



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

JORGE RAPHAEL RODRIGUES SATURNINO DE SOUZA

**MANUTENÇÃO PREDITIVA ATRAVÉS DE TERMOGRAFIA EM
SUBESTAÇÃO DE CONSUMIDOR DE ALTA TENSÃO DE UMA INDÚSTRIA
PETROQUÍMICA**

Manaus-AM

2023

JORGE RAPHAEL RODRIGUES SATURNINO DE SOUZA

**MANUTENÇÃO PREDITIVA ATRAVÉS DE TERMOGRAFIA EM SUBESTAÇÃO
DE CONSUMIDOR DE ALTA TENSÃO DE UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Weverson dos Santos Cirino, Msc.

Manaus-AM

2023

Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Escola Superior de Tecnologia – EST

Reitor:

André Luiz Nunes Zogahib

Vice-Reitor:

Kátia do Nascimento Couceiro

Diretor da Escola Superior de Tecnologia:

Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

Israel Gondres Torné

Banca avaliadora composta por:

Data da defesa: 31/03/2023

Prof. Weverson dos Santos Cirino, Msc. (Orientador)

Prof. Antônio Luiz Alencar Pantoja, Dr.

Prof. Israel Gondres Torné, Dr.

CIP – Catalogação na Publicação

Souza, Jorge R. R. S.

Manutenção preventiva através de termografia em subestação de consumidor de alta tensão de uma indústria petroquímica / Jorge Raphael Rodrigues Saturnino de Souza; [orientado por] Werverson dos Santos Cirino. – Manaus: 2023.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).
Universidade do Estado do Amazonas, 2023.

1.Termografia. 2.Subestação de alta tensão. 3.Manutenção preditiva.

I- Cirino, Weverson.

JORGE RAPHAEL RODRIGUES SATURNINO DE SOUZA

MANUTENÇÃO PREDITIVA ATRAVÉS DE TERMOGRAFIA EM SUBESTAÇÃO DE
CONSUMIDOR DE ALTA TENSÃO DE UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

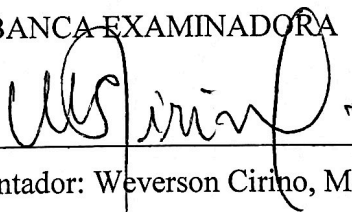
Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Nota obtida: 9,7 (Nove vírgula sete)


Aprovada em 31 / 03 / 2023

Área de concentração: Manutenção preditiva em subestações

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Weverson Cirino, Msc.



Avaliador: Antônio Luiz Alencar Pantoja, Dr.



Avaliador: Israel Gondres Torne, Dr.

Manaus
2023

DEDICATÓRIA

Uma dedicação especial primeiramente aos meus pais, Eurlles Aparício Rodrigues e Jorge Saturnino de Souza. À minha filha, Gabrielle Tokuta Saturnino de Souza. À minha esposa, Thyena Evellyn Godinho. Ao meu irmão, Brenno Rodrigues Facundes. E à toda minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida e me abençoar com saúde para que possa correr atrás dos meus objetivos.

Agradeço aos meus pais, Eurlles Aparicio Rodrigues, Jorge Saturnino de Souza e ao meu irmão, Brenno Rodrigues Facundes que sempre me apoiaram de todas as formas e incentivaram a estudar e nunca desistir dos meus sonhos.

Agradeço a minha filha amada, Gabrielle Tokuta Saturnino de Souza, minha motivação para sempre continuar buscando o melhor em todos os sentidos.

Agradeço à minha esposa, Thyena Evellyn Nakauth, que sempre esteve ao meu lado e me ajudou a passar por todas as dificuldades até a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao professor Weverson Cirino, que atuou como orientador deste trabalho, por todo suporte para que pudesse concluir com sucesso mais esta etapa.

Agradeço aos amigos engenheiros Alexander da Silva Batista, Aristeu Souza da Fonseca, Argemiro Ferreira de Aguiar Filho, que contribuíram de diversas formas para que este trabalho se tornasse realidade.

Agradeço ainda a todos os professores que passaram por minha trajetória acadêmica, todos sem exceção foram essenciais para que pudesse chegar até aqui.

Por fim, agradeço a todos os colegas de trabalho do setor de manutenção, os quais não mediram esforços para ajudar em todo o processo, compartilhando experiência e conhecimento.

“A oportunidade é perdida pela maioria das pessoas, porque ela está vestindo um macacão e parece com trabalho.”

Thomas Edison

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito debaixo do céu.”

Eclesiastes 3:1

RESUMO

O presente trabalho busca demonstrar a importância da termografia como uma ferramenta eficiente para a manutenção preditiva em subestações de consumidor de alta tensão de uma indústria petroquímica localizada na cidade de Manaus/AM, garantindo a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica às instalações consideradas como cargas críticas, abordando os benefícios da utilização da termografia como uma técnica não-invasiva. Apresenta-se fatores que podem influenciar o processo inspeção termográfica, equipamentos utilizados e teoria envolvida. Por fim, expõe os resultados obtidos com base nas imagens termográficas obtidas em campo, sendo realizadas intervenções preventivas e corretivas, reduzindo o risco de falhas e aumentando a vida útil dos equipamentos.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Termografia Infravermelha. Subestações. Anomalias térmicas.

ABSTRACT

This paper seeks to demonstrate the importance of thermography as an efficient tool for predictive maintenance in high-voltage substations of a petrochemical industry located in the city of Manaus/AM in increasing the reliability of electricity supply, in addition to addressing the benefits of using thermography as a non-invasive technique. It presents factors that may influence the thermographic inspection process, equipment used, and all the theory involved. Finally, it exposes the results obtained based on the thermographic images surveyed, being carried out preventive and corrective interventions, reducing the risk of failure and increasing the life of equipment.

Keywords: Predictive maintenance. Infrared thermography. Substations. Thermal anomalies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Termogramas de um TC, sob o Sol, no mesmo horário, mas de posições opostas. .	20
Figura 2- Reflexo solar em uma conexão de baixa emissividade.....	21
Figura 3 - (a)Termograma obtido durante a noite; (b)Termograma obtido durante o dia;.....	21
Figura 4 - Efeito da chuva sobre a temperatura das conexões.....	22
Figura 5 - Termovisor Fluke Ti125	24
Figura 6 - Subestação 69/13,8 kV – Local da inspeção.....	28
Figura 7 - Dropper (Pingado)	30
Figura 8 - Para-raios 1	31
Figura 9 – Seccionadora 69 kV	32
Figura 10 - TP – Proteção.....	33
Figura 11 - Disjuntor de 69 kV.....	34
Figura 12 - TP – Medição.....	35
Figura 13 - TC – T2.....	36
Figura 14 - Chave Seccionadora – Trafo T2	37
Figura 15 - Transformador T2 - Primário.....	38
Figura 16 - Transformador T2 - Secundário.....	39
Figura 17 - Chave Seccionadora Saída – Trafo T2	40
Figura 18 - Disjuntor Trafo T2 – 13,8 kV	41
Figura 19 - Barramento - 13,8 kV – T2.....	42
Figura 20 - Para-raios 2	43
Figura 21 - TC – Medição T1	44
Figura 22 - Chave Seccionadora – Trafo T1	45
Figura 23 - Transformador T1 - Primário.....	46
Figura 24 - Transformador T1 - Secundário.....	47
Figura 25 – Seccionadora de Saída –T1	48

Figura 26 - Disjuntor de 13,8 kV - T1	49
Figura 27 - Banco de Reguladores de Tensão	50
Figura 28 - Chave Seccionadora - Banco de Reguladores de Tensão	51
Figura 29 - Manutenção nos TP's e seccionadora.	52
Figura 30 – Manutenção: Disjuntor 69 kV - Módulo PASS	53
Figura 31 - Manutenção: TP's, Disjuntor 69 kV, TC's.	53
Figura 32 - Manutenção: TC's	54
Figura 33 – Manutenção Transformador T2.....	54
Figura 34 - Manutenção: Trafo T1	55
Figura 35 – Manutenção na Sala de Baterias	55
Figura 36 – Manutenção: Coleta de óleo para análises	56
Figura 37 - Manutenção: Disjuntores 13,8 kV	56
Figura 38 - Manutenção: Reguladores de Tensão	57
Figura 39 - Manutenção: Conector e cabo avariados	57
Figura 40 - Manutenção: Conector e cabo após substituição	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissividade de materiais utilizados em sistemas elétricos.	17
Tabela 2 - Fator de correção para uma placa vertical.....	19
Tabela 3 - Critério Delta T para Sistemas Elétricos com base em experiência.....	26
Tabela 4 - Máxima temperatura admissível para componentes elétricos. (°C).....	26
Tabela 5 - Raios de delimitação de zonas de risco, controlada e livre.....	29
Tabela 6 – Lista de equipamentos inspecionados.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

EPI – Equipamento de Proteção Individual.

ISO – International Organization for Standardization.

IR – Infra Red.

MTA – Máxima Temperatura Admissível.

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora.

PASS – Plug And Switch System.

SEP – Sistema Elétrico de Potência.

TC – Transformador de Corrente.

