

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELOI RUFATO JUNIOR

EFEITOS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM PARQUES EÓLICOS

CURITIBA

2024

ELOI RUFATO JUNIOR

EFEITOS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM PARQUES EÓLICOS

Trabalho de Conclusão do Curso de **MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis** do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná - UFPR, como requisito para obtenção do Certificado de MBA.

Professor Orientador: Prof. Dr. **Clodomiro Unsihuay Vila**

CURITIBA

2024

RESUMO

Neste trabalho são analisados e comentados artigos técnicos científicos acadêmicos publicados em literaturas pertinentes ao assunto tema do trabalho na área eólica. São abordados os impactos das descargas atmosféricas em aerogeradores e parques eólicos, destacando a importância dos mecanismos e a ciência por trás da formação desses fenômenos. Inicia-se com uma introdução que contextualiza a relevância do tema, seguida pela exploração dos mecanismos de formação de descargas atmosféricas. O trabalho apresenta mapas eólicos brasileiros, oferecendo uma visão geográfica da incidência desses eventos no país. São apresentados os principais defeitos e avarias em pás das torres eólicas de aerogeradores causados por descargas atmosféricas. Apresentam-se estatísticas sobre as descargas atmosféricas no Brasil, no último capítulo é apresentado a análise de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas em aerogeradores que, mostrou completa eficácia após a sua instalação, finalizando com a conclusão sobre os tópicos abordados no trabalho.

Palavras-chave: Descargas atmosféricas, parques eólicos, aerogeradores, raios.

ABSTRACT

In this work, academic scientific technical articles published in literature relevant to the subject of work in the wind area are analyzed and commented. The impacts of atmospheric discharges on wind turbines and wind farms are addressed, highlighting the importance of the mechanisms and the science behind the formation of these phenomena. It begins with an introduction that contextualizes the relevance of the topic, followed by an exploration of the mechanisms for the formation of atmospheric discharges. The work presents Brazilian wind maps, offering a geographical view of the incidence of these events in the country. The main defects and variations in wind turbine towers caused by atmospheric

discharges are presented. Presenting statistics on lightning strikes in Brazil, the last chapter presents an analysis of a protection system against lightning strikes in wind turbines that showed complete effectiveness after its installation, ending with a conclusion on the topics covered in the work.

Keywords: Atmospheric discharges, wind farms, wind turbines, lightning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa Isoceraunico do Brasil	11
Figura 2 - Descarga atmosférica atingindo a pá de um aerogerador de parque eólico	13
Figura 3 - Descargas atmosféricas no Brasil em 14 de janeiro de 2024	15
Figura 4 - Sensores de monitoramento instalados em uma pá eólica	16
Figura 5 - Pá eólica danificada por um raio.	17
Figura 6 - Drone utilizado para inspeção de pás de turbinas eólicas.	18
Figura 7 - Manutenção em pás de aerogeradores.	18
Figura 8 - Playground construído com partes de pás de aerogeradores.....	19
Figura 9 - localização do parque eólico nos Estados Unidos	21
Figura 10 - Área de proteção contra descargas atmosféricas para nível I	25
Figura 11 – Sistema de Proteção contra descargas atmosféricas de aerogerador	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados dos Eventos de Descarga Múltipla.....	22
Tabela 2: Número de descargas atmosféricas nas pás de aerogeradores	25
Tabela 3: Número de Descargas Atmosférica.....	28
Tabela 4: Número de danos nos aerogeradores do parque eólico e perda de faturamento	29
Tabela 5: Número de danos nos aerogeradores do parque eólico e dias parados dos aerogeradores	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. DESCARGAS ATMOSFERICAS EM TURBINAS EOLICAS.....	10
3. DANIFICAÇÃO DE PÁS DE AEROGERADORES.....	15
4. SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM TURBINAS EÓLICAS.....	23
5. CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estudo de descargas atmosféricas em aerogeradores vem se tornando cada vez mais frequente e necessário devido à falta de informações de problemas até então desconhecidos.

Os aerogeradores são frequentemente alvos de descargas elétricas, isso se deve tanto por muitas vezes estarem localizados em regiões de altas altitudes juntamente com as grandes altitudes ao qual as mesmas possuem (obtendo praticamente a função de para-raios). Esse evento acaba acarretando em danos e defeitos tanto nas estruturas quanto aos componentes presentes no devido aerogerador, por conta disso a observação direta dos parques eólicos é de relevância afim de realizar uma avaliação de risco precisa.

Alguns desses incidentes resultaram em danos secundários mais graves devido à contínua rotação das pás danificadas. Para evitar a propagação do dano inicial dessa maneira, as fazendas eólicas nas regiões do Japão vulneráveis a raios no inverno foram obrigadas a implementar sistemas de detecção de raios, capazes de identificar com precisão quando um raio atinge a turbina eólica e, em seguida, interromper imediatamente a rotação das pás. Normalmente, quando o sistema detecta um raio atingindo uma turbina eólica e interrompe a operação, o processo de reinicialização é iniciado apenas após a integridade das pás ser confirmada por inspeção visual. No entanto, em condições meteorológicas adversas, muitas vezes é difícil verificar visualmente a integridade da lâmina, e o atraso resultante no processo de reinicialização prolonga o tempo de inatividade e reduz a disponibilidade da turbina eólica (Detection of Lightning Damage on Wind Turbine Blades Using the SCADA System).

