LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

ANÁLISE SEGMENTADA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA GERAÇÃO ANTECIPADA DE ALERTAS DE SEGURANÇA EM ÁREAS COM ATIVIDADES EM CAMPO ABERTO

Bruno A. S. Oliveira, Marcos A. Alves, Daniel Calvo, Eugenio L. Daher
FITec - Fundação para Inovações Tecnológicas
{brunooliveira, marcosaalves, dcalvo, edaher} @fitec.org.br

Ana Paula P. Santos, Douglas B. S. Ferreira
Instituto Tecnológico Vale - ITV
{ana.santos, douglas.silva.ferreira} @itv.org

Osmar Pinto Júnior
Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
osmar.pinto@inpe.br

RESUMO

Este estudo foca na antecipação de alertas de descargas atmosféricas em áreas industriais a céu aberto, como minas, equilibrando produtividade e segurança. A metodologia propõe monitorar áreas ao redor de um ponto de interesse em círculos concêntricos com raios variáveis conforme a estação do ano, gerando alertas de acordo com a localização das descargas. Diferente da abordagem tradicional, com raio fixo de 10 km, este estudo adotou uma abordagem sazonal, obtendo resultados superiores. Os resultados indicaram uma taxa de falsos alertas de 56,84%, falhas de 21,96%, inatividade de 2,96%, e um tempo médio de antecipação de 7,73 minutos ao longo de 3 anos. Essa abordagem sazonal reduziu significativamente as falhas de alerta, mostrando-se eficaz para melhorar a segurança e manter a produtividade em operações de mineração sujeitas a descargas atmosféricas.

PALAVRAS CHAVE. Descargas atmosféricas, Geração antecipada de alertas, Mineração.

Pesquisa Operacional na Indústria, Inteligência Computacional

ABSTRACT

This study focuses on anticipating lightning strike warnings in open industrial areas, such as mines, balancing productivity and safety. The proposed methodology involves monitoring areas around a point of interest in concentric circles with varying radii according to the season, generating alerts based on the location of the strikes. Unlike the traditional approach, which uses a fixed 10 km radius, this study adopted a seasonal approach, yielding superior results. The findings indicated a false alarm rate of 56.84%, failures of 21.96%, inactivity of 2.96%, and an average lead time of 7.73 minutes over 3 years. This seasonal approach significantly reduced alert failures, proving effective in enhancing safety while maintaining productivity in mining operations exposed to lightning strikes.

KEYWORDS. Lightning. Early warning alert generation. Mining.

Operational Research in Industry, Computational Intelligence

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

1. Introdução

O Brasil é considerado o país com a maior incidência de descargas atmosféricas no mundo [Pinto Jr e Pinto, 2021]. Quando as descargas atingem o solo, podem causar diversos prejuízos, tanto humanos quanto materiais, tais como acidentes com pessoas e animais, muitas vezes com mortes ou graves sequelas, queima de equipamentos e a suspensão de atividades realizadas em áreas expostas [Feitosa, 2022] [Santos e Ferreira, 2024]. Os principais tipos de descarga são classificados pelo local onde ocorrem: dentro de uma única nuvem (intra-nuvem, sigla IN), entre duas nuvens (nuvem-nuvem, sigla NN), da nuvem com o ar (nuvem-ar, sigla NA), entre o solo e uma nuvem (solo-nuvem, sigla SN ou descarga ascendente), ou entre uma nuvem e o solo (nuvem-solo, sigla NS) [Santos e Ferreira, 2024].

Diversas atividades são realizadas diariamente em áreas abertas em situações onde há pessoas expostas e sem proteção contra descargas atmosféricas. Alguns exemplos são jogos de futebol e atividades recreativas em campos e quadras, trabalho na agricultura, escaladas e montanhismo e aventura na natureza, passeios em praias, dentre diversos outros exemplos. Para estes casos, onde as atividades não são controladas, os meteorologistas e outros estudiosos em fenômenos atmosféricos orientam sobre boas práticas, seja para compreender o fenômeno (raio), minimizar os riscos de acidentes, ou mesmo o que fazer se o acidente acontecer. Para conhecer mais, uma leitura essencial é a cartilha proposta por Santos e Ferreira [2024]. No caso de empresas onde há tarefas em locais abertos, normalmente o monitoramento da atividade meteorológica é feito por um time multidisciplinar, gerenciado por um centro de operações. Nestes casos, sistemas informatizados, desenvolvidos com fundamentos de engenharia de software, são utilizados para monitorar o ambiente e auxiliar na geração de alertas que antecipem a ocorrência de uma descarga, contribuindo para a segurança das operações. As soluções vão desde a instalação de sensores de campo [Srivastava et al., 2015] [Oliveira et al., 2022], observações *in-loco* e utilização de técnicas de Inteligência Artificial, especialmente Aprendizado de Máquina (do inglês *Machine Learning* (ML)) [Alves et al., 2022], Aprendizado Profundo (do inglês *Deep Learning* (DL)) [Bala et al., 2017; Geng et al., 2021] e otimização [Alves et al., 2024; Soares e Fonseca, 2019; Libório et al., 2020].

