

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ERICK JOSÉ TELES DE ANDRADE**

**Sistema de Alerta para Detecção de Falhas em Equipamentos  
Elétricos**

**CURITIBA**

**2024**

**ERICK JOSE TELES DE ANDRADE**

**Sistema de Alerta para Detecção de Falhas em Equipamentos Elétricos**

**Alert System for Fault Detection in Electrical Equipment**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dr<sup>a</sup> Leandra Ulbricht

Co-orientador: Prof. Dr. José Carlos Pereira Coninck

**CURITIBA**

**2024**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ERICK JOSE TELES DE ANDRADE**

**Sistema de Alerta para Detecção de Falhas em Equipamentos  
Elétricos**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia de  
Computação do Curso de Bacharelado em  
Engenharia da Computação da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 16 de Dezembro de 2024

---

Leandra Ulbricht

Doutora

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Valfredo Pilia Junior

Mestre

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Leonardo Gobel Fernandes

Mestre

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2024**

Dedico este trabalho à minha família, pelos momentos de ausência. Aos amigos, pela companhia constante e apoio nos momentos de dificuldade.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, de maneira especial, à minha orientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Leandra Ulbricht, por seu apoio, paciência e dedicação. Sua orientação e auxílio foi fundamental para que eu alcançasse este objetivo e pudesse estar completando esta jornada.

À minha namorada, Fernanda, que esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio, incentivo e amor incondicional. Sua presença foi um pilar de força e motivação, e este trabalho é também um reflexo da nossa parceria.

Não posso deixar de agradecer aos meus amigos, que trouxeram leveza e alegria durante os momentos difíceis; à minha família, que sempre acreditou em mim e ofereceu suporte incondicional; e aos meus sogros, que sempre me acolheram como parte da família e contribuíram para que eu pudesse seguir em frente com confiança.

Por fim, estendo minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada gesto, palavra e ajuda foram essenciais para a concretização deste momento.

## RESUMO

Em uma subestação as falhas em seus equipamentos estão frequentemente associadas a anomalias térmicas, por isso a inspeção termográfica faz parte dos requisitos de manutenção e monitoramento das instalações. Além disso, com as tecnologias disponíveis atualmente a termografia tem as vantagens de ser uma técnica não-invasiva e que pode ser realizada de forma remota. Contudo, a técnica possui limitações principalmente quando realizada em ambientes abertos, onde os resultados obtidos podem ser consideravelmente influenciados pelas condições ambientais. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do sistema de alerta para a detecção de falhas em equipamentos elétricos. Para tanto, primeiramente foram captadas imagens termográficas e dados de uma estação solarimétrica, instalada no mesmo local da captação termográfica. Através da utilização de modelos de vetores autorregressivos, foram determinados os principais fatores atmosféricos que influenciaram a temperatura de operação dos equipamentos em uma subestação aberta. Com o conhecimento destes parâmetros foram utilizados os modelos de cartas de controle (EWMA) para definir limites superiores de temperaturas aceitáveis para cada horário de operação dos equipamentos da subestação. Estas informações formaram uma base de dados com todos os dados referentes às aquisições térmicas por horário do dia, realizadas cinco vezes ao dia, criando um histórico de funcionamento de cada equipamento que era comparado ao valor da captação, iniciando um processo de classificação. Este alerta foi calculado a partir da probabilidade de possíveis falhas, variando entre 0.0 (menor risco de falha) e 1.0 (maior risco de falha). O classificador inicia seu procedimento definindo se o equipamento processa corrente ou não, uma vez que seus valores térmicos são fortemente relacionados ao nível da corrente no momento do registro de suas temperaturas (além da influência das condições ambientais). Foram definidos cinco níveis de classificação para cada equipamento, sendo que os dois últimos níveis acionam alertas para o operador. Com este sistema, o especialista em termografia não precisa se deslocar até subestações distantes, não precisa gastar horas analisando todas as imagens realizadas em uma inspeção para posteriormente fazer relatórios pontuais de risco. Esse especialista, com este sistema SMT-SE, irá se dedicar somente à análise de situações de risco, o que permite a agilidade no processo de manutenção e identificação precoce da falha. Assim, esse sistema permite a identificação de equipamentos com possíveis falhas, antes que estas possam comprometer o funcionamento da subestação impactando no abastecimento de energia fornecido pela concessionária.

**Palavras-chave:** Termografia; classificação; alerta.

## ABSTRACT

In a substation, equipment failures are often associated with thermal anomalies, which is why thermographic inspection is part of the maintenance and monitoring requirements for installations. In addition, thermography has the advantages of being a non-invasive technique, nowadays, with the technologies available, it can be carried out remotely and in real time. However, the technique has its limitations, especially when carried out in open environments, where the results obtained can be considerably influenced by environmental conditions. This paper presents the development of a real-time warning system for detecting faults in electrical equipment. To this end, thermographic images and data from a solarimetric station, installed in the same location as the thermographic images, were first captured. Using autoregressive vector models, the main atmospheric factors influencing the operating temperature of the equipment in an open substation were determined. With knowledge of these parameters, control chart models (EWMA) were used to define acceptable upper temperature limits for each operating time of the substation's equipment. This information formed a database with all the data relating to thermal acquisitions by time of day, carried out five times a day, creating an operating history for each piece of equipment that was compared to the real-time capture value, initiating a classification process. This alert was calculated based on the probability of possible failures, ranging from 0.0 (lowest risk of failure) to 1.0 (highest risk of failure). The classifier begins its procedure by defining whether the equipment processes current or not, since its thermal values are strongly related to the current level at the time its temperatures are recorded (in addition to the influence of environmental conditions). Five classification levels have been defined for each piece of equipment, given that the last two levels triggering alerts for the operator. With this system, the thermography specialist does not need to dislocate to distant substations, nor does he need to spend hours analyzing all the images taken during an inspection in order to later produce specific risk reports. With this SMT-SE system, the specialist will focus solely on analyzing risk situations, which will speed up the maintenance process and identify faults at an early stage. In this way, this system allows equipment with possible faults to be identified before they can compromise the substation's operation and impact on the energy supply provided by the utility company.

**Keywords:** Thermography; classification; alert.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### Siglas

UTFPR      Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SE          Subestação Elétrica

ROI        Region Of Interest

AGV        Automated Guided Vehicle

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemática .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>11</b>
1.2.1	Objetivo geral.....	11
1.2.2	Objetivos específicos.....	11
<b>1.3</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>14</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>15</b>
	<b>ANEXO A – EXEMPLO DE RELATÓRIO DE ALERTA GERADO PELO CLASSIFICADOR.....</b>	<b>16</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 PROBLEMÁTICA

O monitoramento contínuo de equipamentos de uma subestação elétrica SE, possibilita a manutenção preditiva, responsável por evitar falhas graves de abastecimento de energia. Uma possível técnica, aplicada para este propósito, é a utilização de monitoramento termográfico (CHENG *et al.*, 2022; GITZEL; KAUL; DIX, 2022).

Sistemas elétricos em subestações enfrentam anomalias causadas pela exposição prolongada a condições ambientais adversas, como variações climáticas, poluição e mau contato, o que pode reduzir a eficiência e acelerar o desgaste dos equipamentos (GAO, Si *et al.*, 2022; GAO, Yunlai; TIAN, 2018; SHI *et al.*, 2021). Tornando o monitoramento térmico essencial para a operação segura da rede elétrica (SHI *et al.*, 2021).

A termografia oferece vantagens como visualização contínua da temperatura sem necessidade de contato físico, sendo útil para análises preditivas do estado dos equipamentos. No entanto, a inspeção visual manual, ainda comum nas subestações, é demorada e sujeita a erros devido à fadiga ou inexperiência dos técnicos, além de ser influenciada por condições ambientais e elétricas, o que diminui sua precisão (KUNZ *et al.*, 2022; MAO *et al.*, 2022).

Além disso, hoje com as tecnologias disponíveis, a inspeção termográfica pode ser realizada de forma remota, de forma a minimizar a influência das condições climáticas e de sobrecarga em horários de pico. Para essa implementação, podem ser utilizadas técnicas de segmentação de imagens térmicas. Desta forma, pode-se identificar e delimitar equipamentos superaquecidos, permitindo realizar a extração de dados como temperatura máxima, média e mínima dessas regiões específicas. Esses dados são de extrema relevância para a predição da condição destes equipamentos, possibilitando a identificação de possíveis falhas. Além disso, pode-se criar um banco de dados com o histórico de funcionamento de cada equipamento.

