

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS**  
**ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES / ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**Trabalho Final de Curso**

**Arthur Vigário Porto Bragotto Ragazzo**

**CIÊNCIA DE DADOS PARA IDENTIFICAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS  
CLIMÁTICAS E INTERRUPÇÕES EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho Final de Curso como parte dos requisitos para  
obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica  
apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Marcos Antônio de Sousa – Orientador. POLI-PUC Goiás.  
Prof. Dr. Antônio Marcos Melo Medeiros – Avaliador. POLI-PUC Goiás.  
Prof. Me. Luis Fernando Pagotti – Avaliador. POLI-PUC Goiás.

Goiânia, 3 de dezembro de 2025.

# Ciência de dados para identificação da relação entre variáveis climáticas e interrupções em redes de energia elétrica

ARTHUR VIGÁRIO PORTO BRAGOTTO RAGAZZO, MARCOS A. SOUSA

**Abstract** – The growing demand for electrical energy and the need for increased reliability in distribution networks highlight the importance of improving failure detection and prediction methods. This study investigates the relationship between climatic variables and operational faults through exploratory data analysis techniques applied to two heterogeneous datasets: an operational dataset containing records of events in power networks, and a climatic dataset composed of meteorological records from INMET. After data cleaning and temporal-spatial integration, histograms, heatmaps, time series, and scatter plots were employed to identify patterns and correlations. The results indicate that precipitation, maximum temperature, and wind gusts are critical factors, with extreme events showing a stronger association with failures than moderate events. The heterogeneous spatial distribution of these events suggests regions of greater vulnerability, while the moderate correlation among climatic variables reinforces their combined influence. The analyses confirm that integrating operational and meteorological data is both feasible and informative, providing initial support for the future development of Machine Learning-based predictive models and for more effective preventive maintenance and power system management strategies.

**Keywords** – EDA, power grid failure, climatic variables.

**Resumo** – A crescente demanda por energia elétrica e a necessidade de maior confiabilidade das redes de distribuição tornam essencial o aprimoramento de métodos de detecção e previsão de falhas. Este trabalho investiga a relação entre variáveis climáticas e falhas operacionais por meio de técnicas exploratórias de análise de dados aplicadas a duas bases heterogêneas: uma operacional, contendo registros de eventos em redes de energia, e outra climática, composta por registros meteorológicos do INMET. Após processos de limpeza, integração temporal e espacial, foram aplicados histogramas, mapas de calor, séries temporais e gráficos de dispersão para identificar padrões e correlações. Os resultados indicam que precipitação, temperatura máxima e rajadas de vento são fatores críticos, com eventos extremos apresentando maior associação com falhas do que eventos moderados. A distribuição espacial heterogênea desses eventos sugere regiões mais vulneráveis, enquanto a correlação moderada entre variáveis climáticas reforça a influência conjunta desses fatores. As análises confirmam que a integração de dados operacionais e meteorológicos é viável e informativa, oferecendo subsídios iniciais para o desenvolvimento futuro de modelos preditivos baseados em Machine Learning e para estratégias mais eficazes de manutenção preventiva e gestão da rede elétrica.

**Palavras-chave** – EDA, falhas na rede de energia, variáveis climáticas.

## I. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais têm provocado um aumento significativo na frequência e na intensidade de eventos extremos, como tempestades, enchentes, secas prolongadas e rajadas de vento. Segundo o Serviço Copernicus para as Alterações Climáticas (C3S) [1], o ano de 2024 registrou um acréscimo superior a 1,5 °C na temperatura média global em relação aos níveis pré-industriais, ultrapassando um dos principais limites definidos pelo Acordo de Paris. Esse cenário impõe desafios críticos à infraestrutura de serviços essenciais, especialmente às redes de distribuição de energia elétrica, cuja vulnerabilidade diante de condições climáticas adversas tem se tornado cada vez mais evidente.

No contexto brasileiro, eventos extremos, como as enchentes ocorridas no estado do Rio Grande do Sul em 2024, causaram não apenas prejuízos humanos e socioeconômicos, mas também danos expressivos à infraestrutura elétrica [2]. Esses episódios evidenciam a fragilidade das redes e a necessidade de aprimoramento nas medidas preventivas adotadas por algumas concessionárias. Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) indicam que, em estados como Goiás, os indicadores de continuidade do fornecimento, Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), têm se mantido consistentemente acima dos limites regulatórios. Essa tendência ressaltava a importância de esforços contínuos na gestão da qualidade do serviço prestado, a fim de assegurar níveis de confiabilidade condizentes com os parâmetros estabelecidos pela regulação setorial. Conforme apontam os relatórios de desempenho da ANEEL, o comportamento desses indicadores reflete desafios operacionais recorrentes na manutenção e expansão das redes de distribuição em determinadas regiões do país [3], [4].

A literatura técnica destaca que a integração entre dados operacionais e variáveis climáticas é fundamental para compreender a dinâmica das falhas nas redes elétricas frente a eventos extremos. Nesse contexto, a análise exploratória de dados constitui uma ferramenta essencial para identificar padrões, avaliar vulnerabilidades e subsidiar estratégias de mitigação. Estudos como o de Freitas (2025) [5] demonstram que a correlação entre variáveis meteorológicas (incluindo precipitação, temperatura, rajadas de vento e umidade e os registros de falhas na rede elétrica) proporciona uma compreensão mais aprofundada dos fatores que influenciam a confiabilidade do sistema de distribuição.

A pesquisa apresentada neste artigo tem como objetivo realizar uma análise exploratória de dados operacionais e climáticos, com foco na identificação de padrões de falhas em redes de energia elétrica em função de eventos meteorológicos. Os dados utilizados foram obtidos com uma concessionária de energia e complementados por registros climáticos obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A abordagem metodológica adotada segue os princípios da análise estatística descritiva e de séries temporais, conforme estruturado no estudo de Neto (2025) [6], que propõe um *framework* robusto para a integração entre dados operacionais e climáticos.

Por fim, destaca-se que os resultados obtidos a partir da análise exploratória apresentada servirão como base para estudos futuros envolvendo técnicas de aprendizado de máquina e otimização multiobjetivo. Embora tais abordagens sejam amplamente reconhecidas na literatura como promissoras para a previsão de falhas e formulação de estratégias preventivas, elas não integram o escopo deste trabalho. O foco permanece na investigação exploratória dos dados, visando contribuir para o entendimento dos impactos das variáveis climáticas sobre a confiabilidade das redes de energia.