Soares e Fonseca [2019] e Libório et al. [2020] propuseram uma abordagem que combina medições pontuais de campo elétrico com dados de satélites, previsões meteorológicas e redes de sensores de superfície para gerar alertas sobre a iminência de descargas atmosféricas, aplicando essa metodologia ao contexto de ambientes de mineração a céu aberto. Outro trabalho relacionado com o tema desta pesquisa foi proposto por Oliveira et al. [2022]. Nele os autores focaram na geração de alertas também para ambiente de mineração, porém, limitaram-se na utilização de dados com campo elétrico. Já Alves et al. [2022] propuseram três abordagens para geração antecipada de alertas, sendo a primeira um método que utiliza círculos concêntricos para monitorar uma área ao redor de um ponto de interesse, a segunda um modelo baseado em ML que utiliza informação espacial como características de entrada, e o terceiro que é uma junção dos dois anteriores. Esses sistemas, desenvolvidos com fundamentos de engenharia de software, são projetados para garantir alta disponibilidade e precisão na geração de alertas antecipados, contribuindo para a segurança das operações.

Todavia, embora os trabalhos mencionados tenham trazido avanços importantes para a segurança dos trabalhadores, os modelos criados são generalistas por não considerarem as diferenças entre as estações do ano em sua formulação e, portanto, podem não se beneficiar de eventuais características sazonais. Com isto, o principal objetivo deste trabalho é propor uma abordagem para geração antecipada de alertas de descargas atmosféricas baseada na segmentação por estações do ano e compará-la com uma análise geral, sem esta distinção de período. Para isso, foi selecionada uma região específica do estado do Pará e um conjunto de dados de descargas atmosféricas rela-

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

tivas ao local. Dessa forma, foi possível comparar se a metodologia proposta é capaz de superar quantitativamente outras metodologias de geração de alertas para descargas atmosféricas.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os materiais e métodos utilizados no estudo; na Seção 3 são apresentados os resultados obtidos com a metodologia proposta e o comparativo com trabalhos relacionados; e por fim, a Seção 4 apresenta a conclusão, limitações da pesquisa e possibilidades de trabalhos futuros, seguida das referências utilizadas.

2. Material e métodos

2.1. Base de dados

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizada uma base de dados composta por registros de eventos de descargas atmosféricas, juntamente com informações de horário e localização. O período de análise abrange três anos consecutivos, compreendendo de outubro de 2020 a setembro de 2023. A extensão territorial considerada para coleta de dados é de 50 km ao redor do ponto central do objeto de investigação, ou área alvo. A Tabela 1 mostra um fragmento do dataset para exemplificar como estão organizados os dados, onde cada linha é composta pelo dia e hora que ocorreu a descarga e pela posição geográfica em termos de latitude e longitude.

Tabela 1: Exemplos de registros de descargas atmosféricas provenientes de múltiplas fontes utililizadas nesta pesquisa.

Data e Hora	Latitude	Longitude
2023-10-14 20:45:21	-6.8364	-50.5940
2023-10-14 20:46:13	-6.6560	-50.4483
2023-10-14 20:46:47	-6.6636	-50.4584
2023-10-14 20:47:31	-6.6820	-50.4627
2023-10-14 20:47:46	-6.8249	-50.6094

Os dados utilizados foram cedidos pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados são compostos por três redes de detecção de descargas em superfície, totalizando aproximadamente 110 sensores distribuídos por todo o território brasileiro. Esses sensores captam radiação nas faixas de VLF (Frequência Muito Baixa) e LF (Frequência Baixa). Adicionalmente, contam com informações provenientes do sensor *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) a bordo do satélite geoestacionário GOES-16, responsável pela detecção de radiação na faixa do visível. Mais informações sobre a captura dos dados e os dispositivos utilizados podem ser encontrados em Pinto Jr e Pinto [2018] e Santos et al. [2024].

No intuito de evitar redundâncias na captura dos dados e obter mais precisão do fenômeno, Pinto Jr e Pinto [2021] destacaram que a integração de múltiplas fontes de dados é uma estratégia fundamental para maximizar a eficiência na detecção de descargas atmosféricas. Esta abordagem é embasada no entendimento de que nenhum sistema individual é capaz de captar a totalidade das descargas, sendo que sistemas individuais são altamente prováveis de gerar muitas descargas falsas [Oliveira et al., 2022].

