

DESEMPENHO DE ATERRAMENTOS DE TORRES DE AEROGERADORES

Paulo E. Freire¹, **Matheus R. Bueno**¹, **Edgar Pane**², **Wagner Franklin**³, **Rinaldo Botelho**⁴,
¹ PAIOL Engenharia, ² Geoanalysis, ³ FAW-7, ⁴ Fastweld Indústria e Comércio Ltda.
Autor Correspondente – Paulo Edmundo da F. Freire, paulofreire@paiolengenharia.com.br
Rua Argemiro Piva 246, Paulínia/SP, 13.140-426, Brasil

INTRODUÇÃO

Parques Eólicos constituem certamente as maiores instalações de geração de energia, em termos de área. Além de abranger grandes áreas, incluem diversos subsistemas, frequentemente interligados em um mesmo amplo sistema de aterramento - aerogeradores, linhas de média tensão e subestação coletora. Este trabalho apresenta algumas simulações de diferentes geometrias de aterramentos de aerogeradores, em baixa e alta frequência, assim como a comparação entre os desempenhos destas diferentes geometrias de aterramento.

As simulações em computador foram feitas nas frequências de 60 Hz e 25 kHz (utilizando o programa canadense MultiGround Z – www.sestech.com), tendo em vista a avaliação do desempenho dos aterramentos, respectivamente, para a condição de curto-circuito no cubículo de média-tensão e para uma medição com o terrômetro de alta-frequência (que aproxima um evento de queda direta de raio).

Palavras-chave: *Aterramento Elétrico, Proteção contra Descargas Atmosféricas.*

1 MEDIÇÃO/SIMULAÇÃO DE ATERRAMENTOS COM ALTAS FREQUÊNCIAS

Parques Eólicos, incluindo as suas linhas de transmissão, podem ser classificados como instalações com Exposição Extrema aos efeitos das descargas atmosféricas, usualmente sujeitos a uma combinação de diversas condições críticas, tais como:

- áreas descampadas e, por vezes, muito expostas à incidência de raios;
- torres muito altas, que inclusive propiciam a formação de descargas terra-nuvem;
- solo de resistividade elevada, que dificulta a obtenção de um bom aterramento;
- interligações por linhas aéreas de média-tensão extensas.

O aterramento de uma torre de aerogerador pode ser analisado do ponto de vista de 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.

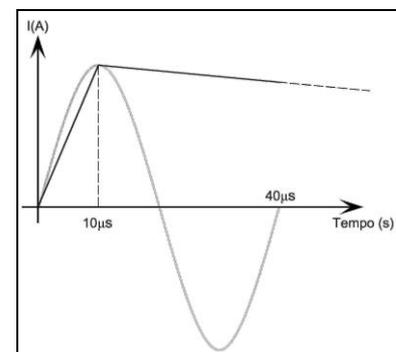
A Figura 1 apresenta o perfil de potenciais no solo acima do eixo de uma malha de aterramento com $60 \times 60 \text{ m}^2$, que é excitada no centro com um impulso de corrente de $1 \text{ kA} \times 1,2/50 \text{ us}$. Pode-se observar que este é um processo dinâmico, em que a elevação transitória de potencial inicialmente se concentra no ponto de injeção de corrente e, em seguida, se propaga progressivamente para toda a malha. Após alguns microsegundos observa-se que a distribuição do potencial torna-se uniforme ao longo de toda a malha. Malhas de menores dimensões terão tempos de acomodação também menores, ou seja, em menos tempo chega-se a uma distribuição uniforme de potencial.

A ilustração revela que em $t = 0+$, correspondente à frente de onda do impulso, onde se concentram as componentes de maior frequência do raio, a impedância dos condutores da malha é muito alta, sendo preferencial a dissipação local para o solo. Fica aqui estabelecido o conceito de “área efetiva da malha”, que é a área da malha que efetivamente vai dissipar para o solo a parte inicial da onda de corrente injetada. À medida que a frente de onda passa, a cauda do raio tende a se propagar mais uniformemente por toda a malha, e desta fluir para o solo.

