IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE COMPORTAMENTO DE OPERAÇÃO EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO SOB INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO DE FALHAS OU SUPORTABILIDADE OPERACIONAL

IDENTIFICATION OF OPERATING BEHAVIOUR PATTERNS IN DISTRIBUTION LINES UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATIC VARIABLES AND OPERATIONAL CONDITIONS FOR FAILURE DETECTION AND OPERATIONAL SUSTAINABILITY ASSESSMENT

Andressa Caldas Malandruccolo, Matheus Patrício de Souza da Silva, Rodrigo Sampaio Diniz, Alexandre Shozo Onuki

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica / Eletrônica
E-mail para contato: am200942@unisanta.br

RESUMO – Este estudo desenvolveu um algoritmo lógico-matemático para analisar a relação entre variáveis de vento e falhas em linhas de distribuição de energia na cidade de Bertioga-SP, utilizando registros da Neoenergia e dados meteorológicos do INMET. A abordagem booleana e probabilística identificou condições de vento com maior probabilidade de falha, mostrando que faixas intermediárias e elevadas aumentam a suscetibilidade. Sugere-se refinamento do algoritmo e dos bancos de dados para incluir outras variáveis climáticas em trabalhos futuros.

Palavras-chave: *Redes de distribuição elétrica; Análise probabilística; Variáveis climáticas; Algoritmo preditivo; Confiabilidade operacional*

ABSTRACT – This study developed a logical-mathematical algorithm to analyze the relationship between wind variables and failures in electric power distribution lines in Bertioga-SP, using records from Neoenergia and meteorological data from INMET. A Boolean and probabilistic approach identified wind conditions with higher failure probability, showing that intermediate and high wind ranges increase susceptibility. The study suggests refining the algorithm and databases to include other climatic variables in future work.

Keywords: *Electric Power Distribution Networks; Probabilistic Analysis; Climatic Variables; Predictive Algorithm; Operational Reliability.*

1 INTRODUÇÃO

A distribuição de energia elétrica desempenha um papel fundamental na infraestrutura crítica de qualquer nação, sendo relevante para garantir a continuidade de diversos serviços essenciais. Para assegurar o fornecimento contínuo, além da realização de planejamento de custo na rede, envolvendo manutenções preventivas e corretivas (RIGONI, 2016), as redes de distribuição de energia elétrica devem ser planejadas considerando fatores como perfil de demanda energética, geografia e futuras necessidades de ampliação da rede (COSSI, 2008), incluindo critérios técnicos de padronização das estruturas para redes de distribuição e regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica (ABNT, 2021; ANEEL, 2023).

Então, para garantir a segurança e qualidade de uma rede de distribuição, destaca-se a importância do dimensionamento adequado de estruturas e equipamentos, considerando tanto as condições ambientais quanto as exigências operacionais das cargas atendidas, aliado à estrita observância de normas técnicas e regulamentações específicas das concessionárias locais (SANTOS, 2021). Ainda assim, as redes de distribuição permanecem suscetíveis a eventos climáticos extremos, que podem provocar faltas no sistema elétrico ou até mesmo falhas estruturais.

As mudanças climáticas vêm se intensificando, resultando no aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, principalmente em regiões costeiras e de latitudes mais elevadas (SANCHES, et al., 2023). Com a alteração de variáveis como a temperatura, ventos, radiação solar, precipitação e densidade do ar, geram-se impactos negativos nas redes de distribuição de energia e suas proximidades. Como resultado, há um aumento de contingências operacionais, nas perdas elétricas e nos desafios para garantir a confiabilidade do sistema, além de elevar os custos associados à expansão e manutenção da infraestrutura elétrica (SINAPSIS; CLIMATEMPO, 2021).

