

Análise do Desempenho de Aterramentos Elétricos Interligados de Parques Eólicos frente a Descargas Atmosféricas: uma Avaliação Considerando Condições Típicas Brasileiras

Lucas S. Passos*, Daiane Conceição*, Rafael Alipio*, Miguel Guimarães*, Maria Teresa Correia de Barros**

*Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, Brasil
(e-mail: rafael.alipio@cefetmg.br).

**Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa (UL), Lisboa, Portugal
(e-mail: teresa.correiaebarros@tecnico.ulisboa.pt).

Abstract: This work investigates the impulse performance of interconnected grounding systems of wind farms, considering typical Brazilian conditions. Different lengths of interconnecting electrode between adjacent wind turbine grounding systems are considered, as well as a wide range of soil resistivity values. According to the results, the interconnection between adjacent wind turbine grounding systems may improve the system impulse response, reducing the peak of the ground potential rise developed in response to the injection of the lightning current. The relative reduction of the peak of the ground potential rise becomes more significant with the increase of the soil resistivity and is more pronounced for slower currents. In all cases, the interconnection leads to a significant reduction of the low-frequency grounding resistance seen by each wind turbine individually.

Resumo: Este trabalho investiga o comportamento impulsivo de sistemas de aterramentos interligados de parques eólicos, considerando condições típicas brasileiras. São considerados diferentes comprimentos de eletrodo que interligam os aterramentos de aerogeradores vizinhos, bem como uma ampla faixa de valores de resistividade do solo. De acordo com os resultados, a interligação entre os aterramentos de aerogeradores adjacentes pode levar a uma melhoria do desempenho impulsivo, com redução do valor de pico da elevação de potencial desenvolvida em resposta à injeção da corrente de descarga. A redução relativa do pico da elevação de potencial torna-se mais significativa com o aumento da resistividade do solo e é mais pronunciada para correntes mais lentas. Em todos os casos, a interligação leva a uma redução expressiva da resistência de aterramento vista por cada aerogerador individualmente.

Keywords: Wind farms; grounding; lightning; grounding interconnection; electromagnetic transients.

Palavras-chaves: Parque eólicos; aterramento; descargas atmosféricas; interligação entre aterramentos; transitórios eletromagnéticos.

1. INTRODUÇÃO

A energia advinda de fontes eólicas vem apresentando um forte crescimento, aumentando a cada ano sua participação na matriz energética nacional e mundial (GWEC, 2018). No Brasil, até o fim de 2018 foram adicionados 1,94 GW de geração eólica, representando um aumento da capacidade instalada de 15,19% em relação a dezembro de 2017. Atualmente, o Brasil tem uma capacidade instalada de cerca de 14,71 GW e é o 8º país com maior capacidade eólica instalada no mundo (GWEC, 2018).

O crescente desenvolvimento tecnológico e o aumento da demanda de energia elétrica têm exigido maior nível de confiabilidade no fornecimento de energia, com menor número de interrupções de serviço. De acordo com estatísticas de diversas regiões do mundo (IEC 61400-24, 2019), a maior parte dos danos causados aos sistemas de controle e equipamentos eletrônicos sensíveis instalados nos parques eólicos são decorrentes das sobretensões transitórias originadas da incidência de descargas atmosféricas. Tendo em

vista os locais descampados onde os parques eólicos estão localizados, tais instalações podem ser classificadas como de exposição crítica aos efeitos de descargas atmosféricas (Hoerauf, 2014; Conceicao, Alipio and Dias, 2018). As torres que sustentam os aerogeradores possuem altura pronunciada com relação aos elementos no entorno e constituem-se, portanto, pontos preferenciais de incidência de descargas.

De acordo com (Yamamoto *et al.*, 2010; Markovski, Grcev and Arnautovski-Toseva, 2012; Kontargyri, Gonos and Stathopoulos, 2015; Conceicao, Alipio and Dias, 2018), a maior parte das falhas e/ou mal funcionamento de equipamentos no interior da turbina são devidos à elevação de potencial no aterramento (*Ground Potential Rise – GPR*) produzida pela circulação de correntes de descargas que descem pela torre e são dispersadas para o solo através do sistema de aterramento. O controle dessa elevação de potencial se torna ainda mais desafiador considerando condições típicas brasileiras, em que os parques eólicos estão instalados em regiões de elevada resistividade (praias ou topo de montanhas).

A norma internacional (IEC 61400-24, 2019) recomenda a interligação dos sistemas de aterramentos individuais de cada turbina eólica com o intuito de reduzir a resistência de aterramento vista da base de cada torre do parque. Estudos recentes, no entanto, mostram que embora tal interligação reduza significativamente a resistência de aterramento (resposta de baixa frequência), o seu efeito na resposta frente a descargas atmosféricas é bastante diferente (Sunjerga *et al.*, 2019; Alipio *et al.*, 2020). O presente trabalho tem o intuito de complementar esses estudos, avaliando o desempenho de sistemas interligados de aterramentos de aerogeradores frente a descargas atmosféricas. Consideram-se valores de resistividade típicos do Brasil, bem como ondas de corrente de descargas representativas de regiões tropicais.

Este trabalho está organizado conforme a seguir. No Capítulo 2, discute-se conceitualmente o comportamento de aterramentos de parques eólicos frente a descargas atmosféricas, com ênfase na interligação entre os aterramentos individuais de cada turbina. No Capítulo 3, descrevem-se o estudo de caso e as modelagens empregadas para simulação do comportamento transitório do sistema de aterramento em questão. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e o Capítulo 5 as principais conclusões.

