

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

FERNANDO HENRIQUE DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA EMISSIVIDADE DE CONECTORES ELÉTRICOS E DE UM
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM SUBESTAÇÕES**

CURITIBA

2019

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

FERNANDO HENRIQUE DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA EMISSIVIDADE DE CONECTORES ELÉTRICOS E DE UM
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM SUBESTAÇÕES**

Projeto de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração de Sistemas Energéticos – Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com a Faculdade Cidade Verde, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Ribeiro Junior

CURITIBA

2019

O48e Oliveira, Fernando Henrique de
Estudo da emissividade de conectores elétricos e de um
procedimento de inspeção termográfica em subestações / Fernando
Henrique de Oliveira. – Curitiba, 2019.
124 f. il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Ribeiro Junior
Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o
Desenvolvimento, Institutos Lactec – Programa de Pós-Graduação
em Desenvolvimento de Tecnologia, 2019.
Inclui Referências bibliográficas.

1. Termografia em subestação. 2. Emissividade. 3. Conectores
elétricos. I. Ribeiro Junior, Sebastião. II. Instituto de Tecnologia para
o Desenvolvimento, Institutos Lactec – Programa de Pós-Graduação
em Desenvolvimento de Tecnologia. III. Título.

CDD 621.3

TERMO DE APROVAÇÃO

FERNANDO HENRIQUE DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA EMISSIVIDADE DE CONECTORES ELÉTRICOS E DE
UM PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM
SUBESTAÇÕES**

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com a Faculdade Cidade Verde (FCV), pela seguinte banca examinadora:


ORIENTADOR(A): Prof.^(a) Dr.^(a) Sebastião Ribeiro Junior
UFPR/Mestrado Profissional do LACTEC


Prof.^(a) Dr.^(a) Cresencio Silvio Segura Salas
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Prof.^(a) Dr.^(a) Edemir Luiz Kowalski
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Prof.^(a) Dr.^(a) André Bellin Mariano
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 27 de fevereiro de 2019.

Dedico esse trabalho as pessoas, em especial a minha família, que me ensinaram a não ficar na planície do conhecimento e da vida e me encorajaram a subir a montanha, rumo ao objetivo almejado.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a COPEL Distribuição, aos profissionais e amigos de trabalho que viabilizaram esse projeto de pesquisa e desenvolvimento, visando uma padronização no procedimento de inspeção.

Ao Prof. Dr. Sebastião Ribeiro Júnior, que aceitou o desafio de me orientar mesmo à distância, não medindo esforços para conduzir a construção desse trabalho. Não deixando de lembrar dos Professores da banca examinadora que fizeram contribuições importantes para o melhoria dessa pesquisa, com um profissionalismo ímpar.

Ao Institutos LACTEC, pela oportunidade oferecida do programa de mestrado, onde fiz a integração com alunos de sala nas mais variadas áreas do conhecimento e com os Professores que ministraram as disciplinas, que muito mais do que informações, passaram a sua experiência de vida para superar os obstáculos na busca dos objetivos pessoais.

Por fim, agradeço a minha família, em especial a minha esposa pela paciência e compreensão nos momentos da minha presença ausente no lar, utilizados para escrever essa dissertação. Aos meus pais que me ensinaram a caminhar com as coisas que passam e abraçar as que não passam nesse plano terreno.

RESUMO

Conectores elétricos em subestações precisam serem inspecionados para impedir que um defeito possa evoluir para uma falha elétrica, interrompendo o fornecimento de energia. Devido às falhas em conexões elétricas serem precedidas de fenômenos térmicos que ocorrem com a evolução do processo de oxidação ou mau contato, a inspeção termográfica em conectores é uma tecnologia importante de diagnóstico térmico em materiais. Contudo, o uso da termografia sem considerar as influências envolvidas na medição de temperatura sem contato, pode levar a uma tomada de decisão equivocada. O objetivo do presente trabalho é desenvolver um procedimento de inspeção termográfica para diagnóstico térmico em conectores elétricos de alumínio, por meio da determinação da emissividade dos conectores e capacitação do termografista para inspeções em subestações. Ensaios em laboratório aplicando ciclos de corrente elétrica baseado na norma americana ANSI C119.4-2011 foram realizados para determinar a emissividade dos conectores, através de medições de temperatura com o uso de um termopar e ajuste da emissividade no termovisor até coincidir com a temperatura do termopar. Os dados foram analisados estatisticamente e a média da emissividade dos conectores novos ficou em 0,80 e dos retirados de operação em 0,92 e 0,95, contribuindo com a literatura de termografia quantitativa no conhecimento dessas emissividades. O pesquisa demonstrou que o aumento do valor da resistência elétrica de cada conector e da corrente elétrica de operação, impactam diretamente na elevação de temperatura medida pelo termovisor. Na capacitação da equipe sem experiência foi elaborado um procedimento de inspeção baseado em normas nacionais e internacionais, buscando instruir os profissionais em como identificar aquecimentos de forma assertiva, avaliando as influências na medição de temperatura sem contato em ambientes desabrigados. Foram detectados quatorze aquecimentos em conectores, inspecionando oito subestações, medindo temperaturas que variaram entre 63 a 145 °C e após a manutenção desses aquecimentos, a maior temperatura chegou a 41 °C, evidenciando a redução de temperatura após o reparo de cada conector. Assim o procedimento proposto de inspeção termográfica apresenta-se como uma ferramenta preditiva capaz de auxiliar no diagnóstico térmico de conectores elétricos de alumínio em operação, através da identificação e redução das temperaturas de aquecimento em conexões de subestações, aprimorando a gestão de ativos físicos do parque da Distribuidora de estudo.

Palavras-chave: Termografia em subestação. Emissividade. Conectores elétricos. Procedimento de inspeção termográfica

ABSTRACT

Electrical connectors in substations need to be inspected to prevent a defect from evolving into an electrical failure by disrupting the power supply. Due to the failure of electrical connections being preceded by thermal phenomena that occur with the evolution of the oxidation process or poor contact, thermographic inspection in connectors is an important technology for thermal diagnosis in materials. Nevertheless, the use of thermography without regarding the influences involved in non-contact temperature measurement may lead to a wrong decision. The objective of the present work is to develop a thermographic inspection procedure for thermal diagnosis in electrical connectors of aluminum, by means of determining the emissivity of the connectors and capacity of the thermographer to inspections in substations. Laboratory assays applying electric current cycles based on American Standard ANSI C119.4-2011 were performed for the emissivity of the connectors, through temperature measurements with the use of a thermocouple and the adjustment of the emissivity in the thermal imager until it coincides with the temperature of the thermocouple. The data were statistically analyzed and the average emissivity of the new connectors was 0.80 and the withdrawals of operation at 0.92 and 0.95, contributing with the literature of quantitative thermography in the knowledge of these emissivities. The research showed that the increase in the value of the electrical resistance of each connector and of the electric current of operation, directly impact on the elevation of temperature measured by the thermal imager. In the training of a team without experience an inspection procedure was elaborated based on national and international standards, seeking to instruct the professionals in how to identify heatings in an assertive way, evaluating the influences in the measurement of temperature without contact in unsheltered environments. Fourteen heatings were detected in connectors, inspecting eight substations, measuring temperatures that ranged from 63 to 145 ° C and after the maintenance of these heatings, the highest temperature reached 41 ° C, evidencing the reduction of temperature after the repair of each connector. Thus, the proposed thermographic inspection procedure is shown as a predictive tool capable of assisting in the thermal diagnosis of electrical aluminum connectors in operation, by identifying and reducing heating temperatures in substation connections, improving the physical asset management of the park of the Study Distributor.