O artigo está estruturado em quatro seções, além desta introdução. A Seção II apresenta a revisão da literatura sobre sistema elétrico, medidas de qualidade no fornecimento de energia elétrica e impacto dos fenômenos meteorológicos climáticos nas redes de energia. A Seção III descreve a metodologia adotada, incluindo os dados, processos de integração e técnicas de análise exploratória empregadas. A Seção IV discute os resultados obtidos e suas implicações, enquanto a Seção V apresenta as conclusões e as considerações finais desse trabalho de conclusão de curso.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### A. O setor Elétrico Brasileiro: Estrutura e Desafios Climáticos

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é composto por três segmentos principais: geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Cada um desses segmentos possui características operacionais distintas e enfrenta desafios específicos, especialmente diante das mudanças climáticas e da crescente demanda por energia.

#### Geração de Energia Elétrica

A geração é o ponto inicial do SEB, responsável por converter diferentes formas de energia em eletricidade. A matriz energética brasileira é predominantemente renovável, com destaque para a energia hidráulica, que representa cerca de 60% da geração nacional. Fontes como solar, eólica, biomassa e gás natural também têm ganhado espaço na matriz, com destaque para o crescimento acelerado da energia solar, que apresentou aumento de 54,8% em 2023 [5][7].

Em 2024, o Brasil alcançou uma capacidade instalada de 6,5 GW no primeiro semestre, com acréscimo de 875,42 MW apenas em julho. A Bahia liderou a expansão com 594,60 MW, seguida por Minas Gerais com 161,61 MW. A região Nordeste destacou-se por bater recordes de geração eólica, atingindo 19.083 MW em agosto [5].

A geração distribuída também tem papel relevante, influenciando aspectos como proteção do sistema, qualidade da energia e perfil de tensão. Essa modalidade tem sido

impulsionada por políticas públicas e pela busca por maior autonomia energética [8].

Contudo, a geração elétrica é vulnerável às mudanças climáticas. Secas prolongadas afetam diretamente a produção hidrelétrica, enquanto tempestades e ventos intensos podem comprometer a operação de usinas eólicas e solares. A diversificação da matriz e o uso de tecnologias resilientes são fundamentais para mitigar esses impactos [5][9].

#### Transmissão de Energia Elétrica

A transmissão é responsável por transportar a energia gerada até os centros de consumo, por meio de linhas de alta tensão que integram o Sistema Interligado Nacional (SIN). Esse sistema cobre grande parte do território brasileiro e permite o intercâmbio de energia entre regiões, promovendo maior segurança e eficiência [5].

As linhas de transmissão são projetadas para cobrir grandes distâncias e diferentes condições geográficas. No entanto, sua exposição às intempéries torna a infraestrutura suscetível a falhas causadas por ventos fortes, descargas atmosféricas e quedas de árvores. Esses eventos podem comprometer a continuidade do serviço e demandam investimentos em proteção e modernização [9]. A regulação da transmissão é realizada pela ANEEL, que define critérios técnicos e econômicos para os contratos de concessão. A Receita Anual Permitida (RAP) é estabelecida por meio de leilões, e os operadores devem garantir a qualidade e confiabilidade do serviço.

Estudos apontam que o modelo de expansão da transmissão adotado no Brasil apresenta desafios, como a necessidade de maior flexibilidade e adaptação às fontes renováveis intermitentes. A capacidade de escoar energia de regiões com alta produção, como o Nordeste, para centros consumidores no Sudeste, depende de redes robustas e adaptadas às novas demandas climáticas [10].

#### Distribuição de Energia Elétrica

A distribuição é a etapa final do sistema elétrico, responsável por entregar a energia aos consumidores residenciais, comerciais e industriais. Operando em média e baixa tensão, essa rede é caracterizada por sua capilaridade e é o segmento mais vulnerável a falhas, especialmente causadas por condições meteorológicas adversas [5].

Eventos como tempestades, ventos intensos e descargas elétricas estão diretamente ligados às interrupções no fornecimento, principalmente durante o verão. A dispersão geográfica das redes, aliada à falta de investimentos em modernização, agrava a fragilidade da infraestrutura [9].

Para mitigar os impactos das mudanças climáticas, é fundamental que o setor invista em redes de distribuição mais resilientes, como sistemas subterrâneos, tecnologias de monitoramento em tempo real e estratégias de manutenção preventiva. A adaptação da distribuição às novas realidades climáticas é essencial para garantir a continuidade e a segurança do fornecimento [9][11].

### B. Medidas de Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica

A qualidade do fornecimento de energia elétrica é um dos pilares fundamentais para garantir a confiabilidade dos sistemas de distribuição, especialmente em regiões tropicais sujeitas a eventos climáticos extremos. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece indicadores regulatórios que permitem avaliar o desempenho

das concessionárias, com foco na continuidade e na eficiência do serviço prestado [6].

Os principais indicadores utilizados pela ANEEL são o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). O DEC representa o tempo médio, em horas, que cada unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante o ano, enquanto o FEC indica o número médio de interrupções por unidade consumidora no mesmo período. A Figura 01 apresenta um panorama desses índices para o ano de 2024. Esses indicadores são consolidados no DGC (Desempenho Global de Continuidade) (Figura 02), que permite uma avaliação integrada do serviço fornecido [6].

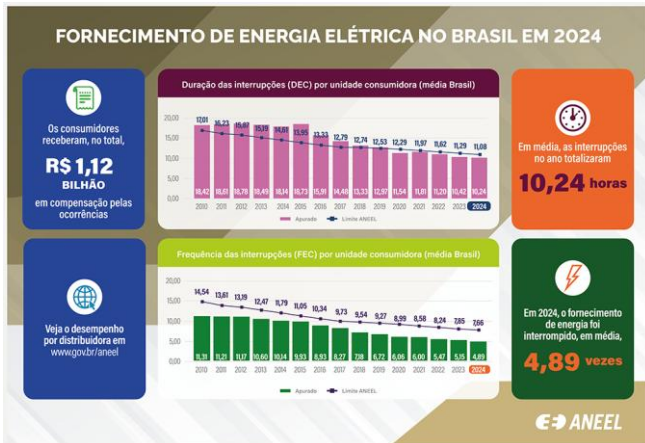


Figura 01. Indicadores de continuidade no Brasil em 2024 – DEC e FEC [3].

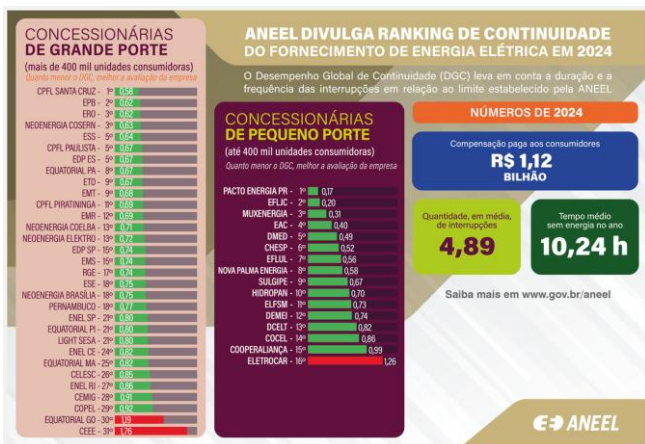


Figura 02. Ranking nacional de desempenho das grandes concessionárias de energia elétrica em 2024 - DGC [3].