2. COMPORTAMENTO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE PARQUES EÓLICOS FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ASPECTOS BÁSICOS

Em um parque eólico, cada turbina possui seu aterramento individual, normalmente composto pela própria fundação da torre que sustenta o aerogerador e que é utilizada como eletrodo natural. Conforme recomendado pela norma internacional (IEC 61400-24, 2019), os aterramentos individuais de cada turbina são, em geral, interligados por meio de cabos enterrados nus. Essa prática normalmente leva a um valor reduzido de resistência de aterramento de baixa frequência (R_{LF}) vista por cada turbina individual. No entanto, quando submetido a descargas atmosféricas, o comportamento do sistema de aterramento interligado do parque eólico apresenta um comportamento particular, bastante distinto daquele frente a fenômenos de baixa frequência (Alipio *et al.*, 2020).

Em função de seu caráter impulsivo, as correntes de descarga atmosférica apresentam um espectro representativo de frequências que vai desde 0 Hz até alguns MHz (Working Group C4.407, 2013). Nessa faixa de frequências, os efeitos reativos, indutivo e capacitivo, são relevantes, bem como os efeitos de propagação (atenuação e distorção de ondas) (Visacro, 2007). Considerando esses últimos efeitos, as tensões e correntes devem ser vistas como ondas viajantes que se propagam através dos eletrodos de aterramento em um meio com perdas (solo). Devido a essas perdas, as ondas são atenuadas a partir do ponto de injeção de corrente e apenas uma porção limitada do aterramento é enxergada pela corrente, durante os primeiros microssegundos do transitório. Note-se que esses primeiros microssegundos correspondem, sobretudo, à frente da onda de descarga atmosférica, associada às componentes de alta frequência. Na cauda da onda, associada às componentes de baixa frequência, os efeitos de

propagação são desprezíveis e basicamente toda a extensão do aterramento é enxergada pela corrente.

Das considerações anteriores pode-se inferir que, embora a interligação entre os aterramentos das diversas torres de um parque eólico leve a uma redução significativa da resistência de aterramento vista por cada aerogerador (resposta de baixa frequência), dado o aumento expressivo da área disponível para dispersão de corrente, o mesmo pode não ocorrer para a impedância impulsiva (resposta de alta frequência). Isso decorre justamente do fato de que, nos primeiros microssegundos do transitório, apenas uma porção limitada do aterramento, nas adjacências do ponto de injeção de corrente, é vista pelo surto. A porção do aterramento efetivamente enxergada pela corrente nesse período depende, sobretudo, do fenômeno de atenuação das ondas que se propagam nos eletrodos de aterramento. A atenuação é tão mais significativa quanto maior a condutividade do solo (menor resistividade) e o conteúdo de frequência do sinal de corrente (menor tempo de subida da corrente impulsiva). Portanto, espera-se que o impacto da interligação do aterramento de turbinas adjacentes no desempenho impulsivo do parque eólico dependa das características do solo e da onda de corrente solicitante.

Também, é importante introduzir o conceito de comprimento efetivo (L_{EF}) de eletrodos de aterramento (Gupta and Thapar, 1978). Esse conceito também decorre do fenômeno de atenuação das ondas a partir do ponto de injeção de corrente e corresponde a um comprimento limite do eletrodo de aterramento (Visacro, 2007). Eletrodos com comprimento superior a esse valor limite não implicam redução adicional da impedância impulsiva de aterramento. O valor do comprimento efetivo depende, basicamente, da resistividade do solo e do tempo de frente da onda de corrente injetada, sendo tão maior quanto maiores forem esses dois parâmetros (Grcev, 2009). Nesse contexto, vale mencionar que a versão mais recente da (IEC 61400-24, 2019) estabelece que eletrodos adicionais conectados ao aterramento de cada turbina, por exemplo, os eletrodos empregados para interligação entre aterramentos vizinhos, são eficientes para redução da impedância desde que o seu comprimento não ultrapasse 80 m. Segundo a (IEC 61400-24, 2019) (pág.138), “devido às componentes de alta frequência da corrente de descarga, um comprimento superior a 80 m, independentemente da resistividade do solo, não provoca reduções adicionais da impedância total”. Ora, tal afirmação está em desacordo com o conceito de comprimento efetivo, uma vez que o comprimento de eletrodo que efetivamente auxilia na redução da impedância de aterramento não é um valor fixo, mas depende da resistividade do solo e do sinal de corrente injetado. Ademais, normalmente, o comprimento dos eletrodos de interligação é superior a 80 m, considerando as distâncias entre aerogeradores em parques eólicos reais. A consideração de que, independentemente da resistividade do solo, apenas 80 m desses eletrodos de interligação contribuem para redução da impedância total de aterramento pode levar a estimativas incorretas e não realísticas do desempenho de parques eólicos frente a descargas atmosféricas.

Entende-se que os aspectos levantados anteriormente não são amplamente discutidos na literatura, sobretudo tendo-se em conta características típicas de solos brasileiros. Ainda, esses

mesmos aspectos não são abordados profundamente nas normas existentes sobre o tema. Neste contexto, nas seções a seguir, são apresentados resultados de simulação empregando um modelo eletromagnético rigoroso, com o intuito de elucidar aspectos relativos ao desempenho de sistemas interligados de aterramentos de aerogeradores frente a descargas atmosféricas.

3. ESTUDO DE CASO E MODELAGENS EMPREGADAS

A Fig. 1 ilustra o estudo de caso considerado, que corresponde a dois aterramentos idênticos de aerogeradores conectados por um condutor de cobre nu enterrado a 0,5 m de profundidade. O aterramento de cada aerogerador, cujas dimensões principais estão indicadas na Fig. 1(b), corresponde a uma fundação do tipo octogonal, formada por uma série de anéis concêntricos e interligados entre si. Consideram-se três diferentes comprimentos do eletrodo de interligação, $L=80, 160, 240$ m. Note-se que o valor de L depende, basicamente, da distância entre as torres que sustentam os aerogeradores. Essa distância varia de acordo com disposição dos aerogeradores no parque eólico, definida pelas condições de vento da região, e, também, de acordo com o comprimento das pás do aerogerador. Nesse contexto, embora a distância $L=80$ m seja relativamente curta, ela foi escolhida como base de comparação, tendo em conta a norma (IEC 61400-24, 2019) e o descrito na seção anterior.