Keywords: Substation thermography. Emissivity. Electrical connectors. Thermographic inspection procedure

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	27
FIGURA 2 - EXITÂNCIA RADIANTE TOTAL DO CORPO NEGRO EM UMA DADA TEMPERATURA	31
FIGURA 3 - RADIAÇÃO INCIDENTE EM UM CORPO REAL.....	31
FIGURA 4 - IMAGEM VISUAL E TÉRMICA DE UMA SUPERFÍCIE AQUECIDA COM DIFERENTES VALORES DE EMISSIVIDADES	33
FIGURA 5 - TERMOVISOR PORTÁTIL MARCA FLIR – MODELO E45.....	35
FIGURA 6 - ENERGIA DISPONÍVEL NAS FAIXAS DE 3 A 5 μm E DE 8 A 14 μm PARA UM CORPO NEGRO A UMA TEMPERATURA DE 300 K (26,85 °C)	36
FIGURA 7 - FORMAÇÃO DE CONTATOS ELEMENTARES ENTRE DOIS METAIS.....	37
FIGURA 8 - CONECTORES NOVOS E RETIRADOS DE OPERAÇÃO PARA O EXPERIMENTO	47
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DO EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO	49
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA	49
FIGURA 11 - SUBESTAÇÃO TÍPICA DE 34,5 KV.....	50
FIGURA 12 - PONTOS USADOS PARA MEDIÇÃO DAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS	51
FIGURA 13 - MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA COM MICROOHMÍMETRO	52
FIGURA 14 - ARRANJO PARA ENSAIOS NO LABORATÓRIO	53
FIGURA 15 - CONEXÃO ELÉTRICA COM MAU CONTATO.....	54
FIGURA 16 - MÁXIMA TEMPERATURA ADMISSÍVEL EM CONEXÕES ELÉTRICAS	59
FIGURA 17 - PERCENTUAL DE ANOMALIAS TÉRMICAS POR TIPO DE EQUIPAMENTO.....	62
FIGURA 18 - PERCENTUAL DE CONECTORES POR TIPO.....	63
FIGURA 19 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS CONECTORES COM BOM CONTATO.....	65

FIGURA 20 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS CONECTORES COM MAU CONTATO.....	66
FIGURA 21 - VARIAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA EM UMA SUBESTAÇÃO DAS 8 ÀS 20 HORAS	67
FIGURA 22 - TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO TÉRMICA DO CONECTOR	68
FIGURA 23 - MEDIÇÃO DA TEMPERATURA COM O TERMOPAR DE CONTATO.....	68
FIGURA 24 - MEDIÇÃO DA TEMPERATURA COM O TERMOVISOR SEM CONTATO.....	69
FIGURA 25 - IMAGEM TÉRMICA DO CONECTOR TIPO CHAPA-CABO RETIRADO DE OPERAÇÃO	69
FIGURA 26 - IMAGEM DO CONECTOR TIPO CHAPA-CABO RETIRADO DE OPERAÇÃO.....	70
FIGURA 27 - EMISSIVIDADES DOS CONECTORES TIPO CHAPA-CABO NOVO E RETIRADO DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO	71
FIGURA 28 - EMISSIVIDADES DOS CONECTORES TIPO PARALELO NOVO E RETIRADO DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO.....	72
FIGURA 29 - EMISSIVIDADES DOS CONECTORES TIPO CABO-CABO NOVO E RETIRADO DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO	73
FIGURA 30 - TEMPERATURAS MEDIDAS NO CONECTOR CHAPA-CABO NOVO COM BOM CONTATO.....	77
FIGURA 31 - TEMPERATURAS MEDIDAS NO CONECTOR PARALELO NOVO COM BOM CONTATO.....	81
FIGURA 32 - TEMPERATURAS MEDIDAS NO CONECTOR CABO-CABO NOVO COM BOM CONTATO.....	84
FIGURA 33 - COMPARAÇÃO DE TEMPERATURA ENTRE A CONEXÃO PARALELA NOVA COM BOM CONTATO E COM MAU CONTATO ($e = 0,85$)	89
FIGURA 34 - COMPARAÇÃO DE TEMPERATURA ENTRE A CONEXÃO PARALELA RETIRADA DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO E COM MAU CONTATO ($e = 0,85$)	90
FIGURA 35 - PERCENTUAL DE ANOMALIAS TÉRMICAS POR ESTADO DO CONECTOR.....	93

FIGURA 36 - VALORES DE TEMPERATURAS DOS TERMOGRAMAS EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE OPERAÇÃO.....	95
FIGURA 37 - PERCENTUAL DE ANOMALIAS TÉRMICAS POR PRIORIDADE DE ATENDIMENTO DA MANUTENÇÃO.....	97
FIGURA 38 - COMPARAÇÃO ENTRE OS NÍVEIS DE TEMPERATURAS ANTES E DEPOIS DA MANUTENÇÃO DOS TERMOGRAMAS DE 1 A 7	99
FIGURA 39 - COMPARAÇÃO ENTRE OS NÍVEIS DE TEMPERATURAS ANTES E DEPOIS DA MANUTENÇÃO DOS TERMOGRAMAS DE 8 A 14 ..	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - SUBDIVISÃO DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHA EM REGIÕES	27
TABELA 2 - VANTAGENS DE DESVANTAGENS DA TERMOGRAFIA	34
TABELA 3 - ENERGIA DISPONÍVEL NAS FAIXAS DO COMPRIMENTO DE ONDA DOS TERMOVISORES	35
TABELA 4 - MATERIAIS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO	45
TABELA 5 - CONECTORES UTILIZADOS NO EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO	46
TABELA 6 - MATERIAIS UTILIZADOS NA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM SUBESTAÇÕES	47
TABELA 7 - APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO POR CATEGORIA	59
TABELA 8 - QUANTIDADES DE SUBESTAÇÕES POR DISTRITAL	60
TABELA 9 - QUANTIDADES DE SUBESTAÇÕES POR NÍVEL DE TENSÃO ELÉTRICA.....	61
TABELA 10 - QUANTIDADES SUBETAÇÕES POR SETOR DE MANUTENÇÃO.....	61
TABELA 11 - QUANTIDADES DE CONECTORES POR TIPO EM SUBESTAÇÕES	62
TABELA 12 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS CONECTORES COM BOM CONTATO.....	64
TABELA 13 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS CONECTORES COM MAU CONTATO.....	65
TABELA 14 - VALORES DE EMISSIVIDADES ENCONTRADAS NO ENSAIO EM LABORATÓRIO PARA CONECTORES NOVOS E RETIRADOS DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO.....	73
TABELA 15 - EMISSIVIDADES ENCONTRADAS PARA CONECTORES NOVOS COM BOM CONTATO	74
TABELA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE EMISSIVIDADES PARA OS CONECTORES NOVOS COM BOM CONTATO.....	74