O Brasil, devido às suas dimensões continentais, apresenta regiões com alta incidência de descargas atmosféricas. Essas descargas representam um risco significativo para os aerogeradores e parques eólicos, especialmente aqueles localizados em áreas montanhosas com solos de alta resistividade. Estas condições geográficas não apenas expõem mais essas instalações a raios, mas

também complicam a eficácia dos sistemas de aterramento. As consequências das descargas atmosféricas nestes sistemas são multifacetadas e incluem desde a paralisação forçada de unidades geradoras até danos caros e complexos em componentes específicos como pás, geradores elétricos, redes de distribuição, linhas de transmissão e subestações.

As descargas atmosféricas, ou raios, são fenômenos naturais fascinantes e complexos. Eles ocorrem devido a variações na distribuição de cargas elétricas dentro das nuvens ou entre as nuvens e a terra. Existem diferentes tipos de raios, cada um com características específicas.

Esta é uma das mais violentas manifestações da natureza. Manifestação que, em uma fração de segundos, pode produzir uma carga de energia tão alta cujos parâmetros podem chegar a:

- 125 milhões de volts
- 200 mil ampères
- 25 mil graus centígrados

Para que um raio possa ocorrer é necessário que existam cargas de sinais opostos entre nuvens ou entre nuvens e o solo, quando isso ocorre, a atração entre as cargas é tão grande que provoca a descarga elétrica. Tais cargas foram nomeadas de cargas positivas e cargas negativas por Benjamin Franklin, por volta de 1750, século XVIII, quando esse realizou grandes descobertas sobre a eletricidade. Além de identificar o sinal das cargas, positivas e negativas, Franklin demonstrou de modo experimental que os raios são um fenômeno de natureza elétrica.

Os raios podem ser classificados de acordo com sua origem, assim, eles podem ser:

- Da nuvem para o solo;
- Do solo para a nuvem;
- Entre nuvens.

A formação de um raio ocorre de forma rápida e violenta. Essa formação se dá a partir da grande diferença de potencial entre as cargas, positivas e negativas, entre nuvens e o solo ou até mesmo entre nuvens, e quando o campo elétrico de uma nuvem supera o limite de capacidade dielétrica do ar atmosférico, que normalmente varia entre 10.000 volts/cm e 30.000 volts/cm, dependendo das condições locais. O ar que está entre as cargas, ao se ionizar, torna-se condutor, permitindo assim que ocorra uma forte descarga elétrica. Devido a essa forte ionização do ar que está entre as cargas elétricas em movimento é que ocorrem os chamados relâmpagos, que é a parte visual de um raio. A parte sonora ocorre em virtude do aquecimento brusco e da rápida expansão do ar, produzindo assim uma forte pressão que se manifesta através do trovão, parte sonora. Sendo assim, relâmpago e trovão são conceitos diferentes, mas que tem origem no mesmo fenômeno, o raio.

A ionização da nuvem ocorre em razão das milhares de colisões das partículas de gelo que se encontram no seu interior, esta é uma das teorias aceitas. Outra causa, que não exclui a primeira, estaria em efeitos resultantes da diferença de condutividade elétrica do gelo em face das diferenças de temperatura no interior da nuvem. Durante as colisões, as partículas de gelo se rompem, perdendo elétrons e transformando em íons, o que torna a nuvem eletricamente carregada."

2. DESCARGAS ATMOSFERICAS EM TURBINAS EOLICAS

As descargas atmosféricas em parques eólicos tem sido um grande problema. Contudo existem alguns tipos de descargas diferentes, conforme relacionados a seguir:

A Figura 1 mostra o mapa isoceráunico do Brasil.

Figura 1 – Mapa Isoceraunico do Brasil



Fonte POMPEU Marcela M., 2024.

Dados Isoceraúnicos Específicos do Brasil: No Brasil, zonas como o sul do Rio Grande do Sul e a maior parte da Bahia apresentam uma incidência "normal" de raios, com uma densidade variando de 0,3 a 1,0 raio por km² por ano. Por outro lado, regiões no centro do país e no oeste do Amazonas ou leste do Pará podem experimentar até 8 a 10 raios por km² por ano. Esses dados ressaltam a importância de mapas isoceraúnicos na operação e manutenção de parques eólicos no país.

As descargas atmosféricas são um fenômeno comum no Brasil, país que registra uma das maiores incidências de raios no mundo. A análise estatística desses eventos é crucial para entender o impacto sobre infraestruturas, como parques eólicos.

Dados Recentes: No Outono de 2022, o Brasil experimentou um aumento significativo no número de descargas elétricas atmosféricas e raios. Comparado

com o Outono de 2021, houve um aumento de 71,2% nas descargas elétricas atmosféricas e 57,7% nos raios. Foram registradas 12.092.393 descargas elétricas atmosféricas no país, das quais 4.429.579 foram raios.

Distribuição Geográfica de raios no Brasil: Em outono de 2022, os estados com maior incidência de descargas elétricas atmosféricas foram Pará, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul. O Pará liderou com 1.811.438 descargas, seguido pelo Rio Grande do Sul com 1.150.331 e Mato Grosso do Sul com 1.132.328. No que se refere aos raios, Pará, Amazonas e Rio Grande do Sul foram os mais afetados.

Comparação Anual: Em 2021, o Pará também foi o estado com mais descargas elétricas atmosféricas no Outono, com 1.061.831 registros. Minas Gerais e Amazonas seguiram com 838.747 e 717.821, respectivamente. Quanto aos raios, Amazonas, Pará e Mato Grosso foram os mais afetados, com o Rio Grande do Sul em sétimo lugar.

