

AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA – UM MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA

RESILIENCY ASSESSMENT OF ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS – A LITERATURE SYSTEMATIC MAPPING

Marcelo Leonardo de Souza ¹
Raimundo Celeste Ghizoni Teive ²

Resumo – Avaliar a resiliência de sistemas de distribuição é fundamental para garantir o fornecimento contínuo e confiável de energia elétrica, considerando o possível impacto de eventos climáticos extremos na rede de distribuição de energia elétrica. Neste sentido, é importante fazer um levantamento do estado da arte, buscando identificar como esse tema tem sido estudado e modelado na literatura técnica. Assim, o objetivo principal deste artigo é apresentar um mapeamento sistemático da literatura sobre avaliação da resiliência de sistemas de distribuição. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão restaram 54 artigos para análise. Os resultados mostram que ventos fortes são os eventos climáticos mais estudados, enquanto postes e linhas aéreas de distribuição são os equipamentos mais modelados. Além disso, a simulação de Monte Carlo apareceu como a técnica mais comumente utilizada para análise de resiliência, considerando o protocolo de pesquisa utilizado. Esse mapeamento também destaca a necessidade de integrar técnicas de aprendizado de máquina para melhorar as avaliações de resiliência.

Palavras-chave: sistemas de distribuição de energia, eventos climáticos extremos, resiliência.

Abstract - Assessing the resilience of distribution systems is fundamental to guaranteeing the continuous and reliable supply of electricity, considering the possible impact of extreme weather events on the electricity distribution network. These extreme events are defined as events with a low probability of occurrence but with a major impact on the distribution network. It is important to survey the state of the art, seeking to identify how this topic has been studied and modeled in the technical literature. Thus, this paper presents a systematic mapping of the literature on assessing the resilience of distribution systems. The results show that strong winds are the most studied climatic events, while poles and overhead distribution lines are the most modeled equipment. In addition, Monte Carlo simulation appears to be the most common technique used for resilience analysis, considering the research protocol used.

¹ Pós-graduado em Big Data (UNIVALI/SC). Contato: mlesouza95@gmail.com.

² Doutor em Sistemas de Energia (EPS/UFSC); Mestre em Eng. Elétrica (UFSC). Contato: rteive@univali.br.

This mapping also highlights the need to integrate machine learning techniques to improve resilience assessments.

Keywords: energy distribution systems, extreme weather events, Resilience.

I. INTRODUÇÃO

A avaliação da resiliência de sistemas de distribuição é de grande importância para assegurar o fornecimento contínuo e confiável do serviço de energia elétrica, considerando a rede de distribuição sujeita a situações críticas, como na ocorrência de eventos climáticos extremos. Os furacões e os ciclones são exemplos de eventos climáticos extremos que possuem baixa probabilidade de ocorrência, porém grande impacto sobre as redes de distribuição elétricas, causando normalmente contingências múltiplas.

Nos Estados Unidos os furacões foram responsáveis por 80% das interrupções, onde cerca de 90% destas interrupções são atribuídas a falhas no sistema de distribuição (DEHGHANI, JEDDI e SHAFIGEZADEH, 2021). No ano de 2020 no sul do Brasil, um ciclone com ventos superiores a 120 km/h deixou mais de 1,5 milhões de unidades consumidoras sem energia (CATUCCI e HOLLAND, 2020).

A ocorrência de eventos de natureza extrema, como tempestades com ventos superiores a 100 km/h, como ocorrem no sul do Brasil por exemplo, pode comprometer a estabilidade estrutural das redes de distribuição de energia, em especial dos postes. Manter a estrutura da rede de distribuição durante a ocorrência de eventos extremos é um desafio para as distribuidoras de energia, as quais precisam dispor de ferramentas computacionais que permitam avaliar a resiliência das suas redes, em função da velocidade dos ventos e idade dos postes.

Avaliar a resiliência das redes de distribuição frente a eventos climáticos extremos, com o intuito de identificar possíveis zonas críticas, é um tema que vem crescendo de interesse dentro da área de sistemas elétricos de potência. Neste sentido, é importante identificarmos quais eventos climáticos tem sido mais estudados na literatura, bem como como a resiliência tem sido avaliada e quais componentes da rede de distribuição têm sido modelados.

O presente artigo tem como principal objetivo apresentar um mapeamento sistemático da literatura sobre avaliação da resiliência de sistemas de distribuição, buscando identificar como este problema tem sido tratado na literatura, quais eventos extremos têm sido mais pesquisados, quais componentes da rede de distribuição têm sido modelados e quais técnicas têm sido aplicadas.

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção 1 é apresentada a introdução do artigo. A seção dois introduz alguns conceitos sobre resiliência de sistemas de distribuição elétrica, enquanto que a terceira seção apresenta a metodologia utilizada para realização do mapeamento sistemático da literatura. A quarta seção apresenta os resultados obtidos com o mapeamento e na sequência são apresentadas as conclusões sobre este estudo.

II. RESILIÊNCIA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A crescente dependência da sociedade em relação à energia elétrica, aliada à alta vulnerabilidade dos sistemas de distribuição à ação de eventos climáticos extremos (BESSANI, MASSIGNAN e FANUCCHI, 2019), torna essencial a criação de estratégias que ajudem as redes de distribuição a absorver e se recuperar rapidamente dessas interrupções (DEHGHANI, JEDDI e SHAFIGEZADEH, 2021).