2.2. Análise Exploratória

Para análise inicial dos dados foi utilizada a linguagem de programação Python na versão 3.12.1, bem como os principais pacotes usados em uma análise exploratória, como o Pandas, Matplotlib e Numpy. A implementação seguiu práticas de engenharia de software para garantir a modularidade e manutenção do código, permitindo a reutilização e adaptação da metodologia a diferentes cenários. Para execução dos experimentos se utilizou, principalmente, a biblioteca Multiprocessing

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

disponível em `https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html`. A IDE foi o Visual Studio Code 1.85 em um computador Dell Alienware Aurora R15, processador Intel i9, 32GB RAM e placa de vídeo NVIDIA(R) GeForce RTX 4070 Ti.

As descargas ocorridas em todo o período de análise foram plotadas a fim de fazer uma análise visual de incidência sobre a região de estudo. A Figura 1 apresenta essa distribuição ao longo dos três anos, em que foram somadas as quantias por mês. Nela, os meses de (1) janeiro, (2) fevereiro e (12) dezembro são representados pela cor vermelha, e associados ao período de verão, a cor laranja com os meses (3) março, (4) abril e (5) maio, pertencendo a estação de outono, na sequência os meses de (6) junho, (7) julho e (8) agosto, na cor azul, representando o inverno e, por fim, a cor verde com os meses (9) setembro, (10) outubro e (11) novembro, que ilustram a estação da primavera.

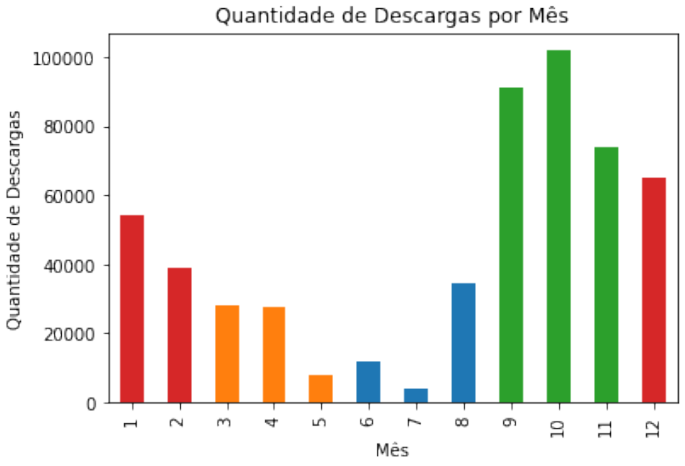

Figura 1: Quantidade mensal somadas de descargas captadas pelos sistemas no decorrer dos três anos.

Considerando o período de análise de três anos é possível perceber, por meio desta Figura, que os meses com maior ocorrência de descargas foram setembro, outubro e novembro (9-11, cor verde). O número de descargas captado pelos dispositivos chegou a quase 100 mil no mês de outubro e foi superior a 60 mil tanto em setembro quanto em novembro. A próxima estação com maior incidência de descargas foi o verão (meses 1, 2 e 12, cor vermelha) com um número de descargas mensal superior a 40 mil em janeiro e dezembro e próximo deste valor no mês de fevereiro. Já os meses de março a agosto tiveram menos descargas comparado aos meses mencionados. Maio, junho e julho foram os meses com menos descargas. Porém, vale também observar que em todos os meses ocorreu incidência de descargas, o que confirma a necessidade de um sistema automatizado de monitoramento de tais eventos, em vista de aumentar a segurança na região.

A quantidade variada de descargas mensais dá um indicativo claro de que há uma diferença sazonal no número de descargas. Esta variação é o principal motivador deste trabalho, pois acredita-se que um método de geração antecipada de alertas que considere as diferentes estações do ano pode ser mais eficiente que um método geral, que não leva estas especificidades em sua lógica de implementação.

A região de interesse localiza-se no sudeste do estado do Pará, Brasil. A Figura 2 mostra o mapa de calor das descargas atmosféricas do período de três anos para a região estudada. É possível observar pela figura que há uma incidência maior de descargas atmosféricas no lado oeste da área alvo, em especial na região noroeste do mapa (região avermelhada mais densa assinala áreas com maior concentração de descargas atmosféricas durante os três anos analisados (2020-2023).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

Esse comportamento pode ser influenciado pela topografia da região, com áreas montanhosas que promovem a ascensão forçada do ar, propiciando condições ideais para a formação de nuvens de tempestade Santos et al. [2024]. Além disso, a proximidade de corpos d'água, como rios e lagos, além da floresta Amazônica, contribuem para o aumento da umidade na região, influenciando a intensidade das tempestades elétricas.