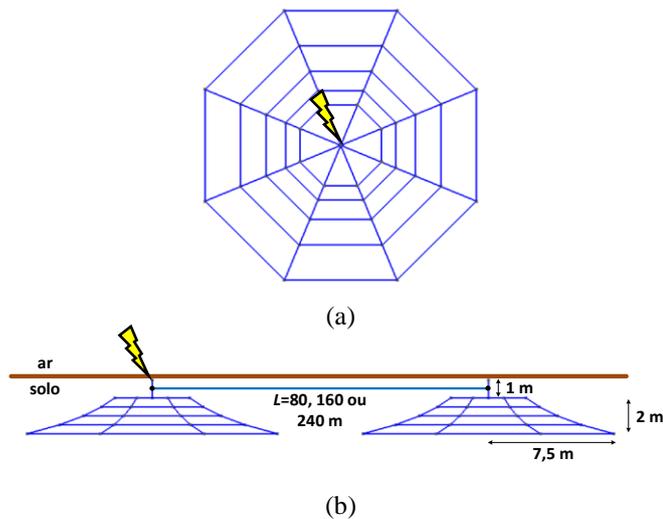


Fig. 1 (a) Sistema de aterramento de cada turbina eólica individual (vista superior), e (b) sistema de aterramento interligado (vista lateral).

3.1 Modelagem Eletromagnética do Sistema de Aterramento

Para simulação do comportamento transitório do sistema de aterramento em questão, utiliza-se o Modelo Eletromagnético Híbrido (HEM do inglês *Hybrid Electromagnetic Model*), baseado na teoria de campo e cujos detalhes podem ser encontrados em (Visacro and Soares, 2005). Esse modelo foi recentemente validado para simulação de transitórios em aterramentos típicos de aerogeradores, considerando a comparação com resultados experimentais (Alipio *et al.*, 2019). Em síntese, considera-se a abordagem de fio fino, discretiza-se o sistema de aterramento em diversos elementos e determina-se o acoplamento eletromagnético entre eles de

forma rigorosa empregando-se os potenciais vetor magnético e escalar elétrico. Todos os cálculos são realizados no domínio da frequência, em uma faixa entre 10 Hz e 10 MHz, e resultados no domínio do tempo são obtidos pela aplicação da transformada numérica de Fourier.

3.2 Modelagem do Solo

Nas simulações, são considerados cinco valores de resistividade em baixa frequência (ρ_0), com o intuito de abranger uma faixa típica de solos brasileiros: 50, 300, 1.000, 3.000 e 10.000 Ωm . A dependência da frequência da resistividade (ρ) e permissividade relativa do solo (ϵ_r) é determinada de acordo com o modelo proposto por (Alipio e Visacro, 2014) e que foi recentemente recomendado pelo CIGRE na Brochura C4.33 para inclusão do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo em estudos de transitórios no sistema elétrico (Working Group C4.33, 2019). Esse modelo é baseado em 65 medições realizadas em condições de campo, compreendendo diferentes tipos de solos, com resistividade em baixa frequência variando entre cerca de 60 Ωm e 18.000 Ωm . Adicionalmente, as premissas do modelo supracitado são baseadas nas Equações de Maxwell e nas relações de causalidade de Kramers-Kronig (Alipio e Visacro, 2014). A variação da resistividade e da permissividade relativa são dadas, respectivamente, por (1) e (2) (Alipio e Visacro, 2014; Working Group C4.33, 2019). A permeabilidade magnética do solo é assumida constante e igual à do vácuo.

$$\rho(f) = \rho_0 \{1 + 4,7 \times 10^{-6} \times \rho_0^{0,73} \times f^{0,54}\}^{-1} \quad (1)$$

$$\epsilon_r(f) = 9,5 \times 10^4 \times \sigma_0^{0,27} \times f^{-0,46} + 12 \quad (2)$$

Em (1) e (2), ρ_0 é a resistividade em baixas frequências em Ωm , que pode ser determinada utilizando-se técnicas e instrumentos convencionais e f é a frequência em Hz.

3.3 Corrente de Descargas Atmosféricas

Na avaliação do comportamento impulsivo/transitório de aterramentos elétricos, dentre outros fatores, é importante que a corrente de descarga atmosférica seja adequadamente representada, uma vez que a qualidade dos resultados de simulação é condicionada à representatividade das ondas de corrente utilizadas. De acordo com (De Conti and Visacro, 2007; Working Group C4.407, 2013), considerando descargas descendentes negativas, as formas de onda típicas das primeiras descargas de retorno têm um formato inicial côncavo seguido de um crescimento abrupto próximo ao primeiro pico e diversos picos adicionais, sendo, em geral, o segundo pico o maior deles. As ondas típicas de descargas subsequentes apresentam usualmente um único pico e uma forma relativamente suave. Adicionalmente, em média, as subsequentes são caracterizadas por menores amplitudes e tempos de subida mais curtos (Working Group C4.407, 2013). As formas de ondas da Fig. 2 procuram reproduzir essas características e consideram os principais parâmetros medianos de ondas de corrente reais de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes, associadas a descargas descendentes negativas, medidas na estação do Morro do Cachimbo localizada em Minas Gerais (Visacro *et al.*, 2004).