A combinação do setor eólico com condições meteorológicas adversas, como tempestades elétricas, representa um risco significativo para os trabalhadores. A segurança dos operários que trabalham em turbinas eólicas é uma preocupação primordial, especialmente quando uma tempestade se aproxima. É vital que eles sejam avisados com antecedência suficiente para evacuar os aerogeradores e buscar um local seguro para abrigo.

Esse fenômeno da natureza pode acontecer de forma isolada com um clarão único, definido como tempestades que produzem muito poucas ou apenas um relâmpago, frequentemente associadas a estruturas altas. Para analisar esse modelo de descargas é utilizado como base o estudo Tempestade que se concentrou em casos de raios com raios únicos que afetam parques eólicos no País Basco, Espanha, onde a presença de turbinas eólicas em locais elevados torna-as propícias a impactos diretos de raios. (Estudo de tempestades de flash único sobre parques eólicos no País Basco)

Os impactos dos raios foram analisados usando diferentes tecnologias em dois sistemas distintos de detecção e localização de raios. Dependendo da corrente de pico estimada pelos sensores de detecção de raios, a maioria das detecções foi apresentada como líderes positivos ascendentes, iniciadas pelas turbinas eólicas na presença de nuvens de tempestade. O estudo abrange tanto tempestades sazonais frias quanto quentes. (Estudo de tempestades de flash único sobre parques eólicos no País Basco)

A Figura 2 mostra uma descarga atmosférica atingindo a pá de um aerogerador de parque eólicos que provoca as avarias tanto estruturais como a queima de componentes e equipamentos no interior da nacele do aerogerador.

Figura 2 - Descarga atmosférica atingindo a pá de um aerogerador de parque eólico



Fonte: JESUS, F., 2024

Além de fatos isolados essas descargas podem acontecer de forma simultâneas conforme analisado pelos autores do artigo “Múltiplas descargas atmosféricas em turbinas eólicas associado a raios nuvem-solo próximos”. Artigo este que aborda a análise de cinco eventos em quais descargas atmosféricas simultâneas foram registradas em turbinas eólicas de um parque eólico equipado com monitoramento de raios. O esclarecimento entre a segurança dos dispositivos de monitoramento nas turbinas, observações de vídeo e dados da Rede Nacional

de Detecção de Raios dos EUA revelou que relâmpagos nuvem-solo (CG) com alta corrente de pico atingiram o solo a aproximadamente 10 km das turbinas afetadas durante os eventos. A polaridade das descargas foi variada, sendo negativa em dois eventos e positiva nos três restantes, acompanhada por pequenos pulsos intranuvem. Uma análise sugere que descargas simultâneas nas turbinas são provavelmente causadas por raios próximos, com mecanismos variando dependendo da polaridade do raio associado. O estudo também destaca a ocorrência frequente de raios ascendentes em turbinas eólicas acionadas por raios próximos, enfatizando a importância de considerar isso em avaliações de exposição às descargas atmosféricas, projetos de proteção e testes de validação. (Múltiplas descargas atmosféricas em turbinas eólicas associadas a relâmpagos nuvem-solo próximos).