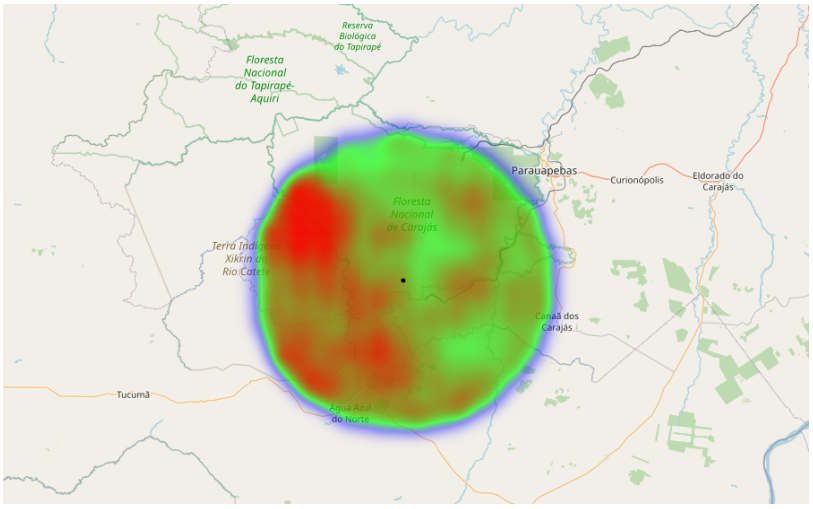

Figura 2: Região em estudo.

2.3. Relação entre descargas atmosféricas e estações do ano

É de conhecimento que a relação entre as estações do ano e a incidência de descargas atmosféricas revela uma dinâmica complexa influenciada por fatores climáticos sazonais. Durante a primavera e o verão, o aumento da temperatura favorece a instabilidade atmosférica, propiciando o desenvolvimento de tempestades elétricas intensas, marcadas por uma elevada quantidade de descargas atmosféricas. No outono e inverno, a atmosfera tende a ser mais estável, limitando a intensidade das tempestades, embora sistemas convectivos formados em escala local ainda possam desencadear eventos meteorológicos adversos.

Além disso, a sazonalidade da atividade elétrica varia com a localização geográfica, sendo as regiões tropicais mais propensas a tempestades ao longo do ano. Adicionalmente, os mecanismos climáticos globais, como El Niño, La Niña e Dipolo do Atlântico, desempenham um papel crucial na modulação dos padrões atmosféricos sazonais, influenciando a probabilidade de ocorrência de tempestades em diferentes estações [Garreaud e Aceituno, 2007].

Especificamente para a área de estudo, localizada no sudeste do Pará, as características sazonais são marcantes, uma vez que as condições de tempo são moduladas por diferentes sistemas atmosféricos, em distintos períodos do ano, como a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) nos meses de verão, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) entre os meses de fevereiro e março, além de Linhas de Instabilidade, que são alguns dos principais indutores da formação de tempestades na região [Silva Júnior et al., 2017].

2.4. Desempenho do sistema de alertas

Nos sistemas de proteção contra raios, um alerta é gerado quando ocorre uma descarga atmosférica dentro da região monitorada. Na metodologia deste estudo, propõe-se monitorar uma área mais ampla do que os 10 km comumente utilizados, permitindo que o alerta seja emitido antes mesmo da primeira descarga atmosférica atingir a região de interesse.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

Para avaliar a metodologia proposta quatro métricas são calculadas: 1) FAR (do inglês *False Alarm Ratio*): corresponde aos falsos alertas, representado pelo número de ocorrências em que um alerta foi gerado de maneira incorreta, ou seja, um alerta estava ativo mas não ocorreu nenhuma descarga atmosférica na região monitorada enquanto o alerta estava vigente. Valores altos de FAR afetam diretamente na produtividade da companhia; 2) FTW (do inglês *Failure to warn*): são as falhas de alerta que, ao contrário da métrica FAR, indica a ocorrência de uma descarga atmosférica sem que um alerta esteja ativo. Em questão de segurança, a FTW é a principal métrica a ser observada, uma vez que a ocorrência de uma descarga atmosférica sem alerta de advertência representa riscos reais para os trabalhadores; 3) Inatividade: corresponde ao tempo de inatividade de operações, que representa o percentual de tempo de duração dos alertas ativos em relação ao intervalo de tempo total do período avaliado que, em outras palavras, corresponde ao percentual do tempo total no qual as atividades foram interrompidas em função de alertas (corretos ou não); e 4) Tempo de antecipação: tempo médio entre a geração de um alerta e a ocorrência da primeira descarga observada dentro da área alvo. A saber, esta notação é conhecida na literatura especializada e foi inspirada nos trabalhos de Holle [2014] e Song et al. [2023].

