

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO CLIMÁTICO NA RESILIÊNCIA DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

por

Elias Malta Martini

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, 09 de dezembro de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO CLIMÁTICO NA RESILIÊNCIA DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

por

Elias Malta Martini

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE
DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos

Banca examinadora:

Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos - DELAE/UFRGS
Prof^a. Dr^a. Bibiana Maitê Petry Ferraz - DELAE/UFRGS
MSc. Eng. Tiago Torres dos Santos - PowerSysLab Engenharia e Sistemas

Porto Alegre, 09 de dezembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Elias e Gláucia, pelo amor incondicional e por acreditarem em mim em todos os momentos. Por terem me proporcionado todas as oportunidades, me ensinado desde cedo a importância do estudo e feito o possível e o impossível para que eu pudesse chegar até aqui. Vocês foram e sempre serão os maiores professores que já tive, e sempre haverá uma parte de vocês em tudo o que eu faço.

À minha irmã, Ceci, por me ensinar desde sempre o que significa ter uma parceira para todas as horas. Se hoje tento ser o meu melhor, é porque sei que tu sempre estará ao meu lado, me apoiando e torcendo por mim.

A todos os familiares que me incentivaram desde sempre e que formam a rede de apoio necessária para que eu possa seguir os meus sonhos.

Ao meu orientador, Flávio Lemos, pela confiança e pela dedicação em me guiar no desenvolvimento deste trabalho e pela parceria ao longo da graduação. Mesmo nos assuntos mais complexos, tudo se torna mais fácil quando temos mentores dispostos a nos orientar.

À UFRGS e a todos os seus servidores, por fornecerem a estrutura necessária para uma formação de excelência, e aos professores do curso de Engenharia de Energia. A dedicação de vocês é o que torna esse curso tão especial e capaz de formar profissionais tão competentes.

Às amigas feitas no colégio, no curso de Engenharia de Energia, na França e em muitos outros lugares, que estiveram ao meu lado ao longo desse caminho. Não teria sido possível chegar até aqui sem a companhia, as risadas, os conselhos e a ajuda de vocês. Vocês me ensinaram muito mais do que imaginam, e tem um pouco de cada um em cada passo que eu dou.

MARTINI, E. **Avaliação do efeito climático na resiliência de sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2024. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Energia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar o efeito do clima sobre a resiliência de sistemas de distribuição de energia. A resiliência é um conceito que surge no contexto das mudanças climáticas para descrever a capacidade de um sistema de antecipar perturbações, absorvê-las e adaptar-se para mitigar seus potenciais impactos. Sistemas de distribuição são diretamente impactados por eventos climáticos adversos, resultando em eventos de interrupção do fornecimento de energia. Compreender como esses sistemas se comportam frente ao efeito do clima é fundamental para desenvolver medidas visando a melhoria da resiliência. Analisando dados históricos de ocorrências e dados meteorológicos, o trabalho constrói modelos de aprendizado de máquina utilizando árvores de decisão para explicar o comportamento da rede em função de variáveis climáticas (vento e chuva). As variáveis do modelo são categorizadas e avaliadas em uma base diária, e a resposta do sistema é avaliada em termos do nível esperado de ocorrências. Os modelos construídos apresentam precisão em torno de 70% para a predição de dias com alto ou baixo número de ocorrências. Para avaliar a resiliência, são analisadas as durações das ocorrências, e observa-se que dias com alto número de ocorrências apresentam durações maiores de interrupção, sendo o tempo até o acionamento das equipes o mais significativo. Analisando um dia com alto número de ocorrências, é simulado o despacho de uma equipe adicional para atender às ocorrências com maior duração, resultando em uma redução de 16% na duração total de interrupção do fornecimento no período. Os resultados demonstram a importância de medidas de antecipação em resposta a eventos climáticos adversos que, aliadas à previsão do tempo e à modelagem do comportamento da rede, podem reduzir o impacto das perturbações climáticas no fornecimento de energia.

Palavras-chave: Distribuição de Energia Elétrica, Resiliência, Mudanças climáticas, Árvore de decisão, Python.

MARTINI, E. **Assessment of the climatic effect on the resilience of power distribution systems**. 2024. 27 pages. Monograph (Final paper for the graduation in Energy Engineering) - School of Engineering, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

The main objective of this work is to evaluate the effect of climate on the resilience of power distribution systems. Resilience is a concept that has emerged in the context of climate change to describe the ability of a system to anticipate disturbances, absorb them and adapt to mitigate their potential impacts. Power distribution systems are directly impacted by adverse weather events, resulting in power outages. Understanding how these systems behave in the face of weather effects is fundamental to developing measures aimed at improving resilience. By analyzing historical outages and meteorological data, the work fits machine learning models using decision trees to explain the behavior of the network as a function of climatic variables (wind and rain). The model's variables are categorized and evaluated on a daily basis, and the system's response is evaluated in terms of the expected level of occurrences. The fitted models have an accuracy of around 70% for predicting days with a high or low number of occurrences. In order to assess resilience, the duration of the events is analyzed and it is observed that days with a high number of events have longer interruption durations, with the time until the teams are called being the most significant. Analyzing a day with a high number of occurrences, the dispatch of an additional team to attend to incidents with a longer duration is simulated, resulting in a 16% reduction in the total duration of supply interruptions during the period. The results demonstrate the importance of anticipatory measures in response to adverse weather events which, combined with weather forecasting and modeling of network behavior, can reduce the impact of weather disturbances on power supply.

Keywords: Electric Power Distribution, Resilience, Climate change, Decision Tree, Python.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo do desempenho de um sistema sob a ótica da resiliência.	8
Figura 2 – Fluxograma com as principais etapas do trabalho.	11
Figura 3 – Número de ocorrências por dia para o período em análise.	15
Figura 4 – Distribuição do número diário de ocorrências.	15
Figura 5 – Distribuições dos valores diários das variáveis climáticas selecionadas.	16
Figura 6 – Proporção dos níveis Baixo e Alto para as variáveis em função do critério estatístico usado na categorização.	16
Figura 7 – Proporção de dias e de ocorrências por categoria para cada variável climática (utilizando a mediana como critério para categorização).	18
Figura 8 – Frequência das causas de ocorrências registradas no conjunto de dados.	19
Figura 9 – Diagrama da árvore de decisão ajustada.	20
Figura 10 – Evolução da precisão de diferentes modelos de classificação em função do número de ocorrências consideradas.	22
Figura 11 – Duração média de cada etapa de uma ocorrência em função da categoria do dia.	23
Figura 12 – Linha do tempo do ocorrências em andamento entre os dias 15 e 16 de março de 2024, com destaque para as ocorrências com maior tempo até o acionamento de uma equipe.	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conversão das variáveis do estudo em categorias.	12
Tabela 2 – Resultados da análise de variância para as variáveis volume de chuva, rajada de vento e velocidade do vento em função do critério estatístico utilizado para categorização.	17
Tabela 3 – Resultados da análise de variância para a variável direção da rajada de vento.	17
Tabela 4 – Critério para categorização das variáveis utilizando a mediana das distribuições.	20
Tabela 5 – Matriz de confusão a partir das previsões do modelo ajustado.	21
Tabela 6 – Duração percentual média de cada etapa de uma ocorrência.	22

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3	FUNDAMENTOS	3
3.1	Sistemas de distribuição de energia	4
3.1.1	Configuração	4
3.1.2	Proteção	4
3.1.3	Eventos em redes de distribuição	7
3.2	Resiliência	8
3.3	Conceitos de estatística e aprendizado de máquina	9
3.3.1	Análise de variância (ANOVA)	9
3.3.2	Árvores de decisão	10
4	METODOLOGIA	11
4.1	Dados de entrada	11
4.1.1	Banco de dados de ocorrências	11
4.1.2	Banco de dados meteorológicos	11
4.2	Processamento dos dados	12
4.3	Análise estatística das ocorrências e seleção das variáveis climáticas	13
4.4	Ajuste de um modelo de árvore de decisão	13
4.5	Avaliação da resiliência	13
5	ESTUDO DE CASO E RESULTADOS	14
5.1	Análise exploratória	14
5.2	Análise estatística das ocorrências e seleção das variáveis climáticas	17
5.3	Ajuste de um modelo de árvore de decisão	19
5.3.1	Construção de um modelo de classificação simplificado	20
5.3.2	Busca pelo melhor modelo de classificação	21
5.4	Avaliação da resiliência	22
6	CONCLUSÃO	25
	REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de distribuição de energia elétrica são fortemente sensíveis a efeitos climáticos. Essa sensibilidade pode ser vista sob dois aspectos principais: pelo lado do consumo, os padrões e níveis de uso de energia pelos consumidores depende, por exemplo, da temperatura, devido à importância da refrigeração e climatização no consumo de energia elétrica; do lado da produção, a inserção crescente de geração distribuída a partir de fontes intermitentes depende de fatores como a irradiação solar, temperatura e intensidade do vento. Por outro lado, a própria infraestrutura dos sistemas de distribuição é sensível à ação de fatores que inter-relacionam meio ambiente e aspectos meteorológicos. Eventos como descargas atmosféricas, ventos fortes e altos índices pluviométricos, por exemplo, agem sobre a infraestrutura da rede, com potencial de danificar condutores e equipamentos, o que pode resultar na interrupção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

A confiabilidade de um sistema de distribuição de energia elétrica refere-se a sua capacidade de fornecer energia de maneira contínua e com o mínimo de interrupções aos consumidores. Essa capacidade está condicionada à qualidade do planejamento da expansão e à realização de obras de infraestrutura da rede por parte das distribuidoras, mas também está fortemente sujeita a condições operacionais como falhas de equipamentos, interrupções não programadas e eventos climáticos adversos. Frente à ocorrência cada vez mais intensa e frequente de eventos climáticos severos, a noção de resiliência de sistemas de distribuição surge como complemento às ideias já estabelecidas de desempenho desses sistemas, sendo definida como a capacidade do sistema não simplesmente de resistir a eventos adversos, mas de antevê-los, absorvê-los e adaptar-se para se recuperar dos mesmos (IEA, 2021).

Em um cenário de demanda crescente e dependência cada vez mais acentuada por energia elétrica, a confiabilidade e a qualidade do fornecimento tornam-se cada vez mais essenciais, e, para isso, o planejamento e a construção de sistemas resilientes frente aos efeitos climáticos é fundamental.

Interrupções no fornecimento de energia causadas por falhas de equipamentos e faltas na rede, causadas por sobrecorrentes e sobretensões, causam impacto direto tanto às distribuidoras, que devem arcar com custos em obras de reparo e troca de equipamentos, multas por violação de indicadores de continuidade e despacho de equipes, por exemplo, como também aos consumidores, cujo padrão de vida é cada vez mais dependente da energia elétrica. Desta maneira, compreender o comportamento dos sistemas de distribuição frente a condições climáticas adversas, incluindo o impacto de diferentes fatores como temperatura, chuva e vento, traz benefícios diretos às Distribuidoras, ainda mais com a observação recente de eventos meteorológicos cada vez mais extremos. Mais especificamente, entender como o sistema reage em função da meteorologia pode ser valioso para: antecipar impactos que poderão ocorrer na rede em função da previsão do tempo; priorizar investimentos em manutenção e troca de equipamentos; fornecer suporte à definição de obras de expansão da rede; e reduzir custos operacionais em condições climáticas extremas, otimizando o despacho de equipes em campo.

Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito do clima em sistemas de distribuição de energia elétrica sob a ótica da resiliência desses sistemas. Uma vez que o efeito climático sobre sistemas de distribuição é conhecido, porém não necessariamente modelado e quantificado,

esse trabalho visa a construir modelos para explicar o comportamento desses sistemas quando submetidos a eventos climáticos adversos. Especificamente, foram investigadas as relações entre fatores climáticos e eventos de interrupção no fornecimento de energia, partindo da premissa de que uma parte significativa desses eventos é causada pela ação do clima sobre a infraestrutura da rede.