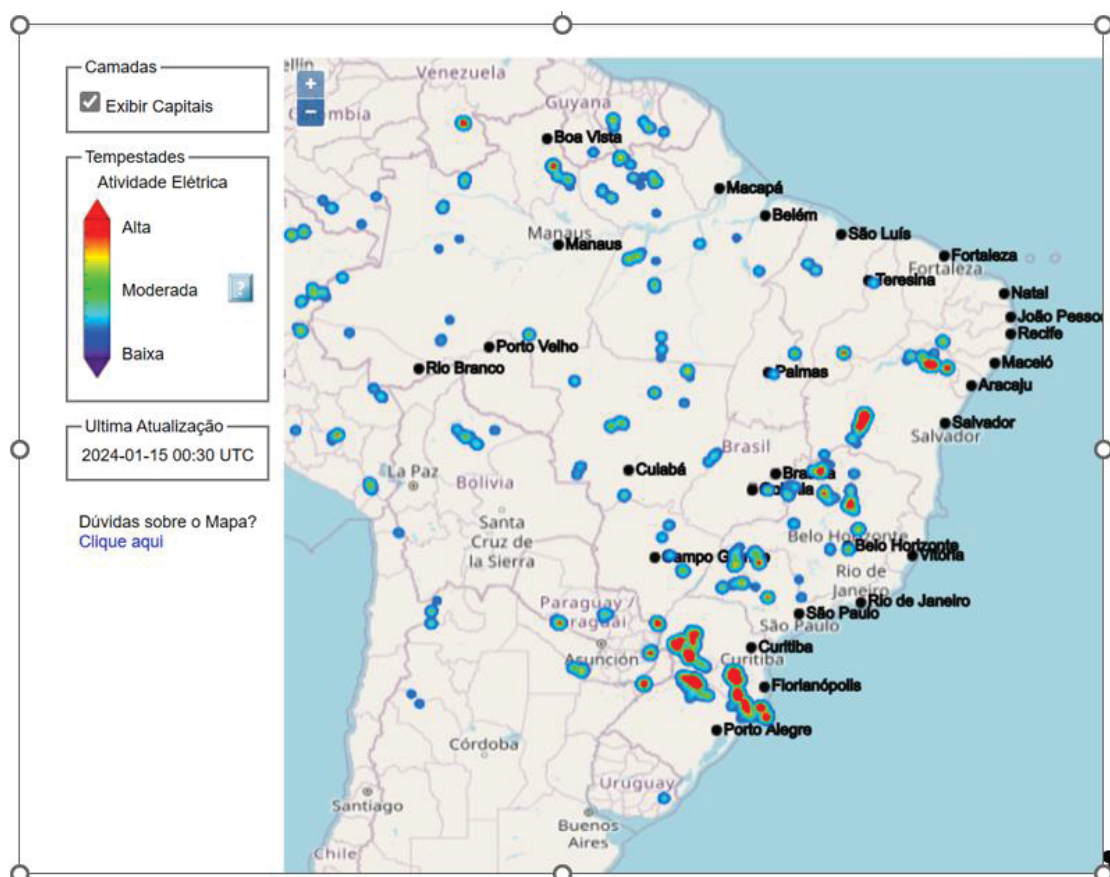
2.2. Descargas atmosféricas no Brasil

De acordo com dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Inpe, em números absolutos, o Brasil é o país com a maior incidência de raios no mundo. Por ano, chegam a ser registradas até 100 milhões de descargas, a maior parte delas durante os períodos úmidos e de muito calor. (INPE, 2023).

A análise das estatísticas de descargas atmosféricas no Brasil, considerando a extensão geográfica diversificada do país, oferece informações valiosas sobre a distribuição espacial e temporal desses eventos. Dados meteorológicos detalhados, incluindo a frequência, intensidade e localização das descargas atmosféricas, são essenciais para a formulação de estratégias de prevenção de riscos e proteção de infraestruturas críticas. Além disso, o entendimento das estatísticas de raios no contexto brasileiro contribui para aprimorar modelos de previsão e alerta, promovendo a segurança da população e a resiliência diante de eventos climáticos adversos.

O site do INPE fornece a atividade de descargas atmosféricas em tempo real na região do Brasil, como é mostrado na Figura 3 , que mostra as atividades de descargas atmosféricas no dia 14 de janeiro de 2024.

Figura 3 - Descargas atmosféricas no Brasil em 14 de janeiro de 2024

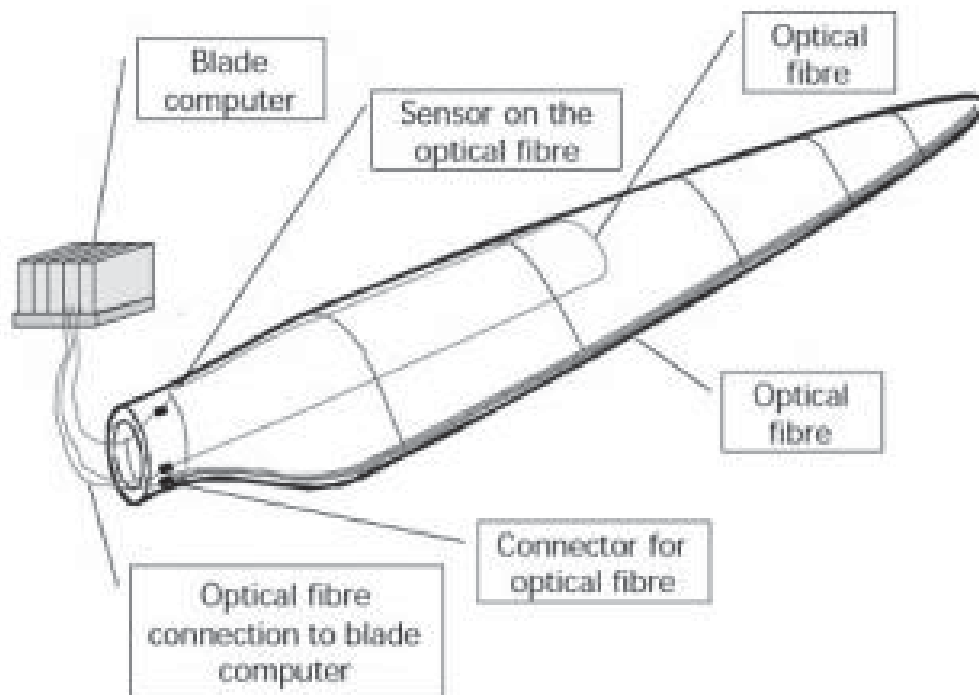


Fonte: INPE, 2024.

3. DANIFICAÇÃO DE PÁS DE AEROGERADORES

As pás das turbinas eólicas podem sofrer diversos tipos de danos ao longo do tempo. Elas devem ser inspecionadas periodicamente, porém, na prática, é difícil realizar uma inspeção completa, especialmente do interior das pás. Uma maneira de amenizar esse problema é por meio da utilização de sensores incorporados nas pás durante a fabricação. Os sensores são integrados em um sistema de monitoramento, que são usados para alertar os operadores em casos de danos (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009). A Figura 4 ilustra como é a configuração de um sensor de monitoramento instalado em uma pá de uma turbina eólica.

Figura 4 - Sensores de monitoramento instalados em uma pá eólica



Fonte: HYERS, 2006.

Os danos mais frequentes encontrados nas pás de aerogeradores envolvem a erosão da ponta, danos referentes a relâmpagos, rachaduras e contaminação severa. A Figura 5 mostra os danos causados por um raio em uma pá eólica.