As métricas FAR e FTW são claramente conflitantes entre si, representando um clássico *trade-off* de tomada de decisão para equipes do Centro de Operações Integradas (COI). Ambas devem ser minimizadas para garantir a segurança dos trabalhadores e a manutenção da produtividade com o menor impacto possível. Quanto mais próximo de zero, melhor o resultado. Entretanto, a redução de uma das métricas ocasiona o aumento da outra, sendo necessário buscar objetivos que proporcionem segurança sem impactar de forma significativa a produtividade. O objetivo para a métrica Inatividade é reduzi-la ao máximo, de maneira a maximizar a produtividade. Existe uma correlação entre a métrica FAR e a Inatividade, já que a redução dos falsos alertas proporciona uma redução da Inatividade e vice-versa. Já com relação à métrica Tempo de antecipação, o objetivo é maximizá-la, visando proporcionar um tempo maior para que as pessoas busquem abrigo após o recebimento de um alerta.

Para efeito de simulação, foi definido que cada alerta tem uma duração fixa de 30 minutos e que os dados são processados em janelas de 5 minutos (simulando um processamento em tempo real). A motivação para estes parâmetros foi por decisão de negócio e recomendação de trabalhos anteriores de Alves et al. [2022, 2024]. Para um sistema em produção é importante que estas premissas estejam descritas nos requisitos do sistema e que a arquitetura proposta suporte tal aplicação.

2.5. Baseline e alternativa proposta

Como baseline se utilizou um raio de 10 km em torno do ponto central do local a ser monitorado. Este valor atende aos requisitos de negócio e é baseado nas orientações da norma IEC 62793:2020 [IEC, 2020] proposta pela *International Electrotechnical Commission* e também já utilizado em outros trabalhos [Schmitt e Rousseau, 2016; Soares e Fonseca, 2019; Alves et al., 2022, 2024]. A saber, quanto maior o raio de monitoramento, maiores as probabilidades de detecção de alertas verdadeiros, mas também de falsos alertas. Quanto menor a área monitorada, maiores as chances de ocorrência de falhas de alerta e menores as chances de falsos alertas. Logo, encontrar uma região de monitoramento ideal é um desafio a ser trabalhado.

Para efeito de comparação, duas abordagens foram computadas: 1) solução geral (baseline), cujo foco está em fazer o monitoramento de uma área ao redor da área alvo de maneira constante durante todo o ano (raio de 10 km); 2) solução segmentada (proposta do artigo), que utiliza um raio de monitoramento diferente dependendo da estação do ano. Estas duas representações estão ilustradas na Figura 3. A parte superior ilustra a solução geral, cuja área de monitoramento (em vermelho) tem o mesmo raio que a área alvo (10 km) e é utilizada para gerar alertas. Na parte

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

inferior, uma solução segmentada que utiliza um raio de monitoramento diferente para cada estação do ano.

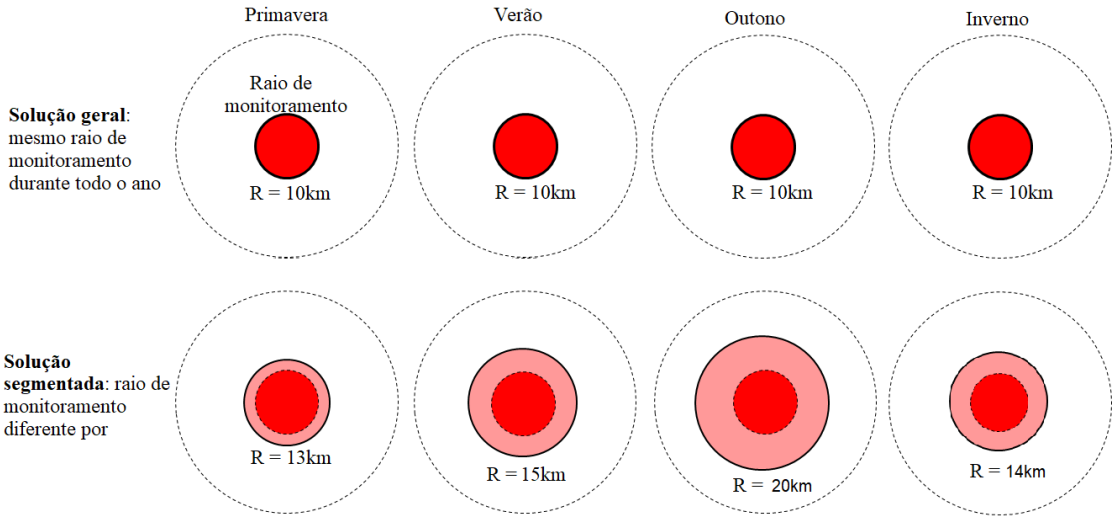

Figura 3: Diferença entre a solução geral e solução segmentada.