TP – Transformador de Potencial.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	10
INTRODUÇÃO	9
1 REFERÊNCIAL TEÓRICO	10
1.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	10
1.2 SUBESTAÇÃO	10
1.2.1 Subestação de consumidor de alta tensão	11
1.3 CARGAS DE MISSÃO CRÍTICA	11
1.4 MANUTENÇÃO EM SUBESTAÇÕES	11
1.5 TERMOGRAFIA	12
1.5.1 Termovisor	13
1.5.2 Calor e transferência de calor	13
1.5.3 Temperatura	13
1.5.4 Fundamentos de radiação	13
1.5.5 Emissividade	14
1.6 FATORES DE INFLUÊNCIA PARA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA.....	14
1.6.1 Influências de ordem Pessoal	15
1.6.2 Influências de ordem técnica	15
1.6.3 Influências Atmosféricas	18
2 METODOLOGIA	22
2.1 EQUIPAMENTOS.....	23
2.1.1 Equipamentos de proteção individual e coletiva	23
2.1.2 Fluke Ti125	24
2.2 CRITÉRIOS PARA OBTENÇÃO, TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	24
2.2.1 Termografia de referência	25
2.2.2 Termografia de tendência térmica	25

2.2.3 Termografia Comparativa	25
2.2.4 Máxima Temperatura Admissível - MTA	26
2.3 RESPONSABILIDADES	27
3 RESULTADOS.....	27
3.1 INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA.....	27
3.1.1 Dropper (Pingado)	30
3.1.2 Para-raios 1.....	31
3.1.3 SECCIONADORA 69 KV.....	32
3.1.4 TP – Proteção.....	33
3.1.5 Disjuntor de 69 kV	34
3.1.6 TP – Medição.....	35
3.1.7 TC – T2	36
3.1.8 Chave Seccionadora Entrada - T2.....	37
3.1.9 Transformador T2 – Primário.....	38
3.1.10 Transformador T2 – Secundário.....	39
3.1.11 Chave Seccionadora Saída – T2	40
3.1.12 Disjuntor T2 – 13,8 kV	41
3.1.13 BARRAMENTO – 13,8 kV – T2	42
3.1.14 Para-raios 2	43
3.1.15 TC – T1	44
3.1.16 Seccionadora de Entrada – T1.....	45
3.1.17 Transformador T1 – Primário.....	46
3.1.18 Transformador T1 – Secundário.....	47
3.1.19 Seccionadora de Saída –T1	48
3.1.20 Disjuntor de 13,8 kV - T1.....	49
3.1.21 Banco de Reguladores de Tensão	50

3.1.22 Chave Seccionadora - Banco de Reguladores de Tensão	51
3.2 PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO	52
3.3 MANUTENÇÃO PROGRAMADA.....	52
3.3.1 Correção das Anomalias.....	56
CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXO I – PLANTA SUBESTAÇÃO 69 KV.....	62

INTRODUÇÃO

A energia elétrica é componente essencial para a sociedade em geral, assim como para indústrias de variados segmentos, porém se torna ainda mais importante quando tratam-se de processos em que a confiabilidade das instalações está diretamente relacionada a enormes riscos financeiros e, inclusive, de vida.

A este tipo de instalação está associado o conceito de cargas críticas, ou de missão crítica, as quais a fonte de alimentação deve ser mantida em qualquer circunstância. O fornecimento de energia a essas cargas não deve ser interrompido.

Dentre as instalações que estão associadas a este tipo de operação estão: Instalações hospitalares, de defesa e militares; Instalações industriais associadas aos processos de fabricação de semicondutores, indústrias químicas e farmacêuticas, petroquímicas. (TOSSI e STAROSTA, 2013)

A manutenção destes tipos de instalação busca assegurar o contínuo e adequado fornecimento de energia a estas cargas. Por meio da termografia, a manutenção preditiva garante a qualidade desejada do serviço e prediz a ocorrência de anormalidades, através da aplicação de técnicas de análise específicas. O presente trabalho buscará demonstrar a importância da aplicação da termografia em manutenção preditiva de subestações abaxadoras de uma indústria petroquímica e seus componentes.

1 REFERÊNCIAL TEÓRICO

1.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Pode-se definir um sistema elétrico de potência como sendo constituído por cinco componentes principais: fonte/gerador, transformadores, linhas de transmissão, linhas de distribuição e cargas.

Os sistemas elétricos de potência podem ser subdivididos em três grandes blocos:

- Geração: que perfaz a função de converter alguma forma de energia em energia elétrica.

- Transmissão: que é responsável pelo transporte de energia elétrica dos centros de produção aos de consumo.

- Distribuição: que distribui energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores. (Kagan, et al., 2005)

Segundo (Bichels, 2018), grandes usinas, utilizando as mais variadas formas de força motriz, interligadas entre si e às subestações dos grandes centros de carga por meio de longas linhas de transmissão em alta e extra-alta tensão, formando gigantescas redes de transmissão que, juntamente com as linhas e subestações de subtransmissão e de distribuição, formam os sistemas elétricos de potência (SEP).

1.2 SUBESTAÇÃO

De acordo com a terminologia da NBR 5460, uma subestação pode ser definida como: “Parte de um sistema de potência, concentrada em um dado local, compreendendo primordialmente as extremidades de linhas de transmissão e/ou distribuição, com os respectivos dispositivos de manobra, controle e proteção, incluindo obras civis e estruturas de montagem, podendo incluir também transformadores, conversores e/ou outros equipamentos. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992)

Mamede Filho (2017) assevera que subestação é um conjunto de condutores, aparelhos e equipamentos destinados a modificar as características da energia elétrica (tensão e corrente), permitindo sua distribuição aos pontos de consumo em níveis adequados de utilização. Podendo ainda, em termos gerais, ser classificadas como: Subestação central de

transmissão, subestação receptora de transmissão, subestação de subtransmissão e subestação de consumidor.

1.2.1 Subestação de consumidor de alta tensão

A subestação de consumidor é aquela constituída em propriedade particular e alimentada pelo sistema de distribuição primário, originado das subestações de subtransmissão, que suprem os pontos finais de consumo. (Mamede Filho, 2017)

Mamede Filho (2017) relata que as subestações das instalações industriais com potência em transformação superior a 3.500 kVA normalmente são atendidas por subestações de alta tensão em 69 kV, sendo definidas como subestações de consumidor de alta tensão.

1.3 CARGAS DE MISSÃO CRÍTICA

São consideradas cargas em que a fonte de alimentação deve ser mantida em qualquer circunstância. O fornecimento de energia a essas cargas não deve ser interrompido, sob o risco de causar grandes prejuízos, tanto financeiros, quanto a saúde e bem-estar da sociedade.

Conforme definiu (Pereira, 2010), equipamentos cuja interrupção de funcionamento resulte em grandes prejuízos para os usuários e/ou beneficiários dos serviços aos quais se destinam são consideradas cargas de missão crítica.

De acordo com TOSSI e STAROSTA (2013), as petroquímicas estão inclusas na classe de instalações que estão associadas a este tipo de operação, justificando assim investimentos e cuidados especiais quanto às instalações elétricas.

1.4 MANUTENÇÃO EM SUBESTAÇÕES

A NBR 5462 define manutenção como o conjunto de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, com o objetivo de manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar sua função.

Tendo em conta o papel precípua que a eletricidade possui no mundo moderno e a vasta utilização de subestações para atendimento a concessionárias de energia, empresas, indústrias e a sociedade em geral, a manutenção nestas instalações se faz necessária para que operem de maneira constante e segura.

São conhecidos 3 tipos de manutenção fundamentais realizadas em subestações: preventiva, corretiva e preditiva.

A manutenção preventiva é aquela efetuada de forma prévia, em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.

A manutenção corretiva é aquela efetuada após a ocorrência de uma falha, destinada corrigir algo e recolocar um equipamento em condições de executar sua função.

Já a manutenção preditiva é aquela que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, tem o objetivo de prever a condição do equipamento, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva, diminuir a manutenção corretiva e encontrar falhas em estágio inicial.

Com a detecção da falha em fase inicial, quando ainda não é nociva ao equipamento e ao processo, pode-se planejar e organizar intervenções para que seja sanada esta falha.

1.5 TERMOGRAFIA

A termografia é uma técnica de inspeção não destrutiva e não invasiva que tem como base a detecção da radiação infravermelha emitida naturalmente pelos corpos com intensidade proporcional à sua temperatura. (BAUER, et al., 2013)

Ainda segundo o que consta na ISO 13372 (2004), podemos definir a termografia como o uso de imageadores infravermelhos, no monitoramento e diagnóstico de condições, em que as temperaturas de uma ampla variedade de alvos podem ser medidas, remotamente e sem contato, medindo a energia infravermelha que irradia da superfície do alvo e convertendo essa medição em uma temperatura de superfície equivalente.

Posto que a termografia é utilizada para analisar a distribuição térmica e medir temperaturas de equipamentos através da detecção da radiação infravermelha, se torna importante rever alguns conceitos.

1.5.1 Termovisor

O termovisor é o principal instrumento de uma inspeção termográfica. Através dele a radiação infravermelha emitida pelo objeto é detectada e convertida em imagem visível e em leituras de temperatura. (Santos, 2006)

De acordo com (Kaplan, 2007) detectores infravermelhos detectam energia radiante e transformam em sinal elétrico proporcional à temperatura das superfícies alvo. Instrumentos que usam detectores infravermelhos e ótica para coletar e focar a energia dos alvos nesses detectores são capazes de medir as temperaturas do ponto da superfície do alvo com sensibilidade de até $0,1 \text{ }^\circ \text{C}$ e com tempo de resposta na faixa de microssegundos. São chamados de sensores pontuais ou radiômetros pontuais. Os instrumentos que combinam essa capacidade de medição com mecanismos de varredura da superfície do alvo são chamados de termovisores infravermelhos ou câmeras infravermelhas. Eles podem produzir mapas térmicos ou termogramas onde a intensidade de brilho ou matiz de cor de qualquer ponto no mapa é representativo da temperatura da superfície naquele ponto.

1.5.2 Calor e transferência de calor

O calor é a transferência de energia de um objeto para outro. Podemos monitorar essa transferência medindo a temperatura do objeto. O calor flui de um objeto quente para um objeto frio. Após um período efetuando essa transferência, eles eventualmente atingem uma temperatura comum chamada equilíbrio térmico, cessando a mesma. (Holst, 2000)

1.5.3 Temperatura

Pode ser definida como o nível de calor que existe no ambiente, resultante da ação dos raios solares, por exemplo, ou nível de calor existente num corpo. Qualitativamente, podemos descrevê-la como aquela que determina a sensação de quanto um objeto está quente ou frio quando entramos em contato com ele. (PÉCORA E SILVA, 2005)

1.5.4 Fundamentos de radiação

Radiação é a propagação de tipos de energia em forma de ondas eletromagnéticas ou partículas. Podemos definir também a radiação como sendo o processo no qual o calor é transferido de uma superfície de temperatura elevada para uma superfície de temperatura mais

baixa quando há um certo espaço de separação entre as duas. A energia transferida é chamada de radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas que viajam na velocidade da luz.