Figura 5 - Pá eólica danificada por um raio.



Fonte: WINDCOM, 2018.

A degradação dos materiais compósitos pode começar em quebras de microescala. Quando uma fibra sofre um dano, ocorre uma redistribuição da força resultante. Uma área com uma fibra quebrada induzirá uma maior tensão na matriz, o que pode levar a uma quebra da matriz. Se a ligação entre a fibra e a matriz for fraca, ocorre a descolagem da fibra ao longo da matriz. Isso pode potencialmente promover mais quebra da matriz e consequentemente promover o crescimento da fissura (MISHNAEVSKY *et al.*, 2017).

Os danos nas pás eólicas são frequentemente descobertos tardiamente. Como resultado, o tempo de reparo é normalmente extenso e oneroso. Mesmo pequenos danos e sujeiras podem causar redução na eficiência e produtividade de até 5%.

Algumas empresas do ramo de geração de energia eólica, como a Vestas e a Siemens Gamesa, oferecem serviços de manutenção especializada. As pás são inspecionadas através da utilização de drones, conforme mostra a Figura 6 câmeras de alta resolução ou telescópios. Os danos são avaliados e comparados um banco de dados com dezenas de milhares de inspeções antigas. Os especialistas analisam as informações coletadas para identificar as possíveis

avarias. Os resultados são entregues em um relatório que inclui recomendações sobre as possíveis soluções de reparo e, posteriormente, o reparo é realizado.

Figura 6 - Drone utilizado para inspeção de pás de turbinas eólicas.



Fonte: VESTAS, 2017b.

Na Figura 7 técnicos de reparos de pás estão realizando a manutenção das pás de aerogeradores que sofreram avarias externas quando estas foram atingidas por descargas atmosféricas diretas em sua superfície.

Figura 7 - Manutenção em pás de aerogeradores.



Fonte: VENTO, 2018.

3.1. Reciclagem de Pás de Turbinas Eólicas

Como as turbinas eólicas estão sendo construídas em larga escala e as turbinas mais antigas são substituídas pelas mais novas, a preocupação com o descarte das pás se torna mais significativa. No entanto, a reciclagem das pás continua sendo um desafio. As dificuldades estão relacionadas a estrutura da pá e aos materiais compósitos utilizados (MISHNAEVSKY *et al.*, 2017).

A grande maioria das pás utiliza resinas termorrígidas e, ao contrário das resinas termoplásticas, esta matriz não pode ser remodelada para formar um novo produto. Então a reutilização das pás fica limitada a usar os elementos compósito como eles são encontrados na pá ou transformá-los em uma nova fonte de material compósito. A primeira opção requer apenas cortes na pá, porém existe um número limitado de aplicações possíveis. Já na segunda opção, são utilizados processos complexos para separar as fibras da matriz e reutilizá-las (MISHNAEVSKY *et al.*, 2017). A Figura 8 mostra um pequeno parque construído em Rotterdam apenas com partes de pás de aerogeradores.

Figura 8 - Playground construído com partes de pás de aerogeradores.



Fonte: ARCHITECTURE NOW, 2016.

3.2. Manutenção de Pás de Aerogeradores

Os aerogeradores são frequentemente atingidos por descargas elétricas, isso se deve tanto por muitas vezes estarem localizados em regiões de altas altitudes juntamente com as grandes altitudes ao qual as mesmas possuem (obtendo praticamente a função de para-descargas atmosféricas). Esse evento acaba acarretando em danos e defeitos tanto nas estruturas quanto aos componentes presentes no devido aerogerador, por conta disso a observação direta dos parques eólicos é de relevância afim de realizar uma avaliação de risco precisa. Foi realizada uma campanha de observação de campo em um parque eólico localizado no Kansas, EUA. As observações no parque eólico foram relacionadas com os registros de detecção de descargas atmosféricas da Rede Nacional de Detecção de Descargas atmosféricas dos EUA (NLDN), ao qual revelaram cinco eventos que envolveram múltiplas descargas simultâneas em diferentes turbinas eólicas. Nos cinco eventos, o foi detectado um raio descendente nuvem-solo fixando o solo a uma distância de 1 a 10 km das turbinas eólicas afetadas. Em dois casos, a polaridade do raio nuvem-solo foi negativa enquanto nos outros foram positivos, acompanhados por pequenos pulsos no interior das nuvens.

O parque eólico estudado está localizado no Kansas, EUA. As turbinas eólicas estão localizadas no topo de pequenas colinas, distribuídas em grupos leste e oeste de 35 e 32 turbinas, conforme mostrado na Figura 9. Todas as turbinas eólicas têm altura total máxima de 125 m incluindo a torre e uma pá em posição vertical.

Figura 9 - localização do parque eólico nos Estados Unidos



Fonte: GALORELA et al, 2015.

3.3. Sistema de Monitoramento dos Parques Eólicos

O monitoramento do parque eólico envolveu equipamentos permanentes e temporários. Dispositivos de medição de corrente foram permanentemente instalados nas pás das turbinas, enquanto sensores no NLDN registraram descargas eletromagnéticas. Durante campanhas de campo em 2012 e 2013, equipamentos temporários, incluindo câmeras de vídeo, moinhos de campo elétrico, antenas lentas e o conjunto de mapeamento de descargas atmosféricas (LMA), foram utilizados. Os resultados dessas campanhas foram documentados em estudos anteriores. (GALORELA et al, 2015)

O NLDN fornece dados em tempo real da atividade de descargas atmosféricas nos EUA, incluindo localização, hora, tipo e polaridade de cada descarga atmosférica. As medições de corrente nas pás das turbinas são transmitidas para um sistema SCADA, que dispara alarmes indicando impacto de descargas atmosféricas. A correlação temporal entre eventos atmosféricos reportados pelo SCADA e detecções NLDN mostrou um atraso médio de 10 segundos. O sistema SCADA também fornece estimativas do pico de corrente, embora uma fraca correlação com as detecções NLDN tenha sido identificada.