A resiliência de um sistema de distribuição é a capacidade de um sistema de resistir a eventos inesperados, recuperar-se e adaptar suas operações e estrutura para prevenir e mitigar futuros incidentes (CHI et al., 2018). De acordo com HAIDACHI e ALBARYAK (2019), a resiliência de um sistema pode ser dividida em quatro fases:

- Antecipação: Nessa fase, o sistema se prepara para um impacto iminente, tanto em nível de infraestrutura quanto operacional.
- Adaptação: Após a fase de absorção, o sistema se ajusta ao ocorrido antes de iniciar a recuperação.
- Recuperação: Nesta etapa, são realizados os reparos necessários para estabilizar o sistema novamente.

Os eventos climáticos extremos são considerados de baixa probabilidade de ocorrência, porém de alto impacto sobre a infraestrutura, especialmente sobre a rede de distribuição elétrica. Esses eventos são responsáveis por falhas na distribuição de energia em diversos trechos da rede elétrica, ou seja, podendo ocasionar várias contingências simultâneas.

Organizações e instituições como North American Electric Reliability Corporation (NERC), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Agência Nacional de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL) entre outras, possuem indicadores de continuidade de serviço e confiabilidade, porém, esses indicadores geralmente não se aplicam a esses tipos de eventos.

A ANEEL, por exemplo, possui um indicador de continuidade de serviço conhecido como DICRI, o qual representa a métrica, para quantificar a qualidade dos serviços elétricos em um dia crítico. É considerado um dia crítico quando a quantidade de ocorrência de emergências em um conjunto de unidades consumidoras é maior que a média acrescida de três desvios padrões (ANEEL, 2018). Porém, este indicador não pode ser aplicado no caso da ação de um evento extremo na rede de distribuição, pois o impacto deste evento é superior a três desvios padrão.

Segundo HAIDACHI e ALBARYAK (2019) a literatura apresenta inúmeras maneiras de avaliar a resiliência de sistemas de distribuição de energia como:

- Modelagem e Simulação: Utilização de modelos computacionais para simular o impacto de eventos climáticos extremos.
- Planejamento e Plano de Contingência: Elaboração de planos de contingência que incluem estratégias para enfrentar eventos climáticos extremos.
- Métricas de Resiliência: Definição e utilização de métricas específicas para medir a resiliência da rede de distribuição.
- Histórico de Desempenho: Estudo de eventos climáticos passados e análise do desempenho do sistema durante esses eventos.

III. MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA

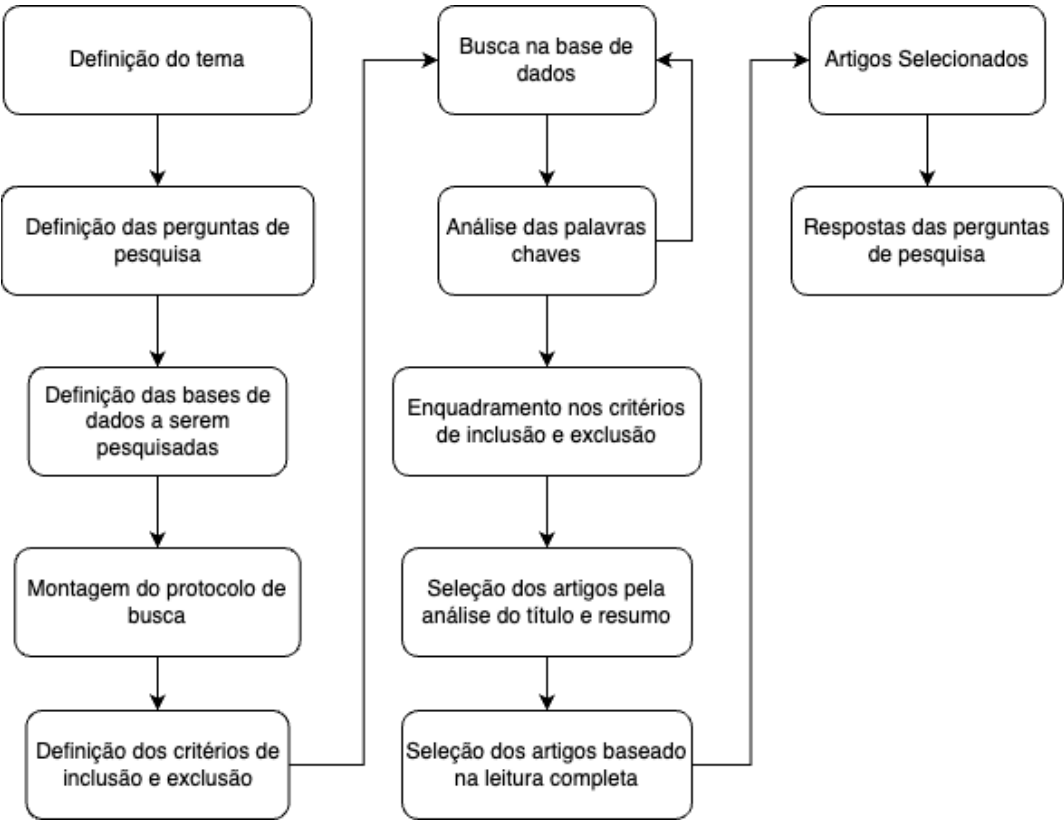
Esta seção apresenta um mapeamento sistemático da literatura, o qual foi realizado para identificar os principais estudos que abordam a avaliação da resiliência de redes de distribuição de energia elétrica, e desta forma responder as questões de pesquisa. As questões de pesquisa que balizaram esta análise foram as seguintes:

- Quais são os eventos climáticos mais utilizados para os modelos de análise?
- Como a resiliência de sistemas de energia elétrica tem sido avaliada em relação a eventos climáticos específicos?
- Quais são os equipamentos da rede de distribuição elétrica modelados para análise da resiliência?
- Que ambientes de simulação têm sido usados para análise de resiliência?

- Que técnicas têm sido usadas para análise de resiliência?
- Quais sistemas teste são utilizados para análise de resiliência?

O mapeamento sistemático da literatura seguiu as etapas colocadas na Figura 1.

Figura 1– Fluxograma do Mapeamento Sistemático.



A Tabela 1 apresenta a relação entre as perguntas de pesquisa e as palavras-chave, tanto em português quanto em inglês.

Tabela 1 – Questões de pesquisa

Questões	Palavra-chave	Traduções
Quais são os eventos climáticos mais utilizados para os modelos de análise?	Análise Resiliência Sistemas de Distribuição Eventos Climáticos	Analysis
Como a resiliência de sistemas de energia elétrica tem sido avaliada em relação a eventos climáticos específicos?		Assessment
Quais são os equipamentos da rede de distribuição elétrica modelados para análise da resiliência?		Resilience
		Distribution System
		Weather Events

Que ambientes de simulação têm sido usados para análise de resiliência?		
Que técnicas têm sido usadas para análise de resiliência?		
Quais sistemas teste são utilizados para análise de resiliência?		

Fonte: Autores, 2024.

Após definidas as perguntas de pesquisa foram identificadas algumas palavras-chaves em português e inglês, as quais foram utilizadas para o protocolo de busca. É importante frisar que para cada repositório de busca é necessário adaptar o protocolo, pois algumas ferramentas trabalham de maneiras diferentes.

Tabela 2– Protocolo de busca

(“Analysis” OR “Assessment”) AND “Resilience” AND “Distribution System” AND “Weather Events”

Fonte: Autores, 2024.

Como ferramenta de busca, foram utilizados algumas bases que são referências na área de sistemas elétricos de potência, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 – Repositórios eletrônicos

Nome do repositório	Descrição	Endereço de acesso
Science Direct	A Science Direct é uma plataforma que oferece acesso a uma grande coleção de pesquisas científica, técnica e médica	https://sciencedirect.com
Scopus	Scopus é a maior base de dados de resumos e citações de literatura revisada por pares	https://scopus.com
IEEE Xplore	Abrange a coleção de trabalhos na área de tecnologia publicados pelo Institute of electrical and electronic Engineers	https://ieeexplore.ieee.org

Fonte: Autores, 2024.

Os critérios de inclusão e exclusão definidos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Critérios de inclusão e exclusão

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
CI01: Data de publicação entre 01/01/2014 e data atual	CE01: Pela análise do título
	CE02: Pela análise do abstract
	CE03: Artigos que não foquem em análise e avaliação de resiliência de sistemas de distribuição de energia elétrica
CI02: Escrito em inglês ou português	CE04: Artigos duplicados
	CE05: Artigos apenas teóricos

	CE06: Artigos escritos em línguas diferentes de português e inglês
	CE07: Artigos não disponíveis para download

Fonte: Autores, 2024.

Aos artigos pré-selecionados foram aplicados os critérios de exclusão apresentados na Tabela 3, com o objetivo de filtrar os trabalhos que tenham maior aderência com os objetivos desta pesquisa. Primeiramente foram aplicados os critérios **CE01** e **CE02**, para remover artigos que em seu título e abstract não estivessem alinhados com as perguntas de pesquisa. Na sequência, foi aplicado como filtro o critério **CE03** para remover artigos que não tratassem sobre análise de resiliência em sistemas de distribuição de energia elétrica. O critério **CE04** foi aplicado para remover artigos que já foram selecionados em outros repositórios (artigos duplicados), e o critério **CE05** foi aplicado para filtrar trabalhos que apresentam uma abordagem apenas teórica sobre o tema. Finalmente, foi aplicado o critério **CE06** para filtrar artigos que possuem abstract em inglês ou português, porém seu conteúdo encontra-se em outras línguas.

A Tabela 5 apresenta o número de artigos encontrados com o protocolo de busca utilizado, e a quantidade de artigos selecionados depois de serem aplicados os critérios de inclusão e exclusão.

Tabela 5 – Número de artigos encontrados

Repositório	Encontrados	Selecionados
Science Direct	38	11
Scopus	185	15
IEEE Xplore	140	60
Total	363	86

Fonte: Autores, 2024.