O trabalho busca correlacionar dados históricos de ocorrências em redes de distribuição com dados meteorológicos, cruzando eventos de interrupção do fornecimento com eventos climáticos adversos, para compreender como a rede reage a diferentes fatores climáticos. A análise visa a levantar informações relevantes sob o ponto de vista da resiliência desses sistemas, sendo valiosa para antecipar os impactos potenciais de eventos climáticos, identificar blocos ou equipamentos críticos no sistema e adaptar a infraestrutura da rede a eventos recorrentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os impactos gerais de fatores meteorológicos sobre a infraestrutura de sistemas de energia são amplamente conhecidos. No entanto, quantificar esse impacto em função de variáveis climáticas não é uma tarefa trivial, dada a complexidade dos sistemas e dos eventos climáticos. Nesse sentido, a abordagem emergente de resiliência fornece novas maneiras de avaliar o desempenho desses sistemas, especialmente em relação às condições climáticas.

O conceito de resiliência de sistemas de energia surge no contexto das mudanças climáticas, desenvolvendo novas abordagens para descrever o desempenho desses sistemas. A resiliência pode ser definida como "a capacidade de um sistema de antecipar, absorver, acomodar e se recuperar de eventos climáticos adversos" (IEA, 2021). Essa definição complementa a noção já estabelecida de robustez de um sistema elétrico, adaptando-a para cenários onde as condições climáticas se tornam cada vez mais extremas e distanciam-se daquelas para as quais muitas das infraestruturas do sistema elétrico foram originalmente projetadas. Um sistema resiliente não necessariamente é robusto o suficiente para resistir a toda perturbação externa, mas possui maior capacidade de absorver os impactos causados por essas perturbações e recuperar-se delas o mais rapidamente possível (IEA, 2021).

A confiabilidade de um sistema de distribuição refere-se à sua capacidade de fornecimento de energia de maneira contínua e está tipicamente associada a capacidade do sistema de operar sob condições de alta probabilidade, baixo impacto e suficientemente conhecidas, tais como falhas conhecidas e prováveis ligadas a equipamentos ou condições climáticas esperadas. Por outro lado, um sistema resiliente deve ser capaz de lidar com eventos de baixa probabilidade e alto impacto, associados a maiores incertezas e com maior potencial de perturbação do fornecimento de energia. Nesse contexto, a adaptação é uma palavra chave para se entender a resiliência. O sistema deve ser capaz de enfrentar eventos que não foram previstos, o que exige adaptação a condições não necessariamente conhecidas, assegurando sua operação de maneira segura, e recuperando-se posteriormente dos impactos causados (PANTELI; MANCARELLA, 2015; CIGRÉ Brasil, 2019).

A resiliência de sistemas de energia elétrica frente às adversidades climáticas é um assunto emergente e cada vez mais abordado no planejamento da distribuição e transmissão de energia, motivado principalmente pela observação crescente de eventos climáticos extremos e imprevisíveis em decorrência das mudanças climáticas (WANG et al., 2016). Em um relatório

técnico de dezembro 2023, a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) faz uma revisão bibliográfica abrangente das definições de resiliência do setor elétrico brasileiro em resposta às mudanças climáticas, buscando consolidar uma base de conhecimentos no assunto direcionada aos atores envolvidos no planejamento do sistema elétrico brasileiro (EPE, 2023). O IEEE PES (*Power and Energy Society*), por meio de relatório técnico publicado em maio de 2023, além de realizar uma revisão da bibliografia, aprofunda o conceito ao propor métricas para a quantificação da resiliência sob aspectos técnicos e econômicos (IEEE PES, 2023).

Uma vez que o efeito do clima pode impactar uma série de fatores em sistemas de distribuição de energia, é possível estudá-lo a partir de diferentes abordagens. Dentre elas, destacam-se os estudos de confiabilidade, os quais buscam explicar o comportamento dos sistemas em função de variáveis climáticas, analisando o impacto do clima sobre as taxas e frequências de falhas dos componentes do sistema (KAIYUAN; LIJUAN, 2019; FREITAG; SPERANDIO, 2022), sobre indicadores globais de confiabilidade do sistema (ALVEHAG; SODER, 2011) e sobre a confiabilidade a longo prazo de sistemas de distribuição (LIU et al., 2023). Esses estudos mostram que a confiabilidade de sistemas de distribuição possui relação direta com eventos climáticos adversos e que um entendimento aprofundado da resposta do sistema às perturbações meteorológicas é fundamental para o planejamento, podendo resultar em melhorias na confiabilidade.

Destaca-se ainda uma série de estudos voltados à análise de eventos de interrupção do fornecimento de energia em sistemas de distribuição, que se propõem a descrever o efeito do clima sobre esses eventos a partir de dados históricos. Esses estudos demonstram que é possível identificar relações causais entre eventos de falta e variáveis climáticas, identificando os fatores climáticos significativos. O efeito do clima pode ser avaliado a partir de distribuições de probabilidade associadas a cada tipo de evento climático (CAI; CHOW, 2011) ou a partir de históricos de medições meteorológicas associadas espacialmente ao sistema analisado (REN et al., 2021). Essa segunda abordagem é aplicada a sistemas de transmissão de energia e busca por padrões geográficos nos eventos de interrupção em função das variáveis climáticas, que também variam com a geografia. No escopo da distribuição, a quantidade de dados climáticos poderia ser simplificada, uma vez que esses sistemas são menos extensos que os sistemas de transmissão, partindo da hipótese de que um evento climático atinge um alimentador de distribuição mais uniformemente do que uma linha de transmissão.

A identificação de vulnerabilidades em redes de distribuição frente ao efeito do clima também pode fornecer informações importantes para avaliar a resiliência do sistema. Ao identificar os trechos mais vulneráveis a certas variáveis climáticas, é possível aplicar estratégias para mitigar os impactos desses eventos, resultado que pode ser avaliado através de métricas como a energia não fornecida (EENS, *Expected Energy Not Served*) (VENKATASUBRAMANIAN et al., 2023).

3 FUNDAMENTOS

Esta seção apresenta os fundamentos teóricos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Em relação aos sistemas de distribuição de energia, são apresentadas suas configurações, dispositivos de proteção e eventos que impactam sua operação. Quanto à resiliência, são apresentados alguns conceitos aplicados a sistemas de distribuição.

3.1 Sistemas de distribuição de energia

Sistemas de distribuição de energia elétrica constituem sistemas complexos, com uma grande quantidade de equipamentos, e que desempenham um papel crucial na infraestrutura elétrica, sendo responsáveis por garantir o fornecimento de energia aos consumidores finais. A rede de distribuição é composta por diversos componentes, incluindo condutores, postes, transformadores, dispositivos de proteção e controle, chaves seccionalizadoras, entre outros.

3.1.1 Configuração

Redes de distribuição são constituídas de alimentadores de média tensão, que operam nas tensões de 13,8, 23 e 34,5 kV e que fornecem energia da subestação até os transformadores de distribuição e ramais de baixa tensão, que operam na faixa de 380/220V e 220/127V em nível residencial e em 440 V em nível industrial (ANEEL, 2021a). A configuração de um alimentador de média tensão é tipicamente radial, começando na saída da subestação e sendo composta por um tronco principal de onde parte uma série de ramais secundários. Os transformadores de distribuição são responsáveis por rebaixar a tensão do alimentador para o nível do uso final da energia elétrica (BILLINTON; ALLAN, 1988).

Em sua configuração mais simples, um alimentador não possui conexão com outros alimentadores. No entanto, comumente há interconexão entre diferentes alimentadores através de chaves normalmente abertas, sendo esta configuração chamada de radial com recurso (ou radial com socorro) (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBIA, 2021). Em operação normal, os alimentadores estão desconectados, e os consumidores finais recebem energia por seus alimentadores correspondentes. Em caso de interrupção do fornecimento de energia, as chaves que conectam os alimentadores podem ser fechadas, permitindo que uma parte dos consumidores tenha seu fornecimento restabelecido. Esse tipo de configuração promove maior confiabilidade ao sistema por permitir a reconfiguração da rede.

Equipamentos de proteção são utilizados ao longo de um alimentador. Tipicamente, chaves fusíveis são posicionadas nos pontos de ramificação do alimentador para proteger o tronco principal, que leva à subestação, de ocorrências nos ramais secundários. Com isso, os ramais podem ser isolados, protegendo os equipamentos a montante da rede e permitindo que o restante dos consumidores não seja impactado por essas ocorrências. No tronco principal de um alimentador, tipicamente são utilizados religadores e chaves seccionalizadoras, que atuam para proteger trechos mais extensos do que os fusíveis dos ramais secundários. Esses diferentes dispositivos de proteção são apresentados com maior detalhe na sequência.

3.1.2 Proteção

Dispositivos de proteção são essenciais em sistemas de distribuição de energia elétrica. A presença desse tipo de dispositivo resulta em uma série de benefícios: a segurança de pessoas e animais; a proteção dos equipamentos, garantindo sua integridade e aumentando sua vida útil; a operação do sistema em segurança, interrompendo o fluxo de potência em casos nos quais as grandezas elétricas estejam fora dos limites de operação; a continuidade do fornecimento de energia elétrica em partes da rede não afetadas em eventos de interrupção, melhorando

indicadores de continuidade. Os principais dispositivos de proteção utilizados em alimentadores de distribuição são: fusíveis, religadores e relés (SHORT, 2004).

- Fusíveis

Os fusíveis são os dispositivos de proteção de menor custo e mais comuns em alimentadores, sendo utilizados amplamente na conexão de ramais secundários de rede ao alimentador principal, ou tronco, e na proteção de transformadores de distribuição. São caracterizados pela presença de duas curvas: a curva de fusão e a curva de extinção da falta. Sua operação consiste na fusão do condutor (composto por uma liga metálica), devido ao aquecimento por efeito Joule, quando a corrente elétrica ao qual o elemento fusível é submetido ultrapassa certo valor por um determinado intervalo de tempo, até a extinção da falta pela abertura do circuito do elemento fusível. Esses dispositivos são caracterizados por curvas de tempo x corrente que determinam, para diferentes valores de corrente, o intervalo de tempo suportado entre a fusão do elo fusível e a extinção da falta. Uma vez que o elo tenha atuado, é necessária a intervenção em campo para a substituição desse dispositivo, o que pode resultar em interrupções do fornecimento de energia por longa duração.

- Religadores

Religadores são dispositivos de proteção mais sofisticados que utilizam lógica de relés para detectar a circulação de sobrecorrentes na rede. Ao detectar uma condição de sobrecorrente, o religador interrompe o circuito, religando-o automaticamente após um tempo predeterminado (ajustável). Se, no momento do religamento, o defeito ainda persiste, o religador repete a sequência de disparo de acordo com a programação implementada no seu sistema de controle.

O principal ganho na utilização de religadores é a possibilidade de extinção de eventos de curto-circuito temporários na rede, evitando a atuação de dispositivos que interromperiam de maneira permanente o fornecimento de energia. Assim como fusíveis, religadores são caracterizados por curvas de tempo x corrente que determinam o gatilho para a sua atuação, em função do valor da corrente circulante e do intervalo de tempo. Religadores são caracterizados também por um ciclo de religamento, que determina o número de tentativas de religamento, bem como o intervalo entre estas. Se, após todas as tentativas de religamento, a falta não foi extinguida na rede, o religador entra em *lock out*, ou seja, o circuito fica aberto até que seja feito um comando manual de fechamento no local de instalação do equipamento.