Inúmeros métodos de segmentação de imagens podem ser encontrados na literatura. Estes métodos propõem uma variedade de técnicas para a separação da *Region of Interest* (ROI) em relação ao fundo da imagem (GAO, Si *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2021; TAKEUCHI *et al.*, 2022).

Este trabalho, parte do escopo do projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D-28660528/2020 - Desenvolvimento de Metodologia para Análise Automática de Imagens Térmica, executado pela COPEL-DIS e regulado pela ANEEL, que busca a partir destes dados térmicos criar um classificador para os equipamentos da subestação, associando-os aos dados ambientais e de corrente elétrica no momento da captação da imagem. Além disso, pretende-se criar métricas específicas para cada equipamento para tornar o sistema de alarme mais robusto, permitindo uma resposta mais eficiente a falhas (PARSA; HASSALL; NADERPOUR, 2022; SANTOS, 2006).

Desta forma, o classificador a ser desenvolvido irá utilizar os picos de temperatura

máxima observados nos equipamentos elétricos, além do histórico de temperaturas aferidas durante o acompanhamento do funcionamento dos mesmos. Com isto, pretende-se realizar a análise do comportamento térmico dos equipamentos presentes na subestação, possibilitando um sistema de análise contínua para manutenção preditiva de subestações.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Desenvolver um sistema de alarme e seus classificadores para detecção de falhas em equipamentos elétricos para o projeto de pesquisa e desenvolvimento PD-28660528/2020.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Aplicar métodos de segmentação e extração dos dados de temperatura das imagens cadastradas no banco.
- Gerar métricas de medição das condições dos equipamentos elétricos.
- Analisar métodos de análise estatística dos dados extraídos das imagens.
- Criar algoritmos de verificação e classificação das condições de cada equipamento.
- Fazer uma interface gráfica para visualização dos dados e classificação final de cada equipamento.

## **1.3 Justificativa**

Com o aumento da demanda por energia, o número de subestações tem crescido, enquanto o número de profissionais qualificados para realizar inspeções termográficas permanece limitado. Além do tempo necessário para capturar as imagens, também é preciso considerar o deslocamento das equipes até as subestações, que frequentemente estão localizadas em áreas distantes, e o tempo necessário para análise por especialistas. Além disso, as inspeções termográficas geralmente são programadas, o que significa que nem sempre é possível fazer a inspeção com as condições climáticas adequadas ou observar a subestação no momento de maior sobrecarga, o que pode comprometer a eficácia da inspeção dos equipamentos.

Portanto, embora as inspeções termográficas sejam uma prática estabelecida, a forma como são realizadas tem avançado muito pouco, demandando tempo e mão de obra significativos e ainda sujeita a erros de diagnóstico e dependente da interpretação humana.

O projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D-28660528/2020 - Desenvolvimento de Metodologia para Análise Automática de Imagens Térmica, possuía como objetivo principal o desenvolvimento de um método de análise preditiva dos equipamentos de uma subestação de energia através do uso da termografia. Este projeto possuiu uma série de etapas e desenvolvimentos paralelos que resultaram na plataforma web responsável por registrar e apresentar os dados de todos os equipamentos elétricos da subestação de forma contínua. O

classificador apresentado neste trabalho trata-se de uma das partes do desenvolvimento do projeto, responsável por utilizar todas as outras etapas de desenvolvimento para classificar o equipamento, possibilitando a análise preditiva dos ativos.

O classificador, etapa descrita neste trabalho, ao receber os dados e as imagens de cada equipamento, deve gerar uma classificação final do mesmo para cada aquisição, permitindo a análise e o acompanhamento contínuo desses objetos. Além disso, deve gerar alertas para casos críticos. Por fim, todas estas informações devem ser dispostas em uma plataforma web, ambiente destinado ao acesso e acompanhamento da situação dos equipamentos por parte dos técnicos da COPEL-DIS.

Neste contexto ressalta-se a importância do desenvolvimento do sistema de alarme para a manutenção preditiva de equipamentos de subestações elétricas. Pois com o monitoramento contínuo, somente os equipamentos com temperaturas anômalas devem acionar o alarme que indicaria a necessidade de uma análise pelos técnicos em termografia. Ao se confirmar a falha, a equipe se dirige à subestação para efetuar a troca ou correção no equipamento, evitando falhas e quedas de energia.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

O trabalho foi estruturado apresentando 4 capítulos.

Inicialmente, é apresentada a introdução do trabalho, mostrando a motivação, justificativa e objetivos do trabalho. Após isso, apresenta-se a metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho. Os resultados são apresentados na forma de um artigo que descreve o desenvolvimento do sistema de alarme. Por fim, a conclusão e as referências apresentam a análise final dos resultados obtidos, assim como as referências utilizadas como base para desenvolvimento do trabalho.

## **2 RESULTADOS**

Esse capítulo apresenta o artigo que descreve o desenvolvimento do sistema de alarme.

# Sistema de Alerta para Detecção de Falhas em Equipamentos Elétricos

Andrade J. T. Erick, Coninck C. P. Jose, Romaneli F. R. Eduardo, Ulbricht Leandra

*Resumo*—Em uma Subestação de Energia Elétrica (SE), as falhas em seus equipamentos estão frequentemente associadas a anomalias térmicas, por isso a inspeção termográfica faz parte dos requisitos legais de manutenção e monitoramento das instalações em alguns países. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de alerta em tempo real para a detecção de falhas em equipamentos elétricos em uma subestação aberta. Para isso, primeiramente, foram captadas imagens termográficas dos equipamentos durante seu funcionamento e dados ambientais de uma estação solarimétrica, instalada na subestação analisada. Através da utilização de modelos de vetores autorregressivos, foram determinados os principais fatores atmosféricos que influenciaram a temperatura de operação dos equipamentos. Com isto, foram utilizados os modelos de cartas de controle, principalmente o método de média móvel exponencialmente ponderada EWMA, para definir limites superiores de temperaturas aceitáveis de operação dos equipamentos da subestação. Com a análise estatística realizada, este trabalho desenvolveu um robusto sistema de classificadores, o qual pode gerar alarmes utilizando métricas a partir desse histórico de funcionamento referente a cada equipamento. Existem 5 níveis de classificação de forma a racionalizar o número de alarmes, eliminando alarmes desnecessários ou repetidos. O sistema de classificadores elaborado visa melhorar as respostas do operador do sistema às situações em que o processo detecta desvios e/ou eventos anormais na subestação.

**Palavras-Chave**—Termografia, Classificação, Alerta, Subestação aberta, Detecção de falha.

## I. INTRODUÇÃO

O monitoramento da condição de equipamentos elétricos permite detectar falhas antes de uma falha catastrófica. Assim, entre os métodos de detecção de falhas sem contato e de utilização em larga escala, está o monitoramento da temperatura dos equipamentos através de câmeras infravermelhas [1][4].

Sistemas são propensos a anomalias com diferentes níveis de gravidade, e estas vão se apresentar porque os equipamentos de uma subestação ficam muito tempo expostos à natureza sob diferentes condições meteorológicas, mau contato devido a poluição acumulada ou força de aperto insuficiente [2][3][14]. Essas anomalias reduzirão a eficiência da conversão de energia (alterando a resistência elétrica) e aceleram o desgaste dos sistemas [1]. Assim, mesmo que a corrente elétrica permaneça a mesma, essas condições podem

levar a falha, que se manifesta sob a forma de aquecimento nos equipamentos. Desta forma, a câmera infravermelha vai detectar essa anomalia como um ponto quente [2][4]. Por este motivo, o acompanhamento das mudanças de temperatura dos equipamentos de uma subestação desempenha um papel importante na manutenção da operação normal da rede elétrica [14].

A utilização da termografia para a análise de equipamentos elétricos presentes em SE apresenta inúmeras vantagens, uma vez que este método possibilita a visualização das temperaturas de cada equipamento durante seu funcionamento, seja durante o dia ou noite; possui ampla faixa de detecção; não necessita de contato. Assim, sua utilização de forma contínua pode subsidiar análises preditivas do estado destes equipamentos [2][6][14][15].