Como pode ser visto na Tabela IV, foram encontrados 363 artigos utilizando-se os protocolos de busca, sendo que após aplicar os critérios de inclusão e exclusão sobraram 86 artigos para análise. Uma vez que os artigos foram selecionados eles passaram pelo critério **CE07**, onde 32 foram removidos por não estarem disponíveis para *downloading*, restando 54 artigos. Os artigos selecionados estão listados no Apêndice A.

IV. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o mapeamento sistemática da literatura, tendo como foco as respostas que foram obtidas em cada pergunta de pesquisa. Para facilitar a análise dos resultados, as respostas foram agrupadas como pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 – Respostas obtidas

Questão	Respostas possíveis
----------------	----------------------------

1	Quais são os eventos climáticos mais utilizados para modelos de análise?	• Ventos Fortes (Furacões, Tufões, Tempestades com ventos fortes) • Terremoto • Inundação • Ondas de Calor • Tempestade • Incêndios florestais • Tempestade de gelo
2	Como a resiliência de sistemas de energia elétrica tem sido avaliada em relação a eventos climáticos específicos?	• Modelagem e simulação • Planejamento e Contingência • Métricas de resiliência • Histórico de desempenho
3	Quais são os equipamentos da rede de distribuição elétrica modelados para análise de resiliência	• Postes • Linhas aéreas • Subestação • Cabos subterrâneos • Gerador • PAINEL Solar • Transformador
4	Que ambientes de simulação têm sido usados para análise da resiliência	• MATLAB • GAMS • GoldSlim • GRIDLAB • MIPOWER • SIMULINK • SHARPE • SPNP • Hypersim • MATPOWER • OCTAVE • OpenDSS • Python • EAGLE-1 • OpenAI Gym
5	Que técnicas têm sido usadas para análise de resiliência?	• Simulação de Monte Carlo • Aprendizado de máquina • Programação não linear inteira mista (MINLP) • Processos de decisão de Markov (MDP) • Programação mista inteira linear (MILP) • Teoria das redes complexas • Algoritmo de caminho resiliente • Otimização por evolução diferencial • Teoria dos grafos
6	Quais sistemas teste são utilizados para análise de resiliência?	• IEEE 33 • Redes de distribuição real • IEEE 69 • IEEE 123 • RBTS BUS 2

-
- IEEE 30
 - IEEE RTS
 - IEEE 37
 - IEEE 69
 - IEEE 13
-

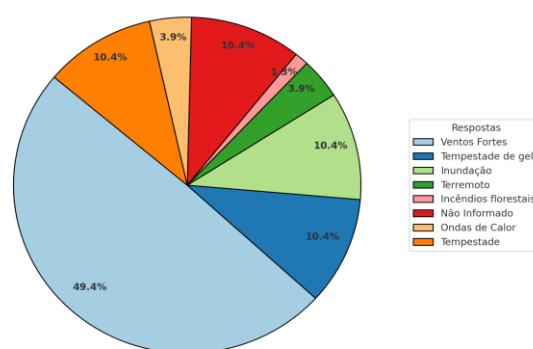
Fonte: Autores, 2024.

Na análise dos trabalhos, quando não havia informação relacionada sobre alguma pergunta de pesquisa no artigo, utilizou-se a notação de “não informado” para indicar que a informação buscada não estava disponível no artigo.

A avaliação dos trabalhos foi feita com base nos 54 artigos selecionados. Outro ponto importante é que uma resposta pode incluir mais de um item, por exemplo, ventos fortes e terremotos, ou linhas aéreas e postes. No entanto, cada item foi contabilizado separadamente. Assim, se uma resposta tiver ventos fortes e terremotos, cada um foi contabilizado de forma individual.

Na Figura 2 é possível identificar as respostas que mais apareceram para a pergunta 1, no qual ventos fortes apareceu 38 vezes com 49.4% das ocorrências, enquanto tempestades de gelo e tempestades aparecem na sequência.

Figura 2 – Distribuição das respostas na Questão 1
Distribuição das Respostas na Questão 1



Fonte: Autores, 2024.

Na Figura 3, pode-se observar que as respostas que mais apareceram sobre o contexto em que a resiliência é avaliada foram “modelagem e simulação” e “planejamento e contingência”, com 100% de ocorrências. Na sequência, “métricas de resiliência” e “histórico de desempenho”.

