

Parque Eólico Água Doce Medições de Resistividade do Solo e de Resistências de Aterramento

Ariel Costanzo ¹, **Marcos Villarreal** ¹, **Paulo Edmundo Freire** ², **Marco Aurélio Lima** ²,
Edgar Pane ³, **Suzana Domingues** ³

¹ IMPSA WIND/Ingeniería de Proyectos y Presupuestos

² PAIOL Engenharia

³ Geoanalysys

Autor Correspondente – Paulo Edmundo Freire, paulofreire@paiolengenharia.com.br

Rua Argemiro Piva 246, Paulínia, 13.140-426, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de reformulação do sistema de aterramento e de proteção contra descargas atmosféricas do Complexo Eólico Água Doce, que abrange seis parques, totalizando 86 aerogeradores de 1,5 MW. O parque está situado no norte do estado de Santa Catarina, próximo à cidade de Palmas/PR. Nesta região, a camada de solo acima do substrato basáltico da Formação Geológica Serra Geral é muito rasa, com espessura média da ordem de apenas 0,5m, resultando em um solo superficial de elevada resistividade. O projeto foi motivado pelos sucessivos eventos de falhas de equipamentos, especialmente de média tensão, associados a quedas de raios.

O trabalho iniciou-se com um levantamento de resistividades do solo em toda a área do parque, e com a medição de resistências de aterramento de 40% dos aerogeradores, utilizando um terrômetro de alta-frequência (25 kHz). A partir deste levantamento, e considerando os projetos originais de aterramento do parque, foram feitas uma série de simulações com o programa MultiGroundZ (www.sestech.com), à frequência fundamental (60 Hz) e em alta frequência (25 kHz), tendo em vista a avaliação do desempenho do sistema de aterramento dos aerogeradores e das linhas de média-tensão, tanto para condições de curto-circuito como frente a quedas de raios. Com base nos levantamentos de campo e nas simulações realizadas, foram dimensionadas as reformulações destinadas a melhorar o desempenho do sistema de aterramento das instalações do parque.

1 DESCRIÇÃO DO PARQUE EÓLICO ÁGUA DOCE

O complexo eólico Água Doce é constituído por seis parques eólicos, conforme resumo apresentado na Tabela 1. Cada unidade geradora possui 3 pás de 37,5 metros de extensão, suportada por uma torre de 100 metros de altura, fazendo-se necessário um raio livre de interferências de 70 metros da base de cada aerogerador.

Os cubículos são instalados junto às bases das torres dos aerogeradores, sendo do tipo compacto e pré-fabricado para 630A, com transformador isolado a óleo 34,5kV/620V (Δ/Y aterrada), 1600 kVA, e chaves de manobra com proteção por fusível limitador 63 A - 36 kV, em cubículos blindados a 36 kV com isolamento SF6. A conexão entre o cubículo e a linha de 34,5 kV é subterrânea de cabo XLP 70 mm alumínio, com extensão típica entre 60 e 100 m, com terminação em poste de concreto dotado de muflas, chaves seccionadoras, cabo para-raios de aço 5/16" e dispositivos para-raios.

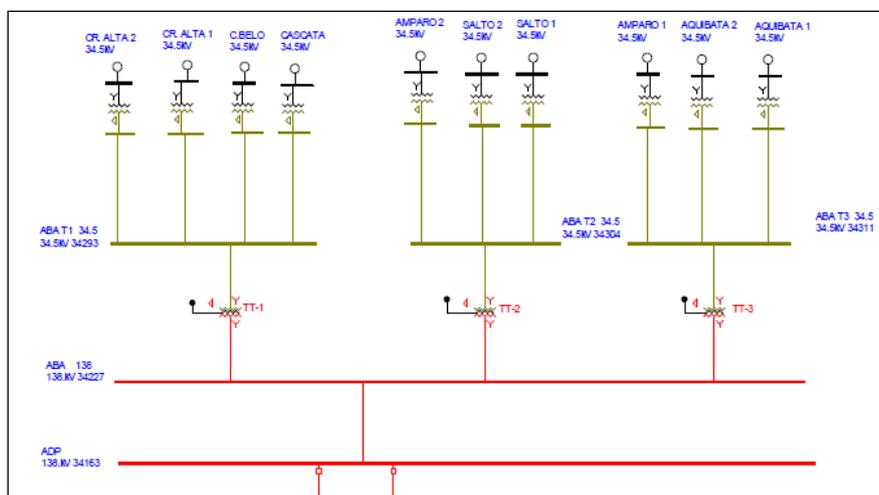


Diagrama 1: diagrama esquemático do parque eólico Água Doce.