Contudo, ainda hoje, observadores inspecionam visualmente a infraestrutura de uma SE, utilizando câmeras portáteis para a detecção de anomalias que possam levar a uma falha. Este método consome muito tempo e devido ao grande número de equipamentos, pode levar a erros de diagnóstico, devido a inexperiência ou fadiga do técnico que está realizando o trabalho. Desta forma, a necessidade de manutenção e detecção precoce de falhas tornou-se uma obrigação e as tecnologias de sensoriamento remoto podem ajudar a automatizar ou pelo menos documentar este processo [9][14].

Além disso, a análise visual pode trazer erros de interpretação, uma vez que condições ambientais e de corrente interferem nas medidas realizadas, diminuindo a acurácia do método. Esse problema também persiste, mesmo com a automatização, quando esta ocorre com monitoramento na forma de streaming, sem informações térmicas prévias para criar um modelo de detecção eficaz [7][8].

Neste contexto, este trabalho procura desenvolver uma forma de analisar e classificar os equipamentos presentes em uma subestação aberta, a partir de dados de corrente de carga e ambientais, em diferentes horários de demanda.

## II. DESENVOLVIMENTO

O trabalho foi realizado em uma subestação aberta na cidade de Curitiba-PR, vinculada a empresa de distribuição de energia COPEL-DIS. Esse sistema de alarmes foi desenvolvido vinculado a um projeto maior que desenvolveu uma metodologia para análise automática de imagens térmicas cujas etapas anteriores foram apresentadas em [5][7][8][12] e pode ser visualizado na Fig 1.

O sistema basicamente recebe como entrada um arquivo da

imagem térmica e RGB do equipamento captada pelo sistema de aquisição automático. Com estes arquivos, o sistema pode identificar quais equipamentos estão presentes na imagem, assim como suas temperaturas, as quais são utilizadas para analisar o estado do equipamento, podendo gerar como saída do sistema um relatório de condição do equipamento para o técnico responsável.

processamento para identificação de cada equipamento e sua respectiva geolocalização [12].

### B. Pós processamento

As imagens eram armazenadas na base de dados do sistema e passavam por um processo de segmentação pela rede neural You Only Look Once (YOLO) treinada e aplicada para

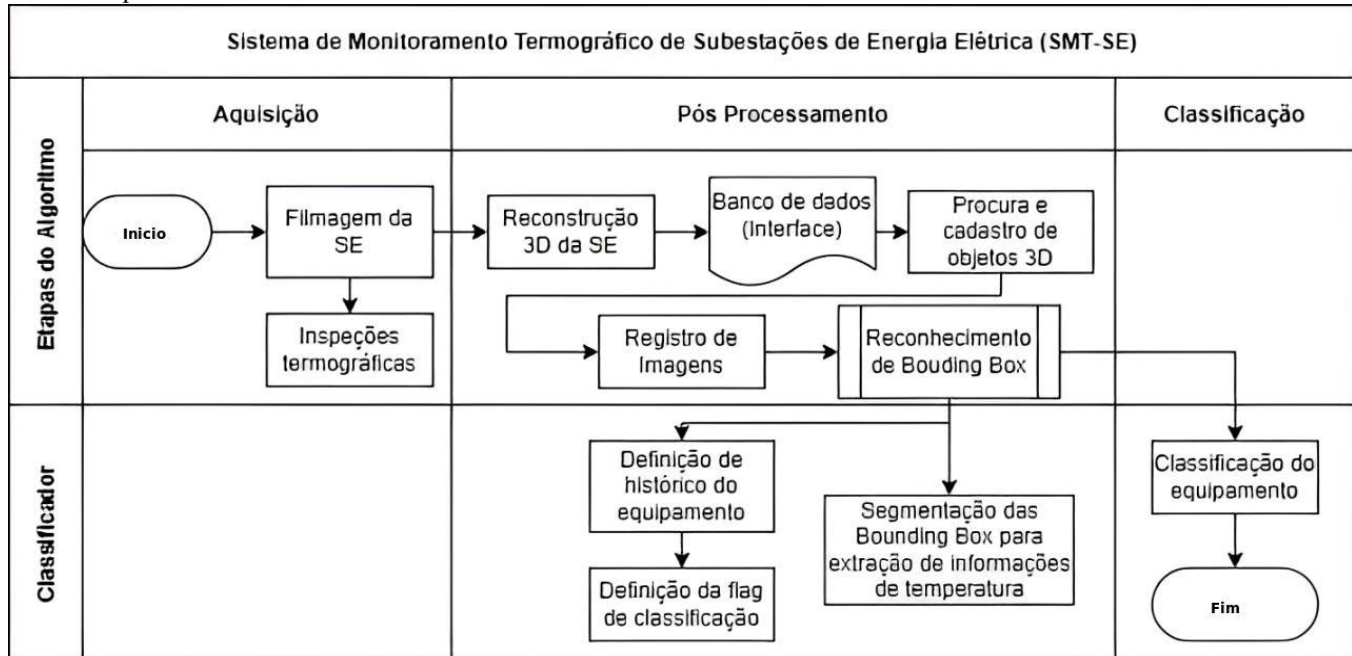


Fig. 1. Fluxograma de etapas do algoritmo do Sistema de Monitoramento Termográfico de Subestações de Energia Elétrica (SMT-SE).

### A. Aquisições

A aquisição de dados ambientais foi realizada através de uma estação solarimétrica instalada na SE. As imagens ópticas e termográficas foram captadas a partir de câmeras termográficas (FLIR A700-EST): fixas (captação contínua – 25,541 imagens); e pelo Automated Guided Vehicle – AGV (23,149 imagens) que circulava pela subestação fazendo uma rota pré-estabelecida, usando sempre os mesmos ângulos, em três períodos: de manhã, entre 8h:00m e 10h:00m; de tarde, entre 13h:00m e 17h:00m; de noite, entre 20h:00m e 21h:00m (Fig 2).



Fig. 2. AGV- Automated Guided Vehicle Fonte: Autor (2024)

Todos os dados adquiridos eram transmitidos para um servidor remoto, onde eram aplicados os algoritmos de pós

identificar as 15 classes de equipamentos presentes nesta subestação. Assim, em uma mesma imagem óptica cada equipamento era isolado (Fig 3) a partir da aplicação da rede neural desenvolvida [5].

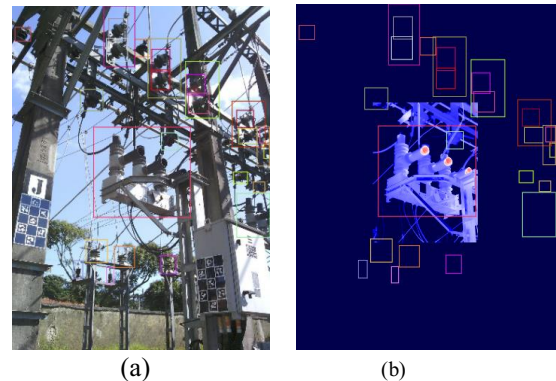


Fig. 3. Caixas delimitadoras que faziam a segmentação dos diferentes equipamentos presentes em uma imagem (a) Visualização da imagem RGB da câmera. (b) Visualização da correspondência IR da câmera. Fonte: Autor (2024).

Após a segmentação óptica, era realizada a captação das informações térmicas referentes a cada equipamento conforme a Fig. 4. Estas informações foram utilizadas na construção dos classificadores para o alarme.

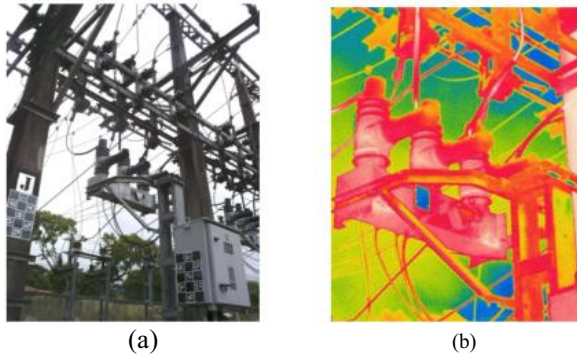


Fig. 4. (a) Arquivo original (termograma – direita). (b) imagem óptica extraída (esquerda). Fonte: Autor (2024).