Para cada estação do ano foram avaliadas 13 combinações, em um raio de monitoramento entre 8 a 20 km de 1 em 1. No total, considerando as quatro estações, $13 \times 4 = 52$ configurações de círculos concêntricos foram computadas. Para cada raio, computou-se as métricas explicadas anteriormente em 2.4.

Depois, tomou-se a decisão de qual era o raio de monitoramento mais apropriado para cada estação. Nesta pesquisa, a demanda era que o número de FTW fosse reduzido em relação à solução sem segmentação de descargas por ano. A escolha foi buscar por alguma solução que apresentasse FTW em torno de 20%. A partir desta requisição foi possível escolher qual círculo concêntrico era o ideal para monitorar a região a ser protegida para cada uma das estações.

A solução de referência, i.e., baseline foi, portanto, a solução sem segmentação por estações do ano. Ela representa aquela solução geral cuja proposta baseia-se apenas no monitoramento de uma área com um círculo concêntrico com raio fixo. Na literatura é possível encontrar trabalhos cujo raio de monitoramento é fixo, por exemplo em Alves et al. [2022]. Neste caso, o avanço que esta presente pesquisa se propõe a fazer está em apresentar alternativas para melhorar ainda mais as taxas de falhas e falsos alertas, além dos demais escores.

3. Resultados e Discussão

Este trabalho focou em analisar um raio de círculo concêntrico segmentado por estações do ano em uma área de mineração, ao invés de uma solução geral sem segmentação. Este círculo serve para monitorar a área e gerar alertas de prevenção de descargas atmosféricas para equipes do COI. Quatro critérios críticos foram definidos a partir destes alertas: (i) reduzir FAR para que as operações continuem em funcionamento, (ii) reduzir FTW para que os trabalhadores de campo sejam protegidos contra os raios, (iii) reduzir o tempo total de inatividades nas operações, (iv) maximizar o tempo entre a geração do alerta e a ocorrência da descarga.

Para os experimentos com as estações do ano, os resultados são apresentados na Tabela 2. Por questões de organização e espaço, apenas o resultados cuja FTW estavam mais próximas de 20% foram apresentados. A decisão de escolher um raio de monitoramento cuja FTW estava próxima

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

de 20% foi tomada em conjunto durante uma reunião de projeto, pois entendeu-se que atenderia a demanda interna da mina. Para outras aplicações desta pesquisa, recomenda-se fortemente avaliar os resultados das métricas de cada área de monitoramento dada pelo círculo concêntrico e ver quais mais atendem aos requisitos de negócio. Caso esta decisão não seja feita em consenso com o time ou pelo gestor, uma das opções sugeridas de minimizar o viés humano sobre esta decisão é utilizar algum método de apoio à decisão como feito em Alves et al. [2022].

Tabela 2: Percentual de FAR, FTW, Inatividade das operações e tempo de antecipação considerando análise segmentada das descargas por estação do ano.

Estação	Km	FAR	FTW	Inatividade	Tempo de antecipação
Verão	13	0.4817	0.2607	0.0118	7.48
	14	0.5050	0.2312	0.0126	7.75
	15	**0.5307**	**0.2100**	**0.0136**	**8.01**
	16	0.5604	0.1937	0.0149	8.36
	17	0.5902	0.1894	0.0162	8.66
Outono	16	0.5975	0.2471	0.0084	8.16
	17	0.6214	0.2429	0.0089	8.66
	18	0.6447	0.2372	0.0096	8.86
	19	0.6608	0.2303	0.0102	8.51
	20	**0.6768**	**0.2290**	**0.0108**	**8.53**
Inverno	11	0.5058	0.2758	0.0021	6.81
	12	0.5543	0.2807	0.0023	7.18
	13	0.5816	0.2807	0.0024	7.08
	14	**0.5809**	**0.2280**	**0.0026**	**6.68**
	15	0.6086	0.1509	0.0029	6.58
Primavera	12	0.4778	0.2555	0.0085	6.73
	13	**0.5020**	**0.2285**	**0.0092**	**7.08**
	14	0.5161	0.1747	0.0099	7.51
	15	0.5284	0.1479	0.0106	7.68
	16	0.5388	0.1221	0.0112	8.25