TABELA 17 - EMISSIVIDADES ENCONTRADAS PARA CONECTORES RETIRADOS DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO.....	75
TABELA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE EMISSIVIDADES PARA OS CONECTORES RETIRADOS DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO.....	75
TABELA 19 - TEMPERATURA MEDIDAS NO CONECTOR CHAPA-CABO NOVO COM BOM CONTATO.....	76
TABELA 20 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR CHAPA-CABO NOVO PARA AS CORRENTES DE 50 A E 300 A	78
TABELA 21 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR CHAPA-CABO NOVO COMPARANDO AS EMISSIVIDADES 0,85 A 0,35	79
TABELA 22 - TEMPERATURA MEDIDAS NO CONECTOR PARALELO NOVO COM BOM CONTATO	80
TABELA 23 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR PARALELO NOVO PARA AS CORRENTES DE 50 A E 300 A	82
TABELA 24 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR PARALELO NOVO COMPARANDO AS EMISSIVIDADES 0,85 A 0,35	82
TABELA 25 - TEMPERATURA MEDIDAS NO CONECTOR CABO-CABO NOVO COM BOM CONTATO.....	83
TABELA 26 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR CABO-CABO NOVO PARA AS CORRENTES DE 50 A E 300 A	84
TABELA 27 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR CABO-CABO NOVO COMPARANDO AS EMISSIVIDADES 0,85 A 0,35	85
TABELA 28 - ACRÉSCIMO DE TEMPERATURA COMPARANDO VALORES DE EMISSIVIDADES E DE CORRENTES PARA CONECTORES NOVOS COM BOM CONTATO	85
TABELA 29 - ACRÉSCIMO DE TEMPERATURA COMPARANDO VALORES DE EMISSIVIDADES E DE CORRENTES PARA CONECTORES RETIRADOS DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO.....	87
TABELA 30 - EMISSIVIDADES DE CONECTORES NOVOS E RETIRADOS DE OPERAÇÃO PARA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA QUANTITATIVA	88
TABELA 31 - RELAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DA REGIÃO NOROESTE SELECIONADAS PARA APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA	91

TABELA 32 - HORÁRIO DE PONTA DE CARGA DIÁRIO NAS SUBESTAÇÕES	92
TABELA 33 - QUANTIDADE DE AQUECIMENTOS IDENTIFICADOS PELA EQUIPE DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA POR TIPO DE EQUIPAMENTO E CONECTOR.....	92
TABELA 34 - ESTADO DOS CONECTORES COM OS AQUECIMENTOS IDENTIFICADOS PELA EQUIPE DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA	93
TABELA 35 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TERMOGRAMAS COLETADOS NA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA.....	94
TABELA 36 - PRIORIDADE E PRAZO DE MANUTENÇÃO DOS AQUECIMENTOS	96
TABELA 37 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TERMOGRAMAS COLETADOS NA REINSPEÇÃO TERMOGRÁFICA.....	97
TABELA 38 - DESCRIÇÃO DO SERVIÇO EXECUTADO NA MANUTENÇÃO DOS TERMOGRAMAS	98

LISTA DE SIGLAS

ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica

ANSI - American National Standards Institute

APR – Análise Preliminar de Riscos

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CELESC - Centrais Elétricas de Santa Catarina

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electric and Electronics Engineers

ITAIPU – Usina Hidrelétrica Binacional

MIT – Manual de Instrução Técnica

MTA – Máxima Temperatura Admissível

NR – Norma Regulamentadora

NDTE – Ensaio térmicos não destrutivos

NEMA - National Electrical Manufacturers Association

SEP - Sistema Elétrico de Potência

URA – Umidade Relativa do Ar

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Unidade de corrente elétrica em amperes

Δt – Elevação de temperatura em relação à temperatura ambiente

e – Emissividade

P – Potência elétrica em watt

R - Resistência elétrica em ohm

I – Corrente elétrica em ampere

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos	22
1.3	METODOLOGIA.....	22
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	CONCEITOS DA TERMOGRAFIA.....	25
2.1.1	Temperatura e calor	25
2.1.2	Formas de transferências de calor	25
2.1.2.1	Condução	26
2.1.2.2	Convecção.....	26
2.1.2.3	Radiação.....	26
2.1.3	Teoria da radiação.....	28
2.1.4	Lei de Planck	29
2.1.5	Lei Stefan-Boltzmann	30
2.1.6	Emissividade	31
2.1.7	Termografia infravermelha.....	33
2.1.8	Teoria do contato elétrico.....	37
3	TRABALHOS CORRELATOS	38
3.1	EXPERIMENTOS TÉRMICOS EM CONECTORES.....	38
3.2	INFLUÊNCIAS NO PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO.....	40
3.3	OBSERVAÇÕES FINAIS.....	43

4	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1	MATERIAS	45
4.2	MÉTODO	48
4.2.1	Levantamento dos ativos físicos da Distribuidora	49
4.2.2	Medição da resistência elétrica dos conectores	50
4.2.3	Estudo da emissividade e temperatura dos conectores	52
4.2.4	Conhecimento do processo de inspeção da Distribuidora	54
4.2.5	Criação de um procedimento de inspeção	55
4.2.5.1	Segurança	56
4.2.5.2	Equipamentos necessários	56
4.2.5.3	Equipe necessária	56
4.2.5.4	Limitações e orientações	56
4.2.5.5	Procedimento de inspeção	57
4.2.6	Aplicação do procedimento pela equipe de inspeção	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1	ATIVOS FÍSICOS SELECIONADOS	60
5.2	ENSAIOS EM LABORATÓRIO	63
5.2.1	Avaliação da resistência elétrica dos conectores	63
5.2.2	Avaliação da emissividade e temperatura dos conectores	66
5.3	Procedimento de inspeção termográfica em subestações	90
6	CONCLUSÕES	101
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	103
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE 1 – PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM SUBESTAÇÕES DESABRIGADAS	108
	APÊNDICE 2 – TERMOGRAMAS DOS AQUECIMENTOS IDENTIFICADOS NA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA	119

1 INTRODUÇÃO

O Setor Elétrico Brasileiro é regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, que fiscaliza as áreas de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. As Distribuidoras de energia que renovaram o contrato de concessão com o órgão regulador, constataram que os indicadores técnicos e financeiros que fazem parte das cláusulas contratuais, estão cada vez mais difíceis de serem alcançados, exigindo das empresas uma gestão eficiente dos seus ativos, para proporcionar um produto de qualidade e segurança à população (ANEEL, 2018).