A transferência de calor por radiação é fundamento para a medição de temperatura através da termografia infravermelha, que detecta a radiação proveniente do objeto sob inspeção, mais especificamente a radiação infravermelha. (Santos, 2006)

1.5.5 Emissividade

A emissividade é uma propriedade de superfície que determina a capacidade dessa superfície em emitir radiação.

Segundo a NBR 15424 (2006) a emissividade é definida como um parâmetro adimensional que estabelece a relação entre a quantidade de energia irradiada por um corpo em estudo e a que seria emitida por um corpo negro, a mesma temperatura e comprimento de onda. A emissividade pode variar de 0 e 1.

A emissividade pode variar com o comprimento de onda, a forma do objeto, a temperatura, qualidade da superfície e ângulo de visão. Embora seja instrutivo estudar a emissividade de alvos específicos, a radiação medida depende do alvo e seu ambiente. (Kaplan, 2007)

1.6 FATORES DE INFLUÊNCIA PARA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

Antes de realizar uma inspeção termográfica é preciso levar em conta uma série de fatores que podem influenciar no resultado das medições, para que se possa obter um resultado confiável e assertivo.

Segundo Santos (2012), essas influências podem estar relacionadas ao termografista, ao termovisor, ao equipamento sob inspeção e às condições do meio em que a inspeção está se desenvolvendo. Agrupando e classificando essas influências em três categorias: Qualificação Pessoal, Técnica e Atmosférica.

1.6.1 Influências de ordem Pessoal

Qualificação pessoal está diretamente ligada ao termografista, todos os resultados obtidos são consideravelmente dependentes do mesmo.

Para reduzir ou eliminar a influência de Qualificação Pessoal, é fortemente recomendável que o termografista tenha aptidão física, seja treinado e possua um nível adequado de experiência. A normatização de todo o processo, procedimentos de inspeção e qualificação do termografista, também podem ajudar a reduzir a influência de Qualificação Pessoal. (SANTOS, 2012)

1.6.1.1 Aptidão Física

O termografista deve possuir boa aptidão física. Devido o procedimento de termografia envolver visores, monitores e inspeção visual, é necessário que possua boa acuidade visual, podendo também ser capaz de fazer uma correta diferenciação de cores. E no caso de uma deficiência nesta percepção de cores deve-se substituir as imagens coloridas por imagens em escala de cinza.

1.6.1.2 Treinamento

É essencial que o termografista seja treinado e instruído sobre a teoria básica que envolve o procedimento de termografia, assim como informações sobre a operação e características do termovisor utilizado. Assim como, também é importante o termografista obter conhecimento técnico sobre os equipamentos e componentes analisados.

1.6.1.3 Normas e Certificações

As normas são fatores essenciais, pois foram criadas a fim de garantir a padronização de todo procedimento envolvendo a termografia, para se obter um tratamento sistêmico e com repetibilidade aceitável é necessária um bom entendimento e aplicação das Normas existentes para a atividade da Termografia.

1.6.2 Influências de ordem técnica

As influências de ordem técnica estão associadas às especificações do termovisor, sua correta configuração e às condições do componente inspecionado.

1.6.2.1 Características e especificações do termovisor

Segundo (Santos, 2012), o termovisor escolhido para determinada inspeção é primordial para a qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos. Suas características devem ser adequadas às condições do objeto-alvo a ser inspecionado e às condições da cena de interesse, que é o local onde o objeto-alvo está inserido. Alguns exemplos são:

- A faixa de temperatura de medição e a faixa de comprimento de onda que o termovisor deve responder estão relacionadas às temperaturas dos objetos a serem inspecionados.
- A resolução espacial e a resolução de medida precisam ser adequadas à distância e ao tamanho do objeto a ser inspecionado.
- A faixa de temperatura de operação do termovisor deve atender à variação da temperatura do local onde se desenvolve a inspeção.

Isto posto, é de suma importância conhecer e saber escolher o termovisor com as melhores características para uma determinada inspeção e diminuir essa influência nos resultados. Sendo interessante observar as características mais importantes, dentre elas:

- Tecnologias de detecção e tipos de detectores
- Faixa espectral
- Faixa de temperatura
- Temperatura de operação
- Resolução espacial e resolução de medida
- Sensibilidade térmica
- Taxa de repetição de quadro (Frame Rate)

Neste tópico é interessante também frisar a importância da calibração periódica destes instrumentos para uma melhor assertividade das medições finais.

1.6.2.2 Influência da Emissividade

Os termovisores fazem a medição da radiação emitida, e não da temperatura em si. Sendo assim, é essencial considerar a emissividade durante as inspeções termográficas. Conforme citado anteriormente a emissividade está relacionada a capacidade de um corpo de

emitir radiação e está diretamente relacionada com as características da superfície do componente (composição, textura e ocorrência de óxidos).

Para realizar medidas corretas de temperatura, o termografista deve conhecer a emissividade da superfície e informar ao termovisor. Isso pode ser feito medindo a emissividade da superfície antes de se realizar a medição. Em sistemas elétricos, principalmente de alta tensão, a medição de emissividade, durante a inspeção, se torna praticamente impossível. Para reduzir os erros relacionados com a emissividade, o termografista deve buscar fazer a medição de temperatura nas áreas da anomalia onde a emissividade é maior. Áreas com oxidação, corrosão, sujeira ou cavidades apresentam um incremento da emissividade e consequente aumento na exatidão da medida de temperatura realizada pelo termovisor. O termografista deve buscar também, uma visão mais perpendicular da superfície da anomalia, a fim de evitar os erros de emissividade devido ao ângulo de visão. (SANTOS, 2012)

Na tabela 1 apresentam-se alguns materiais utilizados em instalações e componentes elétricos e suas respectivas emissividades:

Tabela 1 - Emissividade de materiais utilizados em sistemas elétricos.

Material		Emissividade
Alumínio e suas ligas	Chapa Comercial	0,09
	Polido	0,02-0,10
	Oxidado	0,20-0,40
Cobre e suas ligas	Polido	0,02
	Altamente Oxidado	0,78
Latão	Polido	0,01-0,05
	Oxidado	0,5
Estanho	Chapa Aço Estanhada	0,07
Níquel	Polido	0,07
Prata	Polida	0,02
	Oxidada	0,50-0,95
Aço	Ligeiramente Oxidado	0,52-0,60
Porcelana		0,92
Borracha		0,70-0,80
Fita Isolante		0,98

Fonte: Próprio Autor, 2022.

1.6.2.3 Localização

A distância entre o objeto-alvo e o termovisor pode levar a uma leitura não precisa e muitas vezes distante da real situação térmica. Assim sendo, deve-se atentar para as

especificações do termovisor quanto a Resolução de Medida, que é definida como o menor objeto que pode ter sua temperatura medida com exatidão a uma determinada distância, segundo Santos (2012). Se os limites de resolução de medidas não forem respeitados haverá prejuízo para a análise das inspeções termográficas.

Outro ponto a ser considerado é a visada direta, ou seja, que não haja obstáculos entre o termovisor e o objeto-alvo. Muitas vezes os equipamentos estão envoltos por carcaças, placas de proteção ou até encobertos por outro equipamento. Sendo assim, o termografista deve procurar a melhor posição para a obtenção do termograma, considerando na análise final a perda de radiação no caso de não ser possível a visada direta.

1.6.2.4 Carga

O aquecimento gerado em uma conexão defeituosa depende da corrente que passa através dela, sendo que a potência dissipada é proporcional ao quadrado da corrente ($P=I^2.R$).

Durante sua operação, o equipamento pode sofrer variações de carga que influenciam na sua temperatura e na análise dos resultados da inspeção. Assim sendo, a corrente de carga é um importante fator que deve ser considerado em inspeções termográficas de sistemas elétricos. (SANTOS, 2012)

Logo, torna-se essencial verificar o melhor momento para realizar a inspeção de um equipamento, sempre priorizando os horários de plena carga.

1.6.3 Influências Atmosféricas

Fatores como a temperatura ambiente, velocidade do vento, umidade e onde se está realizando a leitura pode influenciar muito a leitura do termógrafo e para isso deve-se ter noção dos muitos fatores que podem incidir negativamente na imagem gerada pelo equipamento.

1.6.3.1 Vento

Em seus ensaios em laboratório e em campo, Santos (2012) demonstrou que o vento, mesmo em baixa velocidade, pode reduzir consideravelmente a temperatura de anomalias térmicas, tendo influência direta nas análises termográficas. Logo, em ambientes abertos deve ser considerada a velocidade do vento.

A influência do vento sobre a inspeção termográfica em ambientes abertos é importante e geralmente difícil de evitar. Nessa situação, diversas variáveis estão envolvidas e um simples fator multiplicativo, para corrigir a temperatura medida em função da velocidade do vento, é de difícil aplicação. Se utilizado, o termografista deve ter em mente que o fator foi obtido em laboratório e em condições controladas. (SANTOS, 2012)

A tabela a seguir relaciona a velocidade do vento com fatores de correção a serem possivelmente aplicados:

Tabela 2 - Fator de correção para uma placa vertical.

Velocidade do Vento		Fator de Correção
m/s	km/h	
<1	<3,6	1
2	7,2	1,36
3	10,8	1,64
4	14,4	1,86
5	18	2,06
6	21,6	2,23
7	25,2	2,4

Fonte: Kaplan (1999)

1.6.3.2 Temperatura Ambiente

Durante inspeções termográficas é necessário estar atento à interferência que a temperatura ambiente pode ocasionar nos valores de temperatura medidos.

Santos (2012) cita a influência da temperatura ambiente em análises termográficas, salientando que um aumento da temperatura ambiente resulta em um aumento da temperatura da anomalia, fazendo assim que falhas tenham maior probabilidade de ocorrência na presença de temperaturas ambientes mais altas.

