

Uso do Campo Elétrico na Geração de Alarmes para Risco de Descargas Atmosféricas

Bruno A. S. Oliveira ^{***,****} Marcos A. Alves ^{***,****}
Willian Maia ^{*,****} Fernando P. Silvestrow ^{***} Waterson S. Soares ^{*}
Luiz F. M. Rodrigues ^{***} Ana Paula Paes dos Santos ^{**}
Eugenio L. Daher ^{***} Douglas B. S. Ferreira ^{**} Osmar P. Júnior [†]

* Vale SA (e-mail: willian.maia, waterson.soares@vale.com)

** Instituto Tecnológico Vale - ITV, (e-mail:

douglas.silva.ferreira@itv.org, ana.santos@pq.itv.org)

*** Fundação para Inovações Tecnológicas - FITec (e-mail:

brunooliveira, marcosaalves, fsilvestrow, lfrodrigues,

edaher@fitec.org.br)

**** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica -
Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte, MG, Brasil

† Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de
Pesquisas Espaciais (INPE)(e-mail: osmar.pinto@inpe.br)

Abstract: Statistics show that Brazil is the country with the highest incidence of atmospheric discharges in the world. Only in 2020 and 2021, there were 280 million lightning strikes in the country. On average, there are 110 deaths and 300 injuries per year, according to INPE, based on the period between 2000 and 2019, when there were 2,194 deaths due to the occurrence of atmospheric discharges. Private sector investments have been made in an attempt to predict this phenomenon to minimize the impacts caused. One of the ways to monitor lightning is through electric field sensors. In this way, the objective of this work was to carry out a qualitative and quantitative analysis of the relationship between electric field data and atmospheric discharges for an area in the central region of the state of Minas Gerais. As a result, it was found that a system for generating alarms using only the electric field sensor should be used with caution since numerous cases of discharges were seen in which there was no variation in the electric field at the same time. On the other hand, the electric field can help in the decision-making of the system, if used in conjunction with lightning data.

Resumo: As estatísticas mostram que o Brasil é o país com maior incidência de descargas atmosféricas no mundo. Somente nos anos de 2020 e 2021, ocorreram 280 milhões de raios no País. Em média são 110 mortos e 300 feridos a cada ano, segundo o INPE, tendo como base o período entre 2000 e 2019 quando ocorreram 2.194 óbitos devido a ocorrência das descargas atmosféricas. Investimentos do setor privado vêm sendo realizado na tentativa da predição desse fenômeno para minimizar os impactos causados. Uma das formas de se monitorar raios é por meio de sensores de campo elétrico. Desta forma, o objetivo desse trabalho é realizar uma análise qualitativa e quantitativa da relação entre dados de campo elétrico e de descargas atmosféricas para uma área na região central do estado de Minas Gerais. Como resultados, verificou-se que um sistema para geração de alarmes utilizando somente o sensor de campo elétrico deve ser empregado com cautela, uma vez que, foi visto inúmeros casos de ocorrências de descargas em que no mesmo instante não houve variação do campo elétrico. Em contrapartida, o campo elétrico pode vir a auxiliar na tomada de decisão do sistema, caso seja utilizado em conjunto com os dados de descargas atmosféricas.

Keywords: Electric field; Atmospheric discharges; Alert system; Protection; Lightning; Safety; Sensor.

Palavras-chaves: Campo elétrico; Descargas atmosféricas; Sistema de alertas; Proteção; Relâmpago; Segurança; Sensor.

1. INTRODUÇÃO

A descarga atmosférica é um fenômeno da natureza muito atrativo para os seres humanos devido o brilho e beleza que ela proporciona no céu. Contudo, se trata de um evento altamente perigoso. O fenômeno envolve uma descarga elétrica na atmosfera, que libera uma quantidade enorme de energia na forma de raios e calor (Rakov e Uman, 2003). As descargas atmosféricas causam diversos riscos aos seres humanos e aos equipamentos elétricos, eletrônicos e de comunicação, sendo necessário o desenvolvimento de tecnologias que possam amenizar o impacto causado por esses fenômenos naturais (Montanya et al., 2004; Libório et al., 2020).

Além disso, as descargas atmosféricas são uma das principais causas de danos severos aos sistemas de produção de energia eólica, gerando um prejuízo de milhões de dólares por ano (Rademakers et al., 2002). Como exemplo, há alguns anos, um parque eólico na Alemanha sofreu consideráveis perdas ocasionadas por raios que sua operação deixou de ser rentável (Kithil, 2011).

Para a redução desses impactos, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas vêm sendo desenvolvidos nas últimas décadas (Srivastava et al., 2015). No entanto, dada a natureza estocástica no espaço-tempo que as descargas podem ocorrer, não há uma solução ótima que seja capaz de prever com antecedência tais eventos. Logo, estudos exploratórios são essenciais para gerar *insights* e fornecer recursos para novas investigações.