Após a extração das informações térmicas do equipamento, realizado através da segmentação dos objetos, era realizado o cadastro e registro de cada equipamento. Nesta etapa, além da imagem, eram extraídos e armazenados os dados referentes a geolocalização e temperatura máxima, mínima e média pixel a pixel de cada equipamento, bem como o horário de captação.

A partir destes dados, foi criada uma interface gráfica, com a listagem das aquisições realizadas pelo sistema, apresentada na Fig 5. O classificador desenvolvido inicia sua execução verificando todos os novos equipamentos cadastrados. Todos os equipamentos possuem uma flag para informar se aquele determinado objeto, naquela determinada imagem, já foi classificado ou não. Caso o objeto não tenha a flag que indica que ele já foi classificado, ele é colocado em uma lista para posteriormente ser processado pelo classificador.

**Inspeções feitas**

Id	Nome	Data	Processamento
2416	2022-12-08_peri..._1	09/12/2022	10/12/2022 17:10
2409	2022-12-08_peri..._1	08/12/2022	10/12/2022 16:50
2411	2022-12-08_peri..._2	08/12/2022	10/12/2022 16:55
2410	2022-12-08_peri..._4	08/12/2022	10/12/2022 16:53
2413	2022-12-08_peri..._3	08/12/2022	10/12/2022 17:01
2412	2022-12-07_peri..._4	07/12/2022	10/12/2022 16:58
2415	2022-12-07_peri..._3	07/12/2022	10/12/2022 17:07
2417	2022-12-07_peri..._2	07/12/2022	10/12/2022 17:13
2414	2022-12-07_peri..._3	07/12/2022	10/12/2022 17:04
2357	2022-12-06_peri..._4	06/12/2022	08/12/2022 12:14
2386	2022-12-06_peri..._2	06/12/2022	08/12/2022 14:41
2386	fixa_2022-12-06	06/12/2022	08/12/2022 14:46
2406	2022-12-06_peri..._1	06/12/2022	08/12/2022 15:20
2402	2022-12-05_peri..._4	05/12/2022	08/12/2022 15:01

Fig. 5. Listagem de aquisições realizadas pelo sistema de classificação. Fonte: Autor (2024).

O primeiro passo para a análise desta lista é definir se o equipamento está submetido a passagem de corrente ou não. Os equipamentos que conduzem corrente possuem seus valores térmicos fortemente relacionados ao nível de potência que está sendo fornecida pela subestação no momento do registro de suas temperaturas, além da influência das condições ambientais.

Após isso, o cálculo de cada métrica é realizado para cada equipamento da lista, bem como os seus índices de probabilidade de possíveis falhas. Assim, foram definidos valores entre 0.0 e 1.0, sendo 0.0 o valor de menor possibilidade de falha e 1.0 o valor correspondente a máxima possibilidade de falha no equipamento.

Este cálculo é responsável por definir o nível de atenção que será sinalizado para os técnicos responsáveis. Além disso,

o sistema possui uma tela para a listagem de todos os equipamentos que foram classificados com o alerta, facilitando o acesso do técnico às informações específicas do equipamento que gerou o alerta, como seus dados de temperatura, imagens cadastradas e localização na SE, como demonstrado nas Fig. 6 e 7.

**Inspeções feitas** Alertas

**Lista de Alertas**

Nível do Alerta: Alerta Vermelho

Classe	Objeto	Data	Nível	Temp. Máxima
Relógio de	52-45	Oct. 1, 2022, 7 p.m.	Alerta Vermelho	82.48°C
Chave Seccionadora Lamina (Fechada)	29-08- C	May 21, 2022, 9:15 a.m.	Alerta Vermelho	150.00°C

Fig. 6. Listagem alertas categorizados pelo classificador. Fonte: Autor (2024).

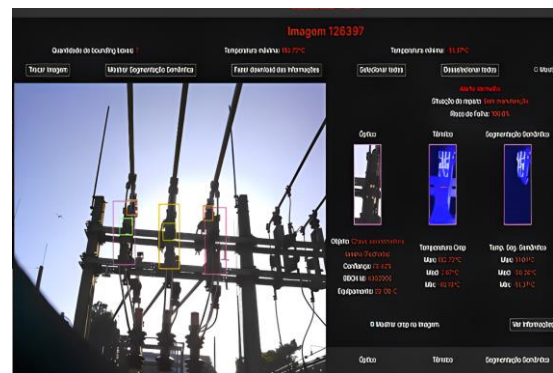


Fig. 7. Tela de informações do equipamento que gerou o alarme. Fonte: Autor (2024).

### C. Análise Estatística dos Dados

Foi utilizada uma distribuição gaussiana para delimitar a região de interesse do equipamento de estudo. Como resultado, foram encontrados os valores de temperatura máxima para cada equipamento monitorado.

As datas e horários das aquisições termográficas foram correlacionadas com os dados: da estação solarimétrica (temperatura ambiente, velocidade do vento, umidade e incidência solar) com os dados de corrente fornecidos pela companhia de energia [7].

Após a formatação dos dados, eles foram transformados em séries temporais. Após o pré-processamento foram aplicados filtros lineares para redução de ruídos com o objetivo de corrigir as distorções e reduzir o efeito aleatório incluído na série.. Em seguida, foi aplicado o Filtro de Kalman em todas as variáveis apresentadas anteriormente para identificar a influência de cada variável na temperatura máxima do objeto. Além disso o filtro busca melhorar a coesão dos dados para que o EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) possa obter desempenho máximo. O EWMA foi utilizado para definição do *Upper Control Limit* (UCL) e *Lower Control Limit* (LCL) para cada equipamento monitorado.

### D. Métricas de Classificação

As métricas de classificação se basearam no estudo dos equipamentos e suas respectivas conexões que possuísem

comportamentos diferente do esperado, realizando uma análise dos principais fatores que influenciavam na condição dos equipamentos [7]. Todos os algoritmos utilizados foram programados em linguagem Python, usando os dados presentes na base de dados referente a cada imagem foi possível aplicar métodos responsáveis por gerar a classificação dos equipamentos para cada métrica. O trabalho de [8] demonstrou a existência da sincronização de fase entre o calor emitido pela corrente da chave seccionadora e a temperatura ambiente usando a transformada de Hilbert. A temperatura do ar por si só exibe sincronia de fase moderada. Esse fato se deve ao aumento da demanda de corrente em dias com maior temperatura ambiente, vide Fig 8.

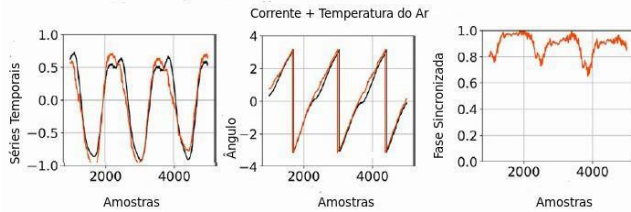


Fig. 8. Listagem de aquisições realizadas pelo sistema de classificação. Fonte: Autor (2024).

As máximas das sincronizações de fase referem-se ao período diurno/noturno (em torno do horário de 12h02m e 19h07m) enquanto as mínimas estão nas madrugadas (em torno das 03h46m).

Sob esse aspecto, o modelo da temperatura coletada pode ser descrito como sendo uma função da corrente ao quadrado e da temperatura ambiente dado aproximadamente por (1), sendo  $T_{Med}$  a temperatura medida pela câmera térmica e  $T_{amb}$  a temperatura ambiente.

$$T_{resposta} T_{Med} - T_{amb} (1)$$

A temperatura resposta é a variável a ser controlada pelas cartas EWMA, cujo modelo é dado por uma média móvel exponencialmente ponderada (2), onde através das breves substituições temporais sob recursividade obtemos (3) para  $Z = T_{resposta}$  para  $\lambda = 0.2$ , conforme sugerido na literatura [10]. A equação (3) é responsável por gerar o valor de limite superior de temperatura de funcionamento dos equipamentos analisados.