- Chaves seccionalizadoras

Chaves seccionalizadoras são dispositivos automáticos de proteção que atuam geralmente em conjunto com religadores na proteção de sobrecorrentes. O seccionalizador não tem capacidade de ruptura, ou seja, não possui uma câmara de extinção de arco com capacidade de abrir um circuito sob falta, e, diferentemente de religadores, não é capaz de efetuar tentativas de religamento. Em vez disso, esses equipamentos contam a quantidade de vezes em que uma corrente de falta, maior ou igual à corrente de acionamento, passa através de seu circuito. Essa contagem é pré-definida no de seu mecanismo de controle, sendo incrementada cada vez que a sobrecorrente de falta circulante é interrompida por um dispositivo de proteção a montante, normalmente um

religador. Quando o contador atinge um número predeterminado de aberturas, a chave abre o circuito, isolando a porção da rede sob falta, e permanece nesta posição até a intervenção da equipe de manutenção.

Associado a um religador, esse tipo de dispositivo evita que o fornecimento de energia seja interrompido instantaneamente na ocorrência de uma falta, deixando um religador a montante efetuar uma tentativa de religamento, mas abre o circuito quando detecta que o problema não é temporário. Caso o problema esteja a jusante da chave seccionalizadora, o religador possivelmente poderá restabelecer o fornecimento ao restante da rede uma vez que esta chave tiver isolado o trecho em falta.

- Disjuntor/Relé

Relés de proteção são dispositivos que têm como função proteger equipamentos de sistemas elétricos contra sobrecargas, curtos-circuitos, sub e sobretensão e outras anomalias elétricas. Na rede de distribuição, sua principal função é proteger o tronco do alimentador primário, sendo localizado na subestação de distribuição. Existem diversos tipos de relés de proteção, cada um com uma função específica, sendo o relé de sobrecorrente (temporizado e instantâneo) o mais utilizado na proteção de alimentadores de redes de distribuição. Quando um relé de sobrecorrente é sensibilizado por uma sobrecorrente (sobrecarga ou curto-circuito), um comando é enviado para acionar o disjuntor após o tempo especificado pela sua curva característica. Ao receber o comando de abertura (*trip*) o disjuntor abre o circuito do alimentador, interrompendo a corrente de defeito.

- Seletividade e coordenação

Diferentes esquemas de proteção podem ser empregados em alimentadores de distribuição de acordo com a maneira como os dispositivos de proteção são parametrizados. Em um esquema de proteção coordenado, as curvas dos religadores a montante dos ramais secundários do alimentador são configuradas para detectar correntes de curto-circuito antes dos fusíveis localizados nas conexões dos ramais com o tronco principal. Com isso, os religadores atuam antes dos fusíveis, efetuando os religamentos na tentativa de extinguir faltas temporárias. O objetivo desse esquema de proteção é eliminar as faltas temporárias sem desligar de maneira permanente os ramais protegidos por fusível. Em caso de uma falta que não é extinguida pela ação do religador, o fusível atua e o ramal é isolado do restante da rede.

Em um esquema de proteção seletivo, os fusíveis são configurados para atuar tanto em faltas permanentes quanto temporárias, sem coordenação com religadores a montante. O objetivo, nesse caso, é garantir a operação do equipamento mais próximo da falta e evitar que outros equipamentos a montante atuem. Tanto a coordenação quanto a seletividade do sistema de proteção de um alimentador são importantes, e a parametrização adequada dos equipamentos para otimizar a atuação em caso de faltas, promovendo maior confiabilidade e garantindo a proteção, é fundamental na operação do sistema.

Com a filosofia de redes inteligentes (*smart grids*) e com o aumento de automação da rede, sistemas de distribuição passaram a ser monitorados e controlados em tempo real através de sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), que acompanham as

grandezas do sistema, os estados das chaves e a atuação das proteções, emitindo alarmes para notificar os operadores em caso de problemas como a ultrapassagem de limites operacionais, por exemplo. Alguns dispositivos do sistema podem ser controlados remotamente, recebendo comandos de abertura e fechamento, enquanto outros necessitam de intervenção no campo para serem manobrados. A supervisão e controle em tempo real é fundamental na operação de sistemas de distribuição de energia para responder de maneira rápida às ocorrências e melhorar a confiabilidade do sistema, minimizando o tempo para restabelecimento do fornecimento de energia.

3.1.3 Eventos em redes de distribuição

Em sistemas elétricos, diferentes termos são utilizados para descrever situações adversas ou condições de operação anômalas. Um defeito refere-se a uma ação física que provoca uma operação inadequada e pode comprometer o desempenho de um equipamento, sem necessariamente impedir seu funcionamento. Falha, por sua vez, descreve a incapacidade de um equipamento de cumprir sua finalidade, seja pela ausência de uma ação programada ou pela interrupção de sua operação normal.

Um curto-circuito é uma ligação intencional ou acidental entre dois pontos de um circuito, geralmente através de uma impedância desprezível, o que resulta em altas correntes devido à diferença de potencial entre os pontos. Falta é um termo muitas vezes usado como sinônimo de curto-circuito (SHORT, 2004). Na maioria das vezes, faltas requerem rápida eliminação para evitar danos aos equipamentos e possíveis propagações para o restante do sistema. De acordo com sua natureza, faltas podem ser temporárias ou permanentes e podem ou não causar uma ocorrência de interrupção do fornecimento de energia. Ocorrências de interrupção são definidas sob o ponto de vista dos consumidores como a interrupção do fornecimento de energia, podendo ser de curta ou de longa duração (IEEE PES, 2012).

Faltas temporárias são causadas por eventos de curto-circuito transitório que se extinguem rapidamente, tipicamente com a atuação de religadores. Essas faltas podem ser causadas pelo contato de galhos de árvores com os condutores, pelo contato entre condutores em situações de vento forte ou por descargas atmosféricas, por exemplo. Nesses casos, a desenergização temporária do circuito é suficiente para extinguir a corrente de curto-circuito e retornar o sistema ao seu estado normal de operação. Assim, faltas temporárias normalmente provocam interrupções de curta duração, as quais normalmente não são apropriadas nos indicadores de continuidade do serviço.

Faltas permanentes são causadas por eventos de curto-circuito que não são extintos ao se desenergizar momentaneamente o circuito. Nesse caso, é necessária alguma intervenção para que o problema seja resolvido. Esse tipo de falta pode decorrer da queda de árvores sobre a rede em situações de tempestade, da queda de postes, do rompimento de condutores, entre outros. Faltas permanentes tipicamente provocam interrupções de longa duração, cujo tempo para restabelecimento do fornecimento de energia depende do tempo de mobilização das equipes, localização da falta e reparo. Esse tipo de falta impacta nos indicadores de continuidade do serviço, ocasionando penalidades à distribuidoras se as metas forem ultrapassadas. Para o cálculo de indicadores de continuidade, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) define o

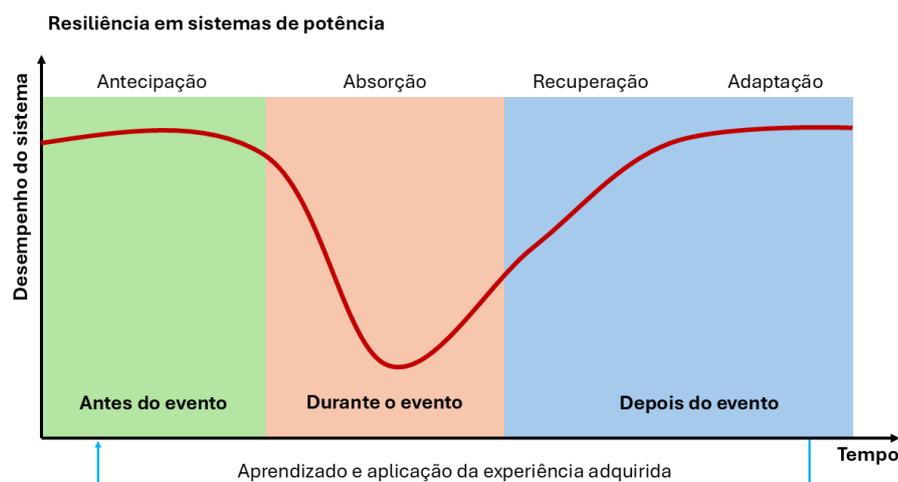
intervalo de três minutos como limite para interrupções de curta duração (ANEEL, 2021b).

No contexto deste trabalho, o foco principal é sobre as ocorrências de interrupção no fornecimento de energia e não sobre os eventos de falta que provocaram essas interrupções. Concessionárias da rede de distribuição tipicamente possuem bancos de dados detalhados de ocorrências em suas redes de concessão, onde registros de ocorrências são cadastrados pelas equipes de operação. Esses dados constituem uma fonte importante de informação acerca da operação do sistema e dos impactos de eventos adversos, como perturbações climáticas, e o aproveitamento dessas informações pode representar um ganho significativo frente a eventos que impactam a infraestrutura do sistema.

3.2 Resiliência

No contexto de sistemas de energia e mudanças climáticas, a resiliência está ligada à capacidade do sistema de antecipar, absorver e se recuperar de eventos climáticos adversos. Dessa maneira, a melhoria da resiliência de sistemas de distribuição pode estar associada a uma série de medidas tanto na operação quanto no planejamento, tais como: o entendimento dos impactos de eventos climáticos sobre o sistema, a identificação dos riscos e das vulnerabilidades; o desenvolvimento de planos de ação em caso de contingência; a previsão de eventos climáticos e preparação para estes com antecedência; o monitoramento do sistema em tempo real durante os eventos, bem como a avaliação de impactos e tomada de medidas necessárias; o estabelecimento de medidas de recuperação, de preferência automáticas; após o evento, a análise dos acontecimentos para promover o aprendizado contínuo, adaptando-se e preparando-se para eventos futuros a partir da experiência adquirida (IEEE PES, 2023; EPE, 2023). Na Figura 1 é apresentado o desempenho de um sistema submetido a um evento em função do tempo, com conceitos chave associados à resiliência do sistema em diferentes fases do evento.

Figura 1 – Ciclo do desempenho de um sistema sob a ótica da resiliência.



Fonte: adaptado pelo autor de IEEE PES (2023).

A ideia do aprendizado em função da incidência de eventos climáticos adversos e aplicação das lições aprendidas não apenas é um dos pilares para a melhoria da resiliência de sistemas de

distribuição, como também é uma das tarefas com maior potencial para desenvolvimento dentro das atividades das concessionárias. Atualmente, com a utilização de cada vez mais equipamentos com função de monitoramento e com a capacidade cada vez maior de armazenamento de dados históricos, há um volume significativo de dados associados à operação das proteções do sistema, ao comportamento das grandezas e ao histórico das transições de estados de chaves e relés, por exemplo. Apesar da grande disponibilidade de dados, pouco ainda é feito para transformá-los em informações e entender melhor o comportamento da rede sob condições climáticas adversas, permitindo tomar medidas para melhoria da resiliência e fechar o ciclo de aprendizado contínuo.

No Brasil, o aumento da resiliência tem surgido como um tema central para o planejamento e a operação de sistemas de distribuição de energia, principalmente em resposta a eventos climáticos extremos observados recentemente no território nacional. Em nota técnica desenvolvida pela ANEEL a partir de uma Tomada de Subsídios realizada em 2024 (ANEEL, 2024), é discutido o impacto dos riscos climáticos sobre a infraestrutura de sistemas de distribuição, principalmente associados a eventos climáticos extremos. Uma série de ações são propostas para a melhoria da resiliência das redes no curto prazo, incluindo: o manejo da arborização, principalmente em redes urbanas; a transparência na comunicação de informações entre concessionárias e consumidores, sobretudo durante eventos de interrupção do fornecimento de energia; a maior eficiência na comunicação das concessionárias com o poder público; o compartilhamento de recursos, como materiais e equipes, entre diferentes concessionárias em eventos severos; e a elaboração de planos de contingência detalhados, permitindo às concessionárias enfrentar eventos climáticos extremos cada vez mais incidentes (ANEEL, 2024).