Tabela 1: características básicas dos seis parques eólicos.

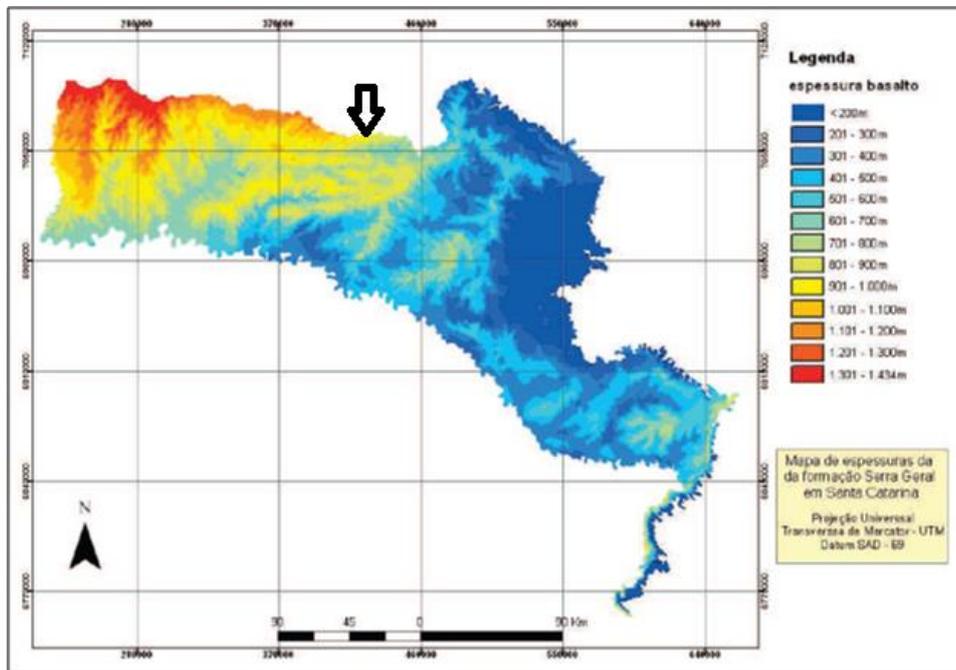
Parque	Aerogeradores	Potência Unitária (MW)	Potência Total (MW)	LT's 34,5 kV
Cascata	4	4 x 1,5	6,0	1
Campo Belo	7	7 x 1,5	10,5	1
Amparo	15	15 x 1,5	22,5	2
Aquibatã	20	20 x 1,5	30,0	2
Cruz Alta	20	20 x 1,5	30,0	2
Salto	20	20 x 1,5	30,0	2
Total	86	86 x 1,5	129,0	10

1.1 GEOLOGIA DA REGIÃO

O Parque Água Doce está situado no norte do estado de Santa Catarina, próximo à cidade de Palmas/PR, quase na divisa entre Santa Catarina e Paraná. Está assentado diretamente sobre a Formação Geológica Serra Geral, integrante da Bacia Sedimentar do Paraná e constituída por extensos derrames vulcânicos. Na região de Água Doce, a camada de solo acima dos basaltos da Formação Serra Geral é muito rasa, o que foi confirmado pelas sondagens realizadas, que revelaram que esta camada de solo tem espessura média da ordem de apenas 0,5m.