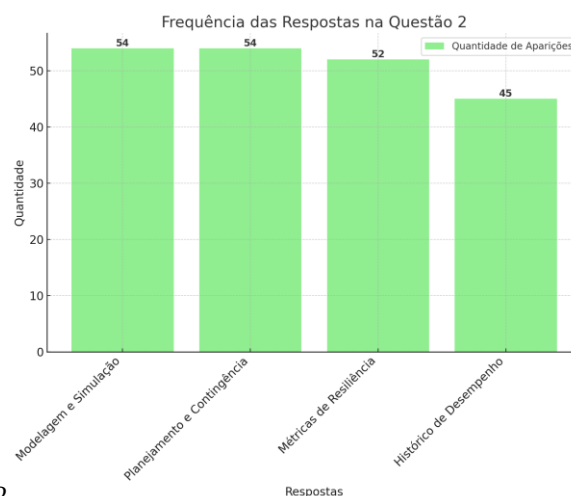
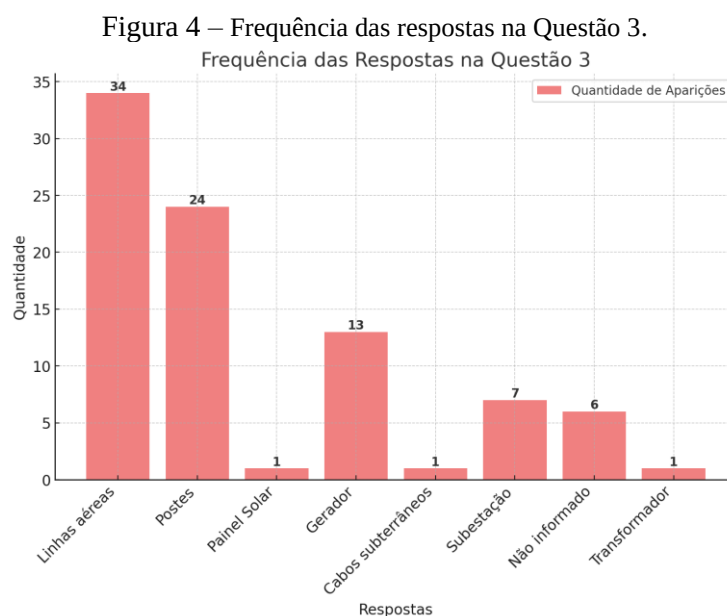


Figura 3 – Frequência das respostas na Questão 2

Fonte: Autores, 2024.

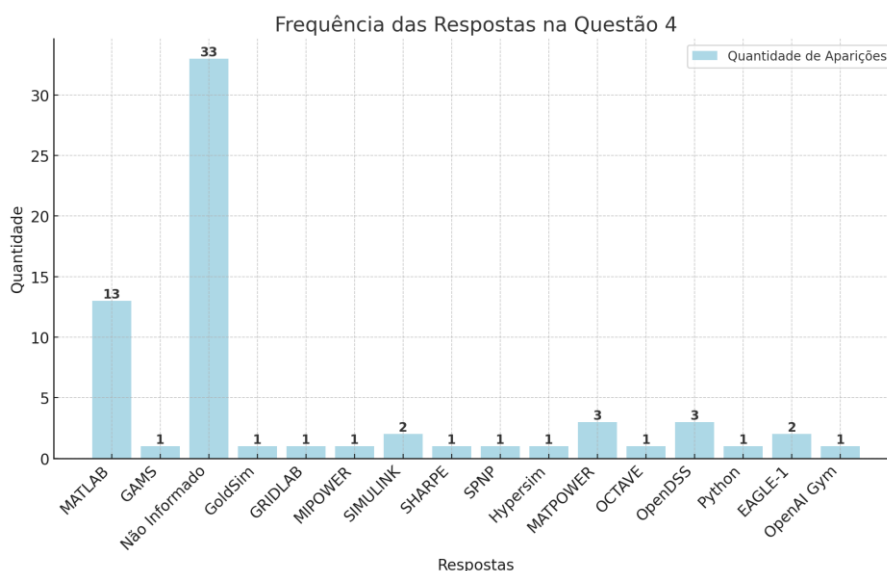
Sobre os componentes da rede de distribuição, os quais são modelados com maior frequência, destaca-se “linhas aéreas” com 34 ocorrências, e “postes” com 24 ocorrências, representando 39,1% e 27,6%, respectivamente. A Figura 4 apresenta todas as respostas encontradas para a questão 3.



Fonte: Autores, 2024.

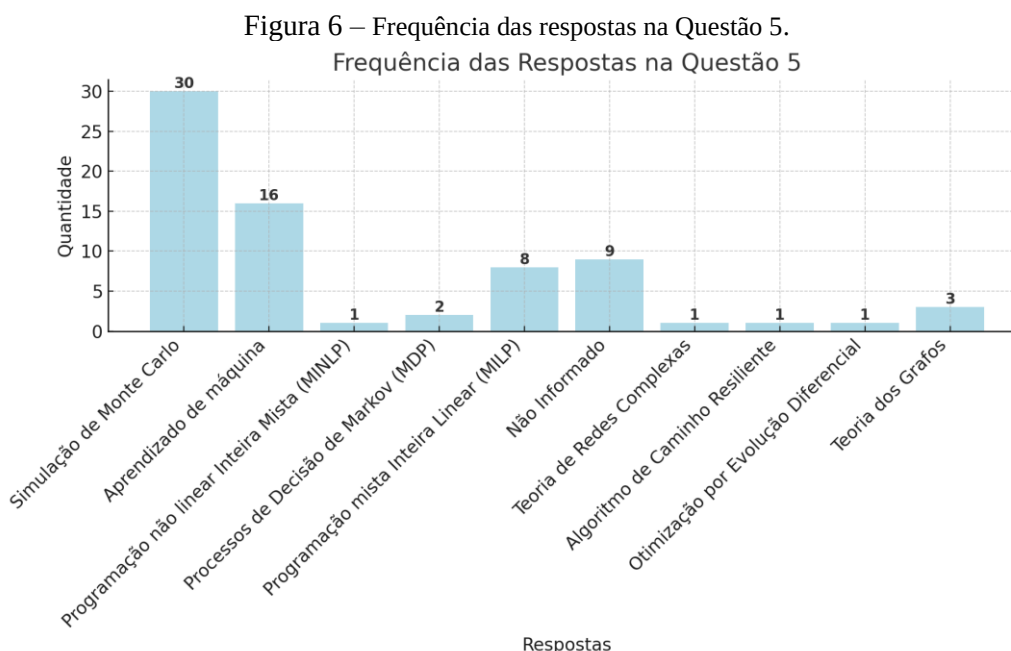
A Figura 5 representa os resultados da pergunta 4, sobre os ambientes de simulação utilizados, na qual a maior porcentagem fica para “Não informado” com 33 ocorrências e 50%, seguido por “MATLAB” com 19.7%.