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) z_{i-1} - 1 (2)$$

$$LSC = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2 - \lambda) [1 - (1 - \lambda)^{2i}]}} (3)$$

Dessa forma, a carta de controle se refere a diferença da temperatura de demanda em relação à temperatura ambiente. De fato, segundo [7] para um ajuste VAR (modelos VAR para análise das séries temporais múltiplas) o impacto do calor emitido apenas por  $I_{(abc)}^2$  é de  $R^2=32,72\%$  e sobe para  $R^2=80,57\%$  quando é incluída a temperatura ambiente  $T_{amb}$ . Isso se deve à sincronização efetiva como discutido na Fig 8. Ou seja, parte do alarme refere-se à sincronização demanda/carga à temperatura ambiente.

Isso foi importante para que não fossem gerados alarmes espúrios e irrelevantes. Dessa forma, a racionalização de alarmes visa reduzir o número de alarmes apresentados em

situações anormais, onde condições ambientais influenciam diretamente na temperatura dos equipamentos, seguindo algumas práticas como eliminar alarmes desnecessários ou repetidos para evitar sobrecarga do operador [13].

A métrica referente à temperatura máxima foi desenvolvida para verificar se esta possui um valor suficiente para o acionamento imediato de alertas, independentemente do cálculo de outras métricas, comparando o valor da temperatura máxima encontrada com os limites propostos pela empresa de distribuição de energia, e os limites apresentados pela American Institute of Electrical Engineers (AIEE). A métrica referente a temperatura máxima possuía maior peso na classificação, sendo que para valores acima do limite, o classificador deve ser capaz de gerar alertas independentemente das outras métricas analisadas para o equipamento.

Outra métrica com capacidade de geração de alertas independentemente do resultado da classificação de outras variáveis foi a métrica de análise do limite superior da carta de controle EWMA. Nesta métrica, o valor de temperatura máxima do equipamento era comparado com o limite superior gerado pela carta de controle para as amostras referentes ao equipamento analisado e, em caso de valor de temperatura máxima maior que o limite superior, o equipamento deveria ser classificado em estado de alerta.

A métrica referente à corrente histórica dos equipamentos se baseou na análise das últimas cinco aquisições do respectivo objeto, que ocorriam 3 vezes ao dia, como citado anteriormente, considerando o seu exato período de aquisição, para garantir a minimização da influência de fatores externos, como as condições atmosféricas discutidas anteriormente.

Além destas, duas outras métricas foram definidas com base na análise dos históricos de temperatura (considerando o horário do dia, a classe e/ou a fase em que o equipamento está conectado).

Dessa forma, é possível realizar uma análise ampla e fundamentada, verificando as diferenças das temperaturas analisadas com seus respectivos históricos para cada equipamento monitorado (considerando todos os objetos de sua mesma classe e dos objetos que estão conectados na mesma fase analisada).

#### E. Fluxograma Algoritmo

Dessa forma, o algoritmo de classificação, utilizando os métodos e métricas descritos, possui uma execução como a descrita na Fig 9. Nesta figura temos o início da classificação, com a definição da classe do equipamento entre as 15 classes analisadas, verificando se o equipamento processa ou não corrente. As 15 classes processadas podem ser visualizadas na Tabela I abaixo, assim como o seu número de aparições na base de dados usada, estes equipamentos representam 99% dos equipamentos encontrados em uma subestação de energia da concessionária onde o projeto foi aplicado. A partir disso, são definidas as métricas de classificação aplicadas ao determinado objeto analisado, gerando seu nível de classificação final, onde alertas podem ser gerados em caso de predição de possíveis falhas a partir da classificação.

### III. RESULTADOS

O classificador desenvolvido neste trabalho utiliza picos de temperatura máxima presentes no histórico dos equipamentos elétricos, além de temperaturas aferidas durante o acompanhamento do funcionamento destes equipamentos. A análise foi realizada de acordo com a classe ou a fase em que o equipamento estava ligado na subestação.

TABELA I

Classe	Instâncias
chave seccionadora lâmina aberta	1117
chave seccionadora lâmina fechada	26068
chave seccionadora <i>tandem</i> aberta	4263
chave seccionadora <i>tandem</i> fechada	5402
disjuntor	4803
fusível	1925
isolador disco de vidro	13803
isolador pino de porcelana	114578
mufra	8128
para-raio	8788
religador	8059
transformador	2391
transformador de corrente (TC)	9293
transformador de potencial (TP)	2904
chave seccionadora tripolar	2044

#### A. Determinação da contribuição de cada variável ambiental na temperatura máxima dos equipamentos

Com base nos dados do Filtro de Kalman, foi proposto o uso de vetores autorregressivos para identificar a participação de cada variável na temperatura máxima do objeto. E os resultados são apresentados na Tabela II.

Ao se considerar o efeito Joule, a corrente elétrica contribuiu com 20,54% da temperatura máxima, enquanto a temperatura ambiente contribuiu com 31,80%, como mostrado (Tabela II). Ambos foram responsáveis por metade da contribuição da temperatura final observada nos termogramas dos equipamentos analisados.

#### B. Aplicação da Carta de Controle

As cartas clássicas de controle de processo são baseadas na premissa de que as observações são independentes. No entanto, mesmo uma pequena autocorrelação entre as observações pode fazer com que a carta de controle falhe, perdendo sua funcionalidade. Por outro lado, as séries temporais são caracterizadas pela dependência entre as observações atuais e as anteriores, tornando a autocorrelação uma parte inerente do processo.

TABELA II

INTERCEPT O	TEMPERATUR A AMBIENTE	CORRENT E AO QUADRAD O	INCIDÊNCI A SOLAR	VELOCIDAD E DO VENTO	UMIDAD E
12,60%	31,80%	20,54%	7,39%	-16,84%	-10,83%

FONTE: AUTOR (2024)

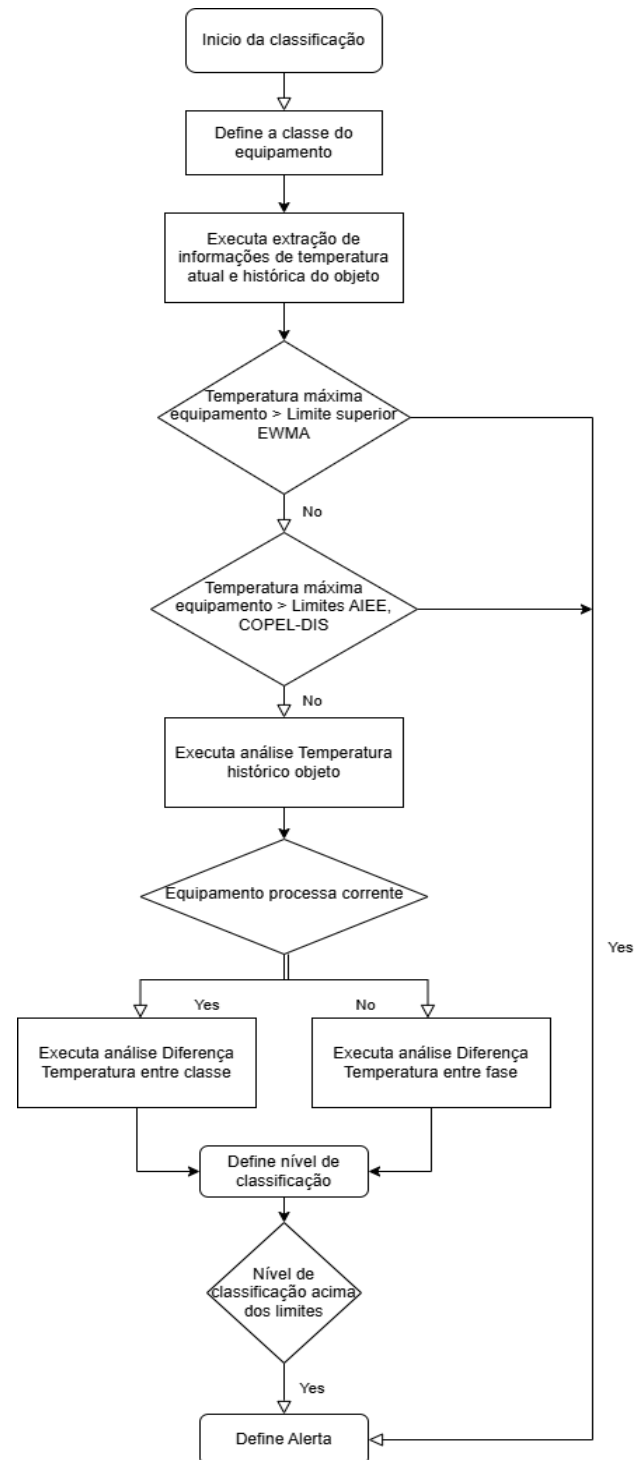


Fig. 9. Flow chart classificador. Fonte: Autor (2024).