É importante mencionar que, no caso de turbinas eólicas situadas em regiões muito elevadas, por exemplo, topo de montanhas, as correntes de retorno associadas às descargas ascendentes negativas podem ser importantes. Segundo estatísticas apresentadas em (Working Group C4.407, 2013), as correntes de retorno relativas a esse evento possuem características muito similares às descargas subsequentes descendentes negativas em termos de tempo de frente e uma amplitude cerca de 20% inferior. Assim, a forma de onda da Fig. 2(b) pode ser considerada representativa das correntes de retorno associadas às descargas ascendentes negativas.

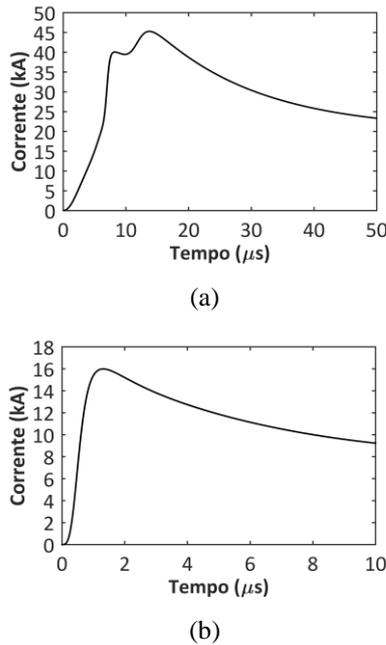


Fig. 2 Correntes representativas de (a) primeiras descargas de retorno e (b) descargas subsequentes, medidas na Estação do Morro do Cachimbo (Visacro *et al.*, 2004; De Conti and Visacro, 2007).

4. RESULTADOS

Em todas as simulações, considera-se a injeção da corrente no centro do sistema de aterramento da turbina à esquerda, vide Fig. 1(b), e calcula-se, utilizando o HEM, a elevação de potencial desenvolvida no ponto de injeção de corrente, aqui chamado de *GPR—Ground Potential Rise*. Com o intuito de se investigar o efeito da interligação entre os aterramentos adjacentes, são simulados e comparados três casos: Caso 1, aterramento da turbina eólica isolado; Caso 2, aterramento da turbina eólica conectado ao eletrodo de interligação (desconsiderando o aterramento da segunda turbina eólica); Caso 3, sistema completo (aterramentos de ambas as turbinas conectados via eletrodo de interligação). Os resultados obtidos estão divididos em duas seções. Na Seção 4.1 são apresentadas as curvas de GPR desenvolvido para os três casos, considerando um eletrodo de interligação de $L=80$ m. Na Seção 4.2, os resultados obtidos para o eletrodo de interligação de $L=80$ m são comparados com aqueles simulados para $L=160$ e 240 m.

4.1 Elevação de Potencial do Aterramento (GPR) para Eletrodo de Interligação de 80 m

A Fig. 3 apresenta os resultados de GPRs desenvolvidos para os três casos simulados, considerando (a) $50 \Omega\text{m}$, (b) $300 \Omega\text{m}$, (c) $1.000 \Omega\text{m}$, (d) $3.000 \Omega\text{m}$, e (e) $10.000 \Omega\text{m}$, em resposta a primeiras descargas (curvas à esquerda) e descargas subsequentes (curvas à direita). Todos os resultados consideram um eletrodo de interligação de comprimento $L=80$ m

De acordo com os resultados, observa-se que, de modo geral, a presença do eletrodo de interligação (caso 2), ou deste juntamente com o aterramento adjacente (caso 3), leva a uma redução do pico do GPR desenvolvido, em relação ao aterramento isolado (caso 1). A Tabela 1 apresenta a relação entre os picos de GPR desenvolvidos para os casos 2 e 1 (GPR_2/GPR_1) e para os casos 3 e 1 (GPR_3/GPR_1), considerando as resistividades analisadas e ambas as correntes.

Tabela 1. Relação entre os picos de GPR desenvolvidos para os casos 2 e 1 (GPR_2/GPR_1) e para os casos 3 e 1 (GPR_3/GPR_1)

ρ_0 (Ωm)	Primeiras descargas		Descargas subsequentes	
	$\frac{GPR_2}{GPR_1}$	$\frac{GPR_3}{GPR_1}$	$\frac{GPR_2}{GPR_1}$	$\frac{GPR_3}{GPR_1}$
50	0,78	0,78	0,87	0,87
300	0,60	0,60	0,77	0,77
1.000	0,51	0,47	0,68	0,68
3.000	0,48	0,35	0,56	0,56
10.000	0,48	0,32	0,49	0,42

Considerando os resultados para primeiras descargas, observa-se que as reduções de GPR dos casos 2 e 3, em relação ao caso 1, tornam-se mais acentuadas à medida que a resistividade do solo cresce. Tendo em conta a discussão apresentada no Capítulo 2, isso pode ser compreendido segundo o conceito de comprimento efetivo, que é tão maior quanto maior for a resistividade do solo. Dessa forma, à medida que se aumenta a resistividade, uma parcela maior do eletrodo de interligação é enxergada e, portanto, contribui efetivamente para a dispersão de corrente e, conseqüentemente, redução do GPR. Comparando-se a redução do pico de GPR para os casos 2 e 3, em relação ao caso 1, observa-se que para as resistividades de $50 \Omega\text{m}$ e $300 \Omega\text{m}$ não há redução adicional. Isso significa que o aterramento adjacente não influi na redução do pico do GPR nesse caso, em decorrência do comprimento efetivo muito curto. Por outro lado, para as demais resistividades, observa-se uma redução adicional do GPR quando se considera o aterramento da turbina vizinha (caso 3), sendo que tal redução se torna mais significativa com o aumento da resistividade. Isso ocorre porque, à medida que se aumenta a resistividade do solo, a atenuação das ondas que se propagam ao longo do eletrodo de interligação se torna menos significativa. Dessa forma, o efeito do aterramento adjacente se propaga sem sofrer grandes atenuações e é capaz de produzir uma redução adicional no pico do GPR desenvolvido na base da torre atingida pelo raio.