A fragilidade das redes de distribuição, expostas a esses fatores, exige uma abordagem mais eficiente para a detecção e previsão de falhas. A crescente complexidade das redes, somada à imprevisibilidade dos eventos climáticos, torna o processo de manutenção e monitoramento complexo e oneroso. Contudo, se torna necessário o desenvolvimento e a implementação de técnicas computacionais para classificação de padrões de falhas

considerando a ocorrência de diferentes eventos climáticos, a fim de prever suscetibilidades operacionais e assim, mitigar potenciais riscos antes que impactem a estabilidade do sistema.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um conjunto de algoritmos que propõem uma metodologia para associar as falhas em sistemas de distribuição de energia elétrica primárias com variáveis de vento e as condições operacionais da linha. Para isso, o algoritmo interage com dados de falhas e ocorrências, categorizando-os com base em estados meteorológicos, especificamente as condições de vento.

Este processo permite ao algoritmo compreender os padrões de como as falhas se manifestam diante de diferentes intensidades e direções de vento. Ao mapear cada registro de falha e de cenário climático geral a um índice único de combinação, o algoritmo analisa as situações, quantificando a frequência e as probabilidades relativas dessas ocorrências, o que permite inferir a possibilidade de falha sob determinadas condições de vento. Através dessa abordagem, é possível entender o comportamento da rede de distribuição de energia na região de Bertioga - São Paulo, frente às variáveis de vento, auxiliando na tomada de decisões estratégicas para aumentar a confiabilidade e a suportabilidade operacional do sistema elétrico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho caracteriza-se como um estudo de caso com abordagem quantitativa e analítica com o desenvolvimento de uma modelagem computacional, apoiado em técnicas de análise estatística e modelagem combinatória para a identificação de padrões operacionais em linhas de distribuição sob influência de variáveis climáticas. O estudo de caso foca em redes de distribuição da concessionária *Neoenergia* no município de Bertioga-SP, abrangendo os anos de 2023 e 2024. Foram utilizados parâmetros meteorológicos locais, buscando compreender a relação entre o comportamento dos ventos e a suportabilidade operacional da rede.

A execução da pesquisa foi dividida em cinco etapas principais, detalhadas a seguir, com o objetivo de garantir a replicabilidade do estudo:

a) **Etapa 1 – Análise independente das Bases de Dados primárias:** foram avaliadas duas Bases de Dados para estruturar o algoritmo principal do estudo;

- Base de Dados proveniente da concessionária *Neoenergia*: histórico de ocorrências em redes de distribuição primárias e secundárias da cidade de Bertioga, fornecido pela concessionária *Neoenergia*, referentes aos anos de 2023 e 2024;
- Base de Dados proveniente do *Instituto Nacional de Metereologia*: série histórica diária de variáveis meteorológicas do mesmo período e região, obtida junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

b) Etapa 2 – Integração e preparação dos dados: as informações provenientes das duas fontes foram consolidadas em um único banco de dados, correlacionando cada ocorrência operacional às condições climáticas do respectivo dia e local. Foram realizados procedimentos de tratamento, normalização e eliminação de inconsistências, garantindo compatibilidade entre as variáveis e precisão nos resultados;

c) Etapa 3 – Seleção e categorização das variáveis críticas: com base em estudos prévios e na natureza física das falhas analisadas, foram selecionadas as variáveis relacionadas ao vento. Essas variáveis foram organizadas em faixas de valores predefinidas possibilitando a análise iterativa por intervalos e a identificação de padrões condicionais.

d) Etapa 4 – Análise probabilística e correlação entre variáveis: para cada variável selecionada, os valores registrados foram classificados nas faixas de valores predefinidas utilizando uma análise condicional booleana. Com base nessa classificação, foram realizados os cálculos probabilísticos de ocorrência das variáveis isoladamente assim como combinações entre as diversas variáveis, utilizando fórmulas condicionais para contabilizar todas as combinações válidas de faixas. Esse procedimento foi aplicado separadamente para os dados climáticos gerais e para os registros específicos de falha na rede de distribuição estudada. Em seguida, calculou-se o percentual de ocorrência de cada combinação e de cada variável isolada, dentro do intervalo observado. Por fim, compararam-se os registros gerais com os específicos da falha, gerando a base para a análise probabilística de associação entre as variáveis climáticas e os eventos de falha.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da metodologia realizada, foram descritas as equações matemáticas funcionais que explicam a aplicação do algoritmo para análise de combinações de variáveis.