Além disso, sensores LS700x da Vaisala, instalados no NLDN, registraram dados de lóbulo, permitindo a construção de formas de onda de campo magnético associadas a descargas atmosféricas. Esses dados foram utilizados para compreender a natureza das descargas atmosféricas.

A tabela 1 mostra os dados referentes aos eventos com descargas simultâneas em turbinas eólicas, incluindo alarmes SCADA, detecções NLDN.

Tabela 1 - Dados dos Eventos de Descarga Múltipla

Evento	Data	Turbinas Afetadas	Tipo de Descarga	Distância NLDN	Corrente Máxima
#1	2011/04/15	10	CG-	2.3 a 3.9 km	-192
#2	2013/04/17	6	CG-	800m a 1.5 km	-181
#3	2011/05/11	10	CG+	7.2 a 9.4 km	+171
#4	2013/02/20	7	CG+	4.1 a 4.9 km	+42
#5	2013/05/30	-	CG+	~5 km	+91

Fonte: Autoria própria, 2024

A análise dos eventos que envolvem descargas simultâneas em turbinas eólicas (aerogeradores) e suas correlações com descargas atmosféricas CG revela padrões intrigantes.

As descargas atmosféricas nuvem-terra, ou descarga atmosféricas nuvem-solo (CG - *Cloud-to-Ground*), são descargas elétricas que ocorrem entre uma nuvem de tempestade e a superfície terrestre. Elas são consideradas perigosas devido aos seus efeitos potenciais.

As descargas CG negativos (CG-) apresentam um padrão complexo, sugerindo a possibilidade de líderes ascendentes extremamente longos, iniciados por líderes descendentes de alta densidade de carga, propagando-se a vários quilômetros das turbinas eólicas.

Por outro lado, as descargas CG positivos (CG+) parecem desencadear descargas ascendentes ou líderes ascendentes nas turbinas eólicas, como ilustrado pelo evento #5. Este achado sugere uma possível conexão entre as descargas CG+ e o início de líderes ascendentes múltiplos. A análise das descargas simultâneas destaca a importância de considerar descargas ascendentes de baixa corrente, muitas vezes não detectadas pelos sistemas

convencionais de monitoramento. Isso tem implicações significativas na avaliação de exposição das turbinas eólicas a descargas atmosféricas, pois eventos não registrados podem impactar negativamente a integridade dos equipamentos e a segurança operacional. (GALORELA et al, 2015).

Ressalta-se ainda a necessidade de aprimorar os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em turbinas eólicas, considerando não apenas as descargas descendentes, mas também as ascendentes. O desenvolvimento de sistemas mais robustos e a compreensão aprofundada da atividade atmosférica nos parques eólicos são cruciais para garantir a segurança e a durabilidade das turbinas em face da exposição contínua a eventos atmosféricos.

A constatação de que as descargas nas turbinas não são frequentemente detectadas por sistemas como NLDN e, em alguns casos, pelo sistema SCADA, sugere que a corrente envolvida nessas descargas ascendentes é geralmente baixa. Este fenômeno, não adequadamente registrado, destaca a possibilidade de descargas atmosféricas em turbinas eólicas serem mais frequentes do que se pensa. As repetidas descargas de baixa corrente e líderes ascendentes abortados precisam ser considerados de perto, pois podem contribuir para a degradação de componentes eletroeletrônicos das turbinas, apresentando riscos não detectados em eventos únicos. (GALORELA et al, 2015).

4. SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM TURBINAS EÓLICAS

O crescente número de turbinas eólicas, como fonte de energia renovável, tem sido uma tendência global, contudo os danos causados por descargas atmosféricas representam um desafio significativo. Tendo em vista esse fato, será abordado a questão, apresentando dados relacionados aos efeitos protetores de um sistema simples de proteção contra descargas atmosféricas (LPS). Importante ressaltar que este sistema foi concebido independentemente do gerador da turbina eólica.

4.1. Danos nos Aerogeradores por Descargas Atmosféricas em Parques Eólicos

Através de investigações e monitoramento das interrupções em uma turbina localizada ao longo do Mar do Japão, conhecido por suas tempestades de inverno, onde ocorrem mais de 25 dias de tempestade por ano.

O gerador da turbina eólica em questão possui uma capacidade de 750 kW e é equipado com um para-descargas atmosféricas isolado de 80 m de altura (LPS), além de receptores nas pás. A Tabela 2 apresenta dados sobre o número de descargas atmosféricas nas pás e a quantidade de dias em que o aerogerador ficou desligado.

Tabela 2 - Número de descargas atmosféricas nas pás de aerogeradores

Yr	Number.	No operation (Days)	Monetary Loss (JPY Million)
2002	2	125	27.252
2003	2	90	16.922
2004	1	70	3.576
2005	5	298	80.102
2006	2	220	28.395
Total	12	803	156.247

Fonte: NASIRI et al, 2022.