3.3 Conceitos de estatística e aprendizado de máquina

Nessa seção, são apresentados os conceitos fundamentais utilizados nas análises estatísticas desenvolvidas no trabalho, bem como na construção dos modelos de predição utilizando aprendizado de máquina.

3.3.1 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística utilizada para avaliar as diferenças entre as médias populacionais de diferentes grupos (MARTINS; DOMINGUES, 2017). O método consiste em estabelecer e testar duas hipóteses: a hipótese nula (H_0), de que as médias populacionais são iguais; e a hipótese alternativa (H_1), de que as médias populacionais são diferentes. Como a análise pode ser feita para um número de grupos maior do que 2, a hipótese alternativa determina se a média de pelo menos um dos grupos é diferente das demais.

A premissa fundamental do método consiste em particionar a variância total de um conjunto de dados em duas fontes de variação: a variância entre diferentes grupos (explicada pela divisão dos grupos) e a variância dentro de cada grupo (não explicada pela divisão dos grupos). Assume-se que a soma dos quadrados dos resíduos total pode ser expressa pelas somas dos quadrados dos resíduos entre os grupos e dentro dos grupos:

$$SQ_{total} = SQ_{EntreGrupos} + SQ_{DentroGrupos} \quad (3.1)$$

e a estatística F é calculada com a seguinte expressão:

$$F = \frac{\text{variância entre grupos}}{\text{variância dentro dos grupos}} = \frac{SQ_{EntreGrupos}/(k-1)}{SQ_{DentroGrupos}/(N-k)} \quad (3.2)$$

onde k é o número de grupos e N é o número total de observações. Para testar a hipótese nula, o valor calculado de F é comparado com a distribuição F ou, utilizando valores tabelados, aos valores críticos de F de acordo com os graus de liberdade do numerador ($k-1$) e do denominador ($N-k$) da expressão a um dado nível de significância α (um valor típico para α é 5% (MARTINS; DOMINGUES, 2017)). Se $F \geq F_{critico}$, a hipótese nula é rejeitada, e conclui-se que a diferença entre as médias dos diferentes grupos é estatisticamente significativa. Para a validade do resultado, a análise da variância pressupõe que as amostras são independentes e que as distribuições das amostras em cada grupo seguem uma distribuição normal.

3.3.2 Árvores de decisão

Árvores de decisão são modelos de aprendizado de máquina supervisionados utilizados para regressão e classificação de dados (GÉRON, 2021). Uma árvore de decisão é construída particionando recursivamente os dados com base em seus atributos, criando uma estrutura hierárquica de nós de decisão. A divisão do conjunto de dados em cada nó é feita para minimizar uma função de impureza.

Um dos principais algoritmos para a construção de árvores de decisão é o CART (*Classification And Regression Tree*), que constrói a árvore minimizando uma métrica para a impureza dos nós resultantes de cada divisão. Uma das métricas de impureza utilizadas é o índice de Gini (I_G):

$$I_G(t) = 1 - \sum_{i=1}^N p_i^2 \quad (3.3)$$

onde p_i é a proporção de amostras da classe i e N é o número total de amostras no nó t .

Árvores de decisão apresentam uma série de vantagens em relação a outros algoritmos de aprendizado de máquina, tais como: a interpretabilidade dos resultados, através de nós de decisão intuitivos; e a flexibilidade para lidar com variáveis numéricas e categóricas, sem grandes necessidades de pré-processamento de dados.

Em contrapartida, entre as principais desvantagens desses algoritmos estão: a propensão ao *overfitting* de dados, que ocorre quando os modelos se ajustam com muita precisão aos dados de treino e perdem a capacidade de generalização para dados de teste; e a instabilidade, que faz com que alterações nos dados de entrada possam levar a estruturas de árvore significativamente diferentes. O *overfitting* pode ser mitigado ao se limitar a profundidade da árvore de decisão.

Duas das principais métricas para se avaliar o desempenho de um modelo de classificação baseado em árvore de decisão são a matriz de confusão e a precisão do modelo. A matriz de confusão resume as predições feitas pelo modelo em quatro categorias: verdadeiros positivos (TP), verdadeiros negativos (TN), falsos positivos (FP) e falsos negativos (FN).

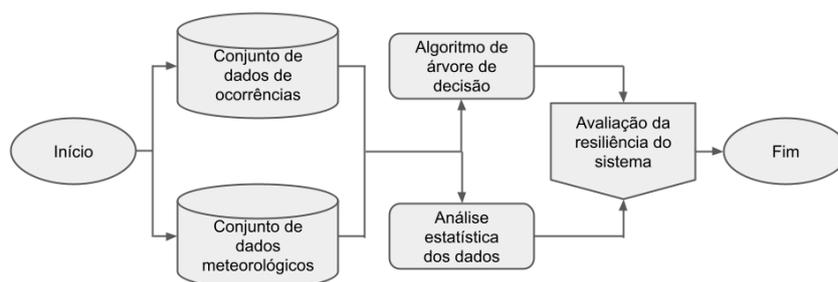
A precisão do modelo é calculada com a seguinte expressão:

$$\text{Precisão} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (3.4)$$

4 METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento do trabalho se baseia na utilização de duas bases de dados principais: uma base de ocorrências de interrupção de energia de uma Distribuidora; e um banco de dados meteorológicos. A partir das entradas de dados, um algoritmo utilizando técnicas de inteligência artificial é utilizado para modelar o comportamento da rede em função de variáveis climáticas, produzindo informações de saída que permitem avaliar a resposta do sistema às perturbações climáticas. As etapas principais do trabalho são mostradas na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma com as principais etapas do trabalho.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.1 Dados de entrada

O banco de dados de ocorrências de interrupção da Distribuidora e o banco de dados meteorológicos são apresentados na sequência.

4.1.1 Banco de dados de ocorrências

O banco de dados da concessionária contém registros operacionais das ocorrências de interrupção do fornecimento de energia entre os meses de fevereiro e agosto de 2024 em toda a rede de concessão da empresa. Entre as informações disponíveis em cada registro estão: a data e hora de início e fim da ocorrência, o alimentador, a cidade e o equipamento em falta, entre outros. Todos os registros de ocorrências do banco de dados constituem interrupções de longa duração do fornecimento. Ocorrências temporárias, decorrentes tipicamente da atuação de religadores para a extinção de faltas temporárias na rede, não são registradas nesse conjunto de dados.

4.1.2 Banco de dados meteorológicos

O banco de dados meteorológicos apresenta dados históricos de temperatura, precipitação e vento, por exemplo, com intervalo de uma hora. Os dados meteorológicos foram obtidos para a localidade da rede de distribuição de onde foram obtidos os históricos de ocorrências, e para o

período de tempo correspondente. As variáveis climáticas escolhidas para alimentar o estudo foram intensidade de vento e chuva.

4.2 Processamento dos dados

O processamento dos dados tem como objetivos: a seleção das variáveis independentes (climáticas), a seleção da variável dependente (resposta do sistema de distribuição), a consolidação das variáveis climáticas e da variável de resposta do sistema em uma base temporal comum e a transformação das variáveis contínuas em variáveis categóricas. Em um primeiro momento, quatro variáveis climáticas foram selecionadas a partir do banco de dados meteorológicos: o volume de chuva horário, em milímetros; a velocidade média do vento horária, em metros por segundo; a rajada máxima de vento horária, em metros por segundo; e a direção média do vento horária, em graus. A resposta do sistema às perturbações climáticas é avaliada em termos das ocorrências de interrupção no fornecimento de energia, obtidas no banco de dados da concessionária.

Uma vez que as variáveis independentes escolhidas para o estudo estão disponíveis em intervalos de uma hora e que a data e a hora dos registros da variável de resposta não são normalizados, pois correspondem exatamente ao horário de início da ocorrência, é necessário trazer todas as variáveis para uma mesma base temporal que permita a comparação entre elas. A base escolhida foi a diária, com o objetivo de capturar os padrões gerais do comportamento do sistema de função das perturbações climáticas, em um compromisso com o menor grau de detalhamento das informações horárias. As variáveis foram agregadas da seguinte maneira:

- Registros de ocorrências: número total de ocorrências diário;
- Volume de chuva horário (mm): volume de chuva total diário (mm);
- Velocidade média do vento horária (m/s): velocidade média do vento diária (m/s);
- Rajada máxima de vento horária (m/s): rajada de vento máxima diária (m/s);
- Direção média do vento horária (°): direção da rajada de vento máxima do dia (°);

Para alimentar o algoritmo utilizado para modelar a resposta do sistema, as variáveis numéricas são transformadas em variáveis categóricas, podendo ser interpretadas como o nível de resposta do sistema e o nível de perturbação climática observada, conforme mostrado na Tabela 1. Diferentes critérios podem ser utilizados para a categorização das variáveis, como a média, a mediana e os quantis das distribuições.

Tabela 1 – Conversão das variáveis do estudo em categorias.

Variável numérica	Variável categórica
Número total de ocorrências diário	Nível de ocorrências diário (alto/baixo)
Volume de chuva total diário (mm)	Nível de chuva diário (alto/baixo)
Velocidade média do vento diária (m/s)	Nível de vento médio diário (alto/baixo)
Rajada de vento máxima diária (m/s)	Nível de rajada de vento diário (alto/baixo)
Direção da rajada de vento máxima do dia (°)	Direção geográfica da rajada de vento (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO)

Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 Análise estatística das ocorrências e seleção das variáveis climáticas

A proposta principal do trabalho se baseia na hipótese de que o comportamento de um sistema de distribuição é influenciado por perturbações climáticas. A validação dessa hipótese é essencial para o ajuste de um modelo que explique e preveja o comportamento do sistema em função das variáveis climáticas. Uma análise estatística das variáveis climáticas é realizada para avaliar a relevância de cada tipo de perturbação climática na resposta do sistema, sendo a base para selecionar as variáveis mais relevantes a serem incluídas no modelo de aprendizado de máquina.

4.4 Ajuste de um modelo de árvore de decisão

O banco de dados de ocorrências constitui uma base detalhada de informações sobre os eventos aos quais o sistema foi submetido. Nessa etapa, o objetivo é ajustar um modelo de aprendizado de máquina capaz de cruzar os dados de ocorrências com as perturbações climáticas do período, determinando as relações entre as variáveis e explicando o comportamento do sistema em função do clima. Foi escolhido um modelo de árvore de decisão (Géron, 2021) para a classificação da resposta do sistema. Esse tipo de algoritmo pode ser empregado tanto para regressão (predição de variáveis contínuas) quanto para classificação (predição de variáveis categóricas). Neste estudo, o algoritmo de árvore de decisão é utilizado para classificar a categoria da variável de resposta do sistema em função das variáveis independentes, também categóricas.

A partir da categoria das variáveis independentes, o modelo classifica a categoria da variável de resposta. O modelo é construído com os dados diários, então a partir do nível de chuva (alto ou baixo), o nível da rajada de vento (alto ou baixo) e a direção da rajada de vento (direção geográfica) observados naquele dia, o modelo determina a categoria da resposta do sistema no dia (alto ou baixo número de ocorrências).

4.5 Avaliação da resiliência

A resiliência do sistema de distribuição é avaliada a partir das informações disponíveis no banco de dados de ocorrências, uma vez desenvolvida a metodologia para classificação dos dias e previsão dos níveis esperados de ocorrências em função das perturbações climáticas. Com isso, são propostas melhorias para a resiliência do sistema que, em conjunto com a previsão do tempo, podem ser implementadas para aumentar a capacidade do sistema de antecipar eventos climáticos adversos. No presente trabalho, a avaliação da resiliência se concentra na dimensão de previsão de eventos climáticos e antecipação na operação do sistema, focando em medidas de preparação para estes eventos.