A análise histórica dos dados da concessionária que atua no estado de Goiás revela um cenário preocupante. Entre 2015 e 2024, os valores de DEC e FEC permaneceram consistentemente acima dos limites regulatórios estabelecidos pela ANEEL (Tabela 1). Em 2023, por exemplo, o DEC apurado foi de 21,58 horas, enquanto o limite era de 11,45 horas, indicando um desempenho insatisfatório 88% acima do permitido. Já o FEC atingiu 11,16 interrupções, superando em 43% o limite de 7,79 interrupções [6]. A persistência desses índices elevados ao longo dos anos evidencia a necessidade de investimentos em infraestrutura, manutenção preventiva e adoção de tecnologias que aumentem a resiliência das redes frente a eventos climáticos adversos.

Tabela 1. Valores históricos de DEC, FEC e DGC da concessionária de Goiás.

| Ano  | DEC Apurado Anual (h) | DEC Limite Anual (h) | FEC Apurado Anual (h) | FEC Limite Anual (h) | DGC  |
|------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------|
| 2015 | 43,24                 | 15,81                | 25,07                 | 14,29                | 2,24 |
| 2016 | 29,55                 | 14,94                | 18,90                 | 12,84                | 1,72 |
| 2017 | 32,29                 | 14,01                | 19,20                 | 11,51                | 1,99 |
| 2018 | 26,61                 | 13,69                | 15,02                 | 11,03                | 1,65 |
| 2019 | 23,07                 | 13,44                | 11,32                 | 10,52                | 1,40 |
| 2020 | 16,48                 | 12,95                | 9,52                  | 9,89                 | 1,12 |
| 2021 | 18,75                 | 12,58                | 8,95                  | 9,28                 | 1,23 |
| 2022 | 22,55                 | 12,11                | 10,35                 | 8,56                 | 1,54 |
| 2023 | 21,58                 | 11,45                | 11,16                 | 7,79                 | 1,66 |
| 2024 | 15,91                 | 11,43                | 7,61                  | 7,73                 | 1,19 |

A literatura técnica reforça que a melhoria dos indicadores de qualidade está diretamente relacionada à capacidade das redes de antecipar e responder a falhas. Estratégias como gestão de vegetação, fortalecimento de estruturas físicas, instalação de sistemas de backup e integração de dados operacionais com variáveis climáticas são apontadas como medidas eficazes para mitigar os impactos de interrupções [13][14]. Portanto, as medidas de qualidade no fornecimento de energia elétrica não apenas refletem o desempenho das concessionárias, mas também servem como base para políticas públicas e estratégias de gestão. Em um cenário de crescente variabilidade climática, o aprimoramento desses indicadores é essencial para garantir a segurança energética, a satisfação dos consumidores e a sustentabilidade dos sistemas de distribuição.

### C. Impacto das Mudanças Climáticas em Falhas na Rede de Energia Elétrica

As mudanças climáticas têm alterado significativamente os padrões meteorológicos, aumentando a frequência e a intensidade de eventos extremos, como tempestades, secas prolongadas, ondas de calor e enchentes. Esses fenômenos impactam diretamente a infraestrutura elétrica, comprometendo a geração, transmissão e, principalmente, a distribuição de energia elétrica [9].

No Brasil, cuja matriz energética é majoritariamente hidrelétrica, as variações no regime de chuvas afetam a disponibilidade hídrica, reduzindo a capacidade de geração e elevando os custos operacionais. Períodos de estiagem prolongada, além de diminuir a produção hidrelétrica, aumentam a deposição de partículas nos isoladores das linhas, elevando o risco de curtos-circuitos [9].

As redes de distribuição, predominantemente aéreas no Brasil, são particularmente vulneráveis a eventos climáticos extremos. Ventos fortes e tempestades com descargas atmosféricas podem causar rompimento de cabos, queda de postes e danos a subestações, resultando em interrupções prolongadas no fornecimento. Em áreas urbanas, o efeito de ilhas de calor intensifica a formação de tempestades severas, aumentando a probabilidade de falhas [15].

Estudos indicam que as condições meteorológicas influenciam entre 50% e 70% das falhas nas linhas de transmissão e distribuição. No caso das redes de distribuição, tempestades com ventos acima de 15 m/s (classificados como ventania) têm potencial para derrubar árvores e danificar condutores, que representam mais de 30% das ocorrências de falhas [9].

Além dos impactos físicos, as mudanças climáticas aumentam os custos operacionais das concessionárias, devido à necessidade de reparos emergenciais, substituição de equipamentos e pagamento de compensações regulatórias. Esses custos tendem a crescer à medida que eventos extremos se tornam mais frequentes, pressionando a sustentabilidade econômica do setor.

Outro aspecto relevante é a vulnerabilidade das fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, que, embora menos poluentes, dependem de condições climáticas estáveis. Tempestades severas e variações abruptas na radiação solar ou na velocidade dos ventos podem reduzir temporariamente a capacidade de geração, exigindo maior flexibilidade operacional do sistema elétrico.

Diante desse cenário, torna-se imprescindível investir em estratégias de adaptação, como modernização da infraestrutura, uso de tecnologias mais resistentes (cabos isolados, redes compactas), monitoramento climático avançado e integração de fontes diversificadas de energia. Essas medidas são fundamentais para aumentar a resiliência do sistema elétrico frente às mudanças climáticas [9]. A adaptação do setor elétrico às novas condições climáticas é, portanto, um desafio estratégico para garantir a segurança energética e a continuidade do fornecimento.

#### D. Trabalhos Relacionados

Os impactos das mudanças climáticas sobre as redes de energia elétrica têm sido amplamente discutidos na literatura, destacando-se estudos que buscam compreender e mitigar as vulnerabilidades do setor frente a eventos meteorológicos extremos. Essa discussão está diretamente alinhada ao objetivo deste artigo, que consiste em desenvolver uma análise exploratória capaz de relacionar eventos climáticos com interrupções em redes de energia elétrica, contribuindo para o fortalecimento da resiliência e da capacidade preditiva dos sistemas energéticos.

O estudo em [16], voltado às redes de micro energia, ressalta a importância de incorporar a variabilidade climática nas estratégias de otimização dos sistemas elétricos. Os autores evidenciam que a integração de dados climáticos pode reduzir impactos ambientais e emissões de carbono, além de orientar o aumento da participação de fontes renováveis. Essa abordagem reforça a relevância da integração de bases climáticas e operacionais, aspecto central na metodologia adotada neste trabalho.