Para garantir a independência das observações, é necessário definir amostragens por horário, como, por exemplo, todas as amostras coletadas às 8h00m de dias consecutivos, que podem ser usadas na construção da carta de controle, garantindo a independência das observações.

#### C. EWMA (Exponentially Weighted Moving Average)

Para aplicar as cartas de EWMA em séries fixas, foram utilizados parâmetros de  $\lambda = 0,2$ . Utilizando as séries obtidas apenas com o uso do filtro de Kalman [8], foi possível analisar quando um aumento de temperatura no objeto seria detectado.

Foram realizados testes, como por exemplo o apresentado na Fig 11, onde foram usados dados dos 14 dias anteriores a coleta do termograma para criar o limite superior e, em seguida, os dados dos 14 dias seguidos foram utilizados, foram utilizados para verificar se um registro de aumento de temperatura seria detectado ou não. No vigésimo segundo dia, foi detectada uma temperatura acima do limite superior.

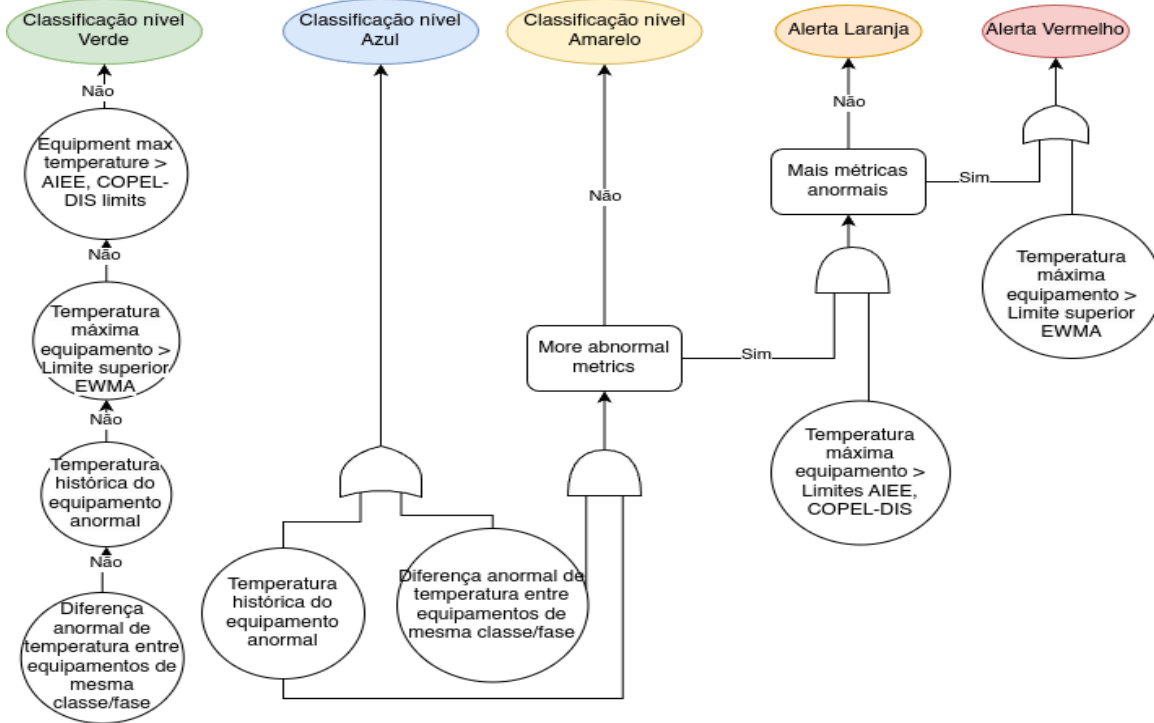


Fig. 10. Definição dos níveis de classificação. Fonte: Autor (2024).

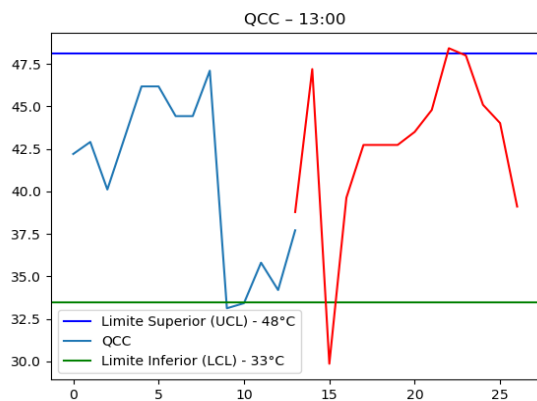


Fig. 11. EWMA Chave Seccionadora 29-40 13:00 horas. Fonte: Autor (2024).

Após determinar o grau de interferência das variáveis exógenas (atmosféricas) na coleta de dados térmicos, foi aplicada a carta de controle pelo modelo de média móvel ponderada exponencialmente (EWMA).

A utilização de cartas de controle para horários definidos foi eficaz na determinação dos pontos extremos nas séries temporais. Dessa forma, foram definidos os limites superiores e inferiores da carta de controle garantindo a segurança do sistema de alarme.

#### D. Níveis de Classificação

Foram criados cinco níveis de classificação possíveis para cada equipamento, os quais foram definidos de acordo com o cálculo das métricas referentes a sua classe e fase. Cada um dos níveis possui um limite para que o valor resultante do cálculo das métricas possa ser relacionado, permitindo uma maior liberdade de análise. Cada nível de classificação possui

sua relação com as métricas de classificação como demonstrado na Fig 10. Os valores relacionados a cada métrica devem ser definidos pelo operador, a partir da definição da importância de cada métrica para o sistema que irá se aplicar o classificador, não possuindo uma regra ou modelagem específica para definição desses valores limites, entretanto, métricas sensíveis devem ser capazes de gerar o alerta para os equipamentos sem a intervenção de outras métricas de menor impacto. Este cuidado é importante para evitar que valores exatos transformem a classificação em uma tarefa binária, o que poderia dificultar uma análise mais complexa de determinados equipamentos nas diferentes situações.

O primeiro nível de classificação, que demonstra menor perigo para os equipamentos elétricos, foi o nível caracterizado como “Verde”.

Este nível foi atribuído aos equipamentos onde nenhuma das métricas utilizadas na análise obteve um valor acima das medidas padrões do comportamento esperado para o equipamento, a partir dos valores definidos como normais pela própria distribuidora de energia. Sendo assim, este nível é o nível correspondente ao correto funcionamento do equipamento, como demonstrado no exemplo da Fig 12.



Fig. 12. Exemplo nível de classificação verde. Fonte: Autor (2024).

Em ordem crescente de índice de possível falha, o próximo nível de classificação foi caracterizado como “Azul”, este nível tem como objetivo sinalizar equipamentos que possuem uma métrica de menor peso (Temperatura histórica, diferença de temperatura entre fases/classe), acima dos valores padrões definidos para ele.

Dessa forma, essa métrica acima dos níveis padrões, pode ser ocasionada por uma falha em outro equipamento de sua mesma classe ou fase, ou então por um valor anômalo encontrado nos dados do equipamento. Assim, a falha pode não estar relacionada com a integridade do equipamento de fato. Como demonstrado na Fig 13, o equipamento possui uma temperatura máxima e temperatura média baixa.

Isso pode ocorrer, por exemplo, quando os equipamentos de mesma classe ou fase podem estar operando sob uma alta demanda dos consumidores (maior corrente), gerando um grau de aquecimento mais elevado que o padrão.



Fig. 13. Exemplo nível de classificação azul. Fonte: Autor (2024).

O nível caracterizado como “Amarelo” foi o nível atribuído aos equipamentos que possuíam mais de uma métrica de menor relevância (Temperatura histórica, diferença de temperatura entre fases/classe) acima dos índices padrões para o equipamento em questão.

Sendo assim, a sua análise passa a ser definida como um equipamento que deve ser mantido sob cuidado, pois pode se tratar de um possível alerta. Ou seja, a partir do nível “Amarelo”, os equipamentos podem ser tratados como equipamentos passíveis de possíveis falhas, aumentando o cuidado com o seu acompanhamento.