Utilizando as informações detalhadas de horário de início da ocorrência, mobilização da equipe em campo, chegada no local da ocorrência e conclusão do chamado, o estudo analisa como as durações das diferentes etapas de uma ocorrência são diferentes em dias com alta ou baixa incidência de ocorrências, identificando as etapas mais significativas em termos de duração da interrupção de energia. Analisando a linha do tempo de eventos em dias com um nível elevado de ocorrências, bem como a coordenação das equipes para a resolução dos problemas em campo,

o trabalho levanta possibilidades para a melhoria do tempo de resposta da operação e quantifica a melhoria da resiliência em termos da duração total de interrupção de energia no sistema.

5 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

O estudo de caso foi realizado a partir de um banco dados da operação contendo ocorrências no período de fevereiro a agosto de 2024. Os dados são contextualizados por cidade, circuito (alimentador) e equipamento em falta. Além disso, constam no banco de dados: data e hora de início e fim da ocorrência, número de consumidores atingidos, consumidor/hora interrompido, DEC e FEC da ocorrência, entre outras informações. Os dados meteorológicos foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que disponibiliza dados horários de suas estações meteorológicas automáticas. Os algoritmos foram desenvolvidos em *Python*.

Para limitar o perímetro das ocorrências a serem analisadas, foram escolhidos registros de apenas uma cidade. A escolha da cidade foi feita de maneira a obter dados meteorológicos completos para o período analisado. Com este filtro inicial, obteve-se um conjunto de cerca de 6 mil ocorrências distribuídas em 20 alimentadores, que impactaram em torno de 300 mil consumidores. Nos gráficos e análises que seguem, os dados foram anonimizados de maneira a preservar informações sensíveis da concessionária.

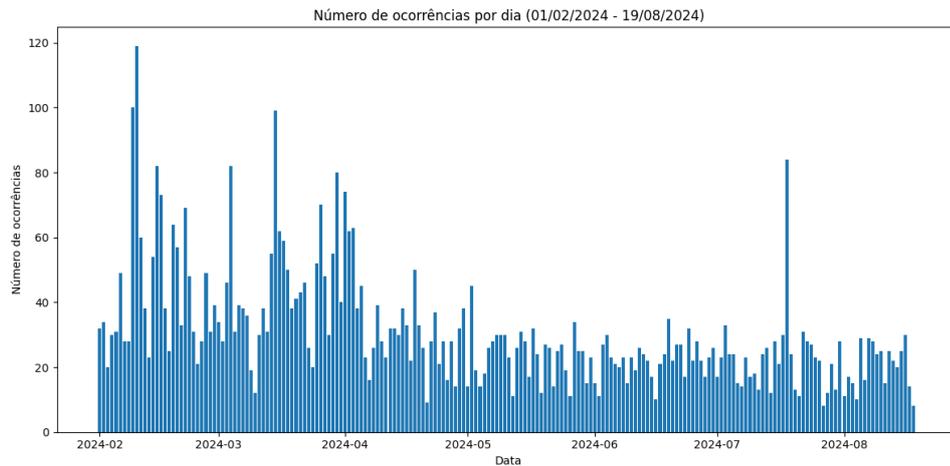
5.1 Análise exploratória

Após o processamento inicial dos dados climáticos e de ocorrências, trazendo-os para a mesma base diária, foram analisadas as distribuições dos dados ao longo do período de interesse. Essa análise inicial é importante para auxiliar na categorização das variáveis utilizando os critérios adequados. O número de ocorrências por dia no conjunto de dados filtrado é mostrado na Figura 3. De maneira geral, observa-se que, para a maior parte dos dias do período, em torno de 20 a 40 ocorrências foram registradas, exceto para os meses de fevereiro a abril, nos quais pôde-se observar uma quantidade significativa de dias com elevado número de ocorrências. Esses resultados podem ser visualizados também no histograma da Figura 4, que mostra uma distribuição assimétrica do número diário de ocorrências.

Em relação às variáveis climáticas, as distribuições observadas nos dias do período analisado são mostradas na Figura 5. Para a rajada e a velocidade do vento, as distribuições são levemente assimétricas, com maior concentração de dias em valores mais baixos e alguns dias com valores bastante elevados. Para o volume de chuva, a grande maioria dos dias do período apresentou pouca ou nenhuma chuva. Quanto à direção da rajada máxima de vento, foram observadas algumas direções de vento mais comuns, entre 90 e 180 graus (correspondentes a ventos predominantemente Sudeste).

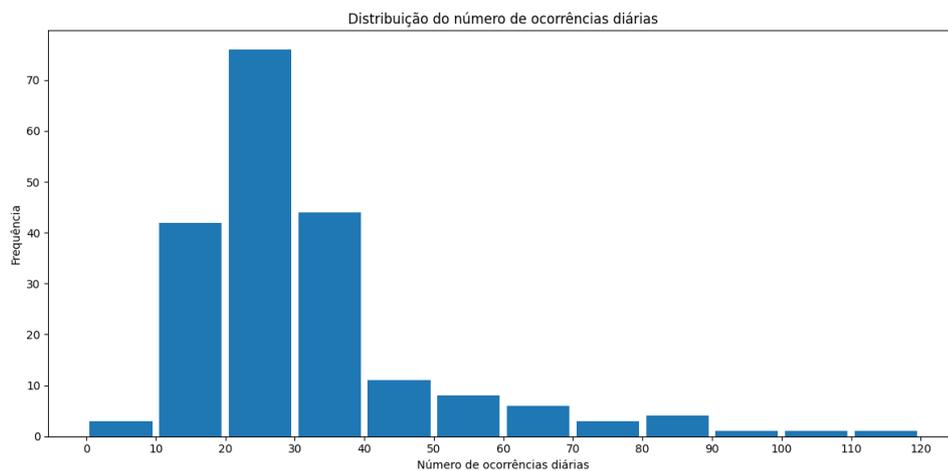
Em seguida, foram avaliados diferentes critérios para a categorização das variáveis climáticas e do número de ocorrências, com base em métricas estatísticas das distribuições. Dada a característica assimétrica das distribuições de rajada de vento, velocidade do vento, volume de chuva e número de ocorrências, era de se esperar que, utilizando diferentes critérios estatísticos, as categorias criadas para as variáveis apresentassem proporções diferentes nos níveis Baixo e Alto. Quatro métricas das distribuições foram avaliadas: a mediana, a média, o quantil 25% (correspondente ao primeiro quartil) e o quantil 75% (correspondente ao terceiro quartil). A

Figura 3 – Número de ocorrências por dia para o período em análise.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4 – Distribuição do número diário de ocorrências.

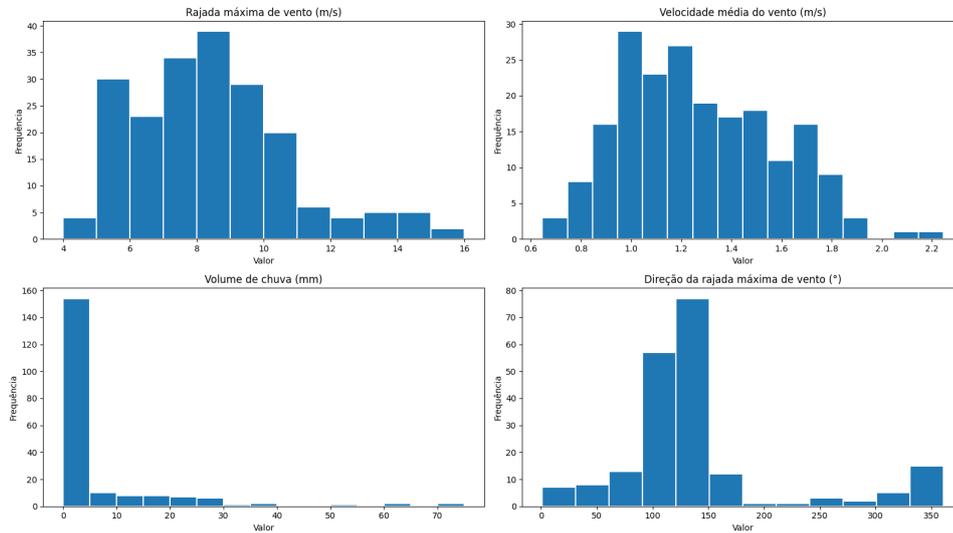


Fonte: elaborado pelo autor.

proporção de dias categorizados como nível Baixo e Alto é mostrada nos gráficos da Figura 6.

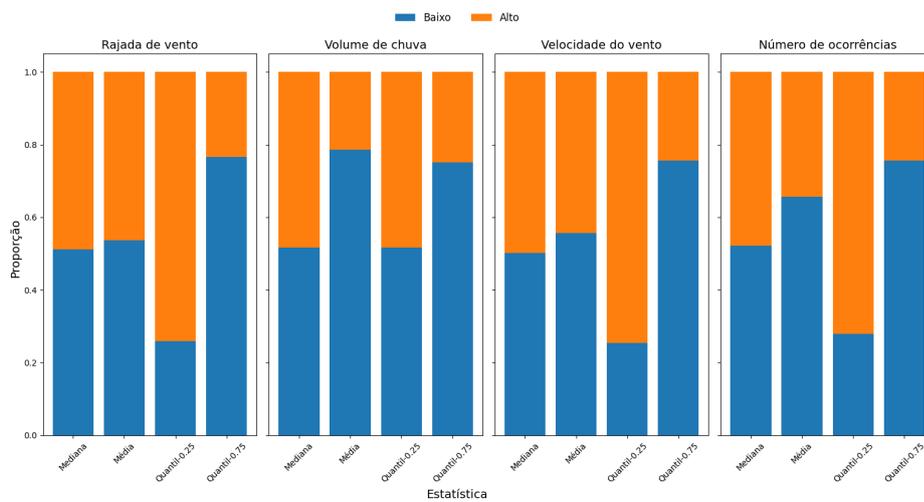
Os resultados da Figura 6 mostram que a proporção de dias categorizados com nível Baixo e Alto muda significativamente de acordo com o critério estatístico estabelecido. Dada a assimetria das distribuições, observa-se uma diferença nas proporções obtidas ao se utilizar a mediana e a média das distribuições, principalmente para as variáveis "Volume de chuva" e "Número de ocorrências". A mediana foi mais eficaz em dividir os dias em grupos com aproximadamente o mesmo número de observações (50% nível Baixo e 50% nível Alto), o que justifica a preferência pela mediana em distribuições assimétricas. A utilização dos quantis como critério de categorização das variáveis, por outro lado, pode ser interessante caso se deseje obter grupos desbalanceados, dando mais ou menos peso para uma das categorias.

Figura 5 – Distribuições dos valores diários das variáveis climáticas selecionadas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 6 – Proporção dos níveis Baixo e Alto para as variáveis em função do critério estatístico usado na categorização.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 Análise estatística das ocorrências e seleção das variáveis climáticas

A sequência do estudo se concentrou em analisar os dados com o objetivo de validar a premissa inicial do trabalho, de que as perturbações climáticas têm impacto na resposta do sistema de distribuição. Para isso, buscou-se avaliar se a resposta do sistema (o número de ocorrências diário) é estatisticamente diferente para diferentes níveis de perturbação climática.

Uma análise da variância (ANOVA) foi realizada para determinar se o número médio de ocorrências é estatisticamente diferente para cada nível de perturbação climática, dado um nível de significância estatística de 5%. Os resultados da análise demonstraram que a diferença entre o número médio de ocorrências dos diferentes níveis de perturbação é estatisticamente significativa, independentemente do critério estatístico utilizado para a categorização dos níveis, para as variáveis de volume de chuva e velocidade do vento. A hipótese nula também foi rejeitada para a variável de direção da rajada, que não depende de um critério estatístico para ser categorizada. Para a variável de velocidade da rajada de vento, a análise demonstrou que apenas a categorização utilizando o quantil 75% permite rejeitar a hipótese nula. Os resultados obtidos são mostrados nas Tabelas 2 e 3. Apesar da análise da variância não implicar causalidade nem indicar uma medida de correlação entre as variáveis, o resultado obtido indica que a resposta do sistema muda de acordo com o nível de perturbação climática.