O lucro das Distribuidoras de energia vem do gerenciamento da parcela variável da composição tarifária, através da disponibilização dos seus ativos físicos e custo para mantê-los. Para compatibilizar o nível de tensão requerido pelos consumidores com qualidade e segurança, são disponibilizadas as subestações de energia de média tensão que é uma parte importante dos ativos físicos das Distribuidoras, integrando o sistema de distribuição de energia, junto com as redes elétricas (COPEL 2018). De forma simplificada, o sistema elétrico de potência é composto pela subestação transmissora, que eleva a tensão para ser transmitida por condutores elétricos, que posteriormente passará pela subestação abaixadora de média tensão. Em seguida, a energia é distribuída para os consumidores de acordo com suas necessidades e contratos estabelecidos (URSINE, 2013)

As subestações de energia elétrica de média tensão, contém diversos equipamentos e conexões elétricas. Uma forma de manter disponibilizados os ativos físicos da subestação, é realizar a manutenção preventiva conforme periodicidade informada pelo fabricante do equipamento. Porém, a taxa de degradação dos conectores de energia utilizados em campo, que ocorre com a evolução de processos de corrosão, não pode ser determinada com precisão, o que torna difícil a programação do tempo de manutenção (AKISHINO, 2014). Falhas em conexões são precedidas de fenômenos térmicos que ocorrem com a evolução do processo de corrosão ou mau contato, aumentando a resistência

elétrica do material da conexão, levando a dissipação de energia por efeito *Joule* (PELIZZARI, 2006). Através da inspeção preditiva, utilizando a termografia por infravermelho como ferramenta de diagnóstico térmico de conexões elétricas, pode-se detectar defeitos em estágios iniciais, com os equipamentos em operação e uma grande agilidade na aquisição de medidas de temperatura.

Para realizar a inspeção termográfica com o termovisor, que é a câmera que mede indiretamente a temperatura do alvo, é necessário conhecer as influências que provocam erro na medição de temperatura de conexões elétricas em subestações desabrigadas de média tensão. Existem as influências da radiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento, precipitação, umidade, distância do alvo, capacitação do profissional que faz a termografia e a emissividade dos componentes elétricos no processo de inspeção termográfica (DOS SANTOS, 2012).

As conexões elétricas em subestação são feitas por conectores de alumínio e cobre, que possuem emissividades diferentes. Vários fabricantes de conectores divulgam em manuais as emissividades de seus produtos, porém, esses valores somente podem ser aplicados quando o conector não foi colocado em operação em ambientes abertos, não retratando a realidade que encontra-se no campo, ou na área da subestação, que possuem conectores que podem conter um nível elevado de sujeira, oxidação e corrosão, por estarem sob a ação de variáveis climáticas influenciando no valor da emissividade. Então um erro na medição de temperatura em subestação, pode ser resultado da emissividade equivocada inserida no termovisor. Diferenças significativas nas medidas de temperaturas de equipamentos de subestações de potência foram observadas em função do uso de valores diferentes de emissividades na inspeção termográfica e do estado de degradação, sendo testadas a emissividade de placas de alumínio, conectores de ferro e material isolante tipo epóxi (Neto et al. 2006).

Por outro lado a capacitação do termografista (profissional que realiza a inspeção termográfica), precisa ser alinhada com procedimentos padronizados que visam orientá-lo a identificar, coletar e gerar relatórios, dos

aquecimentos identificados em conexões com defeito. Informações sobre as características dos equipamentos, funcionalidade, hierarquia de importância e corrente de ponta na subestação, devem ser consideradas no momento em que realiza-se a inspeção em campo e identifica a temperatura do objeto de interesse.

Esse trabalho busca elaborar um procedimento de inspeção termográfica em subestações desabrigadas de média tensão (13,8 e 34,5 kV) com os equipamentos elétricos energizados, através de estudos da emissividade de conectores elétricos de alumínio novos e retirados de operação, visando realizar diagnóstico térmico nos ativos físicos da COPEL Distribuição, para a segurança da operação das suas instalações elétricas, evitando desligamentos não programados que comprometem os indicadores técnicos e financeiros da empresa.

1.1 JUSTIFICATIVA

Existem sessenta e três subestações de média tensão na região noroeste do Paraná, na área de atuação da concessionária. Esses ativos físicos possuem inúmeras conexões com aplicação de conectores, que em sua maioria são de alumínio. Para o setor de engenharia de manutenção que precisa fazer uma gestão de ativos físicos eficiente, fica difícil ter um direcionamento de quais conexões estão apresentando defeito, podendo comprometer a continuidade e segurança no fornecimento de energia elétrica.

Uma forma de inspecionar esses conectores é através da inspeção visual, que tem grande limitação, porque somente vendo a conexão não é possível determinar se existe alguma anormalidade térmica, mas simplesmente verificar se tem a presença de sujeira e oxidação. Para tanto, a inspeção termográfica como ferramenta de diagnóstico térmico e realizada periodicamente, mostra-se atraente por identificar anomalias térmicas em estágios iniciais com os equipamentos em operação, não precisando causar desligamentos desnecessários.

Entretanto é necessário para um eficiente diagnóstico térmico pela termografia infravermelha, ponderar as influências que atingem a medição da temperatura. A emissividade do conector que está em operação na subestação e um procedimento de inspeção termográfica, são influências que afetam diretamente a medição de temperatura e precisam ser estudadas para um diagnóstico térmico mais assertivo, evitando desligamentos não programados, que prejudicam a disponibilização dos ativos físicos da subestação, conseqüentemente os índices técnicos e financeiros da concessionária.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um procedimento de inspeção termográfica para diagnóstico térmico em conectores de alumínio de subestações, visando aprimorar a gestão de ativos da Distribuidora.

1.2.2 Objetivos específicos

Selecionar os ativos físicos das subestações para estudo.

Realizar ensaios em laboratório para determinar a emissividade dos conectores elétricos e conhecer as suas resistências elétricas e temperaturas.

Elaborar um procedimento de inspeção termográfica para diagnóstico térmico em conexões elétricas de subestações.

Aplicar o procedimento criado na equipe de manutenção de subestação.

1.3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos nesse trabalho realizou-se uma pesquisa no banco de dados da Copel Distribuição. Através dos relatórios das equipes que realizam inspeção termográfica em subestações, foram identificados os tipos de equipamentos com aquecimento. Selecionou-se seis conectores de alumínio aparafusados tipo chapa-cabo, tipo cabo-cabo ou tubo-cabo e tipo paralelo, sendo três novos e os outros três retirados de operação. Metais como alumínio, cobre e aço são muito utilizados em equipamentos de subestações, devido às suas características de condutividade, sendo o alumínio o preferido em ambientes abertos pela alta resistência ao processo de corrosão, (BURNDY, 1995).