A aplicação de uma corrente senoidal de alta-frequência na malha, seja para uma medição em campo ou para uma simulação em computador, é um recurso utilizado para inferir a resposta do aterramento para a frente de onda de uma descarga atmosférica. O guia IEEE 81/1983 – “IEEE GUIDE FOR MEASURING EARTH RESISTIVITY, GROUND IMPEDANCE”, no item 12.6 “High-Frequency Earth Resistance Meter”, apresenta a técnica de medição de resistências de aterramento de torres de linhas de transmissão, por meio de um terrômetro que opera na frequência de 25 kHz.

Para a avaliação da resposta de torres de aerogeradores a quedas diretas de raios, a literatura técnica recomenda a utilização da onda 10/350, uma vez que ela é característica de raios de polaridade positiva gerados no topo de estruturas altas e ponteadas (que constituem apenas 1% dos raios). Estas estruturas são consideradas “disparadoras” de raios terra-nuvem, que apresentam descargas de retorno com valores maiores de pico (função da frente de onda) e de energia (associada à longa cauda da onda). A onda 10/350, inclusive, inclui o efeito de superposição à onda de corrente do raio, do processo de ondas trafegantes resultantes das reflexões e refrações da onda de retorno do raio no topo e na base da torre.

A onda senoidal de corrente na frequência de 25 kHz tem período ($T = 1/\text{freq.}$) de 40 us e situa-se em torno da média da faixa de 1 a 40 kHz, onde concentra-se o maior conteúdo de energia dos impulsos padrão. Isto significa que tanto esta senóide (25 kHz) como o impulso 10/350 us levam os mesmos 10 us para atingir o valor de pico. Tem-se, portanto, que a resposta do aterramento à frequência de 25 kHz é uma aproximação da resposta ao impulso com frente de onda de 10 us .



A Figura 2 apresenta o campo magnético na nacele de um aerogerador produzido pela aplicação de uma corrente de 200A a 25 kHz em uma das pás, simulando uma queda de raio na pá de um aerogerador, que também utiliza este recurso de simular a queda do raio por meio da aplicação de uma onda de corrente senoidal de 25 kHz.

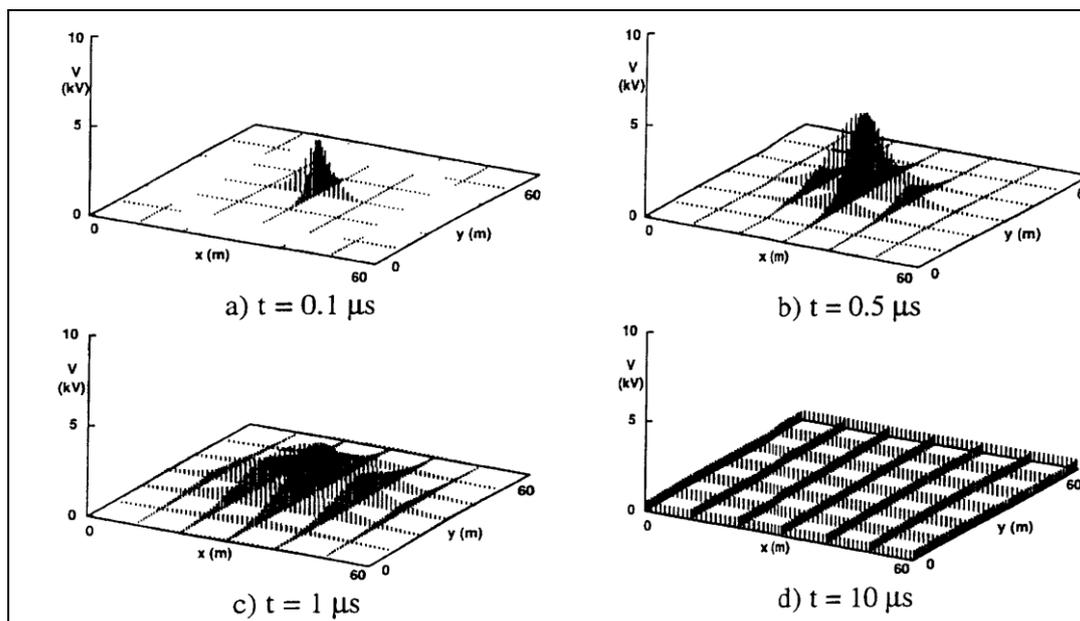


Figura 1: potenciais nos condutores de uma malha submetida a um impulso de corrente ($1,2 \times 50 \mu\text{s}$) de 1kA no seu centro (modificado de Farid Dawalib).