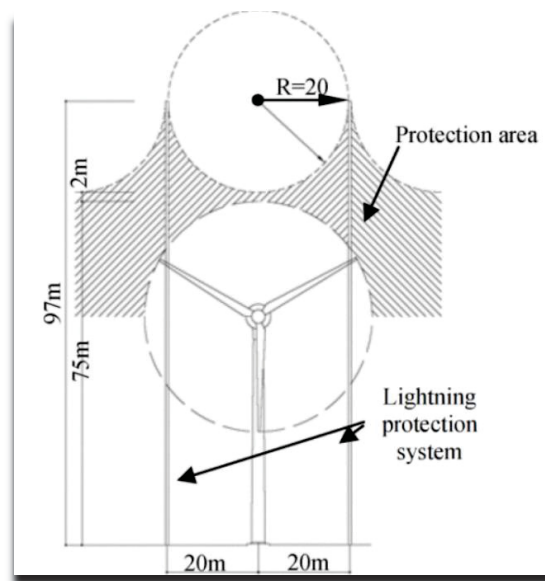
Os resultados revelam que, ao longo de cinco anos, a interrupção da operação resultou em uma perda total de receita de produção elétrica. Esses dados destacam a relevância dos danos causados por descargas atmosféricas nas turbinas eólicas, sublinhando a necessidade de estratégias eficazes de proteção contra descargas atmosféricas para otimizar a produção e evitar perdas financeiras significativas. (NASIRI et al, 2022).

4.2. Sistemas de Proteção IEC contra Descargas Atmosféricas em Aerogeradores

Considerando os diversos níveis de proteção especificados pela IEC], adotou-se o nível I para o Sistema de Proteção contra Descargas atmosféricas (LPS), conforme representado na Figura 10, de acordo com as regulamentações da IEC – *International Electrotechnical Commission*.

Em simulações utilizando o método da esfera rolante com o nível de proteção, observou-se que o para raios isolado não oferece proteção efetiva às pás, a menos que seja instalado dentro da área de rotação do aerogerador.

Figura 10 - Área de proteção contra descargas atmosféricas para nível I



Fonte: ONUMA, 2014.

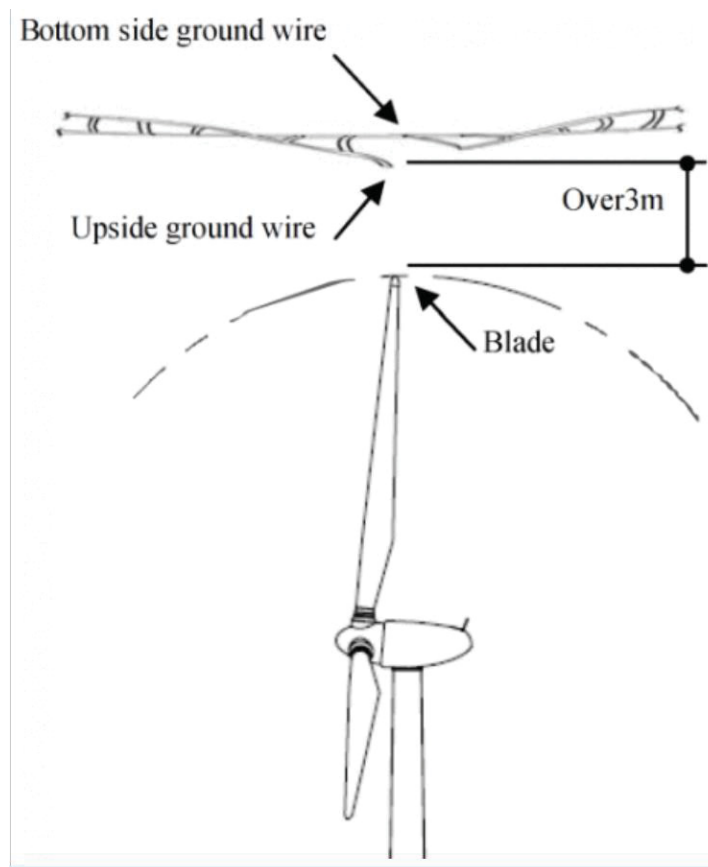
Para se ter proteção e economia se foi adotado o sistema de fio terra aéreo, para se preparar para um possível rompimento do mesmo se toma-se precauções como:

- Para prevenir emaranhados do fio suspenso nas pás das turbinas eólicas, o fio é projetado para não ultrapassar um comprimento específico abaixo da pá. A conexão entre os fios terra superior e inferior evita quedas. Mantendo a distância entre a borda do fio terra aéreo rompido e o topo da pá abaixo de 3m, evita-se descargas elétricas para as pás em caso de

impacto de descargas atmosféricas. A Figura 11 mostra uma representação visual desse conceito. (ONUMA, 2014).

- Para manter a proteção contra descargas atmosféricas, é possível usar dois fios terra suspensos em paralelo. Este sistema usa quatro fios terra aéreos, sendo dois superiores e dois inferiores. Mesmo com um fio cortado, a proteção continua durante vários dias até o reparo.

Figura 11 – Sistema de Proteção contra descargas atmosféricas de aerogerador



Fonte: ONUMA, 2014.

Os condutores de sustentação que ficam ligados aos postes de sustentação dos fios terras também fazem parte do caminho da corrente atmosférica. Se um raio atinge o topo de um poste, os fios de suporte dispersam a corrente do raio, contribuindo significativamente para reduzir a elevação potencial do solo.