Geralmente a temperatura ambiente é maior durante o dia, portanto, análises de inspeções realizadas durante a noite devem levar em consideração que, durante o dia, a temperatura da anomalia pode subir, tanto em função do carregamento solar, como em função do aumento da temperatura ambiente. Raciocínio semelhante deve ser feito quando inspeções são realizadas no inverno: em função de uma temperatura ambiente mais elevada, a temperatura da anomalia tenderá a subir nas outras estações do ano, principalmente no verão. (SANTOS, 2012)

Um fator importante a ser considerado é que a sensibilidade térmica e resolução de temperatura do termovisor tende a piorar quando a temperatura ambiente diminui.

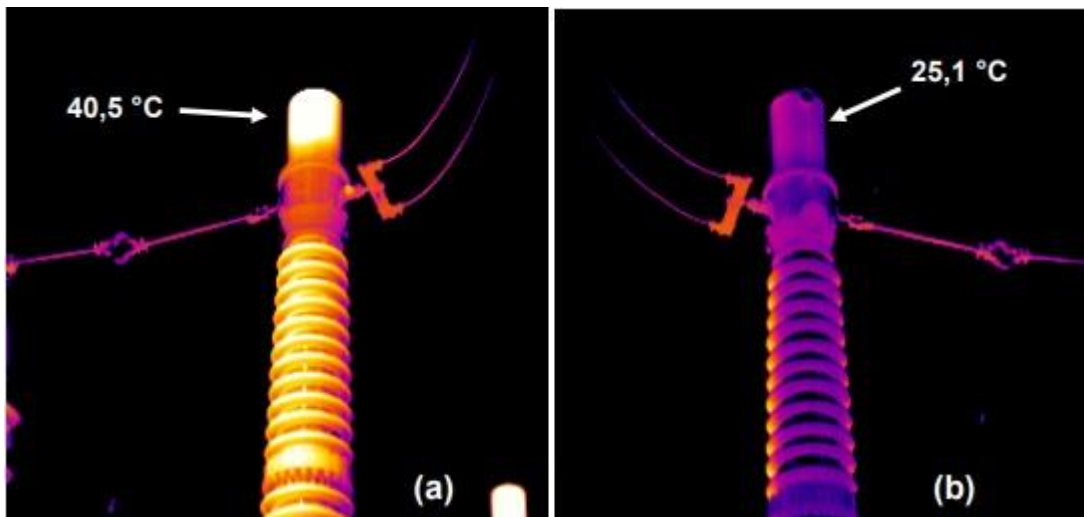
1.6.3.3 Influência Solar

Existem dois fatores relacionados ao sol que podem influenciar diretamente nos resultados das inspeções termográficas em subestações, são eles:

- Carregamento Solar: Aumento da temperatura do objeto-alvo em função da radiação solar absorvida.
- Reflexo Solar: Reflexo causado pela radiação solar no objeto-alvo.

Logo, o termografista deve estar atento a estes fatores, procurando um melhor ângulo para capturar o termograma afim de obter um resultado mais assertivo o possível.

Figura 1- Termogramas de um TC, sob o Sol, no mesmo horário, mas de posições opostas.



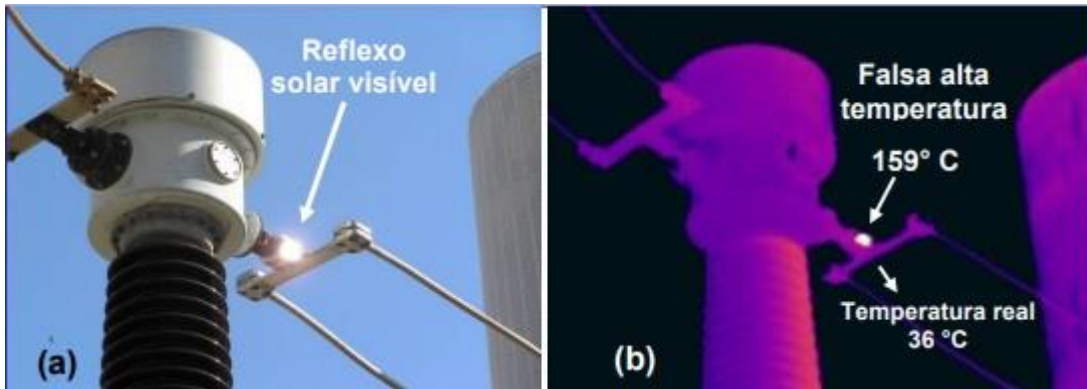
Fonte: Santos (2012)

No caso do reflexo, não há um aumento da temperatura do objeto-alvo em si, como ocorre com o carregamento solar, e sim a reflexão da radiação emitida por objetos próximos que estão com temperatura elevada, ou ainda do próprio sol.

Usualmente, os componentes utilizados em subestações são feitos de metais, os quais possuem baixa emissividade e alta refletância, especialmente quando novos e polidos.

Isto posto, o reflexo pode induzir o termografista a registrar uma temperatura falsa, conforme podemos verificar na figura a seguir:

Figura 2- Reflexo solar em uma conexão de baixa emissividade.

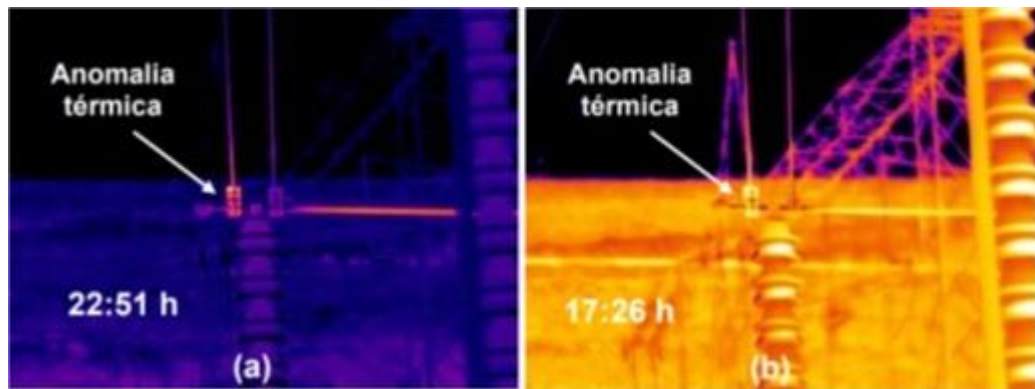


Fonte: Santos (2012)

Se possível, para evitar os problemas mencionados anteriormente, deve-se escolher um horário para realização da inspeção termográfica em horários livres do carregamento solar, entre o pôr do sol e o amanhecer. Porém, deve-se levar em consideração que esses valores deverão aumentar durante o dia.

A figura a seguir demonstra a melhoria na identificação de pontos de aquecimento durante a noite, em comparação ao dia:

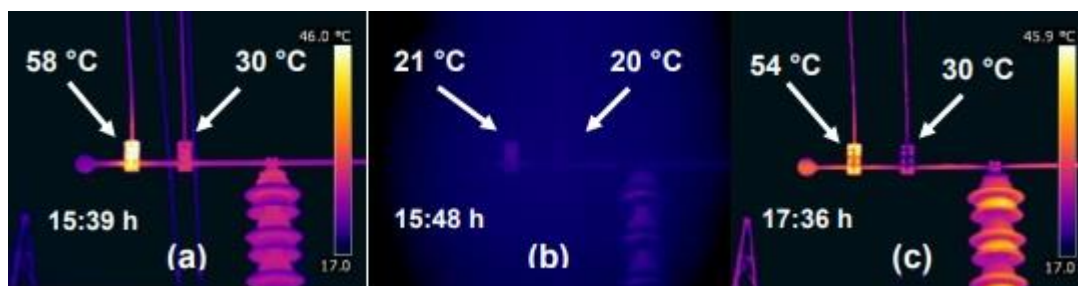
Figura 3 - (a)Termograma obtido durante a noite; (b)Termograma obtido durante o dia;



Fonte: Santos (2012)

Fatores como a poluição, névoa, fumaça, umidade e chuva também afetam a transmissão da radiação infravermelha pela atmosfera, interferindo nos resultados de uma inspeção termográfica, conforme demonstra a figura a seguir:

Figura 4 - Efeito da chuva sobre a temperatura das conexões.



Fonte: Santos (2012)

2 METODOLOGIA

O Trabalho apresentado se trata de uma Pesquisa Aplicada, iniciando-se com uma metodologia exploratória, afim de levantar os dados relativos ao procedimento de termografia existente na empresa onde a subestação de alta tensão está localizada. Assim como, a especificação do termovisor que será utilizado e demais informações sobre os métodos de planejamento para a realização da inspeção termográfica.

A coleta dos dados termográficos se dará diretamente, através de medições realizadas com o termovisor na área da subestação abaixadora de 69/13,8 kV.

Foram realizadas pesquisas em documentos e procedimentos internos da empresa, onde foi verificado a existência de um planejamento de inspeções termográficas para as instalações elétricas em geral, desde quadros elétricos de baixa tensão, até às subestações. Tratando-se da subestação de 69/13,8 kV, as inspeções periódicas incluíam apenas as buchas de entrada e saída do disjuntor de alta tensão e dos transformadores, com periodicidade de seis meses. Estando assim completamente ignorados alguns componentes vitais para o correto funcionamento de uma subestação.

Ademais, o procedimento não deixa explícito os métodos para uma correta obtenção e análise dos termogramas, ficando assim a critério do termografista, o técnico eletricista designado para a atividade, a forma de obtenção dos dados. Cabendo ao usuário final, o engenheiro responsável pelo setor de manutenção, a interpretação dos dados obtidos pelo termografista.

Isto posto, foi solicitada permissão para que se realizasse uma inspeção termográfica incluindo todos os componentes essenciais da subestação e que não estariam inclusos no planejamento das inspeções termográficas periódicas, sendo eles: Para-raios, Transformadores

de Potencial (TP), Transformadores de Corrente (TC), Chaves Seccionadoras, Disjuntores de Média Tensão e Reguladores de Tensão.