Lightning-Proof Wind Turbines

Certified Consultants | Posted on December 4th, 2012 by Andrew Griesmer

Here's a story we've all heard before: due to the inefficient nature and inevitable decline of fossil fuels, alternative energy resources are becoming increasingly popular. Wind energy is a popular source of alternative energy, with wind farms sprouting up all over the world. Here's something you may not have thought about: lightning strikes are a major problem for these wind turbines. Intuitively, places with high wind speeds also have stormy weather, and a 150 meter tall metal pole makes an attractive target for lightning strikes. In fact, some extreme wind turbine sites experience 10 lightning strikes a day!

When lightning strikes a turbine, a powerful current flows through it creating a magnetic field, as shown in the image below. Both the current, and resulting magnetic field can interfere and damage the equipment in the nacelle, the housing that protects and covers the drive components in the turbine. The big challenge for the engineers designing these turbines is where to place the panels that shield the electronics, as to limit the effect of the lightning strikes. Engineers usually rely on physical testing of turbines and their individual components, as well as field experience, to design future systems. This is an expensive process, up to 500,000 Euros for a set of tests on one nacelle. As is usually the case, multiphysics modeling is a cheaper and more efficient process.

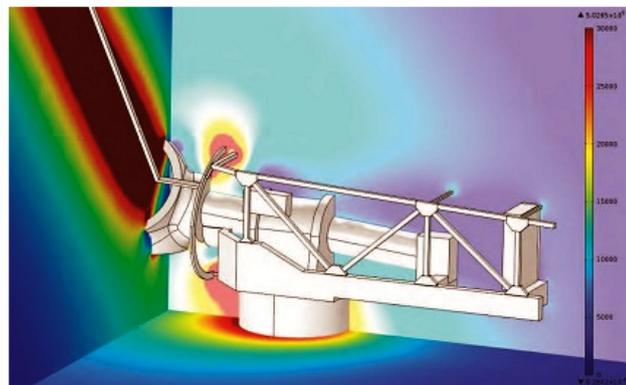


Illustration of the magnetic field after 200 kA @ 25 kHz lightning strikes one of the blades.

Figura 2: campo magnético na nacele de aerogerador devido à aplicação de uma corrente senoidal ($200\text{A} \times 25 \text{ kHz}$) em uma pá (<http://www.comsol.com/blogs/lightning-proof-wind-turbines>).

2 SIMULAÇÕES REALIZADAS

Foram simuladas algumas geometrias de aterramentos de aerogeradores para diversas configurações de aterramento, considerando dois valores de resistividade uniforme do solo: 550 Ωm (resistividade de valor mediano) e 1000 Ωm (resistividade elevada).

A Figura 3 apresenta a geometria de aterramento simulada, constituída pela fundação da torre com 16m de diâmetro (incluindo os tirantes verticais com 13m de extensão) e mais um anel de cabo de cobre nu de 70 mm² com 19m de diâmetro no perímetro externo da base do aerogerador.