Para que seja possível proporcionar algum tipo de segurança para os trabalhadores e para os equipamentos elétricos em campo em relação a esse fenômeno, é necessário que os sistemas de alertas sejam desenvolvidos considerando as medições de parâmetros atmosféricos. A depender da estação do ano, a condição para a formação de uma tempestade é caracterizada por variações de diversos parâmetros, tais como: pressão, umidade e temperatura do ar. Ao mesmo tempo, é importante que as indústrias que possuem atividades em áreas abertas como a mineração e usinas eólicas possuam sistemas capazes de gerar alertas antecipados de descargas atmosféricas. A partir deste sistema, é possível otimizar o planejamento operacional, aumentar a segurança de pessoas e, conseqüentemente, reduz-se o risco de acidentes. Vale ressaltar o alto custo dos equipamentos e maquinários das empresas, os quais também devem ser protegidos.

Estudos pretéritos apresentaram uma metodologia de otimização aplicada utilizando medição de campo elétrico correlacionada com informações de satélites, avaliação meteorológica e diversos sensores de campo magnético dentre outros, com objetivo de prever as descargas atmosféricas para retirada antecipada do trabalhador das áreas abertas (Soares e Fonseca, 2019).

Uma das formas utilizadas para auxiliar na previsão de descargas atmosféricas é com base na utilização de sensores de campo elétrico (Bennett e Harrison, 2007). Diferente de soluções baseadas em inteligência artificial, como os modelos de aprendizado de máquina discutidos por Bala

et al. (2017), que precisam ser retreinados para capturar as especificidades de cada região, os sensores de campo elétrico possuem a versatilidade em relação a possibilidade de serem (re)instalados em diferentes pontos, sem grandes dificuldades. Importante destacar que, cada sensor possui suas especificações técnicas que devem ser obedecidas. No geral, porém, eles podem ser realocados sob demanda.

Há muitas pesquisas direcionadas a estudar o campo elétrico proveniente de diferentes sensores, como “field mill” (Igarashi et al., 2011; Ferro et al., 2011; Srivastava et al., 2015) e “Campo elétrico” (Costa et al., 2014). Igarashi et al. (2011) propuseram uma modelagem fuzzy capaz de reduzir o tempo de inatividade de operações. Ferro et al. (2011) e Costa et al. (2014) estudaram diferentes limiares de campo elétrico, sendo que os primeiros compararam os dados com as descargas atmosféricas captadas pelo BrasilDAT. Srivastava et al. (2015) basearam em cadeias de Markov para calcular probabilidades de descargas.

Embora acredita-se que a efetividade possa variar entre os sensores, o que se espera é o correto funcionamento dos mesmos. Neste contexto, o principal objetivo dessa pesquisa é de, por meio de dados coletados por sensores de campo elétrico e de descargas atmosféricas, analisar a relação existente entre esses fenômenos e, conseqüentemente, a correlação entre os dados coletados para uma área específica localizada na região central do estado brasileiro de Minas Gerais. Além disso, pretende-se verificar o quão eficaz pode ser a utilização única do sensor de campo elétrico para a geração de alertas de risco para descargas atmosféricas.

Esse artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta conceitos importantes para o bom entendimento do trabalho, tais como: o que é a eletricidade atmosférica e a relação entre o campo elétrico atmosférico em e na proximidade de nuvens de tempestade. A Seção 3, foram exploradas as principais pesquisas na literatura que se relacionam com o trabalho proposto. Na Seção 4 são descritos os materiais e métodos empregados no estudo e na Seção 5 os resultados e a discussão deles. Por fim, na Seção 6 são apresentadas as considerações finais, bem como as limitações da pesquisa e possibilidades para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Eletricidade Atmosférica

A eletricidade presente na atmosfera tem como causas principais a ionização do ar e a presença do campo elétrico devido à atividade elétrica global do planeta bem como de fatores locais devido aos fenômenos que ocorrem na camada limite planetária da atmosfera. Devido a existência de radiações de materiais radioativos no solo, radiações ultravioletas e raios cósmicos, a atmosfera apresenta íons positivos e negativos. O campo elétrico terrestre movimenta estes íons (Anaya, 2019).

Em condições de tempo bom (céu claro ou com presença de nuvens médias e altas) existe um campo elétrico vertical de intensidade média de 100 V/m, apontando para baixo, de-

vido às cargas positivas distribuídas na atmosfera, próximo à superfície do planeta, e as cargas negativas distribuídas na superfície da Terra. De acordo com a convenção de sinais da física, o campo voltado para baixo é negativo porque se encontra na direção oposta do vetor da coordenada radial do sistema esférico cuja origem é o centro do planeta. Dito isso, sabe-se que o valor do campo elétrico pode ser afetado por diversos fatores, dentre eles a poluição, a nebulosidade e a turbulência atmosférica (Rakov e Uman, 2003).

2.2 Campo Elétrico Atmosférico em/na Proximidade de Nuvens de Tempestade

A medição do campo elétrico atmosférico é o método mais apropriado para observação do processo de formação e evolução de uma nuvem de tempestade. No interior de nuvens de tempestade, o campo elétrico pode alcançar valores intensos da ordem de 400 kV/m (Oliveira et al., 2020; Turquetti e Ferreira, 2016). Quando uma nuvem de tempestade se forma, a carga elétrica, concentrada nos três centros principais: Centro de Carga Positiva (CP) e Negativa (CN) e Centro Positivo Menor (LPCC), distribuídos no interior da nuvem de tempestade faz com que o campo elétrico atmosférico nas proximidades da nuvem aumente superando os 1000V/m e apresente variações de polaridade. Apesar de atenuado, no nível do solo, o campo elétrico de uma nuvem de tempestade atinge valores de algumas dezenas de kV/m, de polaridade positiva.