A Formação Serra Geral é o resultado de um extenso vulcanismo de natureza fissural que há 130 milhões de anos inundou 75% de toda a Bacia do Paraná com 800.000 km³ de lava, formando pacotes vulcânicos com média de 650m de espessura (Mapa 1). Na região de Palmas, a profundidade da formação Serra Geral é da ordem de 1 km, conforme se pode observar no Mapa 1, ficando o embasamento cristalino da bacia do Paraná a 3.6 km de profundidade.

O Aquífero Fraturado Serra Geral desenvolve-se acima do Aquífero Guarani, conferindo a este último um caráter de aquífero confinado. Os derrames basálticos da Formação Serra Geral tem porosidade e permeabilidade primária desprezíveis, constituindo um aquífero heterogêneo e anisotrópico (figura ao lado).



Mapa 1: mapa de espessuras da formação Serra Geral e localização aproximada do Parque Eólico Água Doce, em Santa Catarina.

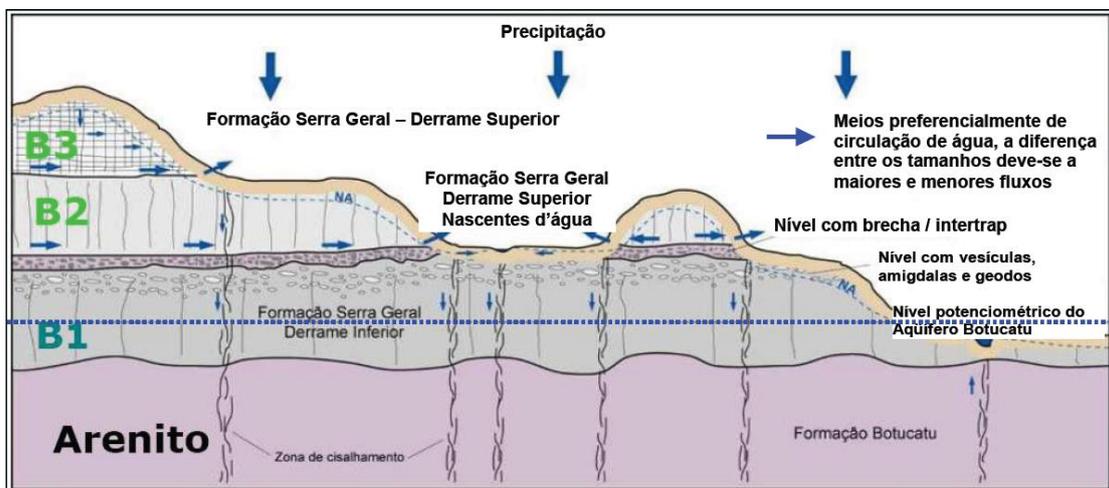


Figura 1: modelo conceitual de recarga do aquífero Guarani pelo aquífero Serra Geral.

1.2 ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES

A observação dos cortes nas estradas (tanto na rodovia como dentro do parque) confirma que a camada de solo acima do basalto da Formação Serra Geral é muito rasa, com menos de um metro de profundidade. Em alguns cortes observa-se o basalto bem íntegro, em outros o basalto apresenta-se já alterado pela meteorização. A avaliação das medições de resistividade de solo realizadas revela, de maneira geral, um solo com as seguintes características típicas:

- 1ª camada – solo superficial raso, com no máximo 1m de profundidade;
- 2ª camada - basalto com alta resistividade (da ordem de 3000 Ωm) e espessura de alguns metros;
- 3ª camada – basalto fissurado no lençol freático, com resistividade média da ordem de 300 Ωm .

O aterramento de cada aerogerador é feito em um anel de cabo de cobre nu de 70 mm², lançado no seu perímetro ($\varnothing 16\text{m}$), diretamente enterrado no solo a 2,2 m de profundidade, e complementado por duas hastes de aço-cobreado (3/4" x 3 m). Deste anel derivam as seguintes interligações (ambas também de cabo de cobre nu de 70 mm²):

- dois anéis internos e concêntricos, interligados por 6 ligações radiais, imersos na base da fundação de concreto e interligados à armadura metálica da mesma, incluindo 16 bulbos de ancoragem com 12 m de profundidade; e
- dois condutores que seguem enterrados por cerca de 10m até o cubículo de média tensão, que abriga o transformador elevador e as chaves fusíveis das linhas de média-tensão.