Tabela 1 – Impedâncias para solo de resistividade uniforme com 550 Ωm

	Caso (ρ uniforme 550 Ωm)	R (Ω) (60 Hz)	Z (Ω) (25 kHz)
1	AG isolado (fig. 4a)	9,59	9,63
2	AG + 4 hastes de 9m (fig 4b)	8,65	8,72
3	AG isolado com dois cabos radiais de 50m (fig. 5a)	7,07	7,50
4	AG isolado com quatro cabos radiais de 50m (fig. 5b)	5,39	5,88
5	AG isolado com dois cabos radiais de 100m	4,93	7,12
6	AG isolado com cabo radial de 250m (fig. 6a)	4,19	9,09
7	Dois AG interligados por cabo de 250m (fig. 6b)	3,21	4,68

Tabela 2 – Impedâncias para solo de resistividade uniforme com 1000 Ωm

	Caso (ρ uniforme 1000 Ωm)	R (Ω) (60 Hz)	Z (Ω) (25 kHz)
1	AG isolado (fig. 4a)	17,43	17,47
2	AG + 4 hastes de 9m (fig 4b)	15,72	15,78
3	AG isolado com dois cabos radiais de 50m (fig. 5a)	12,85	13,17
4	AG isolado com quatro cabos radiais de 50m (fig. 5b)	12,25	12,39
5	AG isolado com dois cabos radiais de 100m	8,96	10,83
6	AG isolado com cabo radial de 250m (fig. 6a)	7,60	15,07
7	Dois AG interligados por cabo de 250m (fig. 6b)	5,84	7,83

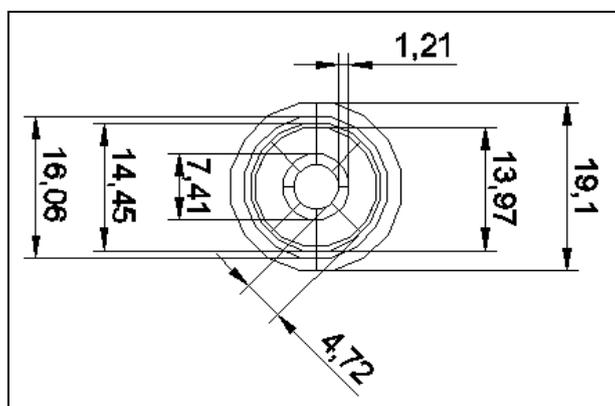


Figura 3 – dimensões da geometria de fundação/aterramento da torre de aerogerador simulada.

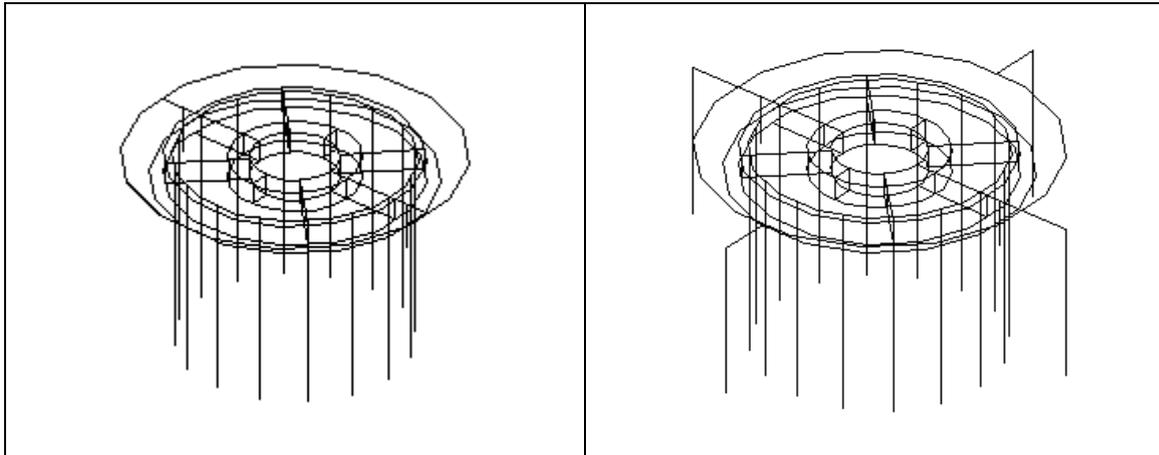


Figura 4 – configuração básica de fundação + aterramento de uma torre de aerogerador e melhoria com quatro hastes de 9m.