O campo apresenta variações rápidas associadas aos relâmpagos seguidas por uma variação lenta indicando o fim da tempestade, denominada oscilação de fim de tempestade. Ela está associada a mudanças na estrutura elétrica da nuvem na fase de dissipação provocada pela precipitação e neutralização das camadas de blindagem da nuvem (Rakov e Uman, 2003). Essas variações físicas permitem, portanto, análises quantitativas e qualitativas entre o campo elétrico e as descargas.

3. TRABALHOS RELACIONADOS

Nas últimas décadas, diversos trabalhos na literatura vêm investigando a relação entre o campo elétrico e a ocorrência de descargas elétricas durante a formação de tempestades. Muitos deles são voltados ao uso de sensores para a geração de alertas de advertência sobre áreas de interesse, como Igarashi et al. (2011); Ferro et al. (2011); Srivastava et al. (2015); Costa et al. (2014). Uma das contribuições é a busca por geração de alertas em regiões onde há pessoas trabalhando e que precisam buscar proteção. Dado um alerta de advertência, as pessoas, com alguma antecedência, buscam abrigo até que o período indicado no alerta se encerre.

Ridley e Liemohn (2002) realizaram um estudo descritivo do campo elétrico acionado por corrente de anel assimétrico durante uma tempestade. Eles mencionam que campos elétricos ionosféricos de baixa latitude e magnetosféricos próximos à Terra são calculados a partir de resultados de modelos de corrente de anel assimétrica ao tempo da tempestade. As correntes equilibram a divergência da corrente assimétrica do anel, que é o componente dominante da corrente do anel durante a fase principal e

a fase inicial de uma tempestade. Os autores concluíram que essa relação pode ser usada para prever a localização e o tamanho de fortes campos elétricos e correntes de baixa latitude.

No estudo de Troshichev et al. (2004), realizado na região polar sul, foi investigada a relação entre as variações do campo elétrico atmosférico e a ocorrência de trovoadas. Os autores não encontraram correlação entre as médias das medições de campo elétrico e a intensidade dos relâmpagos, embora foi observada uma correlação significativa entre os dados em casos particulares. Os mesmos resultados estatísticos foram obtidos a partir de uma comparação em determinados horários. As razões dessas inconsistências foram discutidas no estudo.

Ferro et al. (2011) apresentaram uma metodologia que utiliza variações do campo elétrico causadas pela formação ou deslocamento das nuvens que formam tempestades para que, em seguida, fosse possível gerar alertas de raios. O estudo foi desenvolvido em uma região de interesse no Sudeste do Brasil, com foco em três áreas ao redor do sensor. O limiar para o disparo do alerta em cada área foi variado entre 500V/m e 1500V/m. Para validar se realmente ocorreu uma descarga, os dados foram comparados com outra base de dados de sensores que capturam a ocorrência da descarga dentro da área monitorada. Foram avaliados o número de alarmes corretos, o número de alarmes falsos e a quantidade de alarmes que deveriam ter sido gerados, mas não foram (i.e., falhas). A partir da análise desses parâmetros, os autores concluíram que, aparentemente, o limiar de campo elétrico mais interessante a ser utilizado é o nível de 900V/m para um raio de 10km ao redor do ponto onde o sensor está instalado.

Tovar et al. (2014) avaliaram os riscos causados por descargas atmosféricas e a qualidade dos sistemas de geração de alertas para esse fenômeno. A pesquisa analisou os riscos de raios na Colômbia e como os sistemas de alerta de trovoadas podem ser usados para gerenciá-los. Instalações reais e constatações de trovoadas de 2012 a 2013 foram estudadas. Eles concluíram que países com altas densidades no solo e que possuem indústrias que envolvem ambientes perigosos geralmente não se preocupam em satisfazer os limites toleráveis de proteção contra descargas atmosféricas.

Na pesquisa de Costa et al. (2014) os autores mencionaram que o Brasil ocupa a incômoda posição de campeão mundial de raios, que é confirmada no livro de Pinto Junior e Pinto (2021), onde as estatísticas mostram que o país é atingido em média por 50 milhões de raios por ano, causando cerca de 130 óbitos e 500 feridos. O trabalho descreveu a experiência do uso de um sistema de detecção preventivo de descargas atmosféricas por meio da medição da variação do campo elétrico. O sistema foi capaz de gerar alertas de risco na área monitorada, fazendo com que os colaboradores que trabalhavam na região pudessem se deslocar para locais seguros. Os autores reportaram bons resultados ao se utilizar os dados de campo elétrico para a geração de alertas de risco.

Em Tao et al. (2016), os autores destacaram que as medidas tradicionais dos sistemas de proteção contra raios são deficitárias, comprometendo o suporte à tomada de decisão para interromper os trabalhos em uma área monitorada.

Com a decisão correta, torna-se possível proteger os equipamentos elétricos bem como a vida das pessoas no local. Com este foco, os autores detalharam os experimentos ao se adotar o campo elétrico atmosférico para a geração de alerta de raios de pequena escala e em curto prazo para áreas alvo. Por fim, foi verificada a eficiência e praticidade do sistema quando ele foi aplicado para a proteção de algumas áreas que possuem linhas de transmissão de redes elétricas.