No cubículo de média-tensão é feita a interligação com os cabos de 25 mm² que vem da linha aérea e/ou dos aerogeradores vizinhos acompanhando os cabos de média-tensão enterrados. O projeto prevê que o valor máximo de resistência de aterramento do aerogerador deve ser de 10 Ω .

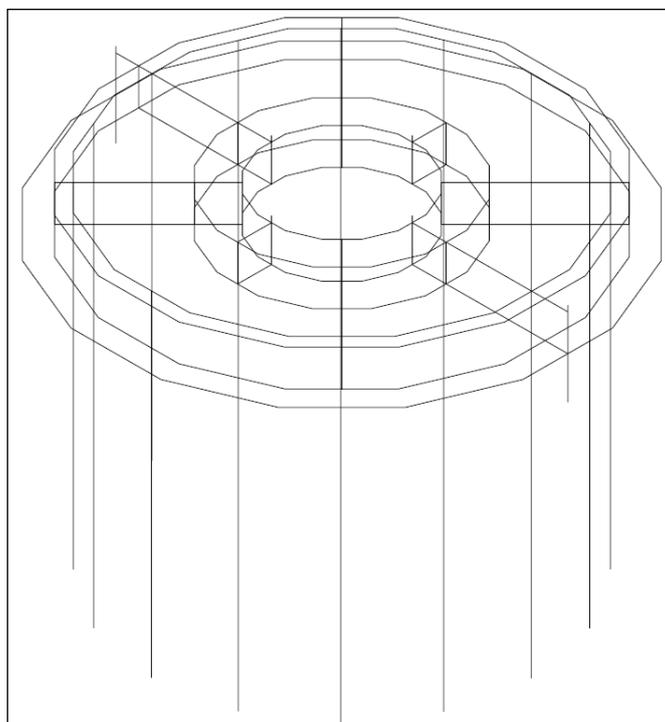


Figura 2: modelo do aterramento de um aerogerador - inclui os anéis de cabo de cobre, as armaduras de aço da fundação e os bulbos de ancoragem.

2 ATERRAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA RAIOS EM PARQUES EÓLICOS

Parques eólicos podem ser classificados como instalações com Exposição Extrema aos efeitos das descargas atmosféricas, uma vez que estão sujeitos a diversas condições críticas, tais como:

- área descampada e muito exposta à incidência de raios;
- torres muito altas, que inclusive propiciam a formação de descargas terra-nuvem;
- solo frequentemente de resistividade elevada, que dificulta a obtenção de um bom aterramento;
- interligações com a subestação por meio de linhas aéreas de média-tensão extensas e por vezes com aterramento precário.

O aterramento de uma torre de aerogerador pode apresentar dois valores:

- impedância impulsiva – resposta do aterramento a um impulso de corrente, tal como o caracterizado por uma descarga atmosférica, vem a ser a impedância que o aterramento apresenta em $t = 0+$, imediatamente após a injeção da corrente do raio; e
- resistência de dispersão – válida para baixas frequências, como é o caso de um curto-circuito para a terra na rede de média tensão, que também pode ser vista como a resistência que a cauda do impulso enxerga, após o transitório associado à frente de onda do raio.

2.1 DESEMPENHO DOS ATERRAMENTOS PARA DESCARGAS IMPULSIVAS

O aterramento de um aerogerador, constituído por um anel de cabo de cobre nu no entorno da sua base e interligado às armaduras da fundação, vem a ser um aterramento concentrado. Aterramentos concentrados em estruturas de fundação pesadas, como é o caso dos aerogeradores, apresentam valores de resistência de dispersão que se aproximam dos valores de resistência impulsiva. Este efeito é decorrente do fato que a componente indutiva não é significativa, devido à natureza concentrada do aterramento e à atenuação do transitório (tanto em termos de amplitude como de duração), resultante do processo de ondas trafegantes na fundação, devido aos inúmeros pontos de reflexão/refração nos ferros das armaduras.