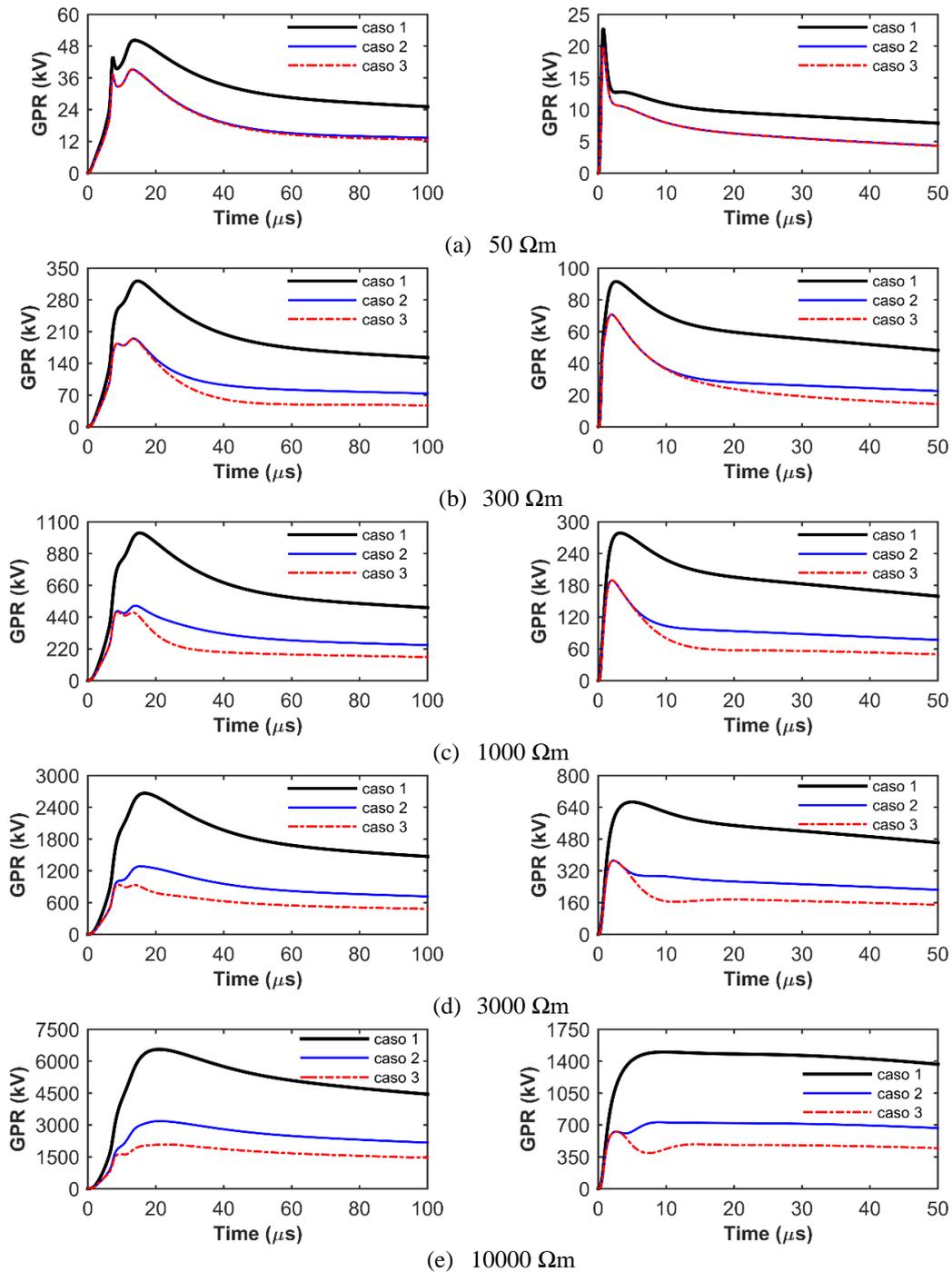


Fig. 3 GPRs desenvolvidos em resposta a correntes representativas de primeiras descargas (curvas à esquerda) e descargas subsequentes (curvas à direita) descendentes negativas, para solos de resistividade (a) $50 \Omega\text{m}$, (b) $300 \Omega\text{m}$, (c) $1.000 \Omega\text{m}$, (d) $3.000 \Omega\text{m}$, (e) $10.000 \Omega\text{m}$. Caso 1, aterramento da turbina eólica isolado; Caso 2, aterramento da turbina eólica conectado ao eletrodo de interligação de $L=80 \text{ m}$ (desconsiderando o aterramento da segunda turbina eólica); Caso 3, sistema completo (aterramentos de ambas as turbinas conectados via eletrodo de interligação de $L=80 \text{ m}$).

Considerando as descargas subsequentes, observa-se, similarmente ao caso de primeiras descargas, uma maior redução do GPR, comparando-se os casos 2 e 1, à medida que a resistividade solo cresce. Novamente, isso decorre do maior comprimento efetivo para solos de maior resistividade. Comparando-se as reduções de pico do GPR observadas para as descargas subsequentes e primeiras descargas, considerando os casos 2 e 1, nota-se que as reduções relativas

são mais significativas para as primeiras descargas. Como as descargas subsequentes possuem menor tempo de subida, ou seja, maior conteúdo de frequências, o comprimento efetivo para uma mesma resistividade é menor do que aquele para primeiras descargas. Dessa forma, no caso de descargas subsequentes, uma menor parcela do eletrodo de interligação é enxergada pela corrente injetada, o que explica a sua menor efetividade para auxiliar na redução do GPR. Ainda