Figura 5 – Frequência das respostas na Questão 4.



Fonte: Autores, 2024.

A Figura 6 apresenta os resultados da quinta questão, envolvendo as respostas sobre as técnicas empregadas para avaliação da resiliência, na qual temos “Simulação de Monte Carlo” com 41,7% das ocorrências, seguido de “Aprendizado de máquina” com 22.2%. Com a menor porcentagem temos “Teoria de Redes Complexas” com 1.4%.



Fonte: Autores, 2024.

Os trabalhos de TARI, SEPASIAN e TOURANDAZ (2021), HUGHES (2024) e ATRIGNA et al. (2021) propõe o uso de modelos de aprendizado de máquina, para avaliar a resiliência de sistema de distribuição, sendo que estes trabalhos buscam identificar os locais que podem ser mais impactados por estes eventos e que necessitam de maiores cuidados, como reforços da rede.

A Figura 7 representa as respostas para a última pergunta de pesquisa, a qual se refere ao sistema teste utilizado na análise de resiliência. Neste caso, tivemos as maiores

porcentagens para “IEEE 33” com 22.2%, seguido de “Redes de distribuição real” com 20.4% e “Não informado” com 14.3%.

Figura 7 – Frequência das respostas na Questão 6.



Fonte: Autores, 2024.

Na seção IV, os resultados quantificados das respostas das perguntas de pesquisa serão analisados e discutidos, buscando-se compreender como a resiliência de sistemas de distribuição de energia elétrica tem sido estudada e avaliada, bem como possíveis direções de pesquisa.

V. CONCLUSÃO

O mapeamento sistemático da literatura realizado indicou alguns aspectos interessantes sobre como o tema da avaliação de resiliência de sistemas de distribuição, tem sido tratado na literatura. Um dos aspectos observados foi com relação ao tipo de evento climático extremo, sendo que ventos fortes é o que tem sido mais pesquisado em estudos de resiliência de redes de distribuição. Isto se justifica pela maior frequência atual deste tipo de tempestade e o forte impacto da mesma sobre a rede de distribuição, ocasionando contingências múltiplas.

Com relação aos componentes da rede de distribuição mais modelados nos trabalhos pesquisados, observou-se que as linhas aéreas e os postes são os componentes mais utilizados nos modelos de simulação. Porém, o ambiente de simulação muitas vezes não é descrito no artigo. Observou-se que 50% dos estudos avaliados não detalharam o ambiente de simulação, dificultando a identificação das ferramentas mais adotadas na análise da resiliência de sistemas de distribuição.

Com respeito as ferramentas computacionais e técnicas que vem sendo utilizadas na literatura, observou-se a maior predominância da Simulação de Monte Carlo. Por mais que o aprendizado de máquina esteja em evidência, ficou claro que para a análise de resiliência ainda existe muito espaço para a aplicação destes algoritmos, pois apenas 30% de artigos pesquisados utilizaram algoritmos de aprendizado de máquina para avaliação da resiliência em redes de distribuição.

Com avanço tecnológico e a crescente dependência da sociedade em relação à

energia elétrica, criar modelos capazes de avaliar a resiliência de sistemas de distribuição com maior eficiência, pode trazer benefícios sociais e econômicos significativos; pois esta análise pode identificar pontos críticos na rede de distribuição, além de detectar possíveis fragilidades em componentes desta rede, em função de algum evento climático extremo.

Para trabalhos futuros, pretendemos desenvolver um modelo de avaliação da resiliência de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado em técnicas de Aprendizado de Máquina e Simulação de Monte Carlo, utilizando curvas de fragilidade dos postes em função da idade e velocidade do vento como entradas.

VI. REFERÊNCIAS

ANEEL Procedimentos da Distribuição – PRODIST. Módulo 1. 2018.

ATRIGNA, M; BUONANNO, A; CARLI, R; CAVONE G; SCARABAGGIO P; VALENTI, M; GRADITI, G; DOTOLI, M; “Effects of Heatwaves on the Failure of Power Distribution Grids: A Fault Prediction System Based on Machine Learning” 21st International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 5th IEEE Industrial and Commercial Power System Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2021 - Proceedings. 2021. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584751>

BESSANI, M; MASSIGNAN, J. A. D; FANUCCHI, R. Z; “Probabilistic Assessment of Power Distribution Systems Resilience Under Extreme Weather”. in **IEEE Systems Journal**, vol. 13, no.2, pp. 1747-1756, 2019. doi: 10.1109/JSYST.2018.2853554.