Nestas inspeções foram levadas em consideração todas as influências externas citadas anteriormente, além de serem utilizados critérios e métodos de análise de dados em conformidade com normas nacionais e internacionais, como:

- NBR 15866 DE 08/2010 - Ensaio não destrutivo — Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos
- NBR 15763 DE 09/2009 - Ensaaios não destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência
- NBR 15424 DE 07/2022 - Ensaaios não destrutivos — Termografia infravermelha — Terminologia
- NBR 16969 DE 06/2021 - Ensaaios não destrutivos - Termografia infravermelha - Princípios gerais
- NBR 16818 DE 02/2020 - Ensaaios não destrutivos - Termografia infravermelha — Procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha
- NBR 15572 DE 03/2013 - Ensaaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos
- Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment.
- ISO 18434: 2008 Monitoramento de condição e diagnóstico de máquinas — Termografia — Parte 1: Procedimentos gerais
- ISO 18436 (2021) Monitoramento de condição e diagnóstico de sistemas de máquinas — Requisitos para certificação de pessoal — Parte 1: Requisitos específicos do setor para organismos de certificação e processo de certificação

2.1 EQUIPAMENTOS

2.1.1 Equipamentos de proteção individual e coletiva.

Para a inspeção termográfica são utilizados na empresa equipamentos de proteção individual como capacete, protetor auricular, luvas de proteção elétrica, óculos de proteção,

uniforme para eletricitistas com proteção contra agentes térmicos provenientes de arco elétrico e fogo repentino. Além de dispor de macacão próprio para manobras em equipamentos de alta tensão, e bastões de salvamento.

2.1.2 Fluke Ti125

O termovisor utilizado é da marca Fluke, modelo Ti125, representado na figura abaixo, com função de foco automático para distâncias maiores que 1,22 metros e ajuste manual de foco para distâncias inferiores e calibrado anualmente. Conta com cartão de memória para que as imagens termográficas sejam transferidas e software gratuito para análise e edição das mesmas.

Figura 5 - Termovisor Fluke Ti125



Fonte: Fluke.

O software utilizado para análise e tratamento das imagens termográficas é o SmartView, fornecido pela própria fabricante, que permite a edição das imagens para obtenção dos valores de temperatura em qualquer ponto da captura.

2.2 CRITÉRIOS PARA OBTENÇÃO, TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Levando em consideração informações do fabricante Fluke, da ABNT, e da Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment, foram levantados os seguintes possíveis critérios e métodos para análise das imagens termográficas obtidas nos planos de inspeção periódicos:

2.2.1 Termografia de referência

Este método tem como objetivo obter um ponto de referência inicial para o objeto-alvo que se quer analisar em condições normais de operação, para que possa ser utilizado posteriormente em comparação a futuras inspeções.

A termografia de referência é um bom ponto de partida para qualquer aplicação. Primeiro, faça a varredura do equipamento na primeira vez em que for inicializado ou mais tarde em seu ciclo de vida quando estiver funcionando corretamente e, em seguida, utilize esse diagnóstico como referência para inspeções futuras. Quer você compare imagens térmicas na câmera no campo ou em seu computador por meio de ferramentas de software, esta abordagem fundamental estabelecerá a base para ajudá-lo a detectar anomalias subsequentes. (FLUKE, 2021)

2.2.2 Termografia de tendência térmica

Este método tem por objetivo comparar as tendências de distribuição de temperatura no objeto-alvo periodicamente, com ou sem referência prévia.

Pode-se utilizar as inspeções de tendência térmica para comparar como a temperatura é distribuída nos mesmos componentes ao longo do tempo. Isso pode ajudá-lo a detectar o declínio de desempenho no período, para que você possa agendar tarefas de manutenção que envolvem períodos de inatividade antes que seja inevitável. (FLUKE, 2021)

2.2.3 Termografia Comparativa

Sendo o método mais comum de ser utilizado no caso de componentes elétricos, a termografia comparativa consiste em comparar os valores de temperaturas em componentes similares e nas mesmas condições de funcionamento do objeto-alvo.

Este método se baseia na ideia de que componentes idênticos ou semelhantes sob cargas semelhantes devem mostrar perfis de temperatura semelhantes. (FLUKE, 2021)

Por exemplo, em sistemas elétricos costuma-se comparar os valores de temperatura na entrada e saída de transformadores em cada uma de suas buchas, assim como as fases em um quadro elétrico, para verificar possíveis pontos quentes e desbalanceamento de fases.

A Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment define a diferença de temperatura entre elementos semelhantes como Delta T, a tabela a seguir apresenta a classificação das anomalias de acordo com este critério.

Tabela 3 - Critério Delta T para Sistemas Elétricos com base em experiência.

PRIORIDADE	DELTA T	AÇÃO RECOMENDADA
4	1°C a 10 °C	As medidas corretivas devem ser tomadas no próximo período de manutenção
3	>10°C a 20 °C	Medidas corretivas necessárias à medida que a programação o permita
2	>20°C a 40 °C	Medidas corretivas necessárias o mais rápido possível
1	>40 °C	Medidas corretivas necessárias imediatamente

Fonte: Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment (2016)

2.2.4 Máxima Temperatura Admissível - MTA

De acordo com NBR 15866 (2010), MTA é a “máxima temperatura admissível para um componente, sistema ou equipamento nas condições nominais de operação informada pelo fabricante ou adquirida por informações colhidas durante sua vida útil ou de normas técnicas referenciais aplicáveis”.

Na tabela a seguir estão demonstrados alguns valores de MTA para componentes elétricos:

Tabela 4 - Máxima temperatura admissível para componentes elétricos. (°C)

COMPONENTE ELÉTRICO	MTA
Condutor encapado (isolação de cloreto de polivinila (PVC))	70
Condutor encapado (isolação de Borracha Etileno Propileno (EPR))	90
Condutor encapado (isolação de Polietileno Reticulado (XLPE))	90
Régua de bornes	70
Conexões mediante parafusos de aperto	70
Conexões e barramentos de baixa tensão	90
Conexões recobertas com prata ou níquel (contatores)	90
Corpo de fusíveis	100
Transformador à óleo, ponto mais quente (núcleo)	80
Transformador à óleo	65
Transformador a seco, classe de isolação 105	65
Transformador a seco, classe de isolação 130	90

Transformador a seco, classe de isolamento 155	115
Transformador a seco, classe de isolamento 180	140
Contatos de disjuntor motor	80+TA
Contatos de disjuntores termomagnéticos	60+TA
Contatos e articulações de seccionadoras	100

Fonte: CCPG Engenharia (2021)

2.3 RESPONSABILIDADES

Em suas versões mais recentes a NBR 15572 e a NBR 15424 definem e citam requisitos para o pessoal envolvido nas inspeções termográficas conforme a seguir:

- **Termografista:** Profissional qualificado para realizar inspeções termográficas, utilizando um sistema de termografia infravermelha de acordo com as atribuições especificadas por um procedimento. Deve possuir ou solicitar informações sobre os equipamentos inspecionados, ser capaz de interpretar os dados obtidos, ponderar as condições ambientais, estar ciente dos requisitos mínimos de segurança da NR 10, e é responsável pela confiabilidade dos dados termográficos obtidos.
- **Assistente Qualificado:** Profissional qualificado, capacitado e autorizado pelo usuário final para auxiliar o termografista na inspeção. Deve possuir conhecimento sobre o histórico de operação e informações genéricas das instalações ou equipamentos inspecionados, e estar ciente dos requisitos mínimos de segurança da NR 10.
- **Usuário Final:** Profissional ao qual se destina o relatório de termografia, deve designar para acompanhar o termografista, um assistente qualificado que tenha conhecimento sobre a operação e o histórico dos equipamentos a serem inspecionados e definir as ações a serem tomadas após a inspeção. Assume a responsabilidade por consequências provenientes de ações tomadas, ou não, como resultado de dados fornecidos por uma análise termográfica.

3 RESULTADOS

3.1 INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

A inspeção termográfica foi realizada no dia 06 de janeiro de 2023. O início foi marcado para o horário de 08h da manhã para tentar amenizar os efeitos do carregamento solar. O dia estava com tempo favorável, com céu parcialmente nublado, como podemos verificar na figura 6, a temperatura ambiente era de 29°C e sem incidência considerável de

vento. Participaram da termografia um técnico eletricista como termografista, e o autor deste trabalho como assistente qualificado, designados pelo usuário final, o engenheiro eletricista encarregado da manutenção.

Figura 6 - Subestação 69/13,8 kV – Local da inspeção



Fonte: Próprio autor. (2023)

A subestação a ser inspecionada se trata de uma subestação compartilhada por duas empresas do mesmo grupo. Possui dois transformadores de 6,25 MVA. O transformador T2, da marca ABB, abastece a fábrica que fica ao lado da petroquímica. O transformador T1, da marca WEG, abastece a indústria petroquímica.

Devido a criticidade dos riscos envolvidos nas atividades realizadas na indústria petroquímica, a subestação possui ainda um transformador reserva de 12 MVA, T3, da marca Toshiba. O mesmo fica separado dos outros transformadores por uma parede corta-fogo e, após algumas manobras de chaves e cabos, é capaz de suprir a demanda das duas empresas. Além disso, após o transformador T1, existe um banco de reguladores de tensão da marca Toshiba, a fim de melhorar o nível da tensão de 13,8 kV fornecida no secundário do transformador, suprimindo possíveis distúrbios e evitando interrupções indesejadas.

O disjuntor de alta tensão se trata de um módulo híbrido modelo PASS, da marca ABB.

As duas indústrias funcionam 24h por dia, tendo uma demanda constante, não necessitando ser selecionado um horário de maior demanda para a inspeção.

Um dos técnicos eletricitas disponíveis na empresa foi responsável por esta atividade, acompanhado pelo autor deste trabalho como assistente qualificado, ambos designados pelo usuário final, o engenheiro eletricitista ocupante do cargo de supervisor de manutenção.

Foram utilizados todos os EPI's necessários para esta atividade, assim como respeitados todos os requisitos mínimos de segurança pertinentes a NR10, respeitando os limites de distância das zonas de risco, controlada e livre, conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Raios de delimitação de zonas de risco, controlada e livre.