considerando as descargas subsequentes, nota-se que, para resistividades de até 3.000 Ω , não há redução adicional do GPR quando se considera o aterramento da turbina vizinha (caso 3). Isso pode ser compreendido considerando dois aspectos principais. Primeiro, dado o maior conteúdo de frequência das descargas subsequentes, as ondas que se propagam ao longo do eletrodo de interligação sofrem forte atenuação e, portanto, o efeito do aterramento adjacente basicamente não alcança o aterramento da torre atingida pela descarga. Segundo, dado o menor tempo de frente das descargas subsequentes, os GPRs associados também atingem o valor de pico mais rapidamente, em comparação às primeiras descargas. Assim, ainda que o efeito do aterramento adjacente alcance o aterramento da torre atingida pela descarga, dependendo da resistividade do solo, o pico do GPR já foi atingido. Interessantemente, para a resistividade de 10.000 Ω , o aterramento adjacente influi na redução do pico de GPR. Isso ocorre para esse caso específico em função do elevadíssimo valor de resistividade, o que implica uma baixa atenuação das ondas que se propagam no eletrodo de interligação. Adicionalmente, segundo (Alipio *et al.*, 2019), para valores muito elevados de resistividade e arranjos de aterramento típicos de turbinas eólicas, o efeito capacitivo é pronunciado, o que leva a curva de GPR atingir o pico em instantes de tempo maiores; assim, o efeito do aterramento vizinho alcança a torre atingida pela descarga antes que o GPR tenha atingido seu valor máximo.

Finalmente, considerando as curvas da Fig. 3, pode-se observar que, ao longo da cauda do GPR, independentemente do sinal de corrente injetado e para cada valor de resistividade do solo, os maiores níveis de GPR são observados para o caso 1 e os menores níveis para o caso 3. Isso ocorre porque à cauda da onda estão associados os componentes de baixa frequência. Nessa faixa do espectro, os efeitos de propagação, com ênfase na atenuação, são desprezíveis e, portanto, basicamente todo o sistema de aterramento é efetivamente utilizado para dispersão da corrente para o solo. Assim, os menores níveis de GPR, ao longo da cauda, são observados para o caso 3, no qual tem-se a maior área disponível para dispersão de corrente, seguido do caso 2 e, por fim, do caso 1, que corresponde simplesmente ao aterramento de uma única turbina eólica.

4.2 Comparação entre GPRs para $L=80, 160$ e 240 m

Com o intuito de se investigar o efeito da consideração de eletrodos de interligação com comprimentos superiores a 80 m, comparam-se, nesta seção, os resultados de GPR obtidos para $L=160$ e 240 m com aqueles obtidos na seção anterior.

A Fig. 4 apresenta, em função da resistividades e para primeiras descargas (a) e descargas subsequentes (b), a relação entre os picos de GPRs desenvolvidos considerando eletrodos de interligação de 160 m e 80 m e os seguintes casos: i) relação entre os picos de GPR desenvolvidos para caso 2 e $L=160$ m e caso 2 e $L=80$ m, identificado como $GPR_{2(160m)}/GPR_{2(80m)}$, curva contínua; ii) relação entre os picos de GPR desenvolvidos para caso 3 e $L=160$ m e caso 2 e $L=80$ m, identificado como $GPR_{3(160m)}/GPR_{2(80m)}$, curva tracejada.

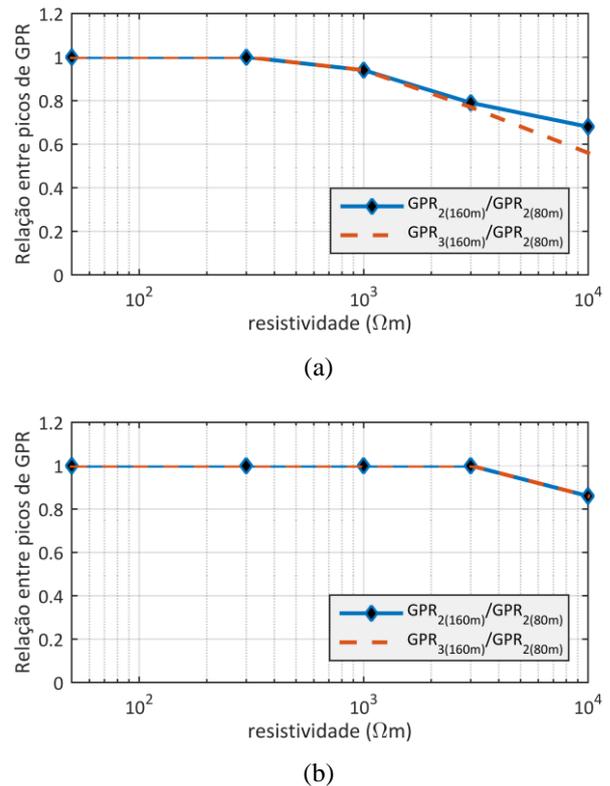


Fig. 4 Comparação entre os GPRs para comprimentos L de condutores de interligação de 160 m e 80 m, considerando (a) primeiras descargas, e (b) descargas subsequentes, em função da resistividade do solo. $GPR_{2(160m)}/GPR_{2(80m)}$ corresponde à relação entre os picos de GPR desenvolvidos para caso 2 e $L=160$ m e caso 2 e $L=80$ m (curva contínua). $GPR_{3(160m)}/GPR_{2(80m)}$ corresponde à relação entre os picos de GPR desenvolvidos para caso 3 e $L=160$ m e caso 2 e $L=80$ m (curva tracejada).