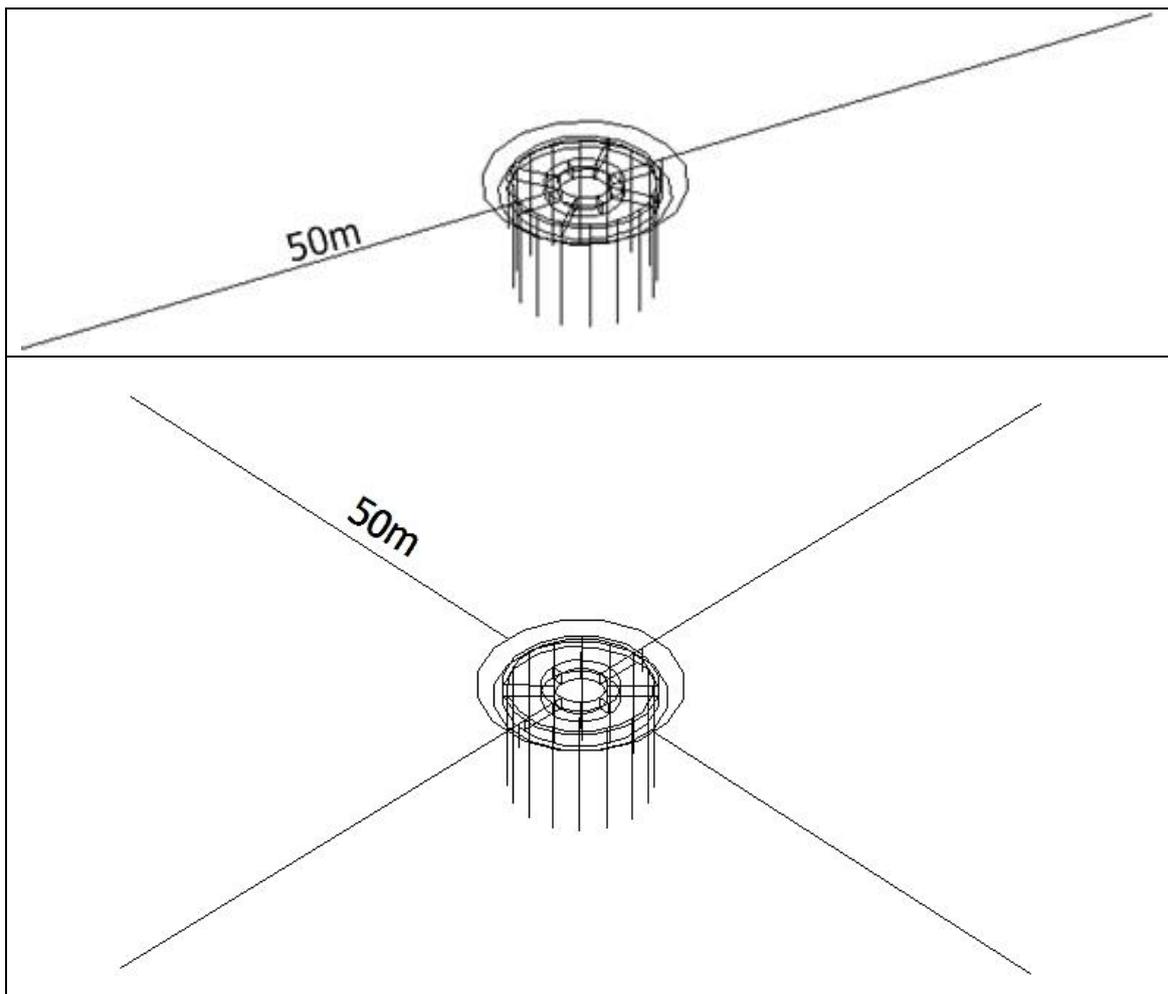


Figura 5 – aterramento de aerogerador com dois e quatro condutores radiais de 50m de extensão.