3.1 Desenvolvimento dos Algoritmos

Para o desenvolvimento do algoritmo, foram implementadas as etapas de codificação e processamento dos dados, com base nas equações definidas a seguir.

a) Classificação Booleana dos Registros por Faixas

Inicialmente, para cada valor de uma variável V_k e cada faixa f_i, é definida a função indicadora de pertencimento à faixa, conforme Equação (1).

$$I(V_k \in f_i) = \begin{cases} 1, \ se\ L_{i_k} \leq V_k < U_{i_k} \\ 0, \ caso\ contrário \end{cases} \quad (1)$$

Em que:

- V_k representa o valor da variável no registro, relacionado à classificação das variáveis associadas ao vento;
- f_i corresponde à i-ésima faixa de classificação atribuída à variável V_k;
- L_{i_k} é o limite inferior da faixa f_i para a variável V_k;
- U_{i_k} é o limite superior da faixa f_i para a variável V_k;
- i_k indica o índice da faixa à qual o valor da variável pertence.

b) Análise Probabilística Isolada por Variável

Após feita a classificação booleana dos registros por faixas, é realizada a análise probabilística isolada da ocorrência da variável V_{k} em cada faixa pré-definida, conforme Equação (2).

$$P_m\,(V_k \in f_i) = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_m} I(V_k \in f_i) \quad (2)$$

Em que:

- $P_m\,(V_k \in f_i)$ é a probabilidade da variável V_k assumir valores dentro da faixa f_i, para o conjunto de dados m;

- N_m representa o número total de registros avaliados no conjunto m;
- O subscrito n indica o índice do registro para a variável selecionada;
- $I(V_k \in f_i)$ é a função indicadora da faixa, definida anteriormente e assume valores de 0 ou 1.
- O subscrito m indica o conjunto de dados analisado, podendo assumir:
    - O: conjunto de Ocorrências;
    - G: conjunto Geral (Cenários Climáticos Gerais).

c) Análise Probabilística Combinatória Entre Variáveis

Com os índices das faixas i_{k} da variável V_{k} , calcula-se um índice único de combinação entre variáveis a partir da Equação (3), na qual identifica cada combinação possível.

$$C_{n_{m,k2}} = (i_{k1} - 1) \times 5 + i_{k2} \quad (3)$$

Em que:

- $C_{n_{m,k2}}$ é o índice de combinação calculado, que representa todas as possíveis combinações entre as cinco faixas de duas variáveis.
- O subscrito n indica o índice do registro, para a falha analisada;
- O subscrito m indica o conjunto de dados analisado;
- i_k indica o índice da faixa à qual o valor da variável pertence, no qual:
    - O subscrito $k1$ identifica a primeira variável da combinação;
    - O subscrito $k2$ identifica a segunda variável da combinação.

Após calculado o índice de combinação para todos os registros do conjunto de dados m, calculam-se as frequências de ocorrência de cada combinação iterativamente, conforme Equação (4)

$$Contagem\ (x)_{n_{m,k2}} = \sum_{n=1}^{N_m} I\ (C_{n_{m,k2}} = x) \quad (4)$$

Em que:

- $Contagem\ (x)_{n_{m,k2}}$ é a frequência de ocorrência de cada combinação de índice n ;
- $I\ (C_{n_{m,k2}} = x)$ é a função indicadora, que retorna 1 quando a combinação observada corresponde ao índice x e 0 caso contrário;
- N_m representa o número total de registros avaliados dentro do conjunto de dados m;
- O subscrito n indica o índice do registro, para a falha analisada;
- x é o índice de combinação específico. Este índice assume valores de 1 a ${i_{max}}^{c}$, onde i_{max} é o número máximo de faixas por variável e c é o número de variáveis em uma combinação.