Faixa de tensão Nominal da instalação elétrica em kV	Rr - Raio de delimitação entre zona de risco e controlada em metros	Rc - Raio de delimitação entre zona controlada e livre em metros
<1	0,2	0,7
1 e <3	0,22	1,22
3 e <6	0,25	1,25
6 e <10	0,35	1,35
10 e <15	0,38	1,38
15 e <20	0,4	1,4
20 e <30	0,56	1,56
30 e <36	0,58	1,58
36 e <45	0,63	1,63
45 e <60	0,83	1,83
60 e <70	0,9	1,9
70 e <110	1	2
110 e <132	1,1	3,1
132 e <150	1,2	3,2
150 e <220	1,6	3,6
220 e <275	1,8	3,8
275 e <380	2,5	4,5
380 e <480	3,2	5,2
480 e <700	5,2	7,2

Fonte: NR 10

Anteriormente foram definidos os equipamentos que seriam inspecionados:

Tabela 6 – Lista de equipamentos inspecionados.

Equipamento	Quantidade
Dropper (Pingado)	1
Disjuntor 69 kV	1

Transformador de Força	2
Para-raios	2
Transformadores de Potencial (TP)	2
Transformadores de Corrente (TC)	2
Chaves Seccionadoras	5
Disjuntores 13,8 kV	2
Reguladores de Tensão	1
Barramento 13,8 kV	1
TOTAL	19

Fonte: Próprio Autor. (2023)

Segundo Santos (2006), existe uma grande dificuldade de determinar a emissividade correta dos vários equipamentos e conexões envolvidos em uma subestação de alta tensão. Podendo ainda o valor da emissividade sofrer variação de acordo com fatores como sujeira, oxidação, corrosão.

De acordo com Oliveira (2019), entre as Distribuidoras de energia elétrica que utilizam a emissividade de 0,75 para inspeções termográficas em subestações estão a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e a Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC). Portanto, para esta inspeção a emissividade no termovisor será ajustada para o valor de 0,75.

A inspeção foi iniciada pelo ramal de entrada seguindo em direção aos demais componentes da subestação.

3.1.1 Dropper (Pingado)

Figura 7 - Dropper (Pingado)



Fonte: Próprio autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA

- **Temperatura Máxima Medida:** 43,2 °C;
- **Observações:** Os conectores dos droppers nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.2 Para-raios 1

Figura 8 - Para-raios 1

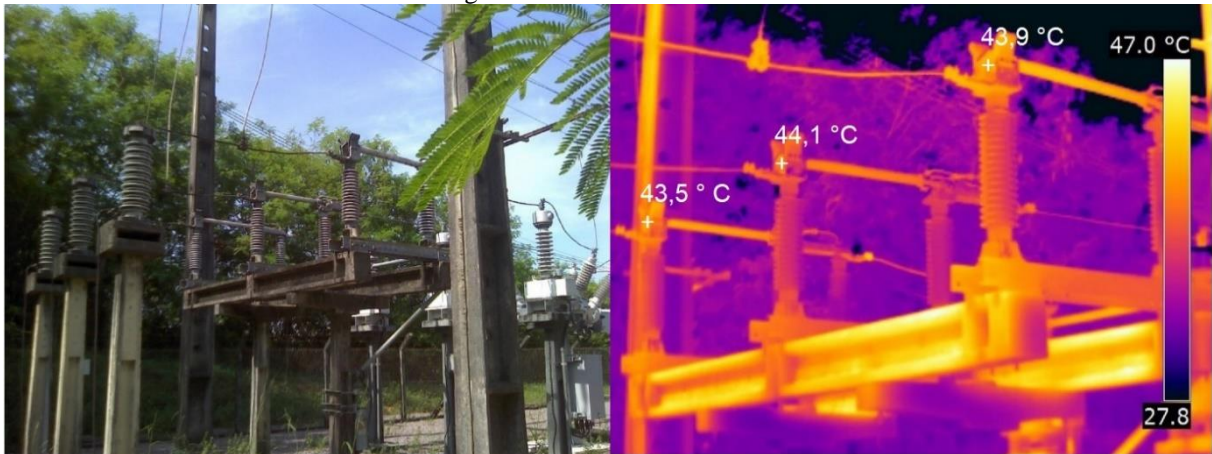


Fonte: Próprio Autor (2023).

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 41,7 °C;
- **Observações:** Os conectores dos para-raios nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura dos corpos dos para-raios verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.3 SECCIONADORA 69 KV

Figura 9 – Seccionadora 69 kV

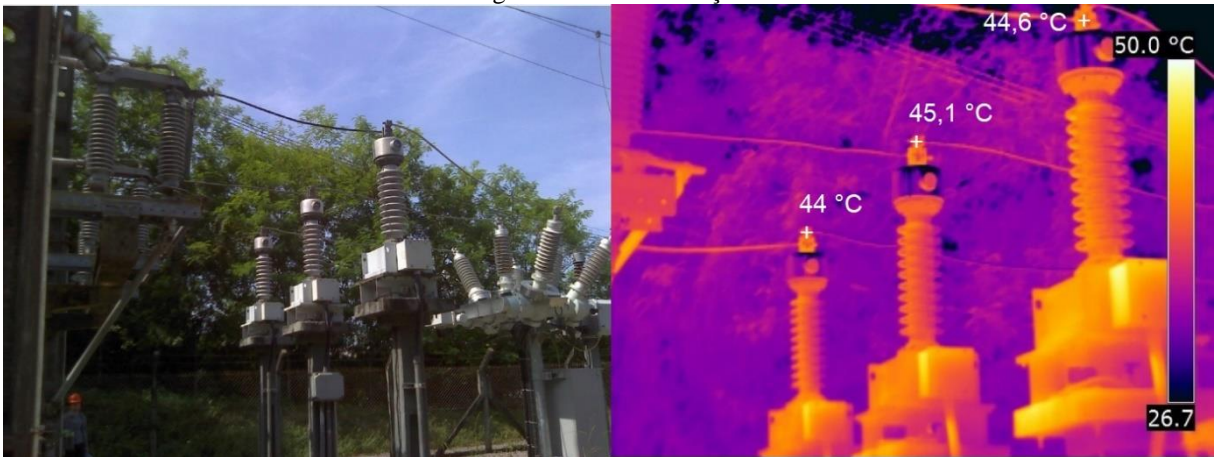


Fonte: Próprio autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 44,1 °C;
- **Observações:** Os contatos da chave seccionadora nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes da seccionadora verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.4 TP – Proteção

Figura 10 - TP – Proteção

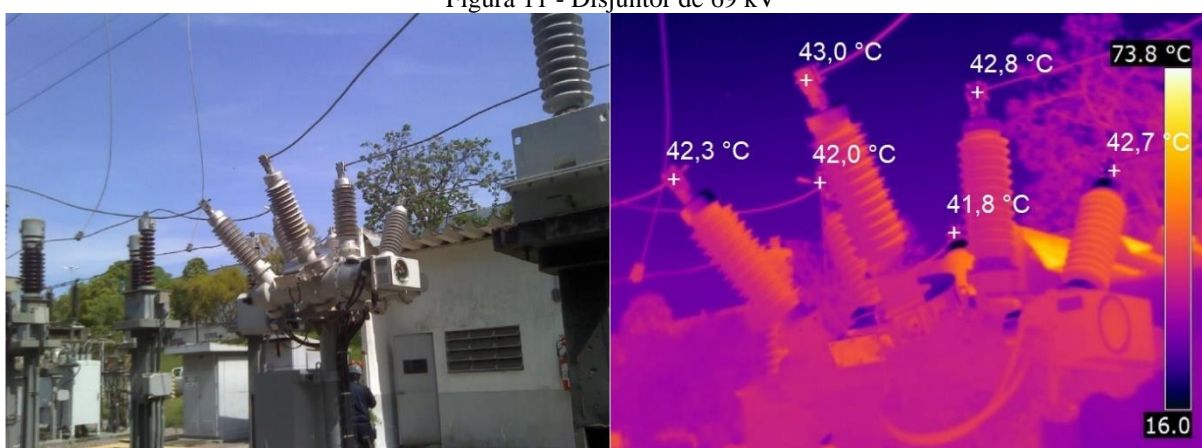


Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 45,1 °C;
- **Observações:** Os conectores dos TP's nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.5 Disjuntor de 69 kV

Figura 11 - Disjuntor de 69 kV

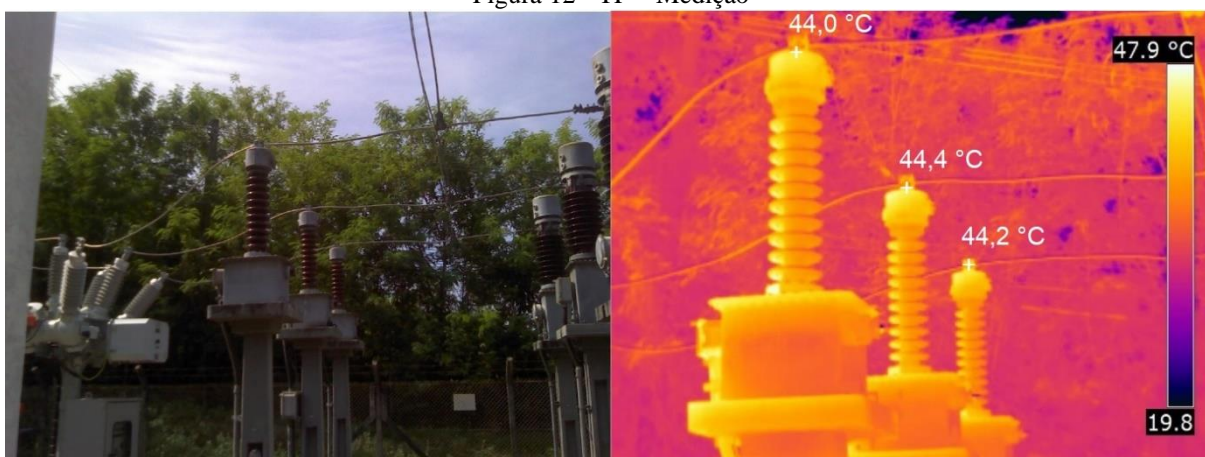


Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 43 °C;
- **Observações:** Os conectores do disjuntor de 69 kV nas três fases medidas, entrada e saída apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes do disjuntor verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.6 TP – Medição