Para primeiras descargas de retorno, considerando a curva contínua, ou seja, a comparação entre os resultados obtidos para o caso 2 e $L=80$ e 160 m, observa-se que, para as resistividades de 50 Ω m e 300 Ω m, não há redução do pico de GPR para incremento do comprimento do eletrodo de interligação para além de 80 m. Por outro lado, para maiores valores de resistividades são observadas reduções do pico de GPR com o aumento do comprimento do eletrodo de interligação, sendo que tais reduções são mais acentuadas à medida que a resistividade do solo cresce. Tal resultado é explicado pelo fato de o comprimento efetivo ser mais longo para solos de maior resistividade. Isso mostra que, diferentemente do relatado na (IEC 61400-24, 2019), 80 m de eletrodo adicional conectado ao aterramento não corresponde ao limite para redução da impedância total enxergada na base da torre que sustenta a turbina. Na realidade, o comprimento de eletrodo adicional que produz redução dessa impedância depende da resistividade do solo e do sinal de corrente injetado; ademais, a redução relativa da impedância também depende desses mesmos parâmetros. A curva tracejada considera, além do aumento do eletrodo de interligação de 80 m para 160 m, também a presença do aterramento da turbina vizinha. Observa-se que, para as resistividades

analisadas, até $3.000 \Omega\text{m}$ as curvas contínua e tracejada estão basicamente superpostas. Isso indica que, até essa resistividade, embora o aumento do comprimento do eletrodo de interligação provoque reduções do pico do GPR, o aterramento adjacente não influencia essa redução. Para a resistividade de $10.000 \Omega\text{m}$ observa-se que a presença do aterramento adjacente é responsável uma redução adicional no pico do GPR. Isso decorre do elevado comprimento efetivo para essa resistividade.

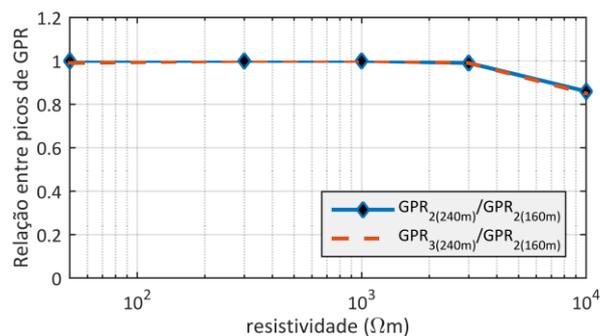
Considerando os resultados para as descargas subsequentes, mostrados na Fig. 4(b), nota-se que o aumento do comprimento do eletrodo de interligação leva a uma redução adicional do pico de GPR apenas para o solo de $10.000 \Omega\text{m}$. Dado o maior conteúdo de frequências associado às descargas subsequentes, apenas para a resistividade de $10.000 \Omega\text{m}$ tem-se um comprimento efetivo superior a 80 m , o que justifica a redução do pico de GPR com o aumento do eletrodo de interligação. Considerando $L=160 \text{ m}$ e descargas subsequentes, para nenhuma das resistividades analisadas há influência do aterramento adjacente na redução do GPR desenvolvido na base da torre atingida pela descarga atmosférica.

Com o intuito de se avaliar a influência de um incremento adicional no comprimento do eletrodo de interligação, de 160 m para 240 m , a Fig. 5 apresenta resultados similares aos da Fig. 4, porém considerando: i) relação entre os picos de GPR desenvolvidos para caso 2 e $L=240 \text{ m}$ e caso 2 e $L=160 \text{ m}$, identificado como $\text{GPR}_{2(240\text{m})}/\text{GPR}_{2(160\text{m})}$, curva contínua; ii) relação entre os picos de GPR desenvolvidos para caso 3 e $L=240 \text{ m}$ e caso 2 e $L=160 \text{ m}$, identificado como $\text{GPR}_{3(240\text{m})}/\text{GPR}_{2(160\text{m})}$, curva tracejada.

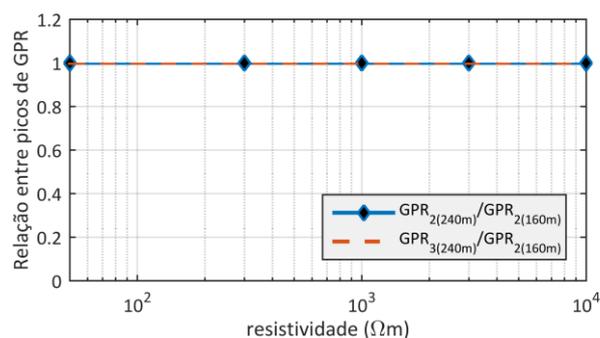
De acordo com os resultados da Fig. 5, observa-se que, para primeiras descargas, há uma redução do pico de GPR para um incremento do eletrodo de interligação de 160 m para 240 m apenas no caso de solo de $10.000 \Omega\text{m}$. Isso indica que para as demais resistividades, o comprimento efetivo é inferior a 160 m . Para as descargas subsequentes, não se observa redução adicional do pico de GPR desenvolvido. Finalmente, para $L=240 \text{ m}$ não se observa efeito do aterramento da torre adjacente, independentemente do sinal de corrente e da resistividade do solo.

6. CONCLUSÕES

Os aterramentos de cada aerogerador em um parque são, normalmente, interconectados com o intuito de reduzir a resistência de aterramento global. O desempenho frente a descargas atmosféricas de um aterramento interligado, no entanto, é bastante distinto daquele apresentado para baixas frequências. Para avaliação do comportamento de aterramentos interligados de parques eólicos foi empregado um modelo eletromagnético rigoroso, que considera os efeitos de propagação ao longo dos eletrodos de interligação, assim como os acoplamentos eletromagnéticos. A seguir são apresentadas as principais conclusões deste estudo.



(a)



(b)

Fig. 5 Comparação entre os GPRs para comprimentos L de condutores de interligação de 240 m e 160 m , considerando (a) primeiras descargas, e (b) descargas subsequentes, em função da resistividade do solo. $\text{GPR}_{2(240\text{m})}/\text{GPR}_{2(160\text{m})}$ corresponde à relação entre os picos de GPR desenvolvidos para caso 2 e $L=240 \text{ m}$ e caso 2 e $L=160 \text{ m}$ (curva contínua). $\text{GPR}_{3(240\text{m})}/\text{GPR}_{2(160\text{m})}$ corresponde à relação entre os picos de GPR desenvolvidos para caso 3 e $L=240 \text{ m}$ e caso 2 e $L=160 \text{ m}$ (curva tracejada).