Fatores como a limpeza da superfície, o formato do objeto, a temperatura, o ângulo de visão, além da presença de sujeira, oxidação e corrosão, fazem com que o valor da emissividade varie (Epperly, 1997). Realizou-se o ensaio elétrico no laboratório de média tensão da Distribuidora, com uma fonte de corrente elétrica, um termovisor e um termopar de contato para medir a temperatura da conexão, visando saber o valor da emissividade e temperatura. Com o termopar e o termovisor foram realizadas três medições de temperatura por conector de estudo, para calcular os dados estatísticos da média e desvio padrão da temperatura e emissividade. Utilizando o microohmímetro realizou-se três medições de resistência elétrica por conector, para calcular a média e desvio padrão das resistências. Através do laboratório, reduziu-se as outras influências existentes no processo de diagnóstico térmico, como radiação solar, a temperatura ambiente, a velocidade do vento, a precipitação, a umidade e a distância do alvo.

Através do levantamento das características da prática de termografia da Distribuidora e das influências no processo de inspeção térmica que os trabalhos correlatos estudaram, como a emissividade de cada componente elétrico, o valor da corrente elétrica no instante da inspeção, o horário de ponta de carga nas subestações, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a distância do termovisor e o objeto inspecionado, foi criado um procedimento de inspeção para diagnóstico térmico em conectores elétricos, a ser aplicado na equipe de inspeção que não é experiente e não trabalha nessa atividade de termografia em subestações.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é dividida em sete capítulos, cujo os escopos passam a ser apresentados.

O Capítulo 1 é a introdução, onde trata dos desafios das Distribuidoras de energia em realizar gestão de seus ativos físicos e a importância de utilizar a inspeção termográfica para diagnóstico em conectores elétricos. Depois a justificativa mostra as vantagens da inspeção termográfica, desde que sejam considerados os fatores de influência na medição de temperatura. Também são apresentados os objetivos geral e específicos, e a metodologia proposta para atingir os objetivos apontados.

O Capítulo 2 dedica-se a fundamentação teórica que mostra os conceitos que envolvem a termografia em sistemas elétricos de potência, as formas de transferência de calor, a teoria da radiação para corpos ideais e reais e a definição da tecnologia da termografia infravermelha.

O Capítulo 3 aborda os trabalhos correlatos, separando em obras que buscaram estudar a emissividade de materiais utilizados no sistema elétrico e de procedimentos de inspeção termográfica que avaliaram as influências no diagnóstico térmico de componentes elétricos. Finaliza nas considerações finais onde são analisadas algumas particularidades destas obras.

O Capítulo 4 remete aos materiais e métodos utilizados, elencando os materiais usados no ensaio em laboratório e na inspeção em subestação. Esse Capítulo ainda mostra como foram realizados os ensaios, a forma que foram medidas as resistências elétricas dos conectores, suas temperaturas e determinação da emissividade. No método também é abordado como foi criado e aplicado o procedimento de inspeção termográfica em subestações desabrigadas.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos. Através dos conectores selecionados para ensaio, foram analisadas as medidas de resistência elétrica,

emissividade e temperatura. Para o procedimento de inspeção em subestação foram observados os níveis de temperatura medidos nos conectores, em função da sua resistência elétrica e corrente de operação.

As conclusões são apresentadas no Capítulo 6 e sugestões de trabalhos futuros são listadas no Capítulo 7.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITOS DA TERMOGRAFIA

Para utilizar a termografia infravermelha como ferramenta de diagnóstico térmico em conexões elétricas de subestações, é necessário conhecer os fenômenos físicos que permeiam o processo de inspeção termográfica. A seguir serão abordados esses fenômenos físicos.

2.1.1 Temperatura e calor

Quando dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, então os três corpos estão em equilíbrio térmico entre si. Por definição, dois corpos tem a mesma temperatura se eles estão em equilíbrio térmico entre si (TIPLER, 2016). Existe uma certa propriedade de estado que descreve os estados termodinâmicos dos corpos que estão em equilíbrio térmico um com outro, sendo denominado de temperatura (CHRZANOWSKI, 2001).

No entanto, o calor é a energia térmica em trânsito que flui de um corpo para o outro quando existe uma diferença de temperatura entre eles (INCROPERA e DEWITT, 2002), passando da região mais quente para a mais fria.

2.1.2 Formas de transferências de calor

A condução, convecção e radiação são as três formas de transferência de calor. Essas formas são diferentes, porém apresentam o mesmo resultado. O entendimento dessas formas de transferência de calor é relevante para compreender os fatores que influenciam na temperatura de uma superfície.

2.1.2.1 Condução

A transferência de calor por condução ocorre em sólidos, líquidos e gases, podendo ser descrita como a transferência de energia das partículas mais energéticas (alta temperatura) de uma substância para partículas adjacentes menos energéticas (baixa temperatura) devido à interação entre elas, pelo movimento cinético ou pelo impacto das moléculas, no caso de um fluido em repouso e pelo movimento de elétrons no caso de metais. Como a energia de uma partícula é diretamente proporcional à sua temperatura, na presença de um gradiente de temperatura pode observar-se a transferência de energia no sentido da região mais fria. (INCROPERA et al. 2008). A fonte de calor excita diretamente as partículas que transferem parte de sua energia às partículas vizinhas e essas por sua vez, transferem às outras partículas. A intensidade do fluxo depende da condutividade térmica do material.

2.1.2.2 Convecção

A transferência de calor por convecção pode ser definida como o processo pelo qual energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido através da ação combinada de: condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura (QUITES & LIA, 2005).

A convecção de calor pode ser dividido em duas categorias, convecção natural e convecção forçada. A convecção forçada depende de um mecanismo externo ao sistema para bombeamento de fluido, como um ventilador ou uma bomba d'água por exemplo. A convecção natural, por outro lado, ocorre devido às forças de empuxo que surgem a partir do gradiente de densidades gerado pelo diferencial de temperatura (HALLIDAY e RESNICK, 2010).

2.1.2.3 Radiação

Corpos com temperatura acima do zero absoluto (0 K ou $-273,16^{\circ}$ C), emitem radiação térmica. A propagação da radiação pode ser explicada por duas teorias, sendo a teoria de Maxwell e a teoria de Planck. A teoria de

Maxwell, usada para predição das propriedades de radiação de materiais, declara que a radiação térmica emitida se comporta como ondas eletromagnéticas, enquanto a teoria de Planck afirma que a radiação são fótons ou quantas de energia, sendo utilizada para estimar a quantidade de energia emitida por um corpo em função da sua temperatura (OZISICK, 1985).