De forma complementar, os autores em [17] analisam os efeitos das mudanças climáticas sobre o setor energético da Suécia, contemplando subsetores como o hidrelétrico e o eólico. O estudo demonstra que a variabilidade climática já provoca impactos significativos na operação e no planejamento energético, ressaltando a necessidade de estratégias de adaptação de longo prazo. Essa constatação converge com a proposta deste artigo, que busca identificar correlações entre eventos climáticos e falhas em redes elétricas, fornecendo subsídios para políticas de mitigação e planejamento resiliente.

Além disso, os autores em [18] enfatizam que a mitigação dos impactos de eventos extremos requer investimentos contínuos em modernização, monitoramento e gestão de riscos no setor elétrico. A adoção de tecnologias avançadas e práticas de planejamento estratégico é apontada como essencial para reduzir interrupções e garantir a continuidade do fornecimento de energia. Essa perspectiva corrobora a importância de análises exploratórias baseadas em dados como instrumento de apoio à tomada de decisão e à construção de redes mais resilientes.

Por fim, este trabalho adota como referência central o estudo de Neto (2025) [6], que apresenta uma metodologia integrada para correlacionar variáveis climáticas e operacionais em sistemas elétricos. A partir desse fundamento, o presente trabalho descreve uma aplicação prática derivada do estudo de Neto (2025) [6], em que se executa análises exploratórias automatizadas e fornece visualizações interativas sobre os impactos climáticos nas redes de energia. Dessa forma, amplia-se o escopo da proposta original, convertendo uma abordagem metodológica em uma ferramenta operacional que apoia o monitoramento contínuo e o planejamento resiliente no setor elétrico.

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

O artigo adotou uma abordagem quantitativa e caráter descritivo-analítico, buscando compreender como as variáveis climáticas interferem na distribuição e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. O estudo baseou-se na análise estatística e computacional de dados secundários provenientes de fontes oficiais, utilizando técnicas de tratamento, correlação para identificar padrões e relações significativas entre clima e desempenho do sistema elétrico.

O delineamento da pesquisa foi estruturado em cinco etapas interligadas (Figura 03). A primeira consistiu na coleta e integração de dados meteorológicos e elétricos. A segunda envolveu o tratamento, limpeza e padronização das séries históricas. Na terceira, foi definida a linguagem de programação. Na quarta foram aplicadas análises estatísticas e modelagens de correlação, e por fim, realizou-se a interpretação dos resultados e a identificação de padrões sazonais e regionais. Esse modelo metodológico foi construído com o objetivo de garantir replicabilidade, transparência e consistência científica.

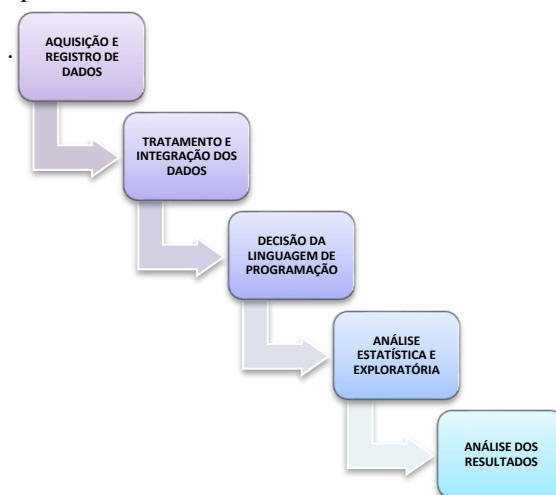


Figura 03. Fluxograma geral da metodologia.

### A. Coleta e Registro de Dados

O processo de coleta e registro de dados foi conduzido em duas etapas. Primeiramente, foi realizado o contato de uma empresa que fornece serviços para uma concessionária de energia, de forma a obter registros de informações de falhas na rede elétrica em uma determinada região geográfica.

Em seguida, foram feitas pesquisas no site do Instituto Nacional de Meteorologia (IMET) procurando dados climáticos referentes a estações meteorológicas estrategicamente situadas na mesma região geográfica de operação da concessionária, fornecendo variáveis climáticas como temperatura, precipitação, umidade relativa, radiação solar global e velocidade/direção do vento, além de eventos severos, como por exemplo tempestades. Essas informações obtidas correspondem ao intervalo de janeiro de 2021 a dezembro de 2023.

### B. Tratamento e Integração das Bases de Dados

O tratamento dos dados envolveu a consolidação de todas as informações em uma base tabular unificada, seguida de verificações de consistência e eliminação de registros duplicados ou incompletos. Foram convertidos diferentes formatos de arquivos para um modelo único, e as variáveis foram normalizadas com técnicas como *Min-Max Scaling*. A interpolação linear foi aplicada em séries com pequenas lacunas temporais, e *outliers* foram removidos de forma a evitar a influência desproporcional no modelo. Essas etapas garantiram coerência estatística e compatibilidade entre as fontes de dados, resultando em uma base confiável para análise.

### C. Decisão da linguagem de programação

A linguagem de programação escolhida para o processamento e análise foi o Python, devido à sua robustez, flexibilidade e ampla adoção na área científica. Essa escolha se justifica pela possibilidade de reproduzir integralmente os resultados a partir dos *scripts* desenvolvidos, garantindo transparência e rastreabilidade. O Python oferece um ecossistema consolidado para análise de dados, com bibliotecas como *pandas*, *numpy*, *matplotlib* e *seaborn*, que permitem desde a manipulação eficiente de grandes volumes de informação até a geração de visualizações gráficas e aplicação de modelos estatísticos avançados.

A comunidade ativa e o suporte acadêmico da linguagem em estudos ambientais e energéticos reforçam sua adequação como ferramenta científica.

### D. Análise estatística e exploratória

A análise exploratória e estatística contemplou o processamento e a visualização das variáveis climáticas e operacionais, visando identificar padrões e possíveis relações com a ocorrência de falhas na rede elétrica. Foram elaborados histogramas de frequência das variáveis climáticas críticas, permitindo caracterizar a distribuição e variabilidade dos dados coletados. Em seguida, foram desenvolvidos mapas de calor de correlação entre as variáveis e gráficos de dispersão com linhas de tendência, possibilitando avaliar a intensidade e direção das relações observadas. Também foram construídas séries temporais comparativas, relacionando a ocorrência de falhas e os eventos climáticos moderados e severos.

### E. Análise dos Resultados

Os resultados foram apresentados por meio de gráficos de dispersão, séries temporais e mapas de calor, que evidenciaram padrões regionais e variações sazonais. As representações visuais facilitaram a identificação de períodos críticos, associando eventos climáticos extremos, como tempestades intensas, ondas de calor e ventos fortes, ao aumento de falhas nos sistemas de fornecimento de energia.