Na pesquisa de Yang et al. (2021) foi desenvolvido um método de rastreamento que encontra o caminho da movimentação da nuvem de uma tempestade. Para isso, foi utilizado um aparelho de campo elétrico atmosférico tridimensional. Para atingir o objetivo do estudo que é o rastreamento da nuvem de uma tempestade, os autores estabeleceram um modelo espacial para rastrear essa trajetória. Com base no modelo, foram definidos os parâmetros dinâmicos da posição da nuvem de trovoadas. Os resultados mostraram que o método pode rastrear com precisão o caminho da movimentação da nuvem na tempestade. Além disso, o método também pode ser combinado com um mapa de radar, melhorando a previsão para o desenvolvimento da nuvem de uma tempestade.

Como anteriormente mencionado, alguns trabalhos já investigaram a viabilidade do uso do campo elétrico para geração antecipada de alarmes. Entretanto, com o passar dos anos e com o aprimoramento dos sensores, novos estudos devem ser realizados para explorar o uso de tal equipamento. Além disso, acredita-se que a pesquisa possa contribuir para a região monitorada possibilitando o desenvolvimento de uma aplicação prática. Por fim, outra contribuição esperada é que os resultados encontrados possam servir como ponto de partida para uma análise com modelos de sensores diferentes para que sejam avaliados em outras regiões.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Sensores de campo elétrico

Sensores de campo elétrico são utilizados para gerar alertas da possibilidade da ocorrência de uma descarga atmosférica em um dado local com o intuito de proteger vidas e/ou equipamentos elétricos (Murphy e Cummins, 2000; Murphy e Holle, 2006). A Figura 1 mostra, como exemplo, a foto de um sensor de campo elétrico instalado na região investigada.

Os sensores medem o campo elétrico atmosférico em um range de +/- 32 kV/m e gera três tipos de alerta: acima de 3 kV/m, 5 kV/m e 7 kV/m, sendo este último considerado risco de alerta máximo e está associado a possibilidade eminente da queda de uma descarga atmosférica nas suas imediações.

4.2 Sensores de descargas atmosféricas

Sensores de descargas atmosféricas são utilizados para monitorar a ocorrência das descargas atmosféricas, informando o instante e localização da descarga, com o intuito de antecipar ações para proteger vidas ou equipamentos elétricos.



Figura 1. Fotografia do sensor de campo elétrico instalado na região monitorada.

Basicamente existem três tipos de sensores: (i) sensores que detectam radiação na faixa de VLF, ou (ii) VLF/LF e (iii) sensores óticos a bordo de satélites, sendo que os dois primeiros operam em redes de superfície. Cada tipo de sensor possui características próprias que definem a área de cobertura, eficiência de detecção e precisão de localização dos dados obtidos (Pinto Junior e Pinto, 2021).

4.3 Análise comparativa do campo elétrico e das descargas ocorridas

A área específica do estudo se localiza na região central do estado brasileiro de Minas Gerais. Os dados coletados são de 01/03/2020 à 28/02/2021, totalizando um ano. A Tabela 1 ilustra um subconjunto dos dados obtidos pelo sensor de campo elétrico.

Tabela 1. Fragmento do conjunto de dados de campo elétrico.

Instante	CE (V/m)
2020-11-06 09:33:57	1188
2020-11-06 09:33:59	1255
2020-11-06 09:34:07	1179
2020-11-06 09:34:09	1087
2020-11-06 09:34:18	723

A Tabela 2 apresenta um fragmento de como são organizados os dados das descargas atmosféricas. Estes dados foram obtidos com o Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (ELAT/INPE), coletados de três redes de superfície formadas por cerca de 110 sensores espalhados pelo Brasil e, também, pelo sensor *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) a bordo do satélite geoestacionário GOES-16.

Como se pode observar nos dados, tem-se tanto o instante de tempo em que a descarga ocorreu quanto sua localização, dada a sua Latitude e Longitude. Com isso, torna-se possível comparar, em um instante de tempo qualquer, qual o valor do campo elétrico quando houve a ocorrência de uma descarga a uma determinada distância de onde o sensor de campo elétrico foi instalado.

Tabela 2. Fragmento do conjunto de dados de descargas atmosféricas.

Instante	Latitude	Longitude
2020-04-15 17:31:28	-20,1432	-43,8755
2020-04-15 17:32:00	-20,1897	-43,8477
2020-04-15 17:32:00	-20,1588	-43,8531
2020-04-15 17:32:02	-20,1574	-43,8397
2020-04-15 17:32:19	-19,8614	-43,3944

Foram explorados dois tipos de análises: qualitativa e quantitativa. Na primeira, buscou-se comparar por meio de uma análise gráfica a relação entre as informações contidas nas duas bases de dados. Já a segunda teve como objetivo simular a geração de alertas quando se é utilizado somente os dados de campo elétrico.

Como um dos objetivos da pesquisa é avaliar o uso do campo elétrico para a geração de alarmes, por meio da análise quantitativa, foram realizadas simulações variando os valores de campo elétrico em [500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 e 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, 7000] V/m.