- A interligação entre os aterramentos de turbinas eólicas adjacentes leva a uma melhoria do desempenho impulsivo da terminação de terra vista de cada turbina individual. Essa melhoria é traduzida na redução do pico do GPR desenvolvido no aterramento da turbina atingida pela descarga atmosférica. A redução relativa do GPR obtida a partir da interligação é tão mais significativa quanto maior a resistividade do solo.
- Na maior parte dos casos, a redução do pico de GPR obtida pela interligação entre os aterramentos é basicamente devida ao eletrodo de interligação, sendo muito reduzida a influência do sistema de aterramento da turbina adjacente. O comprimento de eletrodo de interligação que efetivamente contribui para tal redução não é um valor fixo, mas depende da resistividade do solo e do tempo de frente da onda de corrente, sendo tão maior quanto maiores forem esses dois parâmetros.
- No caso de ondas de corrente mais lentas e solos de resistividade muito elevada, a redução do pico de GPR obtida pela interligação também pode sofrer influência do aterramento adjacente, particularmente quando se têm

distâncias mais curtas entre aerogeradores. Dadas as condições típicas de solos brasileiros, essa hipótese deve ser considerada na avaliação do desempenho de parques eólicos frente a descargas atmosféricas.

- Embora o aterramento da turbina adjacente possua, em geral, papel reduzido na diminuição do pico de GPR, que ocorre na frente da onda, ele influencia de forma expressiva a cauda do GPR, que é fundamentalmente descrita pela resistência de aterramento. Note-se que a medição da resistência de aterramento na base de uma torre de um parque eólico pode levar a um valor muito baixo de resistência de aterramento e gerar a falsa expectativa de bom desempenho do aerogerador frente a descargas atmosféricas. Para avaliação rigorosa do desempenho do sistema de aterramento interligado frente a descargas atmosféricas, deve-se considerar a sua modelagem rigorosa, contemplando os acoplamentos eletromagnéticos e, particularmente, os fenômenos de propagação ao longo dos eletrodos de interligação.

AGRADECIMENTOS

O autor Rafael Alipio agradece aos subsídios do CNPq no âmbito do projeto 312763/2018-2.

REFERÊNCIAS

- Alipio, R. *et al.* (2019) ‘A comprehensive analysis of the effect of frequency-dependent soil electrical parameters on the lightning response of wind-turbine grounding systems’, *Electric Power Systems Research*, 175, p. 105927. doi: 10.1016/j.epr.2019.105927.
- Alipio, R. *et al.* (2020) ‘Analysis of the lightning impulse and low-frequency performance of wind farm grounding systems’, *Electric Power Systems Research*, 180, p. 106068. doi: 10.1016/j.epr.2019.106068.
- Alipio, R. and Visacro, S. (2014) ‘Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil’, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(5), pp. 1163–1171. doi: 10.1109/TEMC.2014.2313977.
- Conceicao, D., Alipio, R. and Dias, R. N. (2018) ‘Lightning performance of wind turbine grounding systems considering typical brazilian soil conditions’, in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395778.
- De Conti, A. and Visacro, S. (2007) ‘Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms’, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49(2), pp. 448–451. doi: 10.1109/TEMC.2007.897153.
- Grcev, L. (2009) ‘Impulse Efficiency of Ground Electrodes’, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(1), pp. 441–451. doi: 10.1109/TPWRD.2008.923396.
- Gupta, B. R. and Thapar (1978) ‘Impulse impedance of grounding systems’, in *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*, pp. 1–6.
- GWEC (2018) *Global Wind Report, Wind energy technology*.
- Hoerauf, R. (2014) ‘Considerations in Wind Farm Grounding Designs’, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(2), pp. 1348–1355. doi: 10.1109/TIA.2013.2273483.
- IEC 61400-24 (2019) *IEC 61400: Wind energy generation systems – Part 24: Lightning protection*.
- Kontargyri, V. T., Gonos, I. F. and Stathopoulos, I. A. (2015) ‘Study on Wind Farm Grounding System’, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), pp. 4969–4977. doi: 10.1109/TIA.2015.2418315.
- Markovski, B., Grcev, L. and Arnautovski-Toseva, V. (2012) ‘Transient characteristics of wind turbine grounding’, in *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICLP.2012.6344413.
- Sunjerga, A. *et al.* (2019) ‘Isolated vs. Interconnected Wind Turbine Grounding Systems: Effect on the Harmonic Grounding Impedance, Ground Potential Rise and Step Voltage’, *Electric Power Systems Research*, 173, pp. 230–239. doi: 10.1016/j.epr.2019.04.010.
- Visacro, S. *et al.* (2004) ‘Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station’, *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(1), p. D01105. doi: 10.1029/2003jd003662.
- Visacro, S. (2007) ‘A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents’, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1), pp. 381–386. doi: 10.1109/TPWRD.2006.876707.
- Visacro, S. and Soares, A. (2005) ‘HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems’, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), pp. 1206–1208. doi: 10.1109/TPWRD.2004.839743.
- Working Group C4.33 (2019) *Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems (WG C4.3)*. CIGRE.
- Working Group C4.407 (2013) *Lightning parameters for engineering applications (WG C4.407)*. CIGRE.
- Yamamoto, K. *et al.* (2010) ‘Analytical Surveys of Transient and Frequency-Dependent Grounding Characteristics of a Wind Turbine Generator System on the Basis of Field Tests’, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4), pp. 3035–3043. doi: 10.1109/TPWRD.2010.2043748.