Figura 12 - TP – Medição

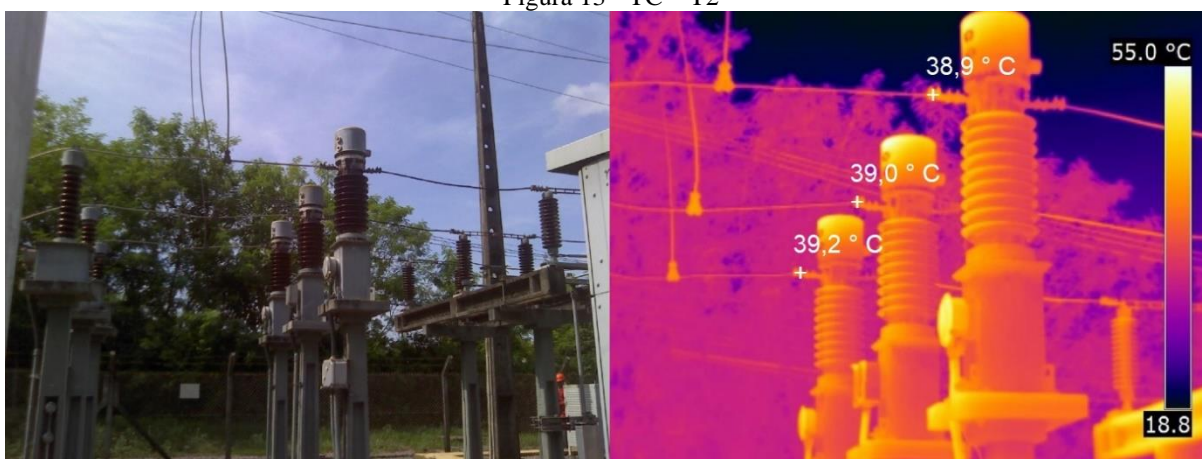


Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 44,4 °C;
- **Observações:** Os conectores dos TP's de medição nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.7 TC – T2

Figura 13 - TC – T2

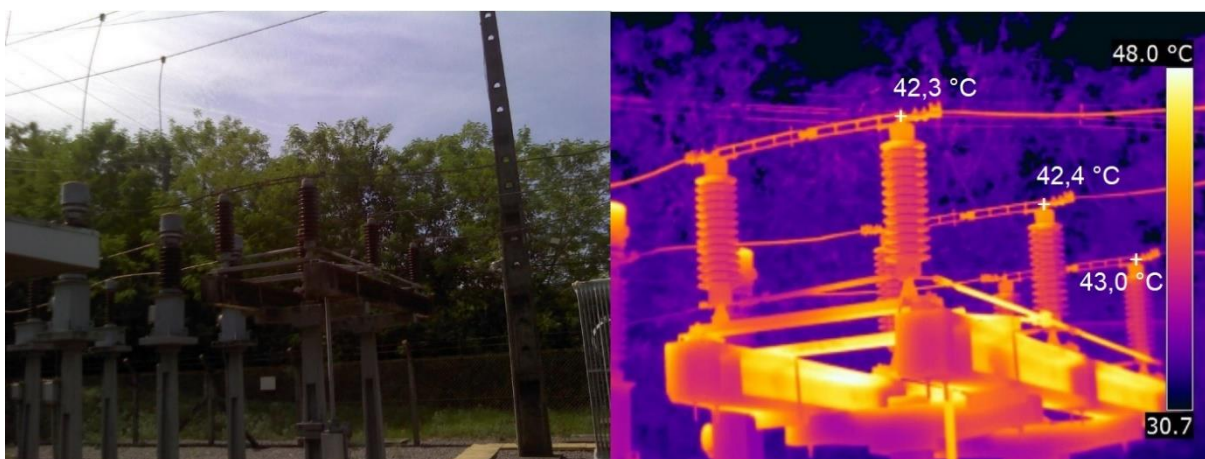


Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 39,2 °C;
- **Observações:** Os conectores dos transformadores de corrente nas três fases medidas, apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes dos transformadores verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.8 Seccionadora Entrada - T2

Figura 14 - Chave Seccionadora – Trafo T2



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 43,0 °C;
- **Observações:** Os conectores da parte fixa da chave seccionadora nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes dos transformadores verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.9 Transformador T2 – Primário

Figura 15 - Transformador T2 - Primário



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 44,5 °C;
- **Observações:** As buchas do primário do transformador nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo do transformador verificamos que estão dentro da faixa esperada, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.10 Transformador T2 – Secundário

Figura 16 - Transformador T2 - Secundário

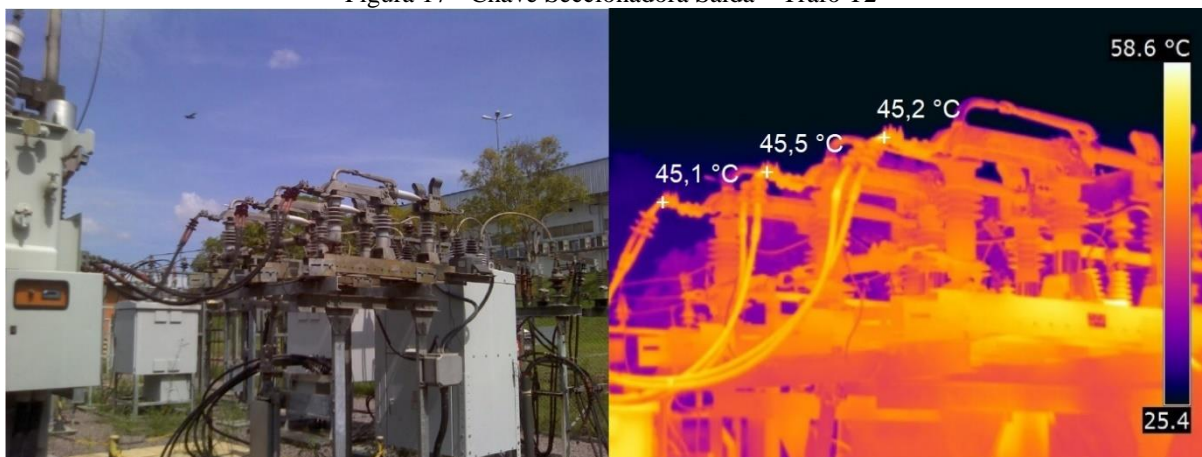


Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 55,2 °C;
- **Observações:** As buchas de do secundário do transformador nas três fases medidas apresentaram uma elevação de temperatura em comparação com elementos semelhantes, porém ainda dentro da Máxima Temperatura Admissível para este tipo de componente. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo do transformador verificamos que estão dentro da faixa esperada, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Na próxima manutenção programada verificar cabos e a conexão das muflas do secundário do transformador, realizar limpeza, reaperto e substituição se necessário.

3.1.11 Seccionadora Saída – T2

Figura 17 - Chave Seccionadora Saída – Trafo T2



Fonte: Próprio autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 45,5 °C;
- **Observações:** Os contatos da chave seccionadora nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes da seccionadora verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.12 Disjuntor T2 – 13,8 kV

Figura 18 - Disjuntor Trafo T2 – 13,8 kV



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 50,1 °C;
- **Observações:** O conector da fase S na entrada do disjuntor de 13,8 kV apresentou temperatura elevada em comparação às outras fases, com uma diferença em torno de 6 °C. Porém, ainda dentro da Máxima Temperatura Admissível para este tipo de componente.
- **Prioridade Critério ΔT_{ref} :** 4
- **Recomendações:** Na próxima manutenção programada verificar cabos e a conexão da fase S da entrada do disjuntor de 13,8 kV, realizar limpeza, reaperto e substituição se necessário.

3.1.13 BARRAMENTO – 13,8 kV – T2

Figura 19 - Barramento - 13,8 kV – T2



Fonte: Próprio autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 44,5 °C;
- **Observações:** As conexões no barramento de 13,8 kV nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura dos componentes conectados ao barramento verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.14 Para-raios 2

Figura 20 - Para-raios 2

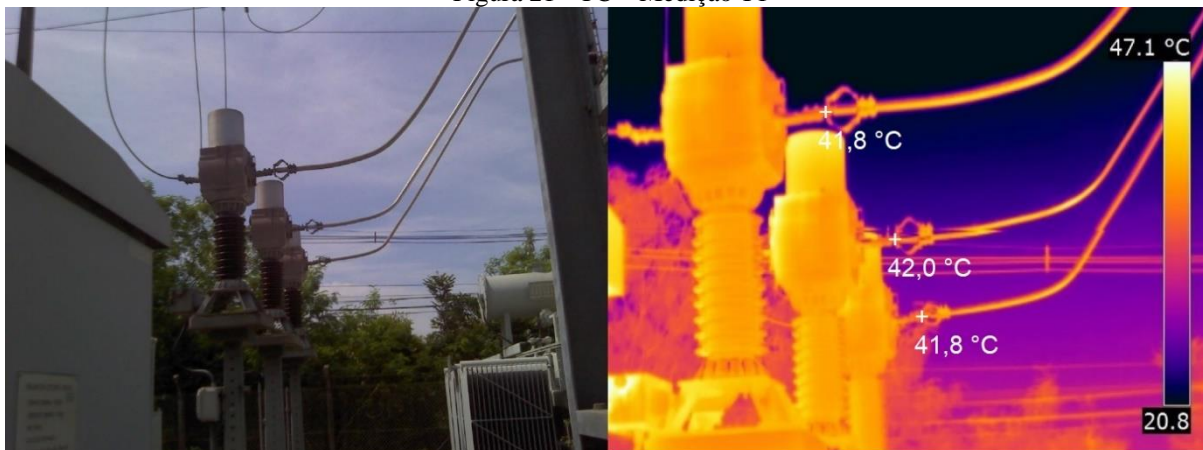


Fonte: Próprio autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 43,2 °C;
- **Observações:** Os conectores dos para-raios nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura dos componentes dos para-raios verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.15 TC – T1

Figura 21 - TC – Medição T1



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 39,2 °C;
- **Observações:** Os conectores dos transformadores de corrente nas três fases medidas, apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes dos transformadores verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.16 Seccionadora de Entrada – T1

Figura 22 - Chave Seccionadora – Trafo T1



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 44,4 °C;
- **Observações:** Os contatos da chave seccionadora nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes da seccionadora verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.17 Transformador T1 – Primário

Figura 23 - Transformador T1 - Primário



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 46,5 °C;
- **Observações:** As buchas do primário do transformador nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo do transformador verificamos que estão dentro da faixa esperada, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.18 Transformador T1 – Secundário

Figura 24 - Transformador T1 - Secundário



Fonte: Próprio Autor. (2022)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 45,5 °C;
- **Observações:** As buchas do secundário do transformador nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo do transformador verificamos que estão dentro da faixa esperada, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.19 Seccionadora de Saída –T1

Figura 25 – Seccionadora de Saída –T1



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 44,6 °C;
- **Observações:** Os contatos da chave seccionadora nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos componentes da seccionadora verificamos que eles estão em condições normais de operação, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Nenhuma.