Todo corpo acima do zero absoluto emite radiação térmica, nas faixas de ultravioleta, visível, infravermelho e até na faixa de micro-ondas do espectro eletromagnético. Todavia, para temperaturas típicas encontradas na Terra, a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho, (CHRZANOWSKI, 2001). Assim sendo, os termovisores, que são equipamentos eletrônicos destinado a medição indireta de temperatura, são fabricados com detectores que respondem a essa faixa do espectro. As divisões do espectro eletromagnético pode ser vista na FIGURA 1.

FIGURA 1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO



FONTE: O Autor (2018).

Através da TABELA 1, tem-se a proposta da divisão do espectro eletromagnético em sub-regiões (ROGALSKI et al., 2002).

TABELA 1 - SUBDIVISÃO DA RADIAÇÃO INFRAVERMELHA EM REGIÕES

REGIÃO	FAIXA DE COMPRIMENTO DE ONDA (μm)
Infravermelho muito próximo	0,78 - 1,1
Infravermelho próximo	1,1 - 3
Infravermelho médio	3 - 6
Infravermelho distante	6 - 15
Infravermelho muito distante	15 - 100

FONTE: ROGALSKI E CHRZANOWSKI (2002).

2.1.3 Teoria da radiação

Alguns fenômenos físicos não tinham explicação pela comunidade científica na segunda metade do século dezanove, entre eles a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo aquecido. Gustav Robert Kirchhoff apresentou um corpo capaz de absorver todas as radiações incidentes, não dependendo dos seus comprimentos de onda, de suas direções de incidência, de sua polarização, mas dependendo apenas de sua temperatura. Esse corpo Kirchhoff denominou corpo negro e para estar em equilíbrio termodinâmico, ele precisaria irradiar energia na mesma taxa em que absorve. Para uma dada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro (INCROPERA et al., 2011).

A conclusão que a quantidade total de energia irradiada por um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta, foi obtida em 1879 por Josef Stefan, através de medidas experimentais. Por meios teóricos

Ludwig Eduard Boltzmann em 1884 chegou na mesma conclusão, resultando na “lei de Stefan-Boltzmann”.

Em 1865, a partir da suposição que um campo magnético variável produz um campo elétrico e que um campo elétrico variável produz um campo magnético podendo propagar-se pelo espaço, o inglês James Clerk Maxwell previu teoricamente a existência de ondas eletromagnéticas, propondo sua igualdade com ondas de luz após verificar a coincidência entre o valor calculado da velocidade das ondas eletromagnéticas e o valor medido da velocidade das ondas luminosas.

O alemão Heinrich Rudolf Hertz, com o uso do fenômeno da indução eletromagnética, confirmou em 1887 as teorias de Maxwell, detectando ondas eletromagnéticas em laboratório e demonstrando que elas se propagam com a mesma velocidade das ondas de luz. A relação entre o comprimento de onda e a frequência de radiação é dada pela equação (1):

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Na qual,

$c = (2,99792458 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1})$ é a velocidade de propagação no vácuo

$\lambda = (\text{m})$ é o comprimento de onda.

$f = (\text{Hz})$ é a frequência da onda.

Pode-se assim listar as leis da radiação:

- Lei de Planck: relaciona energia e comprimento de onda
- Lei do deslocamento de Wien: relaciona temperatura e comprimento de onda
- Lei de Stephan-Boltzmann: relaciona temperatura e energia

2.1.4 Lei de Planck

O corpo negro é uma idealização, sendo importante porque suas características são o alicerce conceitual para representar o comportamento radioativo de corpos reais. Esse corpo idealizado emite a máxima radiação a uma dada temperatura por unidade de área e por unidade de comprimento. A distribuição espectral da radiação é descrita pela lei de Max Planck, dada pela equação (2), demonstrando a radiação emitida por um corpo negro ($M_{b\lambda}$) em uma dada temperatura (θ_{cn}), por unidade de área, por unidade de comprimento de onda (λ).

$$M_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k_B \theta_{cn}}} - 1 \right)} \quad (2)$$

Onde:

$M_{b\lambda} = \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$ é a exitância radiante espectral do corpo negro

$h = (6,6260755 \times 10^{-34} \text{ J.s})$ é a constante de Planck

$c = (\text{m/s})$ é a velocidade da luz no meio

$k_B = (1,380658 \times 10^{-23} \text{ J/K})$ é a constante de Boltzmann

$\theta_{cn} (\text{K})$ é a temperatura absoluta do corpo negro

Conhecendo a exitância, é possível definir a temperatura através da equação (3).

$$\theta_{cn} = \frac{c_2}{\ln\left[\frac{(c_1 + \lambda^5 M_{b\lambda})^\lambda}{(\lambda^5 M_{b\lambda})^\lambda}\right]} \quad (3)$$

Onde:

$$M_b = \left(\frac{W/m^2}{m}\right)$$

θ_{cn} = (K) temperatura do corpo negro

$$c_1 = 3,741832 \times 10^4 \left(\frac{W}{cm^2 \cdot um^4}\right)$$

$$c_2 = (14387,86 \times 10^4 \text{ um.K})$$

2.1.5 Lei Stefan-Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann é obtida matematicamente integrando a lei de Planck sobre o comprimento de onda de zero e infinito, permitindo calcular a quantidade de radiação emitida pelo corpo negro em todas as direções e sobre todos os comprimentos de onda, equação (4).

$$M_b = \sigma \cdot \theta_{cn}^4 \quad (4)$$

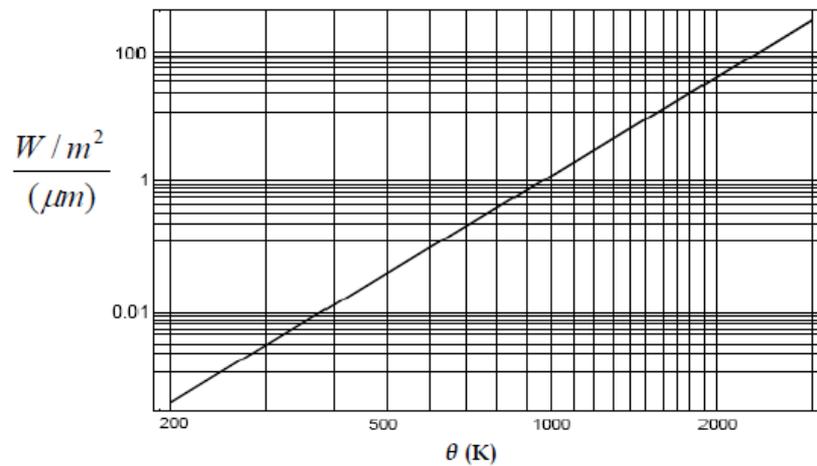
$$M_b = \left(\frac{W/m^2}{m}\right) \text{ exitância radiante total}$$

θ_{cn} = (K) temperatura do corpo negro

$$\sigma = 5,67051 \times 10^{-8} \left(\frac{W/m^2}{K^4}\right) \text{ constante de Stefan-Boltzmann}$$

A FIGURA 2 mostra a exitância radiante total do corpo negro em uma dada temperatura. Graficamente, a exitância radiante total (M_b) representa a área abaixo da curva de Planck para uma temperatura específica.