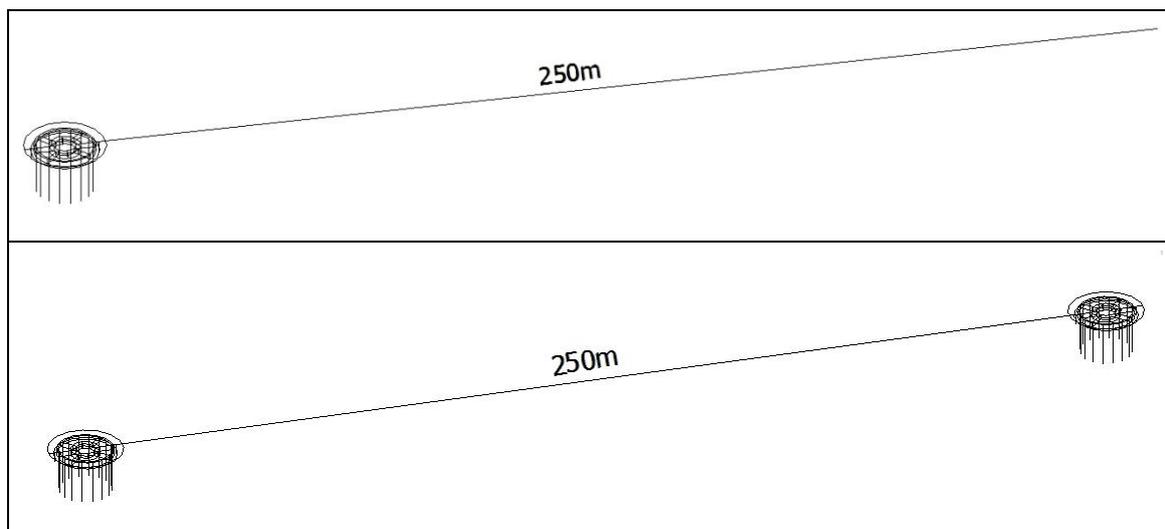


Figura 6 – configurações fundação + aterramento de torres de aerogeradores.

3 AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Nas avaliações que se seguem, para facilitar o entendimento do texto, o valor calculado com 60 Hz é tratado como resistência de aterramento, enquanto que o valor calculado com 25 kHz é tratado como impedância de aterramento.

Observa-se que enquanto os aterramentos são constituídos por elementos concentrados (armaduras de fundações, hastes, anéis de cabo de cobre ou condutores radiais relativamente curtos), os valores de resistência e de impedância são bastante semelhantes. Porém, quando se começa a utilizar condutores longos (que são a única solução para uma efetiva redução da resistência de aterramento), os valores de resistência começam a baixar mais do que os valores de impedância. Fica evidente que a resposta do aterramento para uma queda de raio é diferenciada do desempenho para um curto-circuito.

Para o AG isolado, onde o aterramento é proporcionado apenas pela armadura da sua fundação e por dois anéis de cabo de cobre nu de 50 mm², a resistividade de 550 Ωm resulta em uma resistência quase igual à impedância, e no limite abaixo do valor de projeto tipicamente especificado pelos fabricantes de 10 Ω. Para a resistividade de 1000 Ωm observa-se que com apenas o aterramento da fundação, não é possível atender o critério de 10 Ω.

A complementação do aterramento de fundação com quatro hastes de 9m de extensão resulta em uma redução dos valores de resistência e de impedância de aterramento inferior a 10%. O lançamento de dois condutores radiais relativamente curtos (50m de extensão) promove uma redução nos valores de resistência/impedância de cerca de 25%, não atingindo o valor desejado inferior a 10 Ω, para solos de resistividade elevada. Nestes solos, apenas a utilização de condutores de aterramento mais longos viabilizará a redução da resistência e da impedância de aterramento para valores abaixo de 10 Ω.

Nas Tabelas 1 e 2 os casos estão ordenados em ordem decrescente de resistência de aterramento, onde pode-se observar que quanto mais extenso é o aterramento menor é a resistência que o mesmo apresenta. A análise dos valores de impedância já revela um padrão de variação menos sistemático, que não pode ser facilmente inferido para diferentes combinações de resistividade do solo, de número de derivações da base da torre e de extensão destas derivações.