### F. Escopo e Limitações

O escopo deste estudo concentrou-se em uma região geográfica específica atendida pela concessionária de energia local. Entre as limitações identificadas, destacam-se a heterogeneidade na granularidade das bases analisadas, a presença de lacunas em registros operacionais e climáticos, e a impossibilidade de incorporar variáveis não climáticas relevantes, como falhas internas de equipamentos e intervenções de manutenção programada. Com o propósito de assegurar reprodutibilidade, transparência e continuidade à pesquisa, todos os *scripts*, configurações, arquivos de entrada e saídas relevantes utilizados na execução deste trabalho foram organizados e disponibilizados por Neto (2025) em um repositório público no GitHub [6].

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos a partir das análises exploratórias e estatísticas aplicadas às bases de dados tratadas. As avaliações realizadas permitem identificar relações entre variáveis climáticas, incluindo eventos extremos e moderados e as ocorrências operacionais registradas na rede elétrica. São examinados padrões temporais, correlações, anomalias e tendências que auxiliam na compreensão dos efeitos das condições meteorológicas sobre o desempenho do sistema elétrico.

As análises são fundamentadas em gráficos, tabelas e medidas estatísticas, utilizados com o objetivo de sintetizar e interpretar os comportamentos observados nas séries temporais integradas. A abordagem adotada visa apresentar os resultados de forma objetiva, evidenciando a interação entre dados operacionais e climáticos.

Em conformidade com os procedimentos descritos na seção *Materiais e Métodos*, os resultados apresentados foram derivados de duas bases consolidadas. A **Base Operacional**, composta por registros fornecidos pela empresa responsável pelos serviços no estado de Goiás, continha inicialmente 1.891.001 registros distribuídos em 37 variáveis. Após os processos de limpeza, normalização e eliminação de inconsistências, esta base foi reduzida para 700.200 registros e 18 variáveis. A **Base Climática**, obtida por meio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), incluía séries históricas e medições em tempo real relativas a precipitação, temperatura, umidade e velocidade/direção do vento. A base original contava com 204.600 registros e 27 variáveis, sendo posteriormente refinada e padronizada para 110.474 registros e 28 variáveis.

A integração entre a *Base Operacional* e a *Base Climática* consistiu no alinhamento temporal e espacial dos registros, permitindo associar cada evento operacional às condições atmosféricas correspondentes no mesmo período e localidade. Esse procedimento resultou em uma base unificada e consistente, utilizada nas análises apresentadas nas subseções subsequentes.

As subseções seguintes apresentam os principais resultados organizados em quatro eixos: (A) frequência e distribuição das variáveis climáticas; (B) correlação entre variáveis climáticas; (C) relação temporal entre variáveis climáticas e falhas operacionais e (D) dispersão e tendências entre variáveis climáticas e ocorrências.

#### A. Frequência e distribuição das variáveis climáticas

Os histogramas apresentados nas Figuras 04, 05 e 06 evidenciam que a “precipitação atmosférica”, a “temperatura máxima” e as “rajadas de vento” constituem as variáveis climáticas mais relevantes, por concentrarem a maior frequência de eventos potencialmente capazes de impactar a operação da rede. A compreensão aprofundada dessas distribuições é essencial para o delineamento de estratégias de mitigação e para o planejamento mais eficiente da infraestrutura do sistema elétrico. Além disso, os padrões observados fornecem subsídios significativos para a caracterização e classificação de eventos climáticos extremos, possibilitando uma avaliação mais precisa de seus potenciais impactos operacionais.

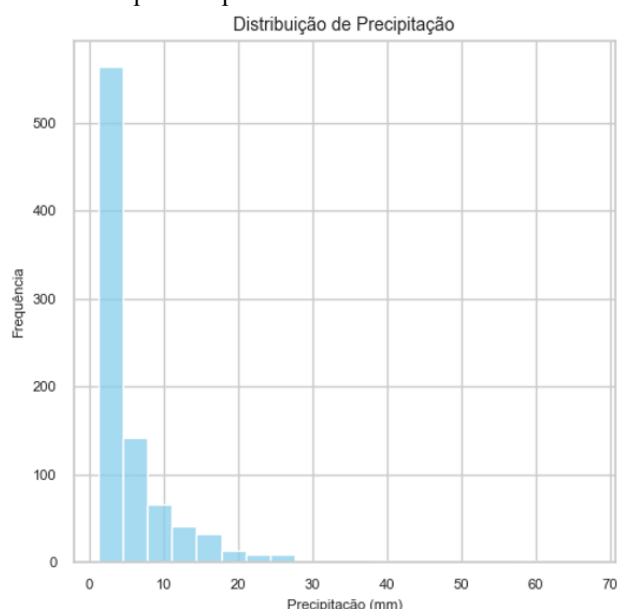


Figura 04. Histograma variável climática “Precipitação Atmosférica”[6].

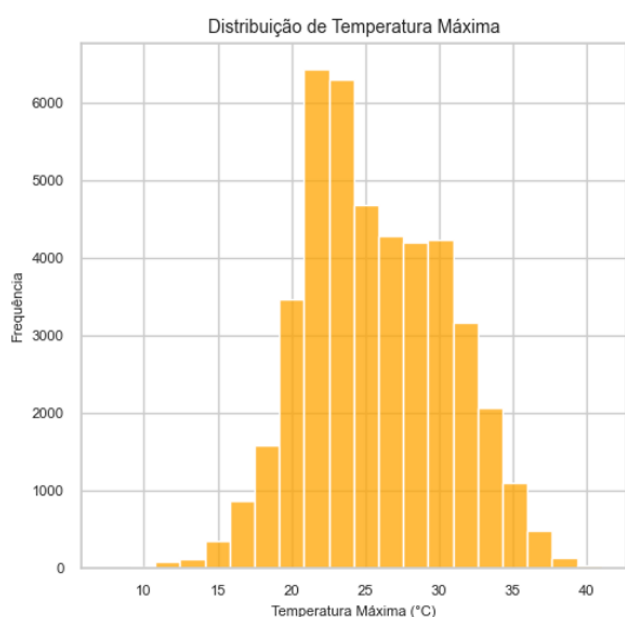


Figura 05. Histograma variável climática “Temperatura Máxima”[6].

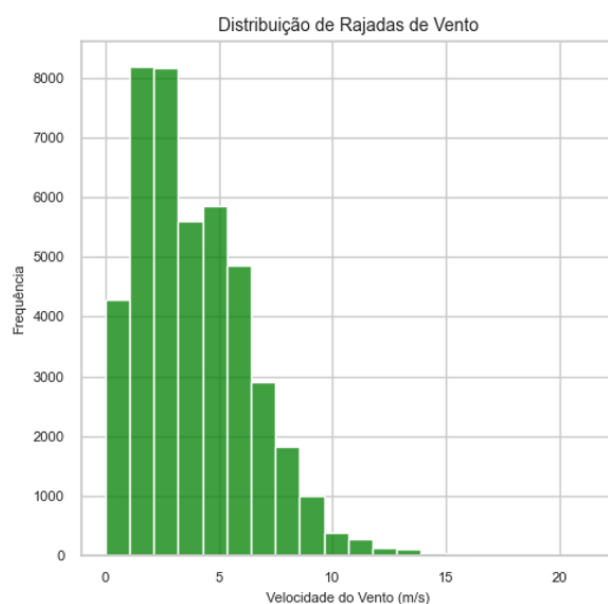


Figura 06. Histograma variável climática “Velocidade do Vento”[6].