FIGURA 2 - EXITÂNCIA RADIANTE TOTAL DO CORPO NEGRO EM UMA DADA TEMPERATURA



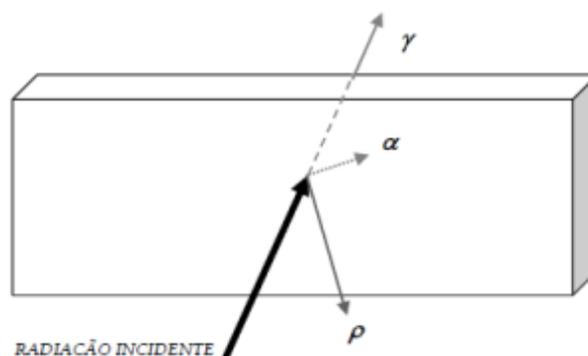
FONTE: CHRZANOWSKI (2001).

2.1.6 Emissividade

Como o corpo negro é considerado ideal e para fins de teoria, ele não retrata a realidade dos corpos existentes. A radiação emitida por corpos reais é proporcional a do corpo negro. As propriedades radioativas relevantes dos materiais, são a radiação absorvida, refletida, transmitida e a emissividade.

A radiação quando incide nos materiais reais desencadeia os fenômenos de absorção (α), reflexão (ρ) e transmissão (γ), conforme FIGURA 3. A soma desses três componentes para o mesmo comprimento de onda é igual a 1, equação (5), e em objetos opacos não tem a parte transmitida.

FIGURA 3 - RADIAÇÃO INCIDENTE EM UM CORPO REAL



FONTE: O Autor (2019).

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \gamma_{\lambda} = 1 \quad (5)$$

Outra propriedade importante é a que descreve a razão entre a emissão de uma superfície real em relação à emissão de um corpo negro à mesma temperatura, com o nome de emissividade, equação (6). Seu valor depende da temperatura, da faixa espectral, do formato e da textura da própria superfície. Portanto, trata-se de uma propriedade complexa, contudo fundamental na medição da radiação e fonte de incertezas no cálculo de temperatura (TEIXEIRA, 2012). A emissividade de uma superfície pode ser qualificada de acordo com sua dependência em relação ao comprimento de onda e à direção da radiação emitida.

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{M_{0\lambda}}{M_{b\lambda}} \quad (6)$$

Onde:

ϵ_{λ} = (adimensional) emissividade espectral

$M_{0\lambda}$ = ($\frac{W}{m^2}$) exitância radiante de uma superfície

$M_{b\lambda}$ = ($\frac{W}{m^2}$) exitância radiante do corpo negro

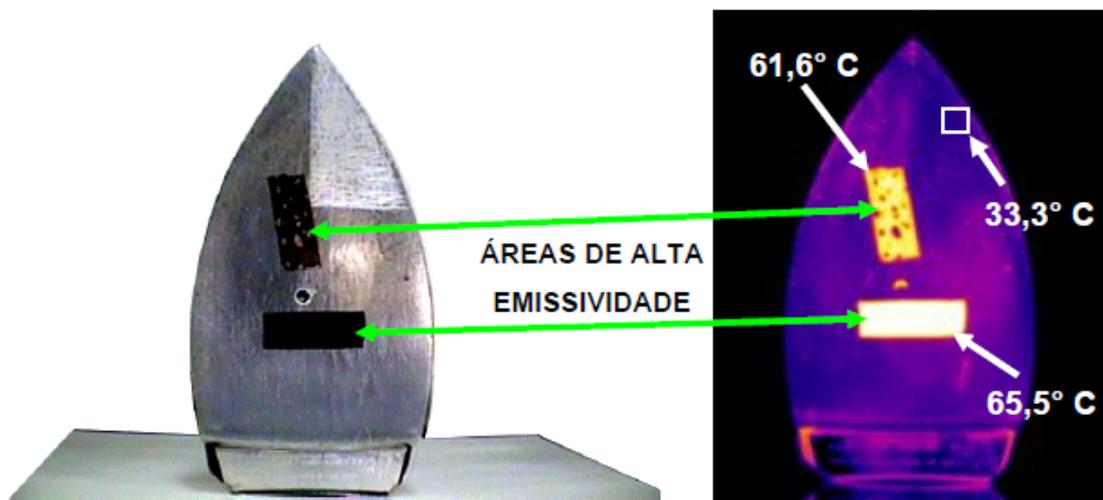
De acordo com a lei de Kirchhoff, para um corpo estar em equilíbrio térmico, é necessário existir um balanço energético entre a radiação absorvida e a radiação emitida. Caso o corpo possua uma maior radiação emitida do que absorvida, acontecerá o seu resfriamento e se esse mesmo corpo absorver uma quantidade maior de radiação ao invés de emitir, levará ao seu aquecimento. Superfícies com altas emissividades tem maior capacidade de emitir e absorver radiação do que superfícies com baixa emissividade, (DOS SANTOS, 2012).

Como os termovisores não medem temperatura diretamente, mas sim a radiação térmica, o diagnóstico térmico do alvo fica muito dependente da emissividade, podendo levar ao erro na identificação de aquecimentos, ou seja,

dificuldade em distinguir as conexões que estão em operação acima das temperaturas de trabalho normal.

A FIGURA 4 mostra uma superfície aquecida, com sua área possuindo valores de emissividades diferentes, através da alteração da superfície do material (DOS SANTOS, 2006). Mesmo ficando toda a superfície do corpo aquecido na mesma temperatura, existem níveis de temperaturas maiores na imagem térmica, para as regiões mais claras. Mostrando que a emissividade altera diretamente a temperatura medida.

FIGURA 4 - IMAGEM VISUAL E TÉRMICA DE UMA SUPERFÍCIE AQUECIDA COM DIFERENTES VALORES DE EMISSIVIDADES



FONTE: DOS SANTOS (2006).

2.1.7 Termografia infravermelha

Segundo definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 15424), a termografia é uma técnica de sensoriamento remoto que possibilita a medição de temperaturas e a formação de imagens térmicas de um componente, equipamento ou processo, a partir da radiação infravermelha, que

é naturalmente emitida pelos corpos, em função de sua temperatura, possuindo as suas vantagens e desvantagens, conforme TABELA 2. Atualmente, o conceito de termografia é utilizado para definição de ensaios térmicos não destrutivos (NDTE), através do equipamento termovisor, que capta a radiação emitida pelos corpos e através do seu detector, processa formando uma imagem onde cada pixel apresenta uma intensidade de radiação associada, que pode ser convertida em temperatura, uma vez que são proporcionais. (SANTOS, 2012).