4 CONCLUSÃO

Pode-se constatar que a impedância do aterramento “vista” do ponto de aplicação do distúrbio será diferente, em função da natureza do distúrbio - seja um curto-circuito (baixa frequência) ou um raio (alta-frequência), o que é de extrema importância na análise de aterramentos que são distribuídos por uma área de muitos quilômetros quadrados, como é o caso dos parques eólicos.

Nos solos de resistividade média ou baixa (abaixo de 500 Ω m), o uso de apenas as armaduras das fundações como elemento de aterramento pode ser suficiente para a obtenção de resistências/impedâncias inferiores a 10 Ω (dependendo das dimensões destas fundações). Nos solos de resistividade elevada (acima de 1000 Ω m), somente com a utilização de condutores de aterramento mais longos será possível a redução da resistência e da impedância de aterramento para valores abaixo de 10 Ω .

Tem-se ainda que para uma dada condição de estrutura resistiva do solo, apenas com a realização de simulações de diferentes combinações de aterramentos será possível otimizar o desempenho do mesmo frente a descargas de natureza impulsiva.

Para finalizar, cabe lembrar que, de maneira geral, não é possível a medição da resistência de aterramento de uma estrutura do porte de um aerogerador, com um terrômetro convencional, que funciona em baixa frequência, especialmente para solos de resistividade de média para alta e/ou no caso de utilização de condutores complementares de aterramento. Para este tipo de estruturas é necessário a medição da impedância de aterramento por meio de um terrômetro de alta-frequência (25 kHz).

Esta afirmativa não se trata de nenhuma novidade, pois já desde 1983, o guia IEEE 81/1983 – “IEEE GUIDE FOR MEASURING EARTH RESISTIVITY, GROUND IMPEDANCE”, no item 12.6 “High-Frequency Earth Resistance Meter”, propõe e recomenda a técnica de medição de resistências de aterramento de torres de linhas de transmissão, por meio de um terrômetro que opera na frequência de 25 kHz.

5 REFERÊNCIAS

- [1] IEC-TR61400-24 - Wind Turbine Generator Systems - Part 24: Lightning Protection
- [2] Paulo Edmundo da F. Freire e Edgard Pane, Sistemas de Aterramento de Parques Eólicos, Brazil WindPower 2012, Rio de Janeiro, agosto/2012
- [3] Ariel Costanzo, Marcos Villarreal, Paulo Edmundo da F. Freire, Edgard Pane, Parque Eólico Água Doce – Medições de Resistividade do solo e de Resistências de Aterramento, Brazil WindPower 2013, Rio de Janeiro, agosto/2013
- [4] Paulo Edmundo da F. Freire, Medição de Aterramentos com o Terrômetro de Alta-frequência – Aplicação a Parques Eólicos, ENIE 2014, São Paulo, agosto/2014
- [5] Heidler F., Zischank W., Flisowsky Z., Bouquegneau Ch., Mazzetti C, Parameters of Lightning Current Given in IEC-62305 – Background, Experience and Outlook, 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala/Sweden, jun/2008

AUTOR PRINCIPAL

Paulo Edmundo da Fonseca Freire (paulofreire@paiolengenharia.com.br), Diretor da PAIOL Engenharia (19 3844-4488). Engenheiro Eletricista (1978) e Mestre em Sistemas de Potência (1984) pela PUC-RJ, Doutorando em Geologia/Geofísica (aplicadas a estudos de aterramento) na UNICAMP. Curso “Grounding & Eletromagnetic Fields” na Safe Engineering Services & technologies Ltd. (1994, Montreal, Canadá). Mais de 33 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, monotrilho e ferrovia). Ex-professor da Universidade Gama Filho (RJ), instrutor/palestrante de cursos e eventos sobre os temas aterramento e proteção contra descargas atmosféricas e autor de trabalhos apresentados em congressos e seminários no Brasil e no Exterior. Serviços prestados no Brasil, Angola, Chile, Kenia e Etiópia.

Endereço Comercial: PAIOL Engenharia, Rua Argemiro Piva 246, Paulínia/SP – CEP 13.140-426.