A Fig 14 demonstra um equipamento classificado como alerta amarelo, nele é possível identificar uma temperatura próxima de 40°C, em um horário de grande demanda de energia. Como se conhece o horário de captação desta informação, o comportamento ao longo do tempo desse objeto pode demonstrar um leve aquecimento neste horário específico.

Contudo, não se pode descartar o início da captação de um comportamento atípico quando sua temperatura é comparada

com outras obtidas nos equipamentos de mesma classe e/ou de outras fases. Por isso, ele será acompanhado com mais cuidado, recebendo este nível de classificação.



Fig. 14. Exemplo nível de classificação amarelo. Fonte: Autor (2024).

O nível “Laranja”, classificado como primeiro nível de alerta, foi atribuído aos equipamentos que possuem duas ou mais métricas de menor peso acima dos valores padrões e a métrica de análise de temperatura máxima com valor minimamente maior do que o limite de temperatura para o equipamento definido pela COPEL-DIS, de acordo com sua própria documentação de análise de funcionamento para cada equipamento.

Este nível envia alertas para que os técnicos responsáveis, para que estes possam analisar de forma longitudinal o comportamento térmico deste equipamento, para confirmar ou não a existência de uma possível falha (como demonstrado na Fig 15).



Fig. 15. Exemplo nível de alerta laranja. Fonte: Autor (2024).

Por fim, o último nível caracterizado como “Vermelho”, foi relacionado aos equipamentos que possuíam todas as métricas acima dos valores padrões, ou então com valores de temperatura máxima acima dos limites definidos pela carta de controle EWMA, sinalizando um alerta urgente, que será encaminhado como prioridade aos técnicos responsáveis.

No caso da Fig 16, é possível verificar um equipamento com temperatura acima dos 50°C, temperatura limite de funcionamento ideal da maioria dos equipamentos da subestação.



Fig. 16. Exemplo nível de alerta vermelho. Fonte: Autor (2024).

Quando estes possíveis alertas são identificados, a exportação dos dados referentes ao equipamento é realizada e

suas *flags* de sinalização de classificação são alteradas para sinalizar que aquele equipamento já foi classificado, armazenando todas as informações definidas pela classificação no banco de dados da aplicação Web.

Além do nível de alerta gerado o operador recebe informações simplificadas para a rápida identificação do equipamento: classe do objeto, o identificador do objeto (caso seja necessária sua troca), a data de aquisição da imagem que gerou o alerta, a sua temperatura máxima do equipamento e um link para a página de detalhes. Nessa página o operador pode visualizar a imagem do objeto que disparou o alarme, permitindo assim a total visualização das informações térmicas por parte do usuário.

#### E. Testes de funcionamento da classificação

Como forma de execução de testes do classificador desenvolvido, os algoritmos de classificação foram aplicados ao sistema (SMT-SE), analisando todas as imagens presentes e as novas aquisições registradas pelo projeto. Os métodos de comparação dos resultados da classificação foram corroborados a partir da definição de alertas para equipamentos que estavam sendo acompanhados pelos técnicos da SE. Dessa forma, o classificador foi aplicado em ambiente de funcionamento real, sendo capaz de prever possíveis falhas em equipamentos elétricos presentes na SE.

#### IV. CONCLUSÃO

A partir das tecnologias de sensoriamento remoto hoje disponíveis foi criado um sistema de monitoramento automático de uma SE a partir de imagens termográficas. O processo, hoje manual, foi automatizado identificando cada equipamento e criando um histórico de funcionamento para cada equipamento acompanhado.

Dessa forma, o artigo apresenta o desenvolvimento de uma das entregas do projeto. No geral, foi possível desenvolver e entregar um sistema de aquisição de imagens térmicas dos equipamentos da subestação com o AGV. Este equipamento que possui rotas pré-definidas e horário de aquisição definidos possibilita a extração e análise contínua dos equipamentos da subestação pelo sistema desenvolvido.

Além disso, foi desenvolvido um sistema de reconstrução 3D da subestação que possibilita a identificação e localização espacial do equipamento que se está analisando nos processos do sistema, permitindo uma análise precisa e orientada, ponto extremamente relevante uma vez que existem vários equipamentos iguais na estação.

O classificador e gerador de alertas aqui apresentado foi a etapa final de desenvolvimento do projeto. Com o classificador foi possível analisar e quantificar o estado de funcionamento de cada equipamento da subestação, possibilitando a análise preditiva e a automatização de um processo que ocorre a partir de técnicos qualificados pela concessionária vinculada a este projeto. Com este classificador, o técnico apenas recebe como saída do processo automatizado pelo sistema, um relatório demonstrando as análises gráficas do equipamento, a localização do equipamento e a condição atual de funcionamento do equipamento que gerou o alerta, automatizando

completamente o processo.

A partir desse acompanhamento, foi desenvolvido um robusto sistema de classificadores (que pode gerar alarmes – a partir do nível laranja). O sistema de classificadores utiliza métricas a partir não só do histórico de funcionamento de cada equipamento, mas também comparando este histórico com todos os objetos de sua mesma classe e com os objetos que estão conectados na mesma fase do equipamento analisado.

O sistema de classificadores elaborado visa melhorar as respostas do operador do sistema às situações em que o processo detecta desvios e/ou eventos anormais na subestação. Assim, a racionalização dos alarmes reduz o número de alertas apresentados, eliminando alarmes desnecessários ou repetidos para evitar sobrecarga do operador.

Dessa forma, o processo de análise e classificação dos desvios de funcionamento cumpre a predição de possíveis falhas, buscando aumentar a vida útil dos equipamentos elétricos e diminuir a possibilidade de falhas catastróficas em equipamentos que prejudiquem o funcionamento da subestação, impossibilitando-a de realizar sua função, ao gerar a interrupção do fornecimento de energia para as unidades consumidoras.

#### V. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada com recursos de P&D fornecidos pela COPEL-DIS e regulamentada pela ANEEL, concessão número PD-2866-0528/2020.

#### VI. REFERÊNCIAS

*Basic format for periodicals:*

- [1] CHENG, C.; LIU, M.; YI, H.; RAN, G.; CHEN, H. Slow Manifold Analysis-Based Detection of Hot Spots in Photovoltaic Systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 71, p. 1–10, 2022. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3187700>.
- [2] GAO, S.; RUAN, Y.; HONG, Q.; YIN, D. Infrared Thermal Image Fault Detection based on YOLOV3-L. 2022. **2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications, ICAICA 2022** [...]. Dalian -China: IEEE, 2022. p. 175–178. <https://doi.org/10.1109/ICAICA54878.2022.9844534>.
- [3] GAO, Y.; TIAN, G. Y. Emissivity correction using spectrum correlation of infrared and visible images. **Sensors and Actuators, A: Physical**, vol. 270, p. 8–17, 2018. DOI 10.1016/j.sna.2017.12.027. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2017.12.027>.
- [4] GITZEL, R.; KAUL, H.; DIX, M. Maps of Infrared Images to Detect Equipment Faults. 2022. **Proceedings - IEEE 8th International Conference on Big Data Computing Service and Applications, BigData Service 2022** [...]. Newark/CA-USA: [s. n.], 2022. p. 167–172. <https://doi.org/10.1109/BigDataService55688.2022.00034>.
- [5] GOMES, A. A. P.; GANACIM, F. I. S.; MAGRIN, F. G. S.; BOBKO, N.; FERNANDES, L. G.; POMBEIRO, A.; ROMANELI, E. F. R. A Semantically Annotated 15-Class Ground Truth Dataset for Substation Equipment to Train Semantic Segmentation Models. **Data**, v. 8, p. 118, 2023.
- [6] HE, M.; QIN, L.; DENG, X.; LIU, K. MFI-YOLO: Multi-Fault Insulator Detection Based on an Improved YOLOv8. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 39, no. 1, pp. 168–179, Feb. 2024, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3328178.
- [7] JUNIOR, O. S.; CONINCK, J. C. P.; MAGRIN, F. G. S.; GANACIM, F. I. S.; POMBEIRO, A.; FERNANDES, L. G.; ROMANELI, E. F. R. Impacts of Atmospheric and Load Conditions on the Power Substation Equipment Temperature Model. **Energies**, v. 16, p. 4295, 2023.
- [8] JUNIOR, O. S.; CONINCK, J. C. P.; MAGRIN, F. G. S.; GANACIM, F. I. S. Predictive Maintenance in Electrical Power Systems: Thermography and Statistical Methods for Phase Synchronization