A inclusão de segmentos longos e radiais de cabo de cobre nu enterrado, para a obtenção de valores mais baixos de resistência de dispersão, pode resultar na diferenciação destes dois valores de resistência e na melhoria do desempenho para correntes impulsivas, tais como as caracterizadas por descargas atmosféricas.

Para a proteção contra os efeitos dos raios, um aterramento de grandes dimensões não é solução, pois, a frente de onda do raio vê somente a resistência impulsiva do aterramento, que vale para o instante da injeção da corrente ($t = 0+$) e que é restrita a uma pequena área no entorno da base da torre. A resistência de dispersão, que vale apenas para a fase final do transitório do raio, em que predominam componentes de frequência mais baixa, é determinada por uma parcela maior do aterramento.

Cabe observar que a redução da impedância de aterramento vista do aerogerador não é diretamente proporcional à extensão de cabo adicionada. Existe um “comprimento efetivo”, acima do qual o aumento da extensão de cabo enterrado não resulta em redução significativa do valor de impedância de aterramento. Este comprimento efetivo de cabo é dependente da resistividade do solo local, da frequência da corrente injetada e da geometria do aterramento. A norma IEC-TR61400-24, no item 9.2, recomenda condutores horizontais com até 50m de extensão, para diminuir a impedância transitória do aterramento do aerogerador.

2.2 DESEMPENHO DOS ATERRAMENTOS PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS

Malhas de aterramento são constituídas por uma rede de eletrodos enterrados e por condutores de interligação desta rede com os elementos a serem aterrados, e tem por objetivo:

- estabelecer um referencial de baixa impedância para a terra, tendo em vista a operação da rede elétrica, de dispositivos de proteção e de equipamentos eletrônicos;
- prover a instalação de um meio de escoamento de correntes elétricas para o solo, quando da ocorrência de faltas para a terra na rede de energia ou de descargas atmosféricas;
- garantir a segurança humana quando da ocorrência de faltas para a terra ou de falhas de isolamento na rede de energia.

A interação malha/solo determina a resistência de aterramento da malha, que é função da sua geometria, de estruturas metálicas eventualmente enterradas no solo na sua área de influência, e da estratificação do solo na região onde a mesma se encontra. O processo de dissipação no solo de uma parcela da corrente de curto-circuito fase-terra resultará em gradientes de potencial no solo, que devem ser controlados para que não deem origem a potenciais de passo e toque perigosos. Tem-se, portanto, que o conhecimento do desempenho da malha de aterramento, considerando a magnitude da fração da corrente de falta dissipada pela mesma para o solo, vem a ser um parâmetro fundamental para a avaliação do seu dimensionamento, tendo em vista o compromisso custo x segurança de pessoas e equipamentos.

Considerando as dimensões de parques eólicos em geral, tem-se que mesmo para um agrupamento típico de 3 ou 4 aerogeradores interligados por cabos subterrâneos, o efeito da não equipotencialidade da rede de aterramento já é significativo. Com muito mais intensidade este efeito será observado com relação ao sistema de aterramento de um parque inteiro - com dimensão da ordem de quilômetros e constituído por muitas malhas de pequeno porte, concentradas nas bases dos aerogeradores, interligadas por condutores longos (enterrados ou aéreos).

De maneira geral, as normas recomendam a adoção de um valor de resistência de aterramento (resistência de dispersão) inferior a 10Ω para instalações em geral (inclusive a norma IEC-TR61400-24), não existindo na literatura técnica um valor de referência para a impedância impulsiva do aterramento de uma instalação.

A medição da resistência de aterramento de um sistema deste porte, todo interconectado, é impossível de ser feita, podendo ser calculada por meio de simulação por computador, o que, porém, não resultará em um valor útil. Considerando que os aerogeradores encontram-se separados ou em grupos de até 4 unidades, a avaliação dos aterramentos deve ser feita pela análise do desempenho do aterramento dos agrupamentos de unidades geradoras.