Tabela 2 – Resultados da análise de variância para as variáveis volume de chuva, rajada de vento e velocidade do vento em função do critério estatístico utilizado para categorização.

Critério	Parâmetro	Volume de chuva	Rajada de vento	Velocidade do vento
Mediana	Teste-F	45,34	0,5048	5,166
	p-valor	1,73e-10	0,4782	0,0241
	H0 rejeitada?	Sim	Não	Sim
Média	Teste-F	54,86	0,7626	4,161
	p-valor	3,59e-12	0,3836	0,0427
	H0 rejeitada?	Sim	Não	Sim
Quantil 25%	Teste-F	45,34	0,5256	4,549
	p-valor	1,73e-10	0,4693	0,0342
	H0 rejeitada?	Sim	Não	Sim
Quantil 75%	Teste-F	66,54	6,956	8,434
	p-valor	3,81e-14	0,0090	0,0040
	H0 rejeitada?	Sim	Sim	Sim

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Resultados da análise de variância para a variável direção da rajada de vento.

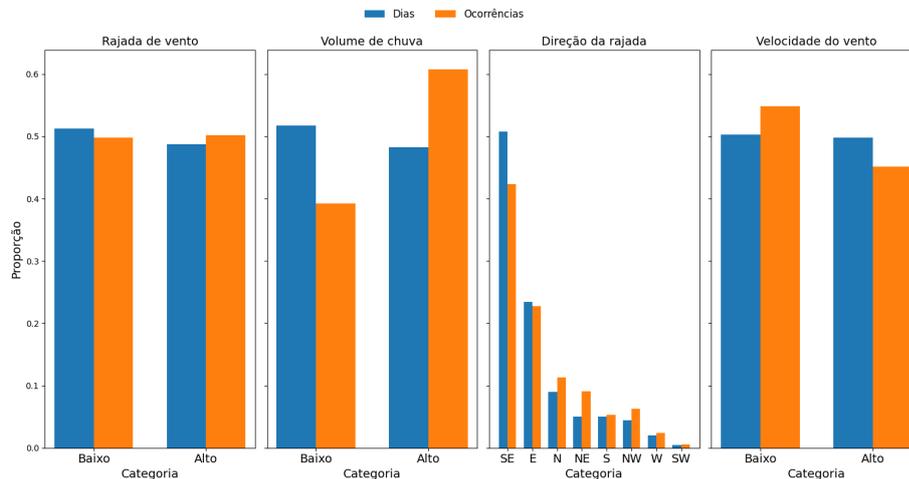
Parâmetro	Direção da rajada
Teste-F	6,202
p-valor	1,47e-6
H0 rejeitada?	Sim

Fonte: elaborado pelo autor.

Em seguida, buscou-se avaliar se todas as variáveis climáticas selecionadas são igualmente influentes sobre o número de ocorrências observado, e se a influência de cada variável climática estava de acordo com o comportamento esperado. Com essa análise, o objetivo foi de potencialmente descartar variáveis menos influentes para, posteriormente, ajustar um modelo apenas com as variáveis que melhor explicassem o comportamento do sistema. Os gráficos mostrados na

Figura 7 ilustram a influência de cada variável climática sobre o número de ocorrências observado ao comparar o percentual de dias do período em que cada nível de perturbação foi observado com o percentual do número de ocorrências registrado para cada nível de perturbação.

Figura 7 – Proporção de dias e de ocorrências por categoria para cada variável climática (utilizando a mediana como critério para categorização).



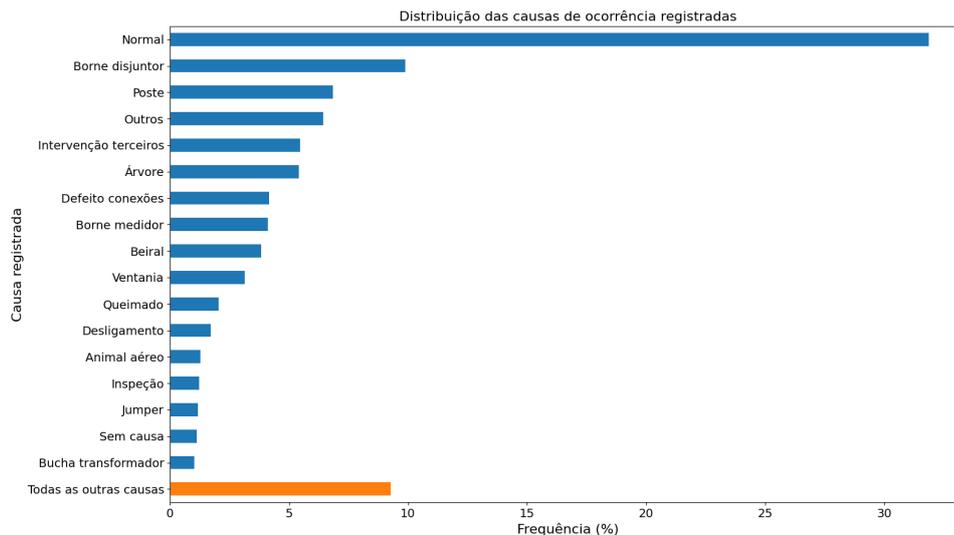
Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 7, observa-se nos gráficos de rajada de vento, volume de chuva e velocidade do vento que a divisão de dias com nível Baixo e Alto é próxima, indicando que a categorização pela mediana resultou em uma divisão balanceada das categorias. Para a rajada de vento, o número de ocorrências em cada categoria é próximo, o que não fornece uma conclusão clara sobre a influência dessa variável no número de ocorrências. Para o volume de chuva, porém, os resultados indicam que um número significativamente maior de ocorrências acontece em dias de Alto nível de chuva, apesar desses dias acontecerem aproximadamente o mesmo número de vezes do que dias com Baixo nível de chuva. Para a variável de velocidade do vento, o comportamento observado é o contrário: proporcionalmente, mais ocorrências acontecem em dias em que o nível de velocidade do vento é Baixo. Isso pode indicar que a velocidade média do vento, ao diluir os valores ao longo de 24 horas, não reflete necessariamente a intensidade ou persistência de ventos fortes em momentos específicos, que poderiam ter maior impacto no número de ocorrências. Em relação à direção da rajada de vento, observa-se que a influência de cada direção de vento acompanha aproximadamente a incidência de cada categoria. Dados os resultados observados nos gráficos, optou-se por não incluir a variável de velocidade média do vento nos modelos de aprendizado de máquina, uma vez que seu comportamento observado é contrário àquele esperado.

Em um sistema de distribuição, não é de se esperar que a totalidade das ocorrências de interrupção registradas seja causada por eventos climáticos adversos. Por isso, para a próxima etapa do estudo, que consiste em ajustar modelos para explicar o comportamento do sistema em função das perturbações climáticas selecionadas, a consideração das causas das ocorrências pode ser útil para obter um modelo capaz explicar as ocorrências observadas. Na Figura 8 é mostrada uma análise da frequência observada de cada causa registrada de ocorrência no conjunto de

dados. As causas com menos de 1% de participação foram agrupadas na categoria "Todas as outras causas". Pode-se observar uma série de causas com participação significativa que podem estar, direta ou indiretamente, associadas a eventos climáticos, tais como: "Poste", "Árvore" e "Ventania". A principal causa de ocorrência observada, "Normal", pode estar associada a eventos em que não foi identificada uma causa direta para o desligamento. Para essas ocorrências, em 98% dos registros, o defeito registrado no conjunto de dados é "Nenhum componente danificado".

Figura 8 – Frequência das causas de ocorrências registradas no conjunto de dados.



Fonte: elaborado pelo autor.

As análises estatísticas realizadas, incluindo a ANOVA e a observação das distribuições das variáveis climáticas, servem principalmente para fornecer uma visão geral do comportamento dessas variáveis e da resposta do sistema. Para se obter resultados mais conclusivos, é interessante realizar uma análise mais rigorosa, observando as premissas estatísticas relevantes, a correlação entre as diferentes variáveis, o número de amostras, entre outros.

5.3 Ajuste de um modelo de árvore de decisão

As análises realizadas até então serviram para se ter uma ideia do comportamento das variáveis do estudo, apoiar as decisões de como categorizar as variáveis e identificar os fatores climáticos mais influentes sobre a resposta do sistema. A seguir, o objetivo é construir um modelo de aprendizado de máquina que explique a resposta do sistema a partir das variáveis climáticas selecionadas. Optou-se por construir um modelo de árvore de decisão que seja capaz de prever se um dado dia apresentará um número alto ou baixo de ocorrências, em função dos níveis observados de chuva e vento.

Os dados diários do período em análise foram divididos em conjuntos de treino e de teste, na proporção 75%/25%. Para o ajuste de modelos de aprendizado de máquina, divisões dos dados no entorno de 80%/20% são comumente utilizadas (GÉRON, 2021). Para o conjunto de dados deste estudo, a proporção 75%/25% demonstrou melhores resultados no modelo final. Para avaliar o desempenho do modelo, foram escolhidas duas métricas: a precisão da predição e a matriz de confusão. Primeiramente, a abordagem mais simples possível foi utilizada para construir o

modelo de classificação, utilizando todo o conjunto de 6 mil ocorrências sem qualquer tipo de filtragem a partir das causas, e categorizando as variáveis com apenas um critério estatístico (a mediana das distribuições). Nessa parte, o objetivo foi validar a metodologia e avaliar se o modelo seria capaz de explicar os dados. Em seguida, foram exploradas outras maneiras de se construir o modelo, usando abordagens incrementais em que se buscou identificar apenas os subconjuntos de ocorrências que melhor poderiam ser explicados pelos fatores climáticos.

5.3.1 Construção de um modelo de classificação simplificado

Em um primeiro momento, um modelo de classificação com árvore de decisão simplificado foi construído utilizando o conjunto de dados filtrados de ocorrências para a cidade escolhida. A categorização das variáveis foi feita a partir da mediana das distribuições, e o critério obtido é mostrado na Tabela 4.

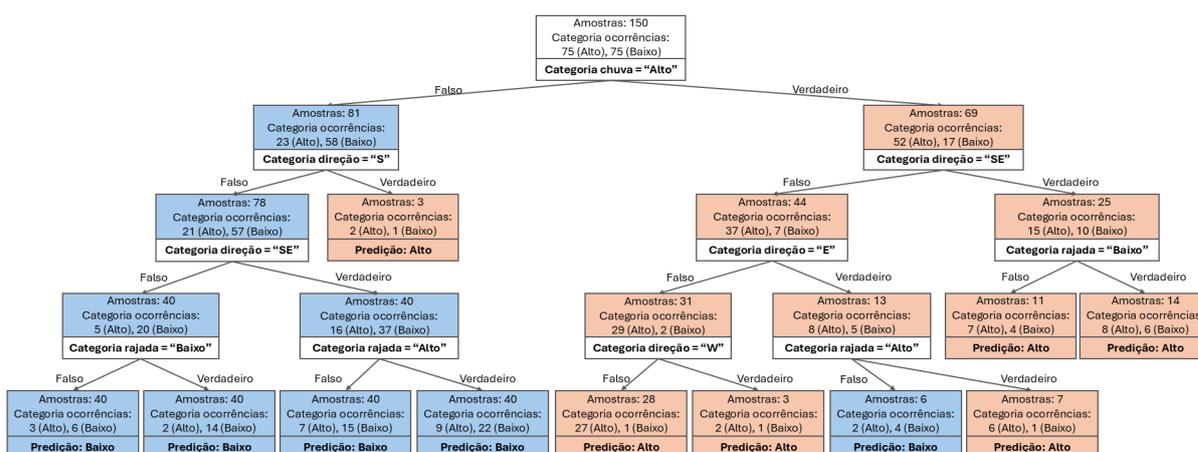
Tabela 4 – Critério para categorização das variáveis utilizando a mediana das distribuições.