A partir dessa contagem, são obtidas as probabilidades relativas de frequências de ocorrência de cada combinação, em ambos os conjuntos de dados, por meio da Equação (5).

$$P_m\left(C_{n_{m,k2}}\right)_x = \frac{Contagem\ (x)_{n_{m,k2}}}{N_m} \quad (5)$$

Em que:

- $P_m\left(C_{n_{m,k2}}\right)_x$ representa a probabilidade relativa de cada combinação de faixas no conjunto de dados m;
- $Contagem\ (x)_{n_{m,k2}}$ é a frequência de ocorrência de cada combinação de índice n ;
- N_m representa o número total de registros avaliados dentro do conjunto de dados m.

Após calculadas as probabilidades relativas para os cenários geral e de ocorrências (respectivamente, conjunto de dados G e O), considerando a combinação entre as variáveis, é obtida a possibilidade de suscetibilidade de falhas na rede de distribuição em relação à frequência da faixa climática analisada no período proposto, conforme Equação (6).

$$P_{total_x} = \frac{P_O(C_{O,k2})}{P_G(C_{G,k2})} \quad (6)$$

Em que:

- P_{total_x} representa a possibilidade de ocorrência da falha, considerando cenário climático;
- $P_O(C_{O,k2})$ é a probabilidade relativa de cada índice de combinação para o conjunto de dados de Ocorrências;
- $P_G(C_{G,k2})$ é a probabilidade relativa de cada índice de combinação para o conjunto de dados de Cenários Climáticos Gerais.

3.2 Testes para Aferição do Algoritmos

Para a aferição do modelo proposto e a realização de processamento de dados, considerou-se a adoção dos seguintes parâmetros:

a) Seleção de Variáveis Relacionadas ao Vento

Considerando a exposição ao vento como fator crucial à rede de distribuição elétrica, adotaram-se as seguintes variáveis para a aferição do algoritmo:

- V_1 – Direção do vento, em graus (°C);
- V_2 – Velocidade máxima de rajada, em metros por segundo (m/s);
- V_3 – Velocidade média do vento, em metros por segundo (m/s).

Contudo, para o caso analisado, o subscrito j assume os seguintes valores:

- $k2 = 2$: quando a combinação é entre V_1 e V_2;
- $k2 = 3$: quando a combinação é entre V_1 e V_3.

b) Determinação de faixas de valores por variável adotada

Após selecionadas as variáveis, dividiram-se as faixas por variável, considerando 5 intervalos de classificação diferentes, podendo então i_k assumir valores de 1 a 5. Essa divisão foi justificada pela contingência de dados observada, sendo o uso de cinco faixas o mais adequado para representar as variações no conjunto analisado e garantir melhor desempenho no caso estudado.

Portanto, para a análise probabilística combinatória entre as variáveis, considera-se que o índice x, adotado na Equação (4), corresponde a $5^2(i_{\max}{}^c)$, uma vez que o número de variáveis combinadas é igual a 2 e o número de faixas adotado para cada variável é 5.

A Tabela 1: Características Das Faixas Pré-Determinadas Para Variáveis Climáticas Relacionadas Ao Vento, evidencia os valores adotados para cada faixa, de cada uma das três variáveis utilizadas.

Tabela 1. Características das faixas pré-determinadas para variáveis climáticas relacionadas ao vento

Combinação	Faixa	L_{ik} – Limite Superior	U_{ik} – Limite Inferior
V_1 - Direção do vento, em graus (°)	F_1	0,0	72,0
	F_2	72,0	144,0
	F_3	144,0	216,0
	F_4	216,0	288,0
	F_5	288,0	360,0
V_2 - Velocidade máxima de rajada, em metros por segundo (m/s)	F_1	0,0	2,4
	F_2	2,4	4,8
	F_3	4,8	7,2
	F_4	7,2	9,6
	F_5	9,6	12,0
V_3 - Velocidade média do vento, em metros por segundo (m/s)	F_1	0,0	1,0
	F_2	1,0	2,0
	F_3	2,0	3,0
	F_4	3,0	4,0
	F_5	4,0	5,0

