faltas para a terra nos diversos barramentos do sistema de média-tensão (rede de interligação dos aerogeradores) e de alta-tensão (subestação de interligação e SEs do sistema a ela interligadas). Este estudo de curto-circuito deve informar as correntes de curto-circuito fase-terra em todos os barramentos de média e alta-tensão, assim como as contribuições das linhas que alimentam cada ponto de falta.

Finalmente pode-se proceder ao estudo do sistema de aterramento do parque eólico, com a realização de simulações de aplicação de faltas para a terra nos diversos barramentos de média e alta-tensão, que permitirão a definição final da topologia de aterramento do parque e a obtenção das seguintes informações:

— resistências de aterramentos da malha da SE de interligação e dos aerogeradores;

— mapeamento de potenciais de passo e de toque na SE de interligação e nas bases dos aerogeradores;

- potenciais transferidos entre diferentes pontos do parque, quando da ocorrência de faltas para a terra;
- interferências da rede de distribuição de média-tensão e do sistema de aterramento do parque sobre tubulações metálicas enterradas e outras instalações.

Dentre os objetos destes estudos cabe definir se interliga-se, ou não, os aterramentos dos aerogeradores com a malha da subestação de interligação com o sistema, usualmente com tensão nominal de 69kV a 345kV e, possivelmente, com elevado valor de corrente de curto circuito. Esta definição é importante porque frequentemente, a maior contribuição para o curto-circuito nos cubículos de média tensão dos aerogeradores vem do sistema, via SE de interligação, e não dos demais aerogeradores.

8 CONCLUSÕES

A norma IEC-TR61400-24 apresenta diversos quadros com estatísticas de eventos de quedas de raios em aerogeradores, com a ocorrência de danos diversos. O Brasil, sendo um país tropical e com incidência de raios mais alta do que a Europa, encontra-se mais exposto aos prejuízos resultantes das quedas de raios.

A análise apresentada neste trabalho revela que o conhecimento da resistividade das camadas profundas do solo é importante para a modelagem de aterramentos de grandes dimensões, tais como o de parques eólicos. Para aterramentos deste porte, a consideração de equipotencialidade não se aplica, uma vez que diferenças de potenciais significativas entre pontos do aterramento do parque se verificam, quando da queda de raios em aerogeradores e da ocorrência de faltas para a terra na SE de interligação ou na rede de média-tensão.

A obtenção de modelos de solo que contemplem camadas de grandes profundidades exige a realização de uma campanha de medições de resistividade do solo que utilize técnicas de geofísica, recurso que já é aplicado em alguns projetos de aterramentos de grande porte.

A combinação de modelos de solo com profundidades compatíveis com as dimensões dos parques eólicos, e de recursos computacionais que sejam capazes de simular solos complexos, com várias camadas de diferentes resistividades e com malhas não equipotenciais, permitirá a elaboração de estudos que resultarão no projeto de um sistema de aterramento mais adequado e econômico, que se refletirá em uma maior confiabilidade operacional e na segurança de pessoas em geral.

Finalmente cabe lembrar que a norma NR-10 dá força de lei às normas ABNT, e que no caso de ocorrência de acidentes, e especialmente na eventualidade de sequelas em pessoas, a aplicação de uma metodologia que reflita o “estado da arte” traz a segurança jurídica do pleno atendimento às normalizações aplicáveis.

9 REFERENCIAS

- 1) IEC-TR61400-24 - Wind Turbine Generator Systems - Part 24: Lightning Protection.
- 2) “Análise do comissionamento do sistema de aterramento de parques eólicos em conformidade com a norma ABNT NBR 15749/2009” - Eng. Carlos Gustavo C. Branco (Universidade Federal do Ceará) e Eng. Carlos Felipe P. Lima (Suzlon Energia Eólica do Brasil Ltda.), ENIE 2012.
- 3) “Wind Turbine Farm Network Grounding Design Using Integrated Simulation Methods and Techniques” - J. Liu and F. P. Dawalibi, Safe Engineering Services & technologies Ltd., Laval, Canada.
- 4) “Direct Current Transmission” - E. W. Kimbark, John Wiley & Sons (1971)
- 5) Reinhold Rudenberg, Fundamental Considerations on Ground Currents, ANSI/IEEE Std. 80-1986 – Appendix H, p. 241-284.
- 6) “Geophysical and geological pre-investigations for HVDC-electrodes” - H. Thunehed (GeoVista AB), U. Åström e B. Westman (ABB), IEEE PES PowerAfrica 2007 Conference and Exposition, Johannesburg, South Africa, 16-20 July 2007
- 7) BRAGA, Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira. Métodos Geométricos Aplicados: Módulo: Hidrogeologia. Universidade Paulista Estadual – UNESP/Campus de Rio Claro. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE. Departamento de Geologia Aplicada – DGA. Rio Claro.
- 8) BRAGA, Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira. Métodos Geométricos Aplicados: Métodos Geométricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das Águas Subterrâneas: . Universidade Paulista Estadual – UNESP/Campus de Rio Claro. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE. Departamento de Geologia Aplicada – DGA. Rio Claro, 2007.

10 CONTATOS

Paulo Edmundo da Fonseca Freire (paulofreire@paiolengenharia.com.br), Diretor da ELETRO-ESTUDOS Engenharia Elétrica Ltda. (PAIOL Engenharia - 19 3844-4488).

Engenheiro Eletricista (1978) e Mestre em Sistemas de Potência (1984) pela PUC-RJ. Curso “Grounding & Eletromagnetic Fields” na Safe Engineering Services & technologies Ltd. (1994, Montreal, Canadá). Mais de 30 anos de experiência em estudos e projetos de sistemas de aterramento e de proteção contra descargas atmosféricas para redes de energia (SEs, LTs, Usinas Hidroelétricas, Termelétricas e Eólicas, Sistemas HVDC) e instalações comerciais, industriais e de transportes (metrô e ferrovia). Ex-professor da Universidade Gama Filho (RJ) e instrutor/palestrante de cursos e eventos sobre os temas aterramento e proteção contra descargas atmosféricas. Revisor dos temas aterramento e proteção contra descargas atmosféricas nos livros “Instalações Elétricas” do prof. Helio Creder (15/16ª Ed.) e do prof. Arnaldo Niskier (5ª Ed.), e autor de inúmeros trabalhos apresentados em congressos e seminários. Serviços prestados no Brasil, Angola, Cuba e Chile.

Edgar Pane (edgar.pane@geoanalysys.com.br), geofísico e diretor da Geoanalysys Consultoria Geofísica (04112 3941-9005).

Newton Guaraldo (newton@buenomak.com.br), engenheiro eletricista na CGTI (19 3258-9076).