Variável	Nível	Critério	Frequência
Volume de chuva	Alto	> 0	48,3%
	Baixo	≤ 0	51,7%
Rajada de vento	Alto	$> 8,2$	48,8%
	Baixo	$\leq 8,2$	51,2%
Número de ocorrências	Alto	> 27	47,8%
	Baixo	≤ 27	52,2%

Fonte: elaborado pelo autor.

A divisão dos dados entre dias de treino e dias de teste resultou em 150 dias de treino e 51 dias de teste, que foram escolhidos utilizando uma semente aleatória. O modelo de classificação ajustado obteve uma precisão de 69% para o conjunto de dados utilizado. A árvore de decisão obtida é mostrada na Figura 9 e a matriz de confusão do modelo é mostrada na Tabela 5.

Figura 9 – Diagrama da árvore de decisão ajustada.



Fonte: elaborado pelo autor.

O diagrama da árvore de decisão da Figura 9 mostra que a característica principal para a classificação dos dias em termos do número de ocorrências foi o nível de chuva, que aparece no primeiro nó de decisão. As cores foram aplicadas às folhas da árvore de maneira a ilustrar o

Tabela 5 – Matriz de confusão a partir das previsões do modelo ajustado.

		Previsto	
		Alto	Baixo
Verdadeiro	Alto	15	6
	Baixo	10	20

Fonte: elaborado pelo autor.

nível predominante de ocorrências (azul para nível Baixo e laranja para nível Alto). Com isso, pode-se observar diretamente que a categoria de chuva divide os dados entre amostras com nível de ocorrências predominantemente Baixo à esquerda (correspondente a níveis de chuva Baixos) e predominantemente Alto à direita (correspondente a níveis de chuva Altos). A precisão do modelo pode ser detalhadamente avaliada através da matriz de confusão da Tabela 5, que mostra que o modelo foi capaz de prever corretamente 35 dos 51 dias do conjunto de testes, sendo 15 com nível Alto e 20 com nível Baixo de ocorrências.

Com base nos resultados do modelo e na matriz de confusão, pode-se argumentar que a precisão de 69% é significativa devido ao impacto potencial das previsões e ao ganho de informação trazido pelas previsões do modelo, especialmente em relação aos dias de alto número de ocorrências. A capacidade de prever corretamente a maioria dos dias com alto número de ocorrências (15 acertos contra 6 erros) é particularmente relevante, pois permitiria à empresa planejar ações preventivas para mitigar os efeitos dessas ocorrências. Além disso, mesmo nos casos em que dias com baixo número de ocorrências foram previstos como de alto número (10 falsos positivos), a antecipação de medidas nesses dias poderia representar um ganho indireto, ao preparar a infraestrutura ou recursos da empresa para cenários mais desafiadores, sem incorrer em perdas significativas.

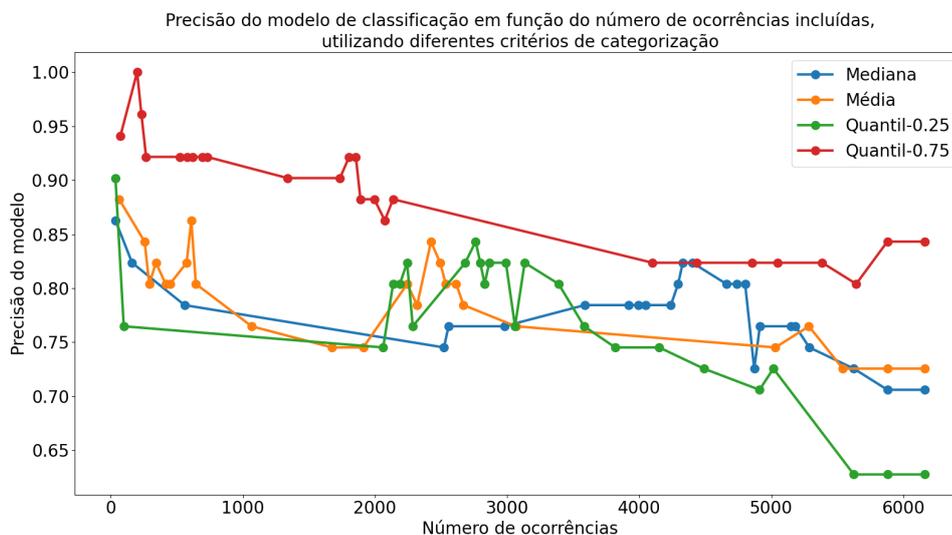
5.3.2 Busca pelo melhor modelo de classificação

Com a validação da metodologia para o ajuste de um modelo de classificação, a etapa seguinte teve como objetivo a comparação entre diversos modelos, construídos com diferentes critérios, a fim de buscar aquele com melhor capacidade para explicar o comportamento dos dados em função das variáveis independentes. Duas características principais do modelo foram avaliadas: o critério estatístico utilizado para categorizar as variáveis (mediana, média e quantis das distribuições); e o universo de ocorrências incluídas no conjunto de dados da variável de resposta (de acordo com a sua causa identificada no banco de dados).

Quanto à seleção do universo de causas de ocorrências incluídas no modelo de classificação, foi utilizada uma abordagem incremental com o objetivo de cobrir uma proporção cada vez maior das ocorrências do conjunto de dados. A cada iteração, o método selecionou a causa de ocorrência a ser incluída no modelo de classificação que resultasse no modelo com maior precisão. O processo foi repetido até que todas as causas de ocorrências tivessem sido incluídas no modelo. A precisão de cada modelo intermediário é mostrada no gráfico da Figura 10, em função do número de ocorrências consideradas.

Os resultados demonstram uma tendência de redução da precisão dos modelos à medida que mais ocorrências são incluídas, o que está dentro do esperado, uma vez que esse processo

Figura 10 – Evolução da precisão de diferentes modelos de classificação em função do número de ocorrências consideradas.



Fonte: elaborado pelo autor.

pode estar considerando um universo de ocorrências com cada vez menos dependência de fatores climáticos. Utilizando um conjunto reduzido de ocorrências, os modelos apresentaram precisão de 80% a 90%. Com um conjunto maior de ocorrências, contemplando pelo menos a metade do conjunto de dados, as precisões obtidas foram da ordem de 70% a 85%. Quanto ao critério estatístico para a categorização das variáveis, o quantil 75% apresentou o melhor desempenho para a classificação dos dados, resultando em modelos consistentemente mais precisos, enquanto as outras métricas apresentaram desempenho similar entre si.

5.4 Avaliação da resiliência

A resiliência do sistema de distribuição é avaliada através das durações das diferentes etapas das ocorrências. A partir das informações do conjunto de dados, as seguintes etapas podem ser identificadas: tempo de acionamento de uma equipe; tempo de aceite da ocorrência por parte da equipe; tempo de deslocamento da equipe até o local; tempo de resolução do defeito e restauração do sistema ao estado normal. Na Tabela 6, é mostrada a participação média de cada uma dessas quatro etapas na duração total de uma ocorrência. Tipicamente, o intervalo de tempo entre o início de uma ocorrência e o acionamento de uma equipe representa a maior parte da duração da ocorrência, em torno de 70%.

Tabela 6 – Duração percentual média de cada etapa de uma ocorrência.

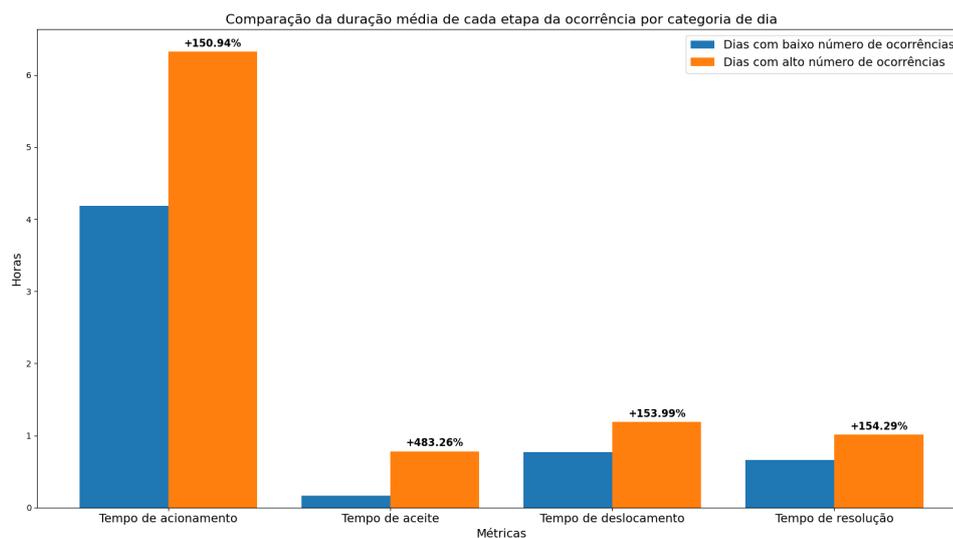
Etapa da ocorrência	Duração média (%)
Tempo de acionamento	69%
Tempo de aceite	7%
Tempo de deslocamento	13%
Tempo de resolução	11%

Fonte: elaborado pelo autor.

Uma análise mais aprofundada dos dados, comparando dias classificados com um alto ou

baixo número de ocorrências evidencia que a duração dos eventos é superior para dias em que houve um alto número de ocorrências na rede, como mostrado na Figura 11. Normalmente, todas as etapas de uma ocorrência têm uma duração maior, com destaque para o tempo de acionamento de uma equipe (1,5 vezes maior, representando a maior parte da duração das ocorrências) bem como o tempo de aceite (quase 5 vezes maior em dias com alto número de ocorrências). Esses resultados podem indicar uma ocupação excessiva das equipes em campo, tendo que lidar com um grande número de chamadas, o que aumenta o tempo de resposta para novas ocorrências.

Figura 11 – Duração média de cada etapa de uma ocorrência em função da categoria do dia.