Distribuição de precipitação: revela uma predominância de registros concentrados entre 0 e 10 mm, indicando que eventos de baixa intensidade são significativamente mais frequentes. Esse comportamento caracteriza um padrão pluviométrico marcado por chuvas esparsas e volumes reduzidos, o que pode resultar em condições desfavoráveis à regularidade da geração de energia em usinas hidrelétricas.

Distribuição da temperatura máxima: apresenta comportamento próximo ao de uma distribuição gaussiana, com valores concentrados em torno de 24°C a 25°C e a maior parte dos registros situada na faixa entre 20°C e 30°C. Temperaturas superiores a 35°C, consideradas extremas tanto para a resiliência de equipamentos elétricos quanto para o aumento da demanda energética, ocorrem com menor frequência ao longo do período analisado.

Distribuição de rajadas de ventos: apresenta a maior parte dos registros concentrada à esquerda do gráfico, evidenciando uma distribuição assimétrica com predominância de valores entre 0 e 5 m/s. Velocidades superiores a 10 m/s são observadas com baixa frequência, enquanto rajadas acima de 15 m/s, classificadas como eventos extremos, ocorreram apenas raramente ao longo do período analisado.

#### B. Análise da correlação entre variáveis climáticas

Para analisar a influência dos eventos climáticos na quantidade de ocorrências operacionais, inicialmente foi elaborado o mapa de calor contendo a correlação entre as três principais variáveis climáticas. O mapa de calor apresentado na Figura 07 evidencia uma correlação moderada (0,49) entre as variáveis “temperatura máxima” e “rajadas de vento”, indicando que esses fatores climáticos tendem a ocorrer simultaneamente e, quando combinados, podem intensificar os riscos operacionais.

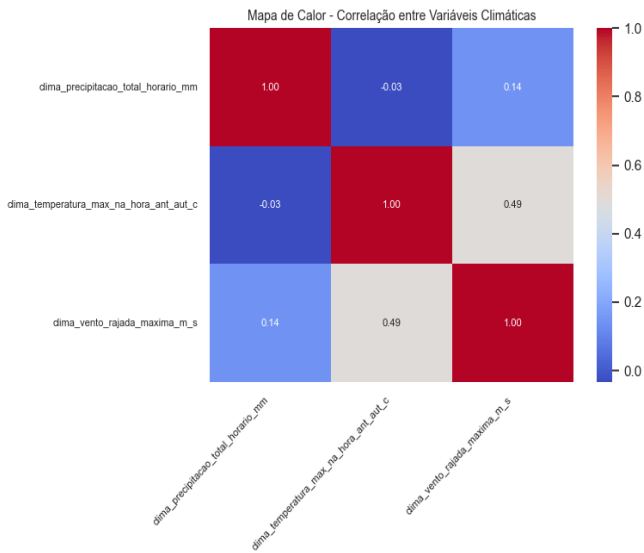


Figura 07. Mapa de calor das principais variáveis climáticas [6].

### C. Relação temporal entre variáveis climáticas e falhas operacionais

Com base na identificação das variáveis climáticas mais relevantes, procedeu-se à análise exploratória das duas bases de dados com o objetivo de quantificar o impacto dos eventos climáticos sobre as ocorrências operacionais. A integração entre essas bases é ilustrada nas séries temporais apresentadas nas Figuras 08 e 09. Cabe destacar que a série de ocorrências operacionais (linha azul) é representada com a mesma escala em ambos os gráficos, permitindo uma comparação direta entre os cenários analisados.

O principal resultado dessa análise diz respeito ao fato de que, embora a frequência de eventos climáticos extremos seja significativamente menor do que a de eventos moderados, sua influência sobre o número de ocorrências operacionais é substancialmente maior. Em outras palavras, a série temporal de eventos extremos apresenta maior similaridade e alinhamento com a série de ocorrências operacionais do que aquela associada a eventos climáticos moderados.

Além disso, observa-se que a presença de sazonalidade reforça essa relação, uma vez que os padrões sazonais das séries “ocorrências operacionais” e “eventos climáticos extremos” exibem comportamento mais consistente entre si. Essa característica evidencia a importância dos eventos extremos na dinâmica operacional da rede e na previsão de períodos de maior vulnerabilidade.

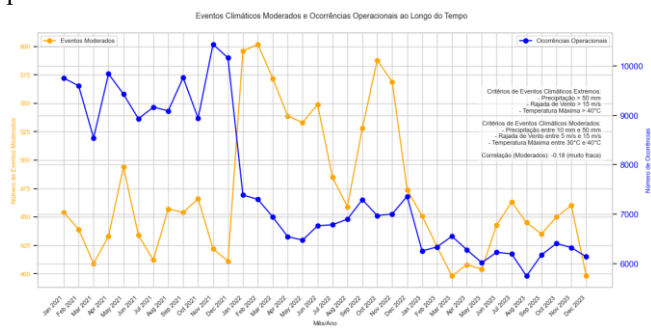


Figura 08. Série temporal: eventos climáticos moderados versus ocorrências operacionais [6].

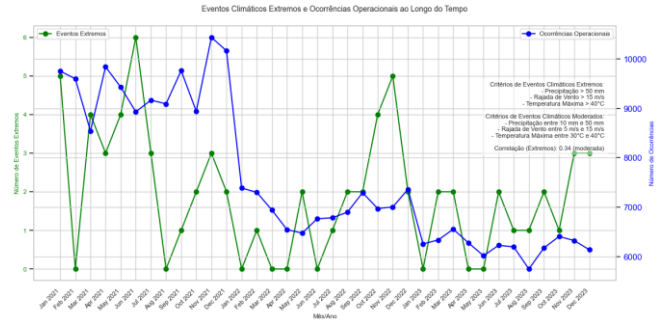


Figura 09. Série temporal: eventos climáticos extremos versus ocorrências operacionais [6].

### D. Gráfico de dispersão entre variáveis climáticas e ocorrências

Outra abordagem para avaliar a correlação entre as duas bases de dados consiste na geração de gráficos de dispersão. As Figuras 10 e 11 apresentam esses resultados. Observa-se que a dispersão entre “ocorrências operacionais” e “eventos climáticos extremos” revela uma leve concentração de pontos no quadrante superior direito, quando comparada à dispersão referente aos “eventos moderados”. Esse padrão indica uma maior incidência de eventos climáticos extremos associada a um aumento nas ocorrências operacionais, reforçando a relação significativa entre essas variáveis.