Com base no valor definido que é aquele mais próximo de 20% para a métrica FTW de alertas foi possível definir qual o melhor raio do círculo para cada uma das estações do ano, sendo esse raio destacado em negrito na Tabela 2 para cada uma das estações. Os raios mais apropriados para formar os círculos concêntricos de monitoramento da área a ser protegida foi de 15 km ao redor da área alvo no verão, 20 km no outono, 14 km no inverno e 13 km na primavera. A partir destas configurações, essa solução foi configurada para ser executada durante todo o período e computar seu desempenho global. O resultado foi 0.5684, 0.2196, 0.0296 e 7.73 para FAR, FTW, inatividade e tempo de antecipação, respectivamente.

Para fins de comparação com o baseline, utilizou-se esta solução com aquela cujo raio era fixo e igual a 10km. Os resultados de ambas as soluções são apresentados na Tabela 3.

Por meio dos resultados apresentados é possível observar que a solução considerando a análise segmentada de descargas por estações do ano apresentou elevado ganho em termos de FTW comparada à solução com círculo concêntrico de raio fixo, equivalente a quase 50% do valor. Além disso, houve um aumento no tempo de antecipação de 6.05 minutos para 7.73 minutos, o que pode representar preciosos momentos para um trabalhador procurar local seguro para se abrigar. A solução teve resultado inferior em aproximadamente 12% em termos de FAR, o que foi entendido como aceitável pelo time de operações. Ao observar os valores calculados de cada raio na Tabela 2

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

Tabela 3: Comparativo entre resultado para área monitorada com um raio fixo de 10 km em torno da área alvo e resultado pela metodologia de diferentes raios circulares de acordo com a estação do ano.

Solução	Falsos alertas	Falhas de alertas	Inatividade	Tempo de antecipação
Área de monitoramento com raio fixo de 10 km	**0.4413**	0.4059	**0.0184**	6.05
Área de monitoramento com raios segmentados por estações do ano	0.5684	**0.2196**	0.0296	**7.73**

é possível notar que há soluções cujos FAR se aproximam do valor objetivo com a área de monitoramento com raio de 10 km, como monitorar 13 km ao redor da área alvo no Verão e 12 km na Primavera (o que levaria a 48% de FAR, aproximadamente, nas duas estações). Todavia, em ambos os casos, o número de descargas que atingiria a área monitorada sem que houvesse alertas seria maior.

Quando se define apenas um raio fixo para o círculo concêntrico para todo o período do ano tem-se uma solução genérica, enquanto que com a metodologia proposta neste artigo mostra-se uma solução mais especializada. Para trabalhos futuros, este tipo de segmentação também pode ser feita considerando, por exemplo, os meses do ano, tipo de descargas, anos com o fenômeno El Niño ou La Niña, ou outros eventos climáticos. Além disso, a metodologia aqui proposta pode ser inserida em qualquer abordagem que utiliza raios de monitoramento em formato de círculos concêntricos ao redor de pontos de interesse.

Como cada estação do ano tem suas peculiaridades em relação as tempestades atmosféricas que são formadas, o estudo aqui proposto indica que a metodologia especializada pode ter resultados superiores na geração dos alertas, possibilitando uma melhor solução para o problema. Além disso, é sabido que sistemas de monitoramento de descargas atmosféricas precisam evoluir para incorporar novos dados, algoritmos e técnicas de análise. Estas atualizações e melhorias podem ser feitas de maneira controlada e com o mínimo de interrupção no sistema em produção através de técnicas conhecidas de engenharia de software como gerenciamento do ciclo de vida do software.

4. Conclusão

Este trabalho investigou a análise segmentada de descargas por estações do ano para geração antecipada de alertas de descargas atmosféricas em uma região de mineração cujas atividades incluem tarefas externas e desprotegidas. Diferentes raios de monitoramento ao redor da área de interesse foram testados em busca de uma solução mais especialista que minimizasse, especialmente, o número de FTW. Valores para FAR, tempo de inatividade de operações e de antecipação também foram computados.

A proposta baseada em testar diferentes raios de monitoramento a cada estação do ano trouxe resultados mais interessantes que a solução geral de raio fixo como um circulo concêntrico. Os dados utilizados compreenderam um período de três anos e são provenientes de múltiplas fontes de sensores, tanto em superfície como a bordo de satélite. Entendeu-se que a metodologia proposta é capaz de gerar alertas antecipados de descargas atmosféricas, o que pode ser útil não apenas para reduzir o tempo de parada nas operações, mas especialmente para a proteção de trabalhadores que exercem atividades a céu aberto.