CATUCCI, A; HOLLAND, C; Formação de ciclone bomba; e passagem de tempestades provocam ao menos 3 mortes em SC. G1, 30 jun. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2020/06/30/fortes-ventos-e-chuva-provocam-estragos-em-cidades-de-sc.ghtml>. Acesso em: 11 maio 2024.

CHI, Y; CHU, Y; HU, C; FENG, S; “A state-of-the-art literature survey of power distribution system resilience assessment” IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2018. pp. 1-5. <https://doi.org/10.1009/PESGM.2018.8586495>.

DEHGHANI, N. L; JEDDI, A. B; SHAFIEEZADEH, A; “Intelligent hurricane resilience enhancement of power distribution systems via deep reinforcement learning”. 2021. *Applied Energy*, 285, 116355.

HAIDACHI, I; ALBARYAK, S; “A Survey on Simulation of Power Systems Resilience Under Extreme Weather Events.”. 2019 IEEE Milan PowerTech, Milan, Italy, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2019.8810541.

HUGHES, W. et al. Assessing grid hardening strategies to improve power system performance during storms using a hybrid mechanistic-machine learning outage prediction model. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 248, 1 ago. 2024. doi: 10.1016/j.ress.2024.110169.

TARI, A. N.; SEPASIAN, M. S.; TOURANDAZ, M. K. Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 125, 1 fev. 2021. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106414.

VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

APÊNDICE – ARTIGOS SELECIONADOS

Autor(es)	Título	Ano	Revista/Congresso
ABDELMALAK, M. et al.	Quantitative Resilience-Based Assessment Framework Using EAGLE-I Power Outage Data	2023	IEEE Access
AMICARELLI, E. et al.	Assessment of the resilience of the electrical distribution grid: e-distribuzione approach	2018	2018 AEIT International Annual Conference
AMIRIOUN, M. et al.	Metrics and quantitative framework for assessing microgrid resilience against windstorms	2019	International Journal of Electrical Power and Energy Systems
ATRIGNA, M. et al.	A Machine Learning Approach to Fault Prediction of Power Distribution Grids Under Heatwaves	2021	21st International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021
BAJPAI, P. CHANDA, S. SRIVASTAVA, A. K.	A Novel Metric to Quantify and Enable Resilient Distribution System Using Graph Theory and Choquet Integral	2018	IEEE Transactions on Smart Grid, vol 9.
BOSISIO, A. et al.	Machine learning and GIS approach for electrical load assessment to increase distribution networks resilience	2021	Energies, vol 14.
CIAPESSONI E. CIRIO D. PITTO A.	A Cost-Benefit Analysis Framework for Power System Resilience Enhancement Based on Optimization via Simulation Considering Climate Changes and Cascading Outages	2023	Energies, vol 16, no 13.
CHANDA, S. et al.	Quantifying Power Distribution System Resiliency Using Code Based Metric	2016	2016 IEEE International Conference on Power Electronics
CHEN, H. et al.	A Two-stage Stochastic Mixed-integer Programming Model for Resilience Enhancement of Active Distribution Networks	2023	Journal of Modern Power Systems and Clean Energy
CHEN, Y. et al.	Learning Power Grid Outages With Higher-Order	2024	IEEE Transactions on Power Systems

Topological Neural Networks			
CRESTA, M. et al.	Resilience assessment in distribution grids: A complete simulation model	2021	Energies, vol 14.
DEHGHANI, F. MOHAMMADI, M. KARIMI, M.	Age-dependent resilience assessment and quantification of distribution systems under extreme weather events	2023	International Journal of Electrical Power and Energy Systems
DE VANNA, G. LONGO, M. FOIADELLI, F.	Reliability and Resilience Analysis and Comparison of Off-Grid Microgrids	2020	Virtual conference, UPEC 2020 : 2020 55th
DU, Y. ZHANG, T. ZHANG, W.	Enhancing Distribution System Resilience to Extreme Weather Using Multi-Energy Coordination	2019	2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)
DWIVEDI, D. YEMULA, P. PAL, M	Evaluating the planning and operational resilience of electrical distribution systems with distributed energy resources using complex network theory	2023	Renewable Energy Focus
FANUCCHI, R. et al.	Stochastic indexes for power distribution systems resilience analysis	2019	IET Generation, Transmission and Distribution
GAUTAM, P. PIYA, P. KARKI, R	Resilience assessment of distribution systems integrated with distributed energy resources	2021	IEEE Transactions on Sustainable Energy
GHOSH, P. DE, M.	Resilience-oriented planning for active distribution systems: A probabilistic approach considering regional weather profiles	2024	International Journal of Electrical Power and Energy Systems
HOU, H. et al.	Resilience enhancement of distribution network under typhoon disaster based on two-stage stochastic programming	2023	Applied Energy
HUANG, Y. et al.	Resilient Distribution Networks by Microgrid Formation Using Deep Reinforcement Learning	2022	IEEE Transactions on Smart Grid
HUGHES, W. et al.	Assessing grid hardening strategies to improve power system performance during storms using a hybrid mechanistic-machine learning outage prediction model	2024	Reliability Engineering and System Safety
HUGHES, W. et al.	Damage modeling framework for resilience hardening strategy for overhead power distribution systems	2021	Reliability Engineering and System Safety