3.1.20 Disjuntor de 13,8 kV - T1

Figura 26 - Disjuntor de 13,8 kV - T1



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 52,3 °C;
- **Observações:** O conector da fase T na entrada do disjuntor de 13,8 kV apresentou temperatura elevada em comparação às outras fases, com uma diferença em torno de 7 °C. Porém, ainda dentro da Máxima Temperatura Admissível para este tipo de componente.
- **Prioridade Critério ΔT_{ref} :** 4
- **Recomendações:** Na próxima manutenção programada verificar cabos e a conexão da fase T da entrada do disjuntor de 13,8 kV, realizar limpeza, reaperto e substituição se necessário.

3.1.21 Banco de Reguladores de Tensão

Figura 27 - Banco de Reguladores de Tensão



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 46,6 °C;
- **Observações:** As buchas da fonte, carga e neutro dos reguladores nas três fases medidas apresentaram valores de temperatura semelhantes e dentro da faixa normal de operação. Em uma análise qualitativa da distribuição de temperatura do corpo dos reguladores verificamos que estão dentro da faixa esperada, sem presença de anomalias térmicas.
- **Recomendações:** Sem recomendações

3.1.22 Chave Seccionadora - Banco de Reguladores de Tensão

Figura 28 - Chave Seccionadora - Banco de Reguladores de Tensão



Fonte: Próprio Autor. (2023)

- **Critério Utilizado:** ΔT_{ref} ; MTA;
- **Temperatura Máxima Medida:** 64,2 °C;
- **Observações:** O cabo na saída do regulador 2 apresentou temperatura elevada em comparação aos outros. Porém, ainda dentro da Máxima Temperatura Admissível para este tipo de componente.
- **Prioridade Critério ΔT_{ref} :** 4
- **Recomendações:** Na próxima manutenção programada verificar cabos e a conexão na saída do regulador 2, realizar limpeza, reaperto e substituição se necessário.

3.2 PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO

Após a identificação de pontos de aquecimento anormal em 3 equipamentos, a equipe de manutenção levou à gerência as informações para que fosse decidido se seriam realizadas as devidas correções de imediato ou se aguardariam a parada de planta programada que aconteceria do dia 22 de fevereiro de 2023 até o dia 05 de março de 2023.

Em comum acordo com os demais setores foi decidido que aguardaríamos a parada de planta, quando já estaria programada para ocorrer a manutenção anual subestação, com objetivo de não afetar o plano de produção e estoque de material, e tendo em vista que a empresa dispõe de procedimentos e um sistema secundário de alimentação composto por 3 geradores a diesel e 7 nobreaks industriais, capazes suportar a carga da planta no caso de alguma ocorrência indesejada.

Foi levantado todo material que poderia ser necessário no caso de uma manutenção corretiva ocasionada pela falha de algum dos equipamentos onde foram identificadas anomalias térmicas e foi devidamente separado em local de fácil acesso.

3.3 MANUTENÇÃO PROGRAMADA

No dia 23 de fevereiro, às 08:00h, após as partes envolvidas no serviço e o setor de segurança no trabalho realizarem uma análise preliminar de risco de todas as atividades a serem realizadas, foi dado início à manutenção da subestação, conforme registros fotográficos a seguir:

Figura 29 - Manutenção nos TP's e seccionadora.



Fonte: Próprio autor. (2023)

Figura 30 – Manutenção: Disjuntor 69 kV - Módulo PASS



Fonte: Próprio Autor. (2023)

Figura 31 - Manutenção: TP's, Disjuntor 69 kV, TC's.



Fonte: Próprio autor. (2023)

Figura 32 - Manutenção: TC's



Fonte: Próprio autor. (2023)

Figura 33 – Manutenção Transformador T2



Fonte: Próprio Autor. (2023)

Figura 34 - Manutenção: Trafo T1



Fonte: Próprio autor. (2023)

Figura 35 – Manutenção na Sala de Baterias



Fonte: Próprio Autor. (2023)

Figura 36 – Manutenção: Coleta de óleo para análises



Fonte: Próprio autor. (2023)

3.3.1 Correção das Anomalias

Para os disjuntores de 13,8 kV não foram encontrados componentes danificados, sendo necessário somente realizar a limpeza e aperto nas conexões de força, assim como demais medições e testes necessários.

Figura 37 - Manutenção: Disjuntores 13,8 kV



Fonte: Próprio Autor. (2023)

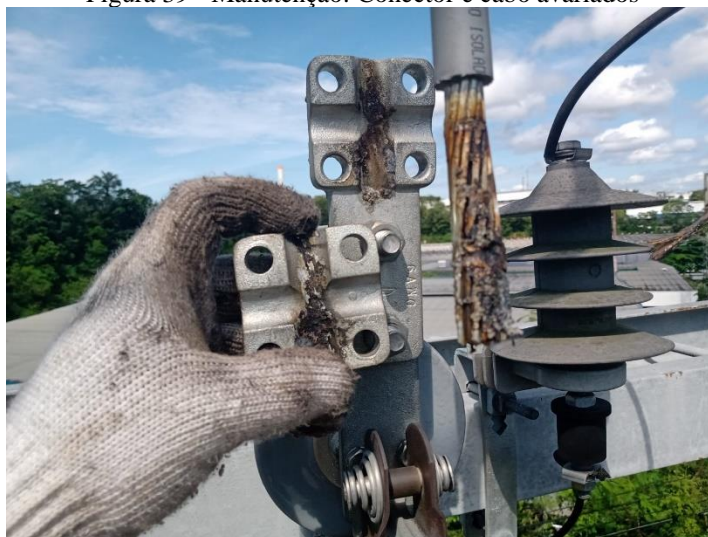
Já para a anomalia encontrada em um dos reguladores de tensão, foram encontradas avarias no conector e no cabo na saída do regulador de tensão, ocasionadas pela anomalia térmica identificada através da termografia realizada anteriormente. Foi realizada a substituição do conector avariado e do cabo. Em paralelo foi agendada com a fabricante dos reguladores uma inspeção detalhada para tentar identificar a causa deste sobreaquecimento.

Figura 38 - Manutenção: Reguladores de Tensão



Fonte: Próprio autor. (2023)

Figura 39 - Manutenção: Conector e cabo avariados



Fonte: Colaborador terceiro. (2023)

Figura 40 - Manutenção: Conector e cabo após substituição



Fonte: Colaborador terceiro. (2023)

CONCLUSÃO

Os resultados alcançados através da pesquisa e das inspeções termográficas realizadas comprovam a importância da manutenção preditiva através da termografia como método não intrusivo na identificação de anomalias térmicas, aumentando a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica às cargas que não devem sofrer interrupções.

A eficácia do método pôde ser comprovada na manutenção corretiva realizada, onde foram encontrados pontualmente componentes avariados ou necessitando de reaperto nas conexões nos equipamentos onde foram indicadas anormalidade anteriormente através da inspeção termográfica.

Em suma, apesar de obter grande eficiência, a termografia por infravermelho pode ser afetada por fatores externos e limitações, os quais podem ser atenuados se o termografista for qualificado e estiver atento a todos estes fatores.

Sugere-se para trabalhos futuros a criação de um procedimento de execução de termografia em subestações, com o objetivo de instruir a equipe de manutenção a realizar as termografias da maneira mais eficaz e segura o possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 5460: Sistemas elétricos de potência: Terminologia [Relatório]. - Rio de Janeiro : [s.n.], 1992.

BAUER ELTON e LEAL FRANZ CASTELO BRANCO Condicionantes das medições termográficas para avaliação da temperatura em fachadas [Artigo] // X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. - Fortaleza : [s.n.], 2013.

Bichels Arlei Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução [Livro]. - Curitiba : EDUTFPR, 2018.

Gonçalves Renato Masago Guia de projeto para subestações de alta tensão // Trabalho de graduação (Graduação de Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos. - São Paulo : Universidade de São Paulo, 2012. - p. 239 f.

Holst Gerald C. Common sense approach to thermal imaging [Livro]. - [s.l.] : JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 2000.

Kagan Nelson, Oliveira Carlos Cesar Barioni de e Robba Ernesto João Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica [Livro]. - São Paulo : Blucher, 2010. - 2º ed.

Kagan Nelson, Oliveira Carlos César Barioni e Robba Ernesto João Introdução aos sistemas de distribuição de energia [Livro]. - São Paulo : Blucher, 2005. - 1.

Kaplan Herbert Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment [Livro]. - Washington : SPIE, 2007. - 3.

Mamede Filho João Instalações elétricas industriais: De acordo com a Norma Brasileira NBR 5419:2015. [Livro]. - [s.l.] : LTC, 2017. - 9.

Pereira José Cláudio Sistemas elétricos de suprimento de energia para cargas de missão crítica [Diário] // O Setor Elétrico. - Maio de 2010. - 52.

Santos Laerte Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas [Artigo] // Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá.. - 2006.

STANDARDIZATION INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR ISO 13372: Condition monitoring and diagnostics of machines: Vocabulary [Artigo]. - 2004.

Tossi Luis e Starosta José Instalações em cargas de missão crítica [Diário] // O Setor Elétrico. - Janeiro de 2013. - 84.

ANEXO I – PLANTA SUBESTAÇÃO 69 KV