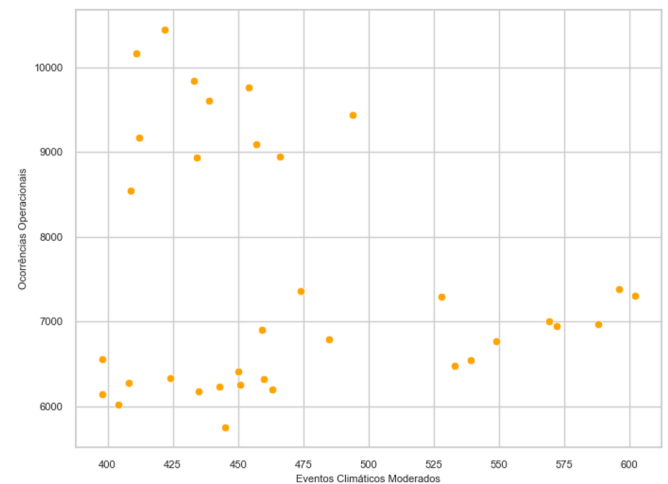


Figura 10. Gráfico de dispersão de ocorrências operacionais versus eventos climáticos moderados [6].

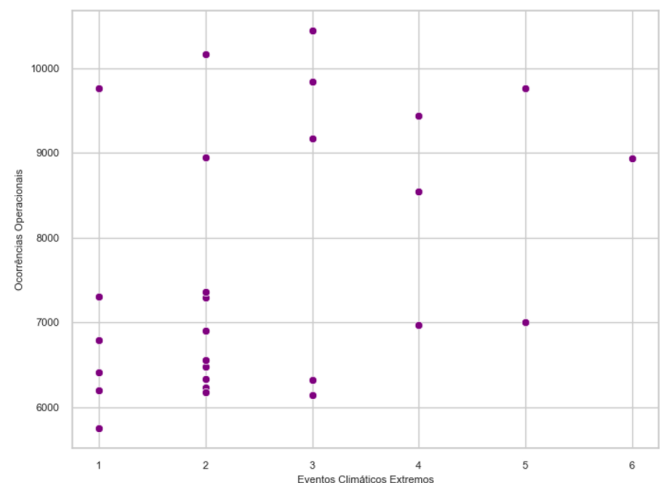


Figura 11. Gráfico de dispersão de ocorrências operacionais versus eventos climáticos extremos [6].

Com base nessa constatação, procedeu-se à obtenção da curva de tendência que descreve essa relação. A Figura 12 apresenta a linha de tendência ajustada por meio de um modelo de regressão linear, a qual confirma a forte correlação entre “ocorrências operacionais” e “eventos climáticos extremos”. Adicionalmente, a Figura 12 evidencia a presença de *outliers* concentrados nesse cenário, indicando ocorrências atípicas que também merecem atenção no processo de análise e modelagem.

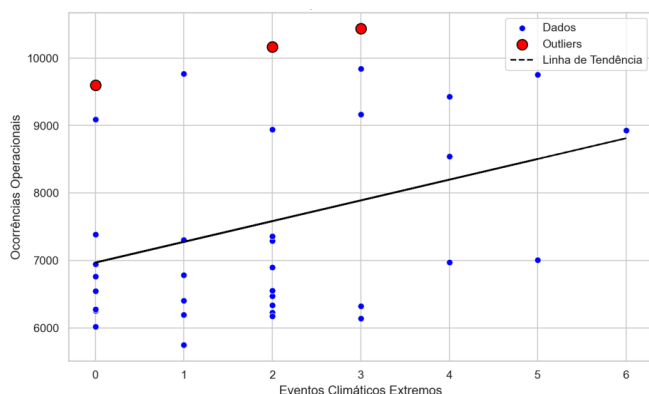


Figura 12. Gráfico de dispersão de ocorrências operacionais versus eventos climáticos extremos - com *outliers* e linha de tendência [6].

Os resultados obtidos confirmam que variáveis climáticas específicas estão diretamente associadas à ocorrência de falhas em redes de energia. Os histogramas (Figuras 04, 05 e 06) evidenciam que precipitação, temperatura máxima e rajadas de vento constituem fatores particularmente críticos, sobretudo em cenários cuja distribuição geográfica apresenta elevada heterogeneidade. Essas desigualdades regionais sugerem que determinadas áreas são estruturalmente mais vulneráveis, fornecendo subsídios relevantes para estratégias direcionadas de monitoramento, manutenção preventiva e alocação eficiente de recursos.

A integração das bases climáticas e operacionais demonstrou-se altamente informativa. As séries temporais (Figuras 08 e 09) revelaram forte similaridade entre a sazonalidade dos eventos climáticos extremos e a incidência de falhas operacionais, em contraste com a correlação mais limitada observada para eventos moderados. Esses resultados indicam que a integração de bases heterogêneas constitui uma abordagem promissora para o desenvolvimento e aprimoramento de modelos preditivos.

Além disso, os gráficos de dispersão (Figuras 10, 11 e 12) mostraram que eventos climáticos extremos possuem maior capacidade explicativa sobre as falhas do que eventos moderados, reforçando seu papel como preditores robustos. A linha de tendência e o mapa de calor de correlação (Figura 07) demonstraram que múltiplas variáveis climáticas podem atuar de forma combinada, justificando o emprego de técnicas multivariadas em etapas posteriores de modelagem. A identificação de *outliers* (Figura 12), por sua vez, evidencia situações de risco excepcional e aponta para a necessidade de investigações adicionais que aprofundem a compreensão dos mecanismos responsáveis por desencadear eventos operacionais críticos.

## V.CONCLUSÃO

Os resultados apresentados demonstram de forma consistente que variáveis climáticas exercem influência significativa sobre o desempenho das redes de distribuição de

energia elétrica. A análise exploratória evidenciou que eventos climáticos moderados e extremos, como precipitações de média e alta intensidade, temperaturas elevadas e rajadas de vento entre 5 e 10 m/s, estão associados a um aumento substancial nas ocorrências operacionais. Isso indica que tanto episódios severos isolados quanto a persistência de condições meteorológicas moderadas podem comprometer a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico.