Cabe observar que mesmo nos casos em que se tem um único aerogerador, separado dos demais pela linha de média-tensão aérea, ainda assim é pouco eficiente a medição da resistência de dispersão do aterramento devido a diversas dificuldades técnicas, tais como:

- a dimensão do aterramento resultante (fundação do aerogerador + condutor enterrado até o poste de transição rede subterrânea-aérea), da ordem de 100 m, faz com que o terra remoto (onde é cravado o eletrodo auxiliar de corrente) fique muito distante da base do aerogerador; e
- em região de solos de alta resistividade, além do aspecto acima comentado, a obtenção de correntes de medição de valor adequado fica mais difícil, pois a resistência dos eletrodos auxiliares fica muito alta, limitando a corrente injetada pelo equipamento de medição.

3 REFORMULAÇÃO DAS INSTALAÇÕES DO PARQUE ÁGUA DOCE

Considerando o acima exposto, a reformulação do sistema de aterramento e de proteção contra descargas atmosféricas de cada parque eólico, abrangeu as seguintes atividades:

- especificação de para-raios para os cubículos de média-tensão;
- complementação dos aterramentos das bases dos aerogeradores (especialmente dos cubículos de média-tensão), tendo em vista a melhoria do seu desempenho frente a descargas impulsivas;
- melhoria do aterramento das linhas de 34,5 kV, tendo em vista uma melhor atuação dos para-raios na descarga de surtos para a terra e de modo que os cabos para-raios possam desempenhar um melhor efeito de blindagem para os surtos induzidos por descargas indiretas.

O aterramento dos aerogeradores é do tipo concentrado, sendo constituído, basicamente, pelas armaduras das fundações das torres, e complementado pelas interligações com aerogeradores vizinhos e/ou com a linha de média-tensão. Dentro do cubículo de média-tensão existe uma barra de aterramento, para onde convergem as interligações com o aterramento do aerogerador (dois cabos de 70 mm²) e com os aerogeradores vizinhos e/ou linha de transmissão (por meio de cabos de cobre nu de 25 mm²).

Antes do início deste trabalho, foram tentadas melhorias dos aterramentos implantadas nas bases de algumas torres de aerogeradores. A aplicação de uma malha reticulada, solução tentada em Cruz Alta 3, é aplicável apenas para subestações, pois é adequada para o controle de potenciais de passo e de toque, sendo menos eficiente para a melhoria do desempenho frente a quedas de raios (descargas impulsivas). Em alguns aerogeradores foram lançados condutores longos derivando da base do aerogerador e seguindo um traçado curvo junto à base do aerogerador, que acompanha as laterais da estrada de acesso à torre. O uso de condutores radiais é uma solução clássica para a melhoria da resposta impulsiva de aterramentos de estruturas altas (torres de linhas de transmissão, de telecomunicações e de aerogeradores).

A implementação destas melhorias, porém, não impediu que descargas atmosféricas incidentes no parque resultassem na queima de componentes das instalações, especialmente das chaves FLUSARC nos cubículos de média tensão junto às bases dos aerogeradores.

O projeto desenvolvido para os parques especificou as seguintes complementações para os aterramentos dos aerogeradores:

- anel de aterramento no perímetro dos cubículos de média-tensão, interligado com o aterramento do aerogerador, que promova o controle de potenciais de toque nas partes metálicas do cubículo;
- condutores horizontais radiais derivando do anel do cubículo, com até 50m de extensão, para diminuir a impedância transitória do aterramento, tendo em vista a melhoria do desempenho dos para-raios de média-tensão a serem ali instalados.

3.1 RESULTADO DAS MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES

A tabela 3.1 apresenta as impedâncias medidas (a 25 kHz) e calculadas (a 60 Hz e 25 kHz), para os aterramentos existente e projetado para um dos parques do Complexo Agua Doce. As simulações foram feitas com a representação do parque todo, que desde a subestação coletora até o último aerogerador, tem a extensão de 4,8 km. A modelagem do aterramento do parque incluiu as fundações e aterramentos das torres, os cabos enterrados que interligam os agrupamentos de aerogeradores (identificados pelas cores na tabela) e o cabo para-raios multiaterrado das linhas de média tensão.