c) Determinação do tipo de falha a ser aferida

Para este estudo, optou-se por analisar as falhas ocorridas na rede primária, uma vez que esse segmento apresenta maior suscetibilidade a falhas decorrentes de variações climáticas, especialmente relacionadas à intensidade do vento. Assim, selecionou-se a falha "*Fio Dando Fogo na Rede Primária*" como caso específico de análise, abrangendo os registros dos anos de 2023 e 2024. Adota-se, portanto, que n assume valores de 1 a 31, correspondentes ao número total de ocorrências registradas para essa falha.

d) Aferição dos Resultados pelo Algoritmo

A partir da aplicação do algoritmo, verificou-se que determinadas faixas de rajadas de vento combinadas à sua direção apresentaram valores de maior possibilidade de ocorrência de falhas. Essa tendência foi observada por meio da razão probabilística entre os valores de vento registrados nas ocorrências e o total de registros climáticos do mesmo período. Quando o resultado dessa razão apresenta valor superior a 1, entende-se que há maior probabilidade relativa de ocorrência de falhas sob aquela faixa específica de vento. Essa relação é representada na Tabela 2: Interpretação dos valores probabilísticos das faixas de vento, que descreve a interpretação dos valores obtidos no cálculo probabilístico.

Tabela 2. Interpretação dos valores probabilísticos das faixas de vento.

Resultado da Razão $P_m(C_{m,j})$	**Interpretação**	**Probabilidade relativa da falha**
< 1	Faixa com menor probabilidade relativa de falha	Baixa
$= 1$	Faixa com comportamento proporcional ao total de registros climáticos	Neutra
> 1	Faixa com maior probabilidade relativa de falha	Alta

Ao analisar os cenários referentes às variáveis V_1, V_2e V_3, verificou-se que as faixas de vento intermediárias e elevadas apresentaram maior frequência de valores acima de 1, indicando maior impacto dessas velocidades nas falhas. Algumas faixas baixas também mostraram valores superiores a 1, sugerindo influência da interação entre direção e velocidade do vento. Por outro lado, certas faixas apresentaram resultados próximos ou inferiores a 1, indicando baixa correlação. Alguns resultados foram inconclusivos ou apresentaram baixa probabilidade, em razão da contingência de dados. As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados obtidos a partir da aplicação da Equação (6), calculada para cada conjunto de dados (Ocorrências e Geral) e para cada combinação envolvendo a variável V_1.