Para o comparativo foram consideradas descargas cuja distância era igual ou inferior a 10 km de onde estava instalado o sensor de campo elétrico. O valor de 10 km é justificado como sendo a área importante a ser monitorada em torno da região de interesse. Além disso, esse valor é o especificado na documentação do sensor abordado como sendo o limite da sensibilidade do aparelho. Além disso, as métricas de avaliação adotadas foram:

- **Falha de alerta:** Indica a ocorrência de uma descarga atmosférica na região de 10 km sem ter sido emitido algum alerta anteriormente.
- **Falso alerta:** Indica que foi gerado um alerta, porém não teve nenhuma descarga atmosférica dentro da região de 10 km monitorada.
- **Inatividade de operação:** Tempo de inatividade nas atividades da empresa em consequência da emissão de algum alerta. Obtido o tempo em seu valor bruto, é possível calcular o percentual de quanto as operações foram interrompidas considerando todo o período analisado.
- **Tempo de antecipação médio:** Representa o tempo médio necessário, após um alerta acionado, para o registro da ocorrência de uma descarga atmosférica dentro da região monitorada.

Dessa forma, para cada simulação feita com um valor diferente de campo elétrico para a geração de alarmes, tem-se o resultado de cada uma das métricas calculadas. Com isso, foi possível verificar o impacto da variação do valor de campo elétrico para a geração dos alarmes, indicando possíveis riscos para os profissionais em campo e para os equipamentos elétricos expostos na região.

Por fim, a análise qualitativa foi realizada. Para isso, foi produzido um gráfico específico para cada dia que possuísse pelo menos uma descarga atmosférica dentro do período das 00h00 às 23h59. Dessa forma, foi possível observar e analisar a relação entre os dois conjuntos de dados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os valores das métricas obtidos para cada uma das diferentes simulações realizadas alternando o valor do campo elétrico para a geração de alarmes. Como se pode observar, existe um problema clássico de trade-off entre falsos e falhas de alertas. Isto é, reduzir o campo elétrico para a geração de alertas eleva a causa uma maior quantidade de alarmes que correspondem a descargas mas, em contrapartida, um maior número de alertas falsos e, conseqüentemente, o aumento da inatividade.

Para exemplificar o problema de *trade-off* já mostrado com os dados da Tabela 3, a Figura 2 ilustra em forma gráfica a relação entre falhas e falsos alertas, considerando cada valor de campo elétrico abordado.

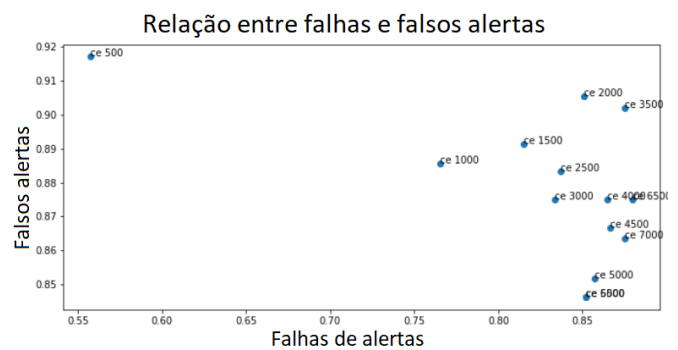


Figura 2. Relação entre falhas e falsos alertas, onde cada amostra representa um determinado valor para o campo elétrico.

Como mostrado na Tabela 3 e na Figura 2, definir um valor ideal para o uso do campo elétrico não é uma tarefa trivial, visto que, caso a segurança dos trabalhadores e dos equipamentos elétricos seja priorizada, o tempo de inatividade das operações aumenta, gerando prejuízo para a empresa. Em contrapartida, priorizar horas de operação aumenta a chance de acidentes pessoais e danos aos equipamentos elétricos, também gerando prejuízo para a empresa.

Considerando o valor de campo elétrico de 500 V/m como apresentado na Tabela 3, foi visto que o valor de 55,7% para as falhas de alertas é interessante (considerando os outros valores de limiar abordados), contribuindo na prevenção de acidentes. Contudo, levando em conta o período analisado que é de quase um ano para uma empresa cuja jornada de trabalho é ininterrupta, as atividades ficaram paradas por 12 dias, 13 horas e 30 minutos.

Para o caso do uso do campo elétrico de 1000 V/m a taxa de falhas de alertas subiu consideravelmente, sendo dessa vez 76,5%. Em contrapartida, considerando a mesma empresa anterior que atua de forma ininterrupta, as atividades ficariam paradas por um período bem menor, aproximadamente 2 dias, 17 horas e 30 minutos, quase 10 dias a menos que no caso anterior.

Sendo assim, a decisão para um valor ideal de campo elétrico possui certa subjetividade e requer uma análise

Tabela 3. Resultados das métricas obtidas para cada uma das simulações realizadas.

Campo Elétrico (V/m)	Falhas de alertas	Falsos alertas	Tempo de inatividade	Inatividade da operação	Tempo médio de antecipação
500	0.557	0.917	12 dias e 13:30:00	0.0370	00:07:56
1000	0.765	0.885	2 dias e 17:30:00	0.0082	00:08:51
1500	0.814	0.891	1 dias e 22:00:00	0.0057	00:06:30
2000	0.851	0.905	1 dias e 13:00:00	0.0046	00:10:14
2500	0.837	0.883	1 dias e 06:00:00	0.0037	00:10:14
3000	0.833	0.875	1 dias e 04:00:00	0.0035	00:08:48
3500	0.875	0.901	1 dias e 01:30:00	0.0032	00:09:47
4000	0.864	0.875	0 dias e 20:00:00	0.0025	00:08:47
4500	0.866	0.866	0 dias e 15:00:00	0.0018	00:10:40
5000	0.857	0.851	0 dias e 13:30:00	0.0017	00:08:10
5500	0.851	0.846	0 dias e 13:00:00	0.0016	00:08:10
6000	0.851	0.846	0 dias e 13:00:00	0.0016	00:08:10
6500	0.880	0.875	0 dias e 12:00:00	0.0015	00:08:29
7000	0.875	0.863	0 dias e 11:00:00	0.0013	00:08:29

multicritério que considere prioritariamente proteção de pessoas e em segundo plano questões operacionais.