Em trabalhos futuros está previsto incluir novas fontes de dados, como informações da temperatura do topo de nuvens do *National Centers for Environmental Information - NOAA* (`www.ncei.noaa.gov`) e avaliar a metodologia proposta em outros pontos de interesse, cuja dinâmica atmosférica é diferente do Norte do Brasil, onde foi testado.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

Além disso, vale a pena mencionar que esta metodologia proposta é uma solução complementar às demais que são utilizadas pelo centro de operações. A IEC 62793, por exemplo, sugere uma série de orientações a respeito da proteção contra descargas atmosféricas. Neste trabalho, as avaliações feitas fazem parte de um estudo que busca implementar uma aplicação automatizada, baseada em múltiplas fontes de dados e em múltiplas tecnologias.

Referências

Alves, M., Oliveira, B., Ferreira, D., Santos, A., Maia, W., Soares, W., Silvestrow, F., Rodrigues, L., Daher, E., e Pinto Jr, O. (2024). An automated technique and decision support system for lightning early warning. *International Journal of Environmental Science and Technology*, p. 1–16.

Alves, M. A., Oliveira, B. A., Maia, W., Soares, W. S., Ferreira, D. B. d. S., dos Santos, A. P., Silvestrow, F. P., Daher, E. L., e Júnior, O. P. (2022). Lightning warning prediction with multi-source data. In *2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, p. 349–354. IEEE.

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, p. 42–46. IEEE.

Feitosa, J. N. (2022). Análise da inserção de sistema contra descargas atmosféricas em sistemas fotovoltaicos. *Anais da Revista Brasileira de Energia— Vol*, 28(3).

Garreaud, R. D. e Aceituno, P. (2007). Atmospheric circulation and climatic variability. *The physical geography of South America*, 45:59.

Geng, Y.-a., Li, Q., Lin, T., Yao, W., Xu, L., Zheng, D., Zhou, X., Zheng, L., Lyu, W., e Zhang, Y. (2021). A deep learning framework for lightning forecasting with multi-source spatiotemporal data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741):4048–4062.

Holle, R. L. (2014). Some aspects of global lightning impacts. In *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, p. 1390–1395. IEEE.

IEC (2020). Thunderstorm warning systems - protection against lightning. Standard IEC 62793, International Electrotechnical Commission.

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.

Oliveira, B. A., Alves, M. A., Maia, W., Silvestrow, F. P., Soares, W. S., Rodrigues, L. F., dos Santos, A. P. P., Daher, E. L., Ferreira, D. B., e Júnior, O. P. (2022). Uso do campo elétrico na geração de alarmes para risco de descargas atmosféricas. *Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, 2(1).

Pinto Jr, O. e Pinto, I. (2018). Brasildatdataset: Combining data from different lightning locating systems to obtain more precise lightning information. In *25th International Conference on Lightning Detection*.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br

Pinto Jr, O. e Pinto, I. R. C. A. (2021). *Brasil campeão mundial de raios*. Artliber.

Santos, A. P. P. d., Ferreira, D. B. d. S., Nascimento Júnior, W. d. R., Souza-Filho, P. W. M. e., Pinto Júnior, O., Lima, F. J. L. d., Bourscheidt, V., Mattos, E. V., Costa, C. P. W. d., Nogueira Neto, A. V., et al. (2024). Lightning under different land use and cover, and the influence of topography in the carajás mineral province, eastern amazon. *Atmosphere*, 15(3):375.

Santos, A. e Ferreira, D. (2024). Proteção contra raios: redução de riscos para aumento da segurança. Technical report, Instituto Tecnológico Vale - ITV, Belém: Matildas.

Schmitt, S. e Rousseau, A. (2016). Thunderstorm warning systems: Iec 62793 standard. In *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, p. 1–5. IEEE.

Silva Júnior, R. O., Queiroz, J., Ferreira, D., Tavares, A., Souza-Filho, P., Guimarães, J., e Rocha, E. (2017). Estimativa de precipitação e vazões médias para a bacia hidrográfica do rio itacaiúnas (bhri), amazônia oriental, brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(5):1638–1654.

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)*, p. 1–6.

Song, G., Li, S., e Xing, J. (2023). Lightning nowcasting with aerosol-informed machine learning and satellite-enriched dataset. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1):126.

Srivastava, A., Mishra, M., e Kumar, M. (2015). Lightning alarm system using stochastic modelling. *Natural Hazards*, 75(1):1–11.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193904
https://proceedings.science/p/193904?lang=pt-br