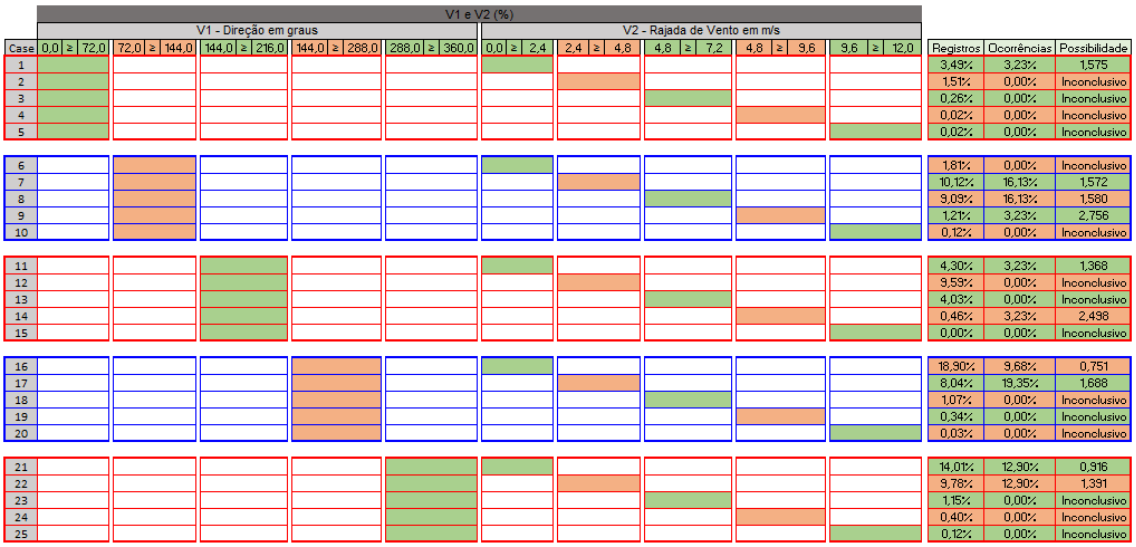


Figura 1: Distribuição combinatória entre as variáveis V_1 (Direção do Vento) e V_2 (Rajada de Vento)

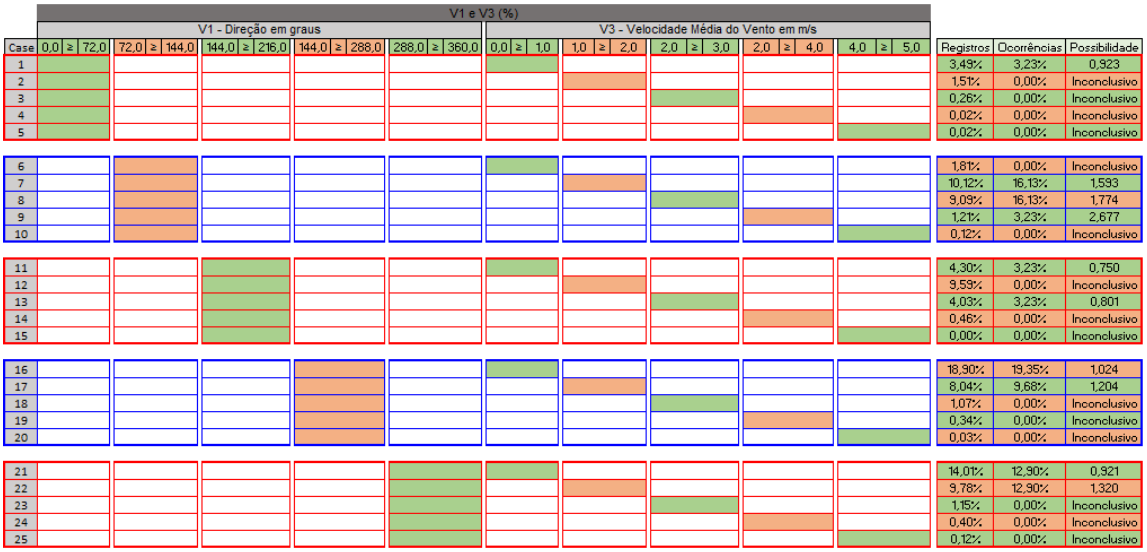


Figura 2: Distribuição combinatória entre as variáveis V_1 (Direção do Vento) e V_3 (Velocidade Média do Vento)

Cada célula das figuras representa uma das 25 combinações possíveis entre as cinco faixas de variação de cada variável, conforme definido pelo índice $C_{n_{m,k2}}$. Os valores indicam a frequência relativa de registros climáticos e de ocorrências em cada combinação, além da razão probabilística $P_m\left(C_{n_{m,k2}}\right)_x$, que expressa a possibilidade relativa de falha sob aquela condição específica. A relação evidenciada na Tabela 3: Resultados Relevantes À Alta Probabilidade De Falha Devido À Combinação De Variáveis Relacionadas Ao Vento e a Tabela 4: Resultados

Relevantes À Alta Possibilidade de Falha por Variável Isolada descrevem os principais indicadores de falhas encontrados através da aplicação da metodologia para o estudo de caso.