JIANG, J. et al.	Stochastic Planning for Resilient Infrastructure of Distribution System Under Extreme Weather Events	2023	IEEE Transactions on Industry Applications
KANDAPERUMAL, G. PANDEY, S. SRIVASTAVA, A.	AWR: Anticipate, Withstand, and Recover Resilience Metric for Operational and Planning Decision Support in Electric Distribution System	2022	IEEE Transactions on Smart Grid
LEE, S. HAM, Y.	Probabilistic framework for assessing the vulnerability of power distribution infrastructures under extreme wind conditions	2021	Sustainable Cities and Society
LEE, S. et al.	Quantifying the Power System Resilience of the US Power Grid Through Weather and Power Outage Data Mapping	2024	IEEE Access
LEITE, J. et al.	Resiliency Assessment in Distribution Networks Using GIS-Based Predictive Risk Analytics	2019	IEEE Transactions on Power Systems
LU, J. et al	Dynamic Assessment of Resilience of Power Transmission Systems in Ice Disasters	2018	2018 International Conference on Power System Technology.
LUO, D. et al.	Evaluation Method of Distribution Network Resilience Focusing on Critical Loads	2018	IEE Access
MA, S. et al	Resilience Assessment of Self-healing Distribution Systems Under Extreme Weather Events	2019	2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)
MA, S. et al.	Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events	2018	IEEE Transactions on Power Systems
MORRIS, K KIM D. S.	Availability and Resiliency Analysis of Modern Distribution Grids Using Stochastic Reward Nets	2017	IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)
MUKHERJEE, M. et al	A Framework to Quantify the Value of Operational Resilience for Electric Power Distribution Systems	2020	Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference
NAJAFI TARI, A. SEPASIAN, M. TOURANDAZ KENARI, M.	Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events	2021	International Journal of Electrical Power and Energy Systems
NAVARRO-ESPINOSA, A. et al.	IMPROVING DISTRIBUTION NETWORK RESILIENCE AGAINST EARTHQUAKES	2017	IET International Conference on Resilience of Transmission and

			Distribution Networks.
NGUYEN, H. MUHS, J. PARVANIA, M.	Preparatory Operation of Automated Distribution Systems for Resilience Enhancement of Critical Loads	2021	IEEE Transactions on Power Delivery
NOEBELS, M QUIROS-TORTOS, J. PANTELI, M.	Decision-Making Under Uncertainty on Preventive Actions Boosting Power Grid Resilience	2022	IEEE Systems Journal, v. 16, n. 2
OH, S. et al.	Achieving Robust and Accurate Power Distribution Grid Damage Forecasting via a Two-Stage Forecasting Method	2020	Proceedings of 2020 4th International Conference on Green Energy and Applications. 2020
PAUL, S DING, F	Identification of Worst Impact Zones for Power Grids During Extreme Weather Events Using Q-learning	2020	IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. 2020.
PAUL, S. et al.	Q-learning-based impact assessment of propagating extreme weather on distribution grids	2020	IEEE Power and Energy Society General Meeting
PITTO, A. et al.	Analytical modeling of overhead line vulnerability to wet snow events for resilience assessment	2019	2019 AEIT International Annual Conference (AEIT)
POUDEL, S. DUBEY, A. BOSE, A.	Probabilistic Quantification of Power Distribution System Operational Resilience	2019	2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)
POUDEL, S. DUBEY, A. BOSE, A.	Risk-Based Probabilistic Quantification of Power Distribution System Operational Resilience	2020	IEEE Systems Journal
PRIYA, E. PREETHA, J.	Integrated Assessment and Enhancement Method for Resiliency Improvement under HILP Events in Distribution Power Networks	2023	International Journal of Renewable Energy Research
SABOUHI, H. et al.	Electricity distribution grids resilience enhancement by network reconfiguration	2021	International Transactions on Electrical Energy Systems
SERRANO-FONTOVA, A. et al.	A novel resilience assessment for active distribution networks including a DER voltage regulation scheme considering windstorms	2023	International Journal of Electrical Power and Energy Systems
SHAOYUN, G. et al	Assessing and Boosting the Resilience of a	2019	2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)

Distribution System under Extreme Weather				
SHI, Q. et al.	Resilience-Oriented DG Siting and Sizing Considering Stochastic Scenario Reduction	2021	IEEE Transactions on Power Systems	
WANG Y. et al	A Resilience Assessment Framework for Distribution Systems under Typhoon Disasters	2021	IEEE Access	
WU, Y. et al.	Resilience enhancement for urban distribution network via risk-based emergency response plan amendment for ice disasters	2022	International Journal of Electrical Power and Energy Systems	
XU, Y. SCHNEIDER, K. P. TON, D, T.	Toward a Resilient Distribution System	2015	Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE	
YANG, F. et al	Assessing the power grid vulnerability to extreme weather events based on long-term atmospheric reanalysis	2023	Stochastic Environmental Research and Risk Assessment	
ZHAI, B. et al.	Pre-event Resilience Enhancement Strategy for Distribution Systems Based on Dueling DDQN	2021	IEEE 4th International Conference on Electronics Technology. 2021	
ZHANG, C. et al.	Distributionally robust resilience optimization of post-disaster power system considering multiple uncertainties	2024	Reliability Engineering and System Safety	