Os trabalhos de Beasley et al. (2008); Murphy et al. (2008); Aranguren et al. (2009); Ferro et al. (2011) sugerem um limiar de 1000 V/m para a geração de alertas. Dessa forma, para a análise qualitativa esse valor também foi adotado no presente estudo teórico.

Sendo assim, para a análise qualitativa da relação dos dados de sensor de campo elétrico e descargas atmosféricas, a Figura 3 mostra o gráfico do dia 18 de dezembro de 2020. O eixo X representa o instante que ocorreu seja a variação do campo elétrico ou a descarga. O eixo Y à esquerda mostra a escala do campo elétrico em V/m e à direita a escala em km, em relação a distância de onde o sensor de campo elétrico foi instalado. Os pontos em azul ilustram a ocorrência das descargas e em vermelho o momento em que houve variação do campo. Por último, o tracejado da cor verde parametriza o valor de campo elétrico abordado, servindo de referência para a análise qualitativa.

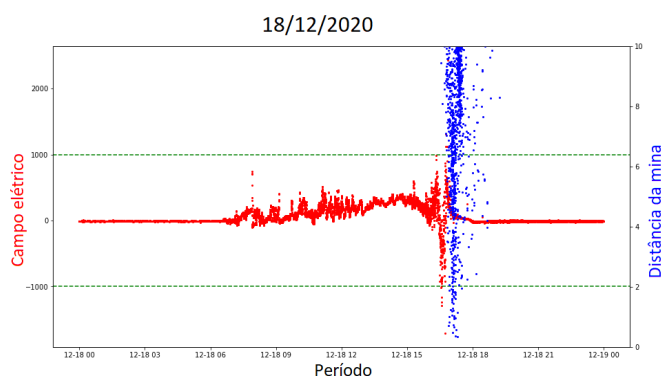


Figura 3. Gráfico que ilustra os valores de campo elétrico (em vermelho) e a distância das descargas atmosféricas (em azul) registradas no dia 18 de dezembro de 2020.

A Figura 3 apresenta um período onde um provável sistema de geração de alertas com base somente nos dados de campo elétrico foi perfeito. Como pode ser observado, nenhum falso alerta foi gerado e, por volta das 16 horas e 35 minutos um alerta foi dado, uma vez que o valor de campo elétrico foi inferior ao valor de -1000 V/m.

Um segundo caso de sucesso foi o ocorrido no dia 11/11/2020, mostrado na Figura 4.

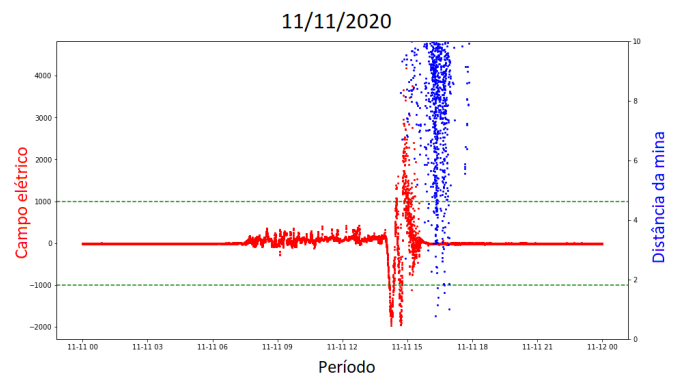


Figura 4. Gráfico que ilustra os valores de campo elétrico (em vermelho) e a distância das descargas atmosféricas (em azul) registradas no dia 11 de novembro de 2020.

Assim como na Figura 3, na Figura 4 o comportamento do campo elétrico conseguiu ser coerente com os dados de descargas atmosféricas. Quando não há ocorrências de descargas, a variação do campo elétrico é baixa. Minutos antes da primeira ocorrência, o valor do campo foi inferior a -1000 V/m, tendo sido por volta das 14 horas e 15 minutos, disparando o alerta. Para esse dia, a descarga inicial dentro de 10 km aconteceu aproximadamente às 14 horas e 35 minutos, isto é, o alarme foi disparado com a antecedência necessária de modo que desse tempo de os profissionais em campo se protegessem e resguardassem os equipamentos elétricos em áreas expostas.

Em contrapartida, existiram casos que somente o uso do campo elétrico para a geração de alarmes não foi satisfatória. O gráfico da Figura 5 apresenta um exemplo. Entre 01h e 05h da madrugada foram registradas inúmeras ocorrências de descargas, porém o sensor de campo elétrico não detectou nenhuma variação significativa, se mantendo praticamente constante e consequentemente não gerando um alerta como deveria. Para o mesmo dia, é possível observar que o uso de somente o sensor iria ajudar somente por volta das 16 horas, sendo que, às 14 horas também houve ocorrência de duas descargas que não teriam sido alertadas.