Tabela 3. Resultados Relevantes À Alta Probabilidade De Falha Devido À Combinação De Variáveis Relacionadas Ao Vento

Combinação	Faixa	Registros (%)	Ocorrências (%)	Possibilidade
V_1 X V_2	$V_1 - F_1$; $V_2 - F_1$	3,49	3,23	1,575
V_1 X V_2	$V_1 - F_2$; $V_2 - F_2$	10,12	16,13	1,572
V_1 X V_2	$V_1 - F_2$; $V_2 - F_3$	9,09	16,13	1,580
V_1 X V_2	$V_1 - F_2$; $V_2 - F_4$	1,21	3,23	2,756
V_1 X V_2	$V_1 - F_3$; $V_2 - F_4$	0,46	3,23	2,498
V_1 X V_2	$V_1 - F_4$; $V_2 - F_2$	8,04	19,35	1,688
V_1 X V_3	$V_1 - F_2$; $V_3 - F_2$	10,12	16,13	1,593
V_1 X V_3	$V_1 - F_2$; $V_3 - F_3$	9,09	16,13	1,774
V_1 X V_3	$V_1 - F_2$; $V_3 - F_4$	1,21	3,23	2,677

Tabela 4. Resultados Relevantes À Alta Possibilidade de Falha por Variável Isolada

Variável	Faixa	Registros (%)	Ocorrências (%)	Possibilidade
V_1	F_2	35,48	22,36	1,587
V_2	F_4	6,45	4,34	1,487
V_3	F_4	3,23	2,43	1,329

A partir dos resultados observados, verificou-se que as faixas intermediárias e mais elevadas de velocidade do vento apresentaram maior probabilidade relativa de falhas, com razões superiores a 1. Algumas faixas de baixa velocidade também exibiram esse comportamento, indicando que a interação entre direção e intensidade do vento influencia diretamente a ocorrência de falhas e, consequentemente, a confiabilidade das redes de distribuição elétrica.

4 CONCLUSÃO

O algoritmo desenvolvido mostrou-se eficiente para identificar padrões de comportamento em linhas de distribuição elétrica sob diferentes condições de vento, evidenciando maior probabilidade de falhas em faixas intermediárias e elevadas de velocidade, bem como em determinadas combinações de direção e intensidade. A metodologia proposta

apresenta aplicabilidade prática para auxiliar concessionárias na análise de vulnerabilidades operacionais e pode ser estendida para incluir outras variáveis climáticas, como temperatura, umidade e precipitação, além de parâmetros elétricos da linha. Essa ampliação possibilitaria análises mais abrangentes e a construção de modelos preditivos mais robustos. Recomenda-se, em futuras pesquisas, a utilização de uma base de dados mais ampla e padronizada, com registros detalhados e consistentes, a fim de aprimorar a precisão estatística e fortalecer a confiabilidade dos resultados obtidos.

5 REFERÊNCIAS

ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, revisão 10 vigente a partir de 01/01/2018. <Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>. Acesso em: 27 de março de 2024, 13h:50min.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15688: Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Condutores Nus. Rio de Janeiro, 2012

COSSI, Antonio Marcos. Planejamento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Média e Baixa Tensão. Tese de Doutorado apresentada a Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. p. 18 - 19. <Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/037-tese-antonio_marcos_cossi.pdf>. Acesso em 21 de março de 2025, 13h:45min.

SANCHES, Fabio Henrique C.,; et al. The increase in intensity and frequency of surface air temperature extremes throughout the western South Atlantic coast. Scientific Reports, v. 13, n. 6293, 2023. p. 4. <Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-023-32722-1>. Acesso em: 24 de março de 2025, 13h:51min.

SANTOS, Maria Alice Batista dos. Projeto de Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica. Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2021. p. 16. <Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/9ef6cf7b-2430-4676-b7c3-9a27a2596a83/content>. Acesso em 24 de março de 2025, 11h:48min.

SINAPSIS; CLIMATEMPO. Implementação de tecnologias inovadoras para melhoria de qualidade da distribuição considerando resiliência às mudanças climáticas: relatório final. Revisão 2, 2021. p. 6 - 7 <Disponível em: https://www.iadb.org/Document.cfm?id=EZSHARE-1288692092-6>. Acesso em: 24 de março de 2025, 12h36min.