4.3. Eficácia do sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas em Aeroogeradores

O sistema de proteção contra descargas atmosféricas nos aeroogeradores do parque eólico estudado foi concluído em fevereiro de 2007, e o resultado pode ser observado pelo contador de raios e pela câmera automática por um ano é mostrada na tabela 3, onde, mostra a quantidade de descargas atmosféricas por cada mês nos aeroogeradores durante o período de um ano.

Tabela 3: Número de Descargas Atmosféricas

Month	Lightning storm days	Number of strikes	Cumulative Total
1	2	11	11
2	0	0	11
3	2	13	24
4	1	3	27
5	1	6	33
6	1	20	53
7	0	0	53
8	1	5	58
9	1	7	65
10	1	6	71
11	4	36	107
Total	14	107	

Fonte: ONUMA, 2014.

A tabela 4 demonstra, ao longo de 5 anos, a quantidade de descargas atmosféricas que atingiram as pás dos aeroogeradores correlacionando com a perda de faturamento pela parada de geração em JPY (Iene japonês) do parque eólico em questão antes da instalação do sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

Fator de transformação do câmbio em 04 de março de 2024:

1,0 JPY = 0,033 Reais.

Tabela 4 - Número de danos nos aerogeradores do parque eólico e perda de faturamento

Yr	Number.	No operation (Days)	Monetary Loss (JPY Million)
2002	2	125	27.252
2003	2	90	16.922
2004	1	70	3.576
2005	5	298	80.102
2006	2	220	28.395
Total	12	803	156.247

Fonte: OMURA, 2014.

Não houve descargas atmosféricas na turbina eólica após a instalação do sistema de proteção. Como não há danos aos dispositivos eletrônicos em turbinas eólicas ao longo de 7 anos, o efeito do sistema de proteção foi satisfatório.

Tabela 5 - Número de danos nos aerogeradores do parque eólico e dias parados dos aerogeradores

Year	Damage number of times	Operation stop days
2007	0	0
2008	0	0
2009	0	0
2010	0	0
2011	0	0
2012	0	0
2013	0	0
Total	0	0

Fonte: OMURA, 2014.

Conforme a análise da tabela 5, observa-se que não ocorreram danos nos aerogeradores provocados por descargas atmosféricas após a implantação do

sistema de proteção. Não houve desligamento da turbina devido a quedas de descargas atmosféricas, resultando em nenhuma perda de produção de eletricidade.

5. CONCLUSÃO

Através da análise dos temas estudados e debatidos nos itens anteriores, é possível observar que a utilização de fontes de energia eólica, com a implantação de parques eólicos nas mais diversas regiões do Brasil, geram diversos problemas variáveis, estes que vão desde danos causados por condições adversas do ambiente (chuva, vento, descargas elétricas) quanto também problemas durante a fase de proteção de equipamentos essenciais para o funcionamento dos aerogeradores nos equipamentos elétricos e eletrônicos que são instalados nos aerogeradores assim como nas pás desses geradores que, são constantemente afetados pelas descargas atmosféricas. Nos casos analisados, onde se utilizaram dispositivos e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em um parque eólico, pode-se observar que o sistema proposto, de proteção, se mostrou satisfatório uma vez que o número de dias parados dos aerogeradores por danificação de pás e queima de componentes eletrônicos diminuiu, ao longo de 7 anos, de um total de 807 dias parados, sem geração de energia elétrica pelos aerogeradores para zero dias parados isto é, o sistema de proteção implantado atingiu o seu objetivo.

Através da análise desse sistema de proteção contra descargas atmosféricas estudado que, foi implantado no Japão, propõe-se o estudo, projeto e utilização de um modelo a ser utilizado como protótipo em um parque eólico instalado no nordeste do Brasil, com as devidas tropicalizações e adaptações as características topográficas da região para fazer a proteção contra descargas atmosféricas e estudar a sua eficácia em nosso país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Calero; I., C. A. Cañizares; K. Bhattacharya, **Compressed Air Energy Storage System Modeling for Power System Studies**, IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8651520>. Acesso em 18 de dez. 2023.

Galorela, A. C.; K. L. Cummins; S. F. Madsen; J. Holboell; J. D. Myers, **Multiple Lightning Discharges in Wind Turbines Associated With Nearby Cloud-to-Ground Lightning**, IEEE, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7058440>. Acesso em 17 jan. de 2024.

INPE, **Mapa de Raios em Tempo Real**. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>. Acesso em 14 de jan. 2024.

JESUS, F.; **Tempestades fustigam não só cidades, mas também turbinas eólicas, 2024**. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/tempestades-atingem-turbinas-eolicas>; Acesso em 04 de jan. 2024.

MISHNAEVSKY, L.; **Damage and Fracture of Heterogeneous Materials**. CRC Press; 1st edition (January 1, 1998)

Nasiri; M. J., O. Homaei; A. Najafi; M. Jasinski; Z. Leonowicz, **Analyzing the Effect of Lightning Channel Impedance on the Induced Overvoltages in Wind Turbines**, IEEE, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9854694>. Acesso em 21 de fev. 2024.

Onuma, M., **The effect of overhead ground wires of a lightning protection system for a wind turbine generator**, IEEE, 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6973231>. Acesso em 21 de fev. 2024.

Pompeu, Marcela M., **Relações entre Raios e Chuvas na Amazonia Oriental**. Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.