Os padrões identificados nas séries temporais e nos mapas de correlação mostram que determinadas combinações de variáveis meteorológicas tendem a elevar a probabilidade de falhas, especialmente em redes já caracterizadas por fragilidades estruturais e elevados índices de continuidade DEC e FEC. Tais evidências reforçam a relevância da integração entre dados climáticos e operacionais como instrumento de suporte ao diagnóstico preventivo e ao planejamento estratégico. As principais limitações observadas nas bases analisadas incluem lacunas temporais nos registros meteorológicos e a dificuldade em distinguir as falhas estritamente técnicas daquelas diretamente associadas a eventos climáticos. Mesmo assim, a consistência estatística dos dados e a metodologia adotada permitiram estabelecer relações robustas entre variáveis meteorológicas e interrupções no fornecimento de energia.

Decorre dos resultados obtidos a necessidade de aprofundar as investigações por meio de técnicas de aprendizado de máquina e modelos preditivos multivariados, capazes de estimar a probabilidade de falhas com maior precisão e em diferentes horizontes temporais. Abordagens baseadas em otimização e na concepção de redes mais resilientes podem contribuir significativamente para a mitigação de riscos, alinhando a operação do setor elétrico às crescentes demandas de adaptação climática. O desenvolvimento e implantação de mecanismos de atualização em tempo real também se configuram como caminhos promissores para pesquisas futuras.

Em síntese, este estudo estabelece uma base empírica sólida, identifica variáveis críticas, confirma a relevância dos eventos moderados e extremos e reforça a integração de dados operacionais e climáticos como elemento central para o desenvolvimento de sistemas inteligentes e proativos de previsão e resiliência das redes de energia diante das mudanças climáticas.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus (C3S), *Destaques do Clima Global 2024*, Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), 10 jan. 2025. [Online]. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>. Acessado em: 1 out. 2025
- [2] JORNAL DA UNESP. *Estudo do CEMADEN mapeia as causas e as circunstâncias que ocasionaram em 2024 a maior tragédia ambiental do RS*. Jornal da Unesp, 20 maio 2025. Disponível em: <https://jornal.unesp.br/2025/05/20/estudo-do-cemaden-mapeia-as-causas-e-as-circunstancias-que-ocasionaram-em-2024-a-maior-tragedia-ambiental-do-rs/>. Acesso em: 6 out. 2025.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Ranking de Continuidade — Distribuição de energia elétrica 2023,” Brasília, 15 Mar. 2024.

- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Indicadores de Qualidade do Serviço – DEC/FEC,” Brasília. Disponível em: <[https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores\\_de\\_qualidade/pesquisaGeral.cfm](https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores_de_qualidade/pesquisaGeral.cfm)>. Acesso em: 1 out. 2025.
- [5] W. R. de Freitas, “Influência dos eventos meteorológicos em falhas na rede de distribuição de energia elétrica”, M.S. thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, SP, Brasil, 2025.
- [6] NETO, M. A. R. Resiliência avançada de redes de distribuição de energia em regiões tropicais: abordagens de aprendizado de máquina e otimização multiobjetivo frente a desafios climáticos. Projeto de pesquisa. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2025. Disponível em: <<https://github.com/mribeiroeng/mestrado>>. Acesso em: setembro 2025.
- [7] EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. 2024. Anuário estatístico de energia elétrica 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 10 out. 2025.
- [8] Tavares, A. et al., “Impactos econômicos da geração distribuída e proposições regulatórias,” Texto de Discussão do Setor Elétrico nº 86, GESEL, Rio de Janeiro, 2018.
- [9] Brito, K. et al., “Impactos das mudanças climáticas no setor elétrico: o papel da geração distribuída e do armazenamento de energia,” GESEL, 2023.
- [10] J. C. O. Mello and E. Neves, “Avaliação do modelo de expansão da transmissão de energia elétrica adotada no Brasil, desafios e oportunidades de aprimoramento,” Revista Brasileira de Desenvolvimento, vol. 5, pp. 41184–41198, 2022.
- [11] UNESP, *Apostila Sistema de Distribuição*, 2024. [Online]. Disponível em: <[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/apostila\\_sdee\\_01.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/apostila_sdee_01.pdf)>.
- [12] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *ANEEL divulga os resultados do desempenho das distribuidoras na continuidade do fornecimento de energia elétrica em 2024*. Brasília, 02 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/aneel-divulga-os-resultados-do-desempenho-das-distribuidoras-na-continuidade-do-fornecimento-de-energia-eletrica-em-2024>>. Acesso em: 22 out. 2025.
- [13] A. Gkika, E. Zacharis, D. N. Skikos, and E. L. Lekkas, “Battling the extreme: lessons learned from weather-induced disasters on electricity distribution networks and climate change adaptation strategies,” *Hydrology Research*, vol. 54, no. 10, pp. 1196–1226, Oct. 2023.
- [14] A. Eitan, “Promoting Renewable Energy to Cope with Climate Change—Policy Discourse in Israel,” *Sustainability*, vol. 13, no. 6, Mar. 2021.
- [15] EXSERGIA. Influência das mudanças climáticas no setor elétrico. Disponível em: <<https://exsergia.eng.br>>. Acesso em: 12 out. 2025.
- [16] JIA, Jiandong et al. Multi-objective optimization study of regional integrated energy systems coupled with renewable energy, energy storage, and inter-station energy sharing. *RENEWABLE ENERGY*, v. 225, maio 2024.
- [17] STRANDBERG, G. et al. Bespoke climate indicators for the Swedish energy sector - a stakeholder focused approach. *CLIMATE SERVICES*, v. 34, abr. 2024.
- [18] BARROS, V. et al. Principais causas de interrupções de fornecimento energia elétrica na Bahia. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.9, n.12, p. 31532-31552, dez., 2023.



Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Pontifical Catholic University of Goiás  
Av. Universitária, 1069, Setor Universitário  
Caixa Postal 86 - CEP 74.605-010  
Goiânia - Goiás - Brasil

## RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

### ANEXO I

#### APÊNDICE ao TCC

#### Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante ARTHUR VIGARIO PORTO BRAGOTTO RAGAZZO do Curso de ENGENHARIA ELÉTRICA matrícula 2020.2.0038.0003-0, telefone: 62 9-9123-3420, e-mail 20202003800030@pucgo.edu.br, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado CIÊNCIA DE DADOS PARA IDENTIFICAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E INTERRUPÇÕES EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 18 de setembro de 2025.

Documento assinado digitalmente  
ARTHUR VIGARIO PORTO BRAGOTTO RAGAZZO  
Data: 17/09/2025 13:04:19 (GMT)  
Verifique em: <https://verificar.dig.gov.br>

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Nome completo do autor: ARTHUR VIGARIO PORTO BRAGOTTO RAGAZZO

Documento assinado digitalmente  
MARCOS ANTÔNIO DE SOUSA  
Data: 18/09/2025 14:04:19 (GMT)  
Verifique em: <https://verificar.dig.gov.br>

Assinatura do professor-orientador: \_\_\_\_\_

Nome completo do professor-orientador: MARCOS ANTÔNIO DE SOUSA

Escola Politécnica e de Artes - setembro de 2025