- Analysis in Disconnected Substations. **Electric Power Systems Research**, v. 232. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110429>.
- [9] KUNZ, N.; KANAND, T.; BOCHMANN, P.; KEMPER, G. Multi Sensor and Smart Gimbal for Enhanced Powerline Monitoring on Helicopter and Uavs. 43., 2022. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives** [...]. Nice-France: [s. n.], 2022. vol. 43, p. 383–388. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-383-2022>.
- [10] MAO, W.; SHI, H.; WANG, G.; LIANG, X. Unsupervised Deep Multitask Anomaly Detection With Robust Alarm Strategy for Online Evaluation of Bearing Early Fault Occurrence. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 71, p. 1–13, 2022. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3200092>.
- [11] MONTEGOMMERY, D. C. Introduction to Statistical Quality Control. Academic internet publishers publication, 2007.
- [12] SANSON, O. J. N.; FERNANDES, L. G.; BADIN, A. A.; SANTOS, W. E. D.; ROMANELI, E. F. R. System for Acquisition and Transmission of Thermal to Monitor Equipment of an electrical Substation. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 8, p. 14750-01, 2022.
- [13] PARSA, K.; HASSALL, M.; NADERPOUR, M. Enhancing Alarm Prioritization in the Alarm Management Lifecycle. **IEEE Access**, vol. 10, p. 99–111, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137865>.
- [14] SHI, Z.; ZHAO, Y.; LIU, Z.; ZHANG, Y.; MA, L. Diagnosis and Classification Decision Analysis of Overheating Defects of Substation Equipment Based on Infrared Detection Technology. **Scientific Programming**, vol. 2021, p. 1–13, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/3356044>.
- [15] TAKEUCHI, R. de O. A.; ULBRICHT, L.; MAGRIN, F. G. S.; GANACIM, F. I. S.; FERNANDES, L. G.; ROMANELI, E. F. R.; JUNIOR, J. U. Comparison of Traditional Image Segmentation Methods Applied to Thermograms of Power Substation Equipment. **Energies**, vol. 15, no. 20, p. 1–17, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15207477>.

### 3 CONCLUSÃO

O sistema de alerta desenvolvido representa uma pequena parte da metodologia de análise automática de imagens termográficas para aprimorar as inspeções em equipamentos de subestações de energia elétrica na área de atuação da COPEL-DIS. O projeto como um todo envolveu o desenvolvimento de algoritmos que automatizaram todo o processo de inspeção, desde a captura das imagens térmicas até a identificação e localização precisa dos equipamentos com temperaturas anômalas.

Os dados dos equipamentos armazenados, possibilitam o acompanhamento do histórico de temperatura de cada um. Isso permitiu a geração automática de alertas para anomalias (foco deste trabalho), classificando sua gravidade e gerando notificações quando necessário. Estas notificações poderiam ser repassadas e registradas pelo técnico a partir dos relatórios gerados pelo sistema para cada possível alerta encontrado pelo classificador. Um exemplo desta saída do sistema pode ser encontrada anexado neste trabalho, Anexo A.

Este sistema de alarme é parte integrante do software registrado sob processo BR512023003644-7.

O desenvolvimento do trabalho mostra o uso da termografia na manutenção preditiva de equipamentos elétricos de subestações abertas.

Para trabalhos futuros sugere-se testar sistema semelhante ao apresentado neste trabalho para o monitoramento de subestações fechadas e linhas de transmissão.

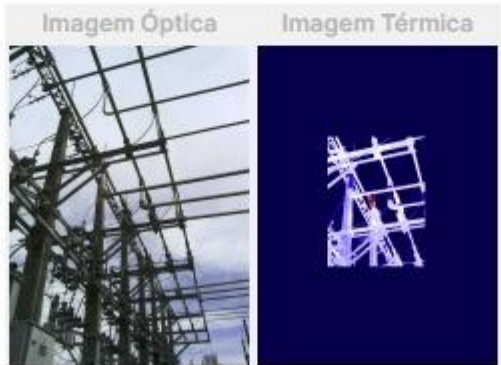
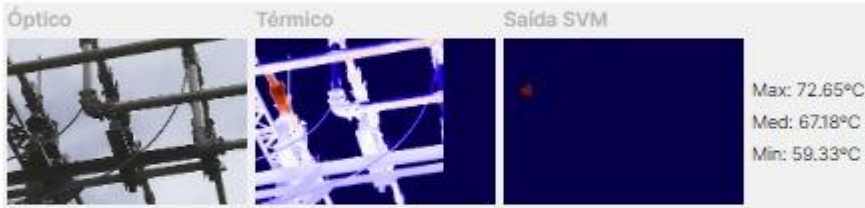
## REFERÊNCIAS

- PARSA, K.; HASSALL, M.; NADERPOUR, M. Enhancing Alarm Prioritization in the Alarm Management Lifecycle. **IEEE Access**, vol. 10, p. 99-111, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137865>.
- CHENG, C.; LIU, M.; YI, H.; RAN, G.; CHEN, H. Slow Manifold Analysis-Based Detection of Hot Spots in Photovoltaic Systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 71, p. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3187700>.
- GAO, S.; RUAN, Y.; HONG, Q.; YIN, D. Infrared Thermal Image Fault Detection based on YOLOV3-L. 2022. **2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications**, ICAICA 2022 [...]. Dalian -China: IEEE, 2022. p. 175-178. <https://doi.org/10.1109/ICAICA54878.2022.9844534>.
- GAO, Y.; TIAN, G. Y. Emissivity correction using spectrum correlation of infrared and visible images. **Sensors and Actuators, A: Physical**, vol. 270, p. 8-17, 2018. DOI 10.1016/j.sna.2017.12.027. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2017.12.027>.
- GITZEL, R.; KAUL, H.; DIX, M. Maps of Infrared Images to Detect Equipment Faults. 2022. **Proceedings - IEEE 8th International Conference on Big Data Computing Service and Applications, BigData Service 2022** [...]. Newark/CA-USA: [s. n.], 2022. p. 167-172. <https://doi.org/10.1109/BigDataService55688.2022.00034>.
- KUNZ, N.; KANAND, T.; BOCHMANN, P.; KEMPER, G. Multi Sensor and Smart Gimbal for Enhanced Powerline Monitoring on Helicopter and Uavs. 43., 2022. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives** [...]. Nice-France: [s. n.], 2022. vol. 43, p. 383-388. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-383-2022>.
- MAO, W.; SHI, H.; WANG, G.; LIANG, X. Unsupervised Deep Multitask Anomaly Detection With Robust Alarm Strategy for Online Evaluation of Bearing Early Fault Occurrence. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 71, p. 1-13, 2022. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3200092>.
- SHI, Z.; ZHAO, Y.; LIU, Z.; ZHANG, Y.; MA, L. Diagnosis and Classification Decision Analysis of Overheating Defects of Substation Equipment Based on Infrared Detection Technology. **Scientific Programming**, vol. 2021, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/3356044>.
- TAKEUCHI, R. de O. A.; ULBRICHT, L.; MAGRIN, F. G. S.; GANACIM, F. I. S.; FERNANDES, L. G.; ROMANELI, E. F. R.; JUNIOR, J. U. Comparison of Traditional Image Segmentation Methods Applied to Thermograms of Power Substation Equipment. **Energies**, vol. 15, no. 20, p. 1-17, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15207477>.

**ANEXO A – EXEMPLO DE RELATÓRIO DE ALERTA GERADO PELO  
CLASSIFICADOR**

Relatório de Alerta Vermelho  
**Subestação Bacacheri 69kV, Curitiba - PR**  
 R. Antônio Geronasso, 220 - Boa Vista, Curitiba - PR, 82540-390, Brasil

Região: 13.9 kV  
 Objeto: Chave Tripolar  
 Equipamento: 29-09  
 Corrente: Boa Vista  
 Data: 26/04/2022 12:00  
 Risco de falha: 83.33333333333334



Fazer download das informações