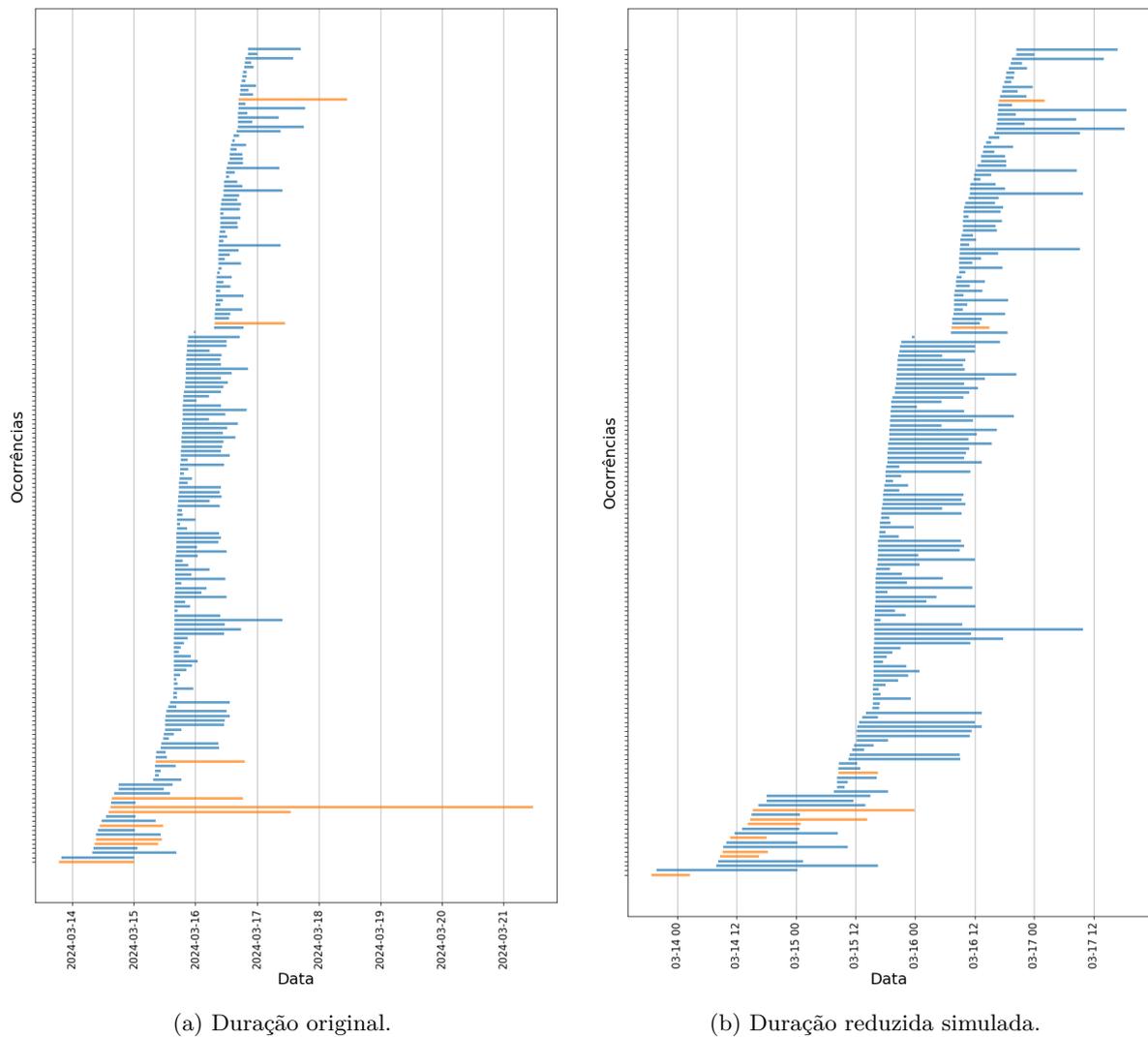


Fonte: elaborado pelo autor.

Em seguida, foi analisado um dia específico do período para entender a organização das equipes de acordo com as ocorrências registradas no dia. Foi escolhido um dia com alto número de ocorrências no qual foram registrados níveis altos de chuva e de rajada de vento, uma vez que o algoritmo de classificação construído anteriormente classificaria corretamente esse dia como tendo maior probabilidade de se ter um alto número de ocorrências. Os gráficos apresentados na Figura 12 mostram a linha do tempo das 179 ocorrências que aconteceram nesse dia e no dia seguinte, fornecendo uma visualização da sucessão de ocorrências e de suas durações. No total, 19 equipes foram acionadas nesse período, sendo 9 equipes responsáveis por resolver 80% das ocorrências, e as outras 10 atendendo 1 ou 2 ocorrências apenas.

A maneira proposta para se melhorar a resiliência do sistema frente aos eventos desse dia é abordando o tempo de acionamento associado às ocorrências. Nos gráficos da Figura 12, as 10 ocorrências com maior tempo de acionamento de uma equipe foram destacadas em laranja. Para simular uma redução no tempo de acionamento, foi calculado o tempo de acionamento médio do restante das ocorrências (excluindo as 10 piores), e atribuiu-se esse tempo de acionamento médio às 10 piores ocorrências. Essa suposição poderia simular duas situações: a inclusão de uma nova equipe para responder aos chamados de ocorrências, mobilizada em função da previsão de eventos climáticos severos e de uma alta probabilidade de um dia com alto número de ocorrências; ou uma melhor distribuição dos chamados de ocorrências entre as equipes já mobilizadas na região, evitando que algumas equipes respondessem a um número muito maior de ocorrências

Figura 12 – Linha do tempo do ocorrências em andamento entre os dias 15 e 16 de março de 2024, com destaque para as ocorrências com maior tempo até o acionamento de uma equipe.



Fonte: elaborado pelo autor.

e otimizando a carga entre as equipes. O número de ocorrências foi escolhido de acordo com o número médio de ocorrências que seria atendido por cada equipe nesse dia, caso fosse feita uma distribuição uniforme (em torno de 10 ocorrências por equipe).

Assim, foi reduzido o tempo de acionamento das 10 piores ocorrências, porém as outras durações foram mantidas inalteradas (tempo de aceite, tempo de deslocamento e tempo de resolução). Na Figura 12a, são mostradas as ocorrências antes da redução simulada da duração, e, na Figura 12b, com as durações reduzidas.

A duração total de todas as ocorrências no período dos dias 15 e 16 de março passou de 2276 para 1904 horas com a redução simulada da duração das 10 piores ocorrências, o que representa uma redução de 16% no tempo total de interrupção do fornecimento de energia. Essas 10 ocorrências, porém, atingiram apenas 1 consumidor cada, o que indica que o ganho em termos de indicadores para a concessionária não necessariamente justificaria as medidas tomadas

para acelerar o restabelecimento. Além disso, essas ocorrências podem justamente ter tido as correspondentes durações devido a decisões operacionais de se restabelecer a energia em locais de maior impacto em termos do número de clientes. Pode ser interessante buscar outras maneiras de se identificar as "piores" ocorrências de cada período, levando em consideração outras métricas para o impacto da ocorrência.

6 CONCLUSÃO

Sistemas de distribuição de energia elétrica são vulneráveis aos impactos de fatores climáticos. O impacto dessas perturbações sobre a infraestrutura dos sistemas compromete a continuidade do fornecimento de energia, afetando consumidores e concessionárias. Em um cenário de crescente ocorrência de eventos climáticos extremos, torna-se essencial compreender como essas variáveis afetam o desempenho dos sistemas elétricos, permitindo a implementação de medidas que aumentem a resiliência e garantam um fornecimento de energia mais confiável e adaptado às mudanças climáticas.

Este trabalho analisou a influência de variáveis climáticas na resiliência de sistemas de distribuição de energia elétrica, com foco na relação entre eventos de interrupção no fornecimento e perturbações climáticas, como chuva e vento. A análise dos dados demonstrou que variáveis climáticas específicas, como o volume de chuva, a velocidade e a direção da rajada de vento, impactam diretamente a ocorrência de interrupções de energia na rede, validando a relevância da abordagem proposta. A categorização das variáveis e o uso de modelos de árvore de decisão permitiram identificar padrões que relacionam condições climáticas adversas a dias com maior número de ocorrências. Os modelos construídos foram capazes de categorizar dias em termos do número de ocorrências esperado (Alto ou Baixo) com precisão da ordem de 70%.

As análises apontaram para a importância do planejamento baseado em dados históricos e previsão meteorológica para aumentar a resiliência do sistema. Analisando a duração das ocorrências, foram observados tempos maiores para o restabelecimento em dias com maior número de ocorrências, sendo o tempo até o acionamento das equipes o mais significativo tipicamente. Esses resultados indicaram que medidas como a otimização do despacho de equipes podem reduzir o impacto de eventos climáticos severos. Além disso, a análise destacou a necessidade de ações como a melhoria dos tempos de resposta operacional, para lidar com eventos adversos. Simulando o despacho de uma equipe adicional para resolução das ocorrências em um dia crítico, a redução da duração das ocorrências mais impactantes do dia resultaram em uma redução de 16% no tempo total de interrupção do fornecimento. No escopo da resiliência de sistemas elétricos, tais medidas se concentram na dimensão de antecipação e preparação aos eventos climáticos, a partir do aprendizado obtido com eventos passados em termos da resposta do sistema.

A metodologia desenvolvida no estudo, embora eficaz, apresenta limitações relacionadas à simplificação das variáveis climáticas e à dependência de dados históricos. Estudos futuros podem explorar modelos mais complexos, integrando maior granularidade temporal e espacial, bem como dados de outros fatores climáticos relevantes. Adicionalmente, o impacto econômico das interrupções e o comportamento dos consumidores poderiam ser incluídos nas análises para oferecer uma visão mais abrangente. Além disso, a expansão da análise para outras localidades pode ser interessante para validar a metodologia e avaliar a reprodutibilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ALVEHAG, K.; SODER, L. A reliability model for distribution systems incorporating seasonal variations in severe weather. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 2, p. 910–919, 2011. Citado na página 3.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Território Nacional - Prodíst, Módulo 1 - Glossário de termos técnicos do Prodíst*. [S.l.], 2021. Citado na página 4.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Território Nacional - Prodíst, Módulo 8 - Qualidade do fornecimento de energia elétrica*. [S.l.], 2021. Citado na página 8.
- ANEEL. *Nota Técnica N° 90/2024 - Avaliação das contribuições recebidas durante a Tomada de Subsídios 002/2024 e proposta de aprimoramentos regulatórios associados ao aumento da resiliência do sistema de distribuição e de transmissão a eventos climáticos extremos*. [S.l.], 2024. Citado na página 9.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. *Reliability Assessment Of Large Electric Power Systems*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1988. Citado na página 4.
- CAI, Y.; CHOW, M.-Y. Cause-effect modeling and spatial-temporal simulation of power distribution fault events. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 2, p. 794–801, 2011. Citado na página 3.
- CIGRÉ Brasil. *Resiliência de Sistemas Eletroenergéticos*. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 2.
- EPE. *Fortalecimento da Resiliência do Setor Elétrico em Resposta às Mudanças Climáticas*. [S.l.], 2023. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.
- FREITAG, S. C.; SPERANDIO, M. Composite reliability assessment considering adverse weather conditions. In: *2022 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–5. Citado na página 3.
- GÉRON, A. *Mãos à Obra: Aprendizado de Máquina com Scikit-Learn, Keras TensorFlow: Conceitos, Ferramentas e Técnicas para a Construção de Sistemas Inteligentes*. 2ª edição. ed. [S.l.]: Alta Books, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 10, 13 e 19.
- IEA. *Climate Resilience - Electricity Security 2021*. [S.l.], 2021. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- IEEE PES. *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*. [S.l.], 2012. Citado na página 7.
- IEEE PES. *Methods for Analysis and Quantification of Power System Resilience*. [S.l.], 2023. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. d.; ROBBA, E. J. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. [S.l.]: Editora Blusher, 2021. Citado na página 4.
- KAIYUAN, H.; LIJUAN, H. Reliability study for distribution network considering adverse weather. In: *2019 6th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 449–453. Citado na página 3.
- LIU, W. et al. A long-term reliability assessment method for active distribution networks considering the impacts of extreme weather events. *2023 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS)*, p. 1025–1030, 2023. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:262129983>>. Citado na página 3.
- MARTINS, G. d. A.; DOMINGUES, O. *Estatística Geral e Aplicada*. 6ª edição. ed. [S.l.]: Atlas, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

- PANTELI, M.; MANCARELLA, P. The grid: Stronger, bigger, smarter?: Presenting a conceptual framework of power system resilience. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 13, n. 3, p. 58–66, 2015. Citado na página 2.
- REN, H. et al. Analysis of weather and climate extremes impact on power system outage. In: *2021 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 01–05. Citado na página 3.
- SHORT, T. *Electric Power Distribution Handbook*. [S.l.]: CRC Press, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- VENKATASUBRAMANIAN, B. V. et al. Machine learning based identification and mitigation of vulnerabilities in distribution systems against natural hazards. In: *27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023)*. [S.l.: s.n.], 2023. v. 2023, p. 2908–2912. Citado na página 3.
- WANG, Y. et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—a review. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 31, n. 2, p. 1604–1613, 2016. Citado na página 2.