A Fase Inicial é aquela em que se encontrava o parque no início deste trabalho. A Fase Final inclui o lançamento de anéis no perímetro dos cubículos de média-tensão e o uso de um ou dois condutores radiais (de até 50m de extensão) a partir do aterramento do cubículo.

Desta tabela podem-se tirar as seguintes constatações:

- as resistências calculadas a 60 Hz, vistas de cada torre, são baixas, devido à grande extensão deste sistema de aterramento;
- os valores de resistência para 60 Hz praticamente não mudam entre as condições inicial e final, pois as modificações não são significativas, considerando as dimensões do parque;
- os valores calculados de impedância a alta-frequência (25 kHz) são bem mais elevados do que os correspondentes para a baixa-tensão (60 Hz);
- os valores medidos e calculados em alta-frequência (25 kHz) apresentam excelente concordância, com desvio médio de apenas 13% (entre 7% e 25%);
- as melhorias implementadas nos aterramentos das torres conseguiram reduzir as resistências de aterramento a 25 kHz para valores inferiores a 10 Ω em quase todas as torres, exceto na torre 1, que vem a ser a única isolada, que não está interligada a nenhum outro aerogerador, e que está localizada em uma área que apresenta resistividade mais elevada.

Tabela 2: impedâncias medidas e calculadas para os aterramentos existente e projetado.

Ponto de Injeção da Corrente	R (60 Hz) Calculado (Inicial)	R (60 Hz) Calculado (Final)	Z (25 kHz) Medido (Inicial)	Z (25 kHz) Calculado (Inicial)	Z (25 kHz) Calculado (Final)
TORRE – 01	2,0 Ω	1,9 Ω	16,8 Ω	19,5 Ω	15,0 Ω
TORRE – 02	1,8 Ω	1,3 Ω	13,1 Ω	11,7 Ω	9,1 Ω
TORRE – 03	2,0 Ω	1,1 Ω	12,1 Ω	11,2 Ω	8,9 Ω
TORRE – 07	0,7 Ω	0,7 Ω	13,9 Ω	10,7 Ω	8,6 Ω
TORRE - 04	0,9 Ω	0,9 Ω	9,3 Ω	10,7 Ω	8,4 Ω
TORRE – 05	0,6 Ω	0,6 Ω	13,8 Ω	10,4 Ω	7,9 Ω
TORRE - 06	0,9 Ω	0,8 Ω	15,1 Ω	16,1 Ω	9,0 Ω

4 REFERÊNCIAS

- [IEC-TR61400-24] Wind Turbine Generator Systems - Part 24: Lightning Protection
- [Freire e Pane, 2012] Paulo Edmundo da F. Freire e Edgard Pane, Sistemas de Aterramento de Parques Eólicos, Brazil WindPower 2012, Rio de Janeiro, agosto/2012
- [Freire et al., 2012] Paulo Edmundo da F. Freire, Electrical Grounding – a Field for Electrical Engineers and Geophysicists Partnership, AGU – American Geophysical Union, Fall Meeting 2012, San Francisco, CA, dezembro/2012

5 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, Chile, Quênia e Etiópia.

Edgar Pane (edgar.pane@geoanalysys.com.br), geofísico e diretor da Geoanalysys Consultoria Geofísica (041 3941-9005). Formado em Geologia (UFRJ, 1976), especialização em geofísica com ênfase em métodos elétricos. Mestrado na área de geofísica aplicada à hidrogeologia (UNICAMP, 2001). Nos últimos trinta anos dirige empresa de geofísica aplicada à mineração, geotécnica, hidrogeologia e meio ambiente.

Suzana Aparecida Domingues (suzydomingues@yahoo.com.br), engenheira ambiental (UNINCOR, 2007), trabalha na Geoanalysys desde 2008.

Ariel Norberto Costanzo (ariel.costanzo@impsa.com), Ingeniero Electricista, Gerencia de Proyectos y Presupuestos, IMPSA Wind.

Marcos M. Villarreal (marcos.villarreal@impsa.com), Ingeniero Electricista, Gerencia de Proyectos y Presupuestos, IMPSA Wind.