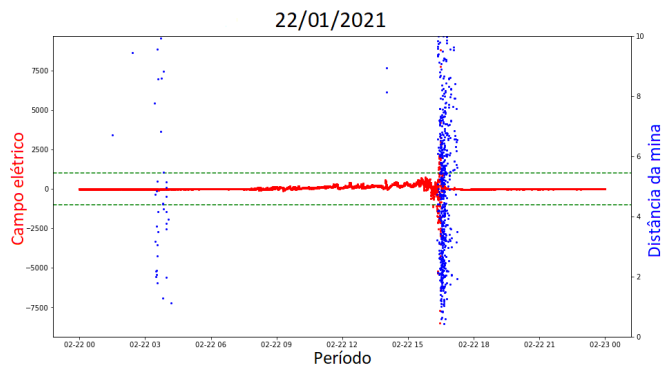


Figura 5. Gráfico que ilustra os valores de campo elétrico (em vermelho) e a distância das descargas atmosféricas (em azul) registradas no dia 22 de janeiro de 2021.

Foi visto por meio da análise quantitativa e qualitativa realizadas nesse estudo que existe uma forte correlação entre os dados de campo elétrico e de descargas atmosféricas. Contudo, acontece casos em que o campo elétrico não varia quando há ocorrência de descargas. Dessa forma, a decisão de fazer uso de somente os dados de campo elétrico para a geração de alertas deve ser feita de forma cautelosa, pensando nos riscos a serem encarados.

Por fim, destaca-se a necessidade de utilizar de forma simultânea os diversos sistemas existentes para detecção de descargas atmosféricas, o que pode potencializar os resultados, visto as limitações existentes na aplicação dos sensores de campo elétrico. Contudo, também foi observado benefícios que o sensor de campo elétrico oferece, como a confirmação da queda do raio e uma possível predição antecipada de quando o campo começa a elevar seu valor significativamente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa teve como objetivo avaliar como os dados coletados por um sensor de campo elétrico podem contribuir para apoiar o processo de tomada de decisão na geração de um alerta de risco de descargas atmosféricas. Para isso, foram realizados experimentos com diferentes valores de campo elétrico para a geração do alarme e os resultados foram avaliados com base em algumas métricas. Além disso, foi utilizada uma base de dados de descargas atmosféricas para a metrificação e para uma análise qualitativa entre a correlação das duas bases de dados.

Com a análise quantitativa e dado os resultados obtidos nas métricas de avaliação, foi visto que encontrar o melhor valor de campo elétrico para a geração de alarmes não é nada intuitiva, uma vez que a melhora de uma métrica implica na piora de outra, o que caracteriza como um problema clássico de *trade-off*.

Com a análise qualitativa se percebeu que em muitos casos realmente o campo elétrico consegue, além de gerar o alerta na ocorrência de uma descarga, fazer isso antecipando alguns minutos. Isso é interessante, uma vez que, as pessoas poderiam ir para locais seguros e proteger os equipamentos elétricos com tempo hábil antes da primeira ocorrência. Em contrapartida, foi visto que as vezes são gerados alertas sem que ocorresse uma descarga, gerando um falso alerta. Além disso, em muitos casos em que houve a ocorrên-

cia de descargas o valor de campo elétrico se manteve praticamente constante, casos esses que implicam como falha de alerta. Neste sentido, recomenda-se utilizar outras tecnologias de forma simultânea de forma a suprimir as limitações técnicas existentes nos equipamentos de campo elétrico.

Como trabalhos futuros, outros modelos de sensores de campo elétrico serão instalados em diferentes regiões, com o objetivo de verificar se apresentariam uma melhora ou piora na geração de alertas. Além disso, avaliar se nos casos em que não houve variação abrupta do campo elétrico no momento das descargas foi devido a distância das descargas em relação ao sensor. Normalmente os valores de medição variam negativamente do centro para fora do raio do sensor quando a tempestade se forma sob o sensor. Similar a uma tenda/ cobertura circular. Ou seja, pode ser que o sensor não consiga atingir valores altos se a tempestade estiver distante.

Outro estudo que será contemplado é realizar experimentos considerando a geração de alertas tanto utilizando os dados de campo elétrico quanto empregando os dados de descargas atmosféricas. Dessa forma, acredita-se que os resultados irão melhorar significativamente, uma vez que, o campo elétrico pode ajudar no tempo de antecipação para uma primeira descarga, enquanto os dados de raios irão disparar o alerta na primeira ocorrência, mesmo que não tenha ocorrido variação do campo elétrico e o sensor não houvesse detectado.

Os autores esperam que a publicação desse artigo seja uma contribuição científica para melhorar as soluções de geração de alertas disponíveis atualmente, visto que, a tarefa de proteger as pessoas estão em áreas abertas em momentos de tempestade é desafiadora. Além disso, que o estudo sirva de incentivo para outros trabalhos futuros relacionados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da pesquisa proporcionada pela Vale S.A. e a oportunidade do desenvolvimento do trabalho nas dependências da FITec.

REFERÊNCIAS

- Anaya, J.C.T. (2019). Análise da variabilidade do campo elétrico atmosférico durante tempo bom e distúrbios geofísicos. *Universidade Presbiteriana Mackenzie*.
- Aranguren, D., Montanya, J., Sola, G., March, V., Romero, D., e Torres, H. (2009). On the lightning hazard warning using electrostatic field: Analysis of summer thunderstorms in Spain. *Journal of Electrostatics*, 67(2-3), 507-512.
- Bala, K., Choubey, D.K., e Paul, S. (2017). Soft computing and data mining techniques for thunderstorms and lightning prediction: a survey. In *2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, volume 1, 42-46. IEEE. doi: 10.1109/ICECA.2017.8203729.
- Beasley, W.H., Williams, D.E., e Hyland, P.T. (2008). Analysis of surface electric-field contours in relation to cloud-to-ground lightning flashes in air-mass thunderstorms at the Kennedy Space Center. In *2nd International Lightning Meteorology Conference*, 24-25.

- Bennett, A. e Harrison, R. (2007). Atmospheric electricity in different weather conditions. *Weather*, 62(10), 277–283.
- Costa, P.F., Ferreira, M.A., e Salame, Y.C. (2014). Preventive lightning protection using local static electric field measurements without mobile elements: First brazilian experience. *International Conference on Grounding and Earthing and 6 th International Conference on Lightning Physics and Effects*.
- Ferro, M.A.D.S., Yamasaki, J., Pimentel, D.R.M., Naccarato, K.P., e Saba, M.M.F. (2011). Lightning risk warnings based on atmospheric electric field measurements in brazil. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 3, 301–310.
- Igarashi, A.Y.S., Leandro, G., e Leite, E.A. (2011). Alerta de incidências de descargas atmosféricas utilizando lógica fuzzy. In *10th Brazilian congress on computational intelligence*.
- Kithil, R. (2011). Lightning hazard reduction at wind farms. Technical report, American Wind Energy Association, Washington, DC (United States).
- Libório, M., Maia, W., Martins, C., Ekel, P., Laudares, S., e Bernardes, P. (2020). Reducing costs of preventive lightning systems by locational optimization. *GOT: Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, 1(20), 149.
- Montanya, J., Bergas, J., e Hermoso, B. (2004). Electric field measurements at ground level as a basis for lightning hazard warning. *Journal of Electrostatics*, 60(2-4), 241–246.
- Murphy, M.J. e Holle, R.L. (2006). Warnings of cloud-to-ground lightning hazard based on combinations of lightning detection and radar information. In *19th International Lightning Detection Conference (ILDC). Proceedings. Tucson, CD-ROM*.
- Murphy, M.J., Holle, R.L., e Demetriades, N.W. (2008). Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations. In *20th international lightning detection conference*, 21–23.
- Murphy, M. e Cummins, K. (2000). Early detection and warning of cloud-to-ground lightning at a point of interest. In *Preprints, 2nd Symposium on Environmental Applications*.
- Oliveira, R.R.R.d. et al. (2020). Análise de variações na radiação gama natural associada ao radônio e influência do campo elétrico atmosférico e efeitos meteorológicos. *Universidade Presbiteriana Mackenzie*.
- Pinto Junior, O. e Pinto, I.R.C.d.A. (2021). *Brasil campeão mundial de raios*. Artliber.
- Rademakers, L., Braam, H., Ramakers, S.G., Wessels, H.R., Prins, R.K., Lok, R., e Leunis, L. (2002). Lightning damage of owecs. part 3. case studies. *ECN Wind Energy*.
- Rakov, V. e Uman, M. (2003). *Lightning: physics and effects* cambridge university press. *Cambridge, UK*.
- Ridley, A. e Liemohn, M. (2002). A model-derived storm time asymmetric ring current driven electric field description. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A8), SMP-2.
- Soares, W.S. e Fonseca, F.O.G. (2019). Lightning monitoring systems a case study applied to the iron ore minning. an approach to meeting standards iec 62793-5, iec 627139 iec 62305/nbr-5419. In *2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA)*, 1–6. doi:10.1109/SIPDA47030.2019.8951594.
- Srivastava, A., Mishra, M., e Kumar, M. (2015). Lightning alarm system using stochastic modelling. *Natural Hazards*, 75(1), 1–11. doi:10.1007/s11069-014-1247-8.
- Tao, H., Gu, S., Wang, H., Feng, W., Guo, J., Wang, Y., e Zhang, L. (2016). Method of lightning warning based on atmospheric electric field and lightning location data. In *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1–5. IEEE.
- Tovar, C., Aranguren, D., López, J., Inampué, J., e Torres, H. (2014). Lightning risk assessment and thunderstorm warning systems. In *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1870–1874. IEEE.
- Troshichev, O., Frank-Kamenetsky, A., Burns, G., Füllekrug, M., Rodger, A., e Morozov, V. (2004). The relationship between variations of the atmospheric electric field in the southern polar region and thunderstorm activity. *Advances in Space Research*, 34(8), 1801–1805.
- Turquetti, G.N. e Ferreira, I.S. (2016). Um estudo do circuito elétrico atmosférico global. *Physicae Organum-Brasília*, 1(2-2015).
- Yang, X., Xing, H., Xu, W., e Ji, X. (2021). A moving path tracking method of the thunderstorm cloud based on the three-dimensional atmospheric electric field apparatus. *Journal of Sensors*, 2021.