TABELA 2 - VANTAGENS DE DESVANTAGENS DA TERMOGRAFIA

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Técnica segura e não invasiva	Dificuldade em determinar a emissividade
Detecta a radiação térmica	Capacitação do termografista
Detecta defeitos em estágios iniciais	Influências climáticas
Direcionamento da manutenção	Estimar o tempo para falha
Alta Produtividade	

FONTE: O Autor (2019).

Um modelo de termovisor portátil é mostrado na FIGURA 5, possuindo vários nomes, como: termocâmera, câmera infravermelha e dispositivo de imagem térmica. O documento *Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments* publicado pela OIML R141(2008) define como termovisor o instrumento optoeletrônico concebido para observação, medição e registro espacial e temporal da radiação térmica de objetos, no campo de visão do instrumento, por formação de uma sequência temporal de termogramas e pela determinação da temperatura superficial de objetos a partir do conhecimento de sua emissividade e parâmetros de influência (temperatura refletida, transmissão atmosférica, distância de observação, etc.).

FIGURA 5 - TERMOVISOR PORTÁTIL MARCA FLIR – MODELO E45



FONTE: O Autor (2019).

As faixas de comprimento de onda mais utilizadas para a fabricação de termovisores aplicáveis ao sistema elétrico são de 3 μm a 5 μm e de 8 μm a 14 μm . Nessas faixas a transmitância da atmosfera à radiação infravermelha é alta. Dentre elas, a faixa de 8 μm a 14 μm é a mais recomendada por apresentar uma transmitância ainda maior (Ghosh e Galeski, 1994). Além disso, essa faixa é menos sensível a falsos pontos de alta temperatura resultantes do reflexo solar, como pode ser observado na TABELA 3.

TABELA 3 - ENERGIA DISPONÍVEL NAS FAIXAS DO COMPRIMENTO DE ONDA DOS TERMOVISORES

REGIÃO DE INFRAVERMELHO (μm)	RADIAÇÃO SOLAR AO NÍVEL DO SOLO (W/m^2)	EMISSÃO DE UM CORPO NEGRO A 290 K (W/m^2)
3 a 5	24	4,1
8 a 13	1,5	127

FONTE: ROGALSKI E CHRZANOWSKI (2002).

O gráfico da FIGURA 6, mostra a radiação emitida por um corpo negro a uma temperatura de 300 K (26,85 °C) em função do comprimento de onda. A faixa de comprimento de onda de 8 μm a 14 μm possui uma maior quantidade de radiância emitida, comparando com a faixa de onda de 3 μm a 5 μm (Kaplan, 2000). Muitos termovisores são fabricados para operar na faixa de comprimento de onda de 8 μm a 14 μm .

FIGURA 6 - ENERGIA DISPONÍVEL NAS FAIXAS DE 3 A 5 μm E DE 8 A 14 μm PARA UM CORPO NEGRO A UMA TEMPERATURA DE 300 K (26,85 $^{\circ}\text{C}$)



FONTE: KAPLAN (2000).

Há duas aplicações da termografia: Aplicação ativa e passiva. Termografia ativa caracteriza-se pelo uso de um estímulo térmico artificial externo ao objeto alvo pouco antes da captura da radiação pelo termovisor. Ela é utilizada em situações em que a diferença de temperatura do corpo sob inspeção não oferece dados suficiente para a análise da sua integridade ou comportamento. Já a termografia passiva difere-se pela não aplicação de estímulo térmico à amostra durante o processo de captura da radiação. Neste caso espera-se que a diferença de temperatura da amostra seja suficiente para sua análise. No campo da manutenção, a termografia passiva é fortemente empregada, aproveitando-se dos equipamentos eletromecânicos que tendem a apresentar elevação anormal de temperatura, quando próximos da falha (TEIXEIRA, 2012).

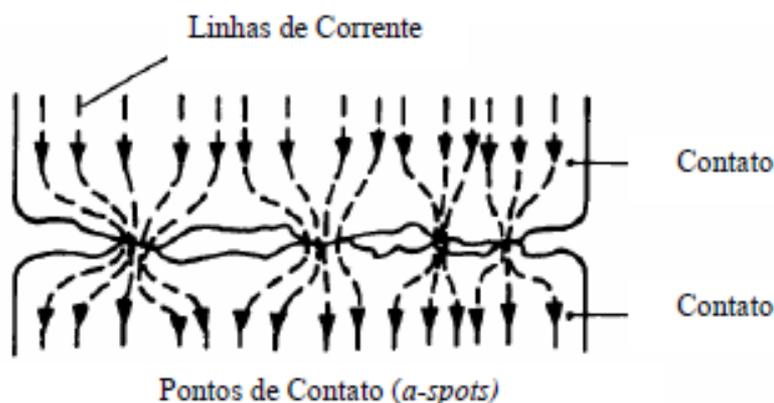
Ainda a termografia infravermelha apresenta a divisão em qualitativa e quantitativa. A qualitativa, onde as análises são focadas em comparações dos perfis térmicos entre equipamentos semelhantes, a quantitativa na qual os níveis de temperatura determinados para cada ponto da superfície do equipamento são utilizados para o seu diagnóstico térmico. A termografia qualitativa encontra seus limites na capacidade do inspetor, pois a detecção de pequenos defeitos será tão boa quanto for a qualidade do seu treinamento, sua experiência e sua paciência (SHEPARD et al., 2007). A termografia quantitativa

envolve a determinação de valores de temperatura, sejam eles máximos, médios, mínimos ou diferenciais, que permitem avaliar se um equipamento está ou não excedendo determinados limites de aquecimento. (FLUKE, 2009).

2.1.8 Teoria do contato elétrico

A resistência de contato é definida como a resistência à circulação de corrente elétrica, através da interface de contato entre dois materiais condutores IEC TR 60643 (2009). O aquecimento por efeito *Joule* ocorre nessa região pelo efeito da passagem da corrente, originando a perda de energia por dissipação de calor, contribuindo para a degradação do contato. A FIGURA 7 demonstra como se estabelece os pontos de contatos elementares (*a-spots*) entre materiais condutores, surgindo a resistência de contato devido a não acontecer o assentamento perfeito entre as superfícies, em função da rugosidade existente nos materiais.

FIGURA 7 - FORMAÇÃO DE CONTATOS ELEMENTARES ENTRE DOIS METAIS



FONTE: KAPLAN (2000).

Não havendo um bom contato entre as partes dos materiais que formam a conexão elétrica, surgem vazios no contato, onde o oxigênio e outros agentes corrosivos podem se infiltrar e reagir com o metal exposto. O processo mais comum conhecido da interação entre o ambiente externo e as conexões elétricas é a oxidação. A difusão do óxido na conexão tende a diminuir as áreas

de contato elétrico, dificultando a passagem de corrente e provocando aquecimento nas peças.

Matematicamente a resistência de contato em um circuito elétrico ligado em série, em corrente contínua, pode ser explicada como a junção de dois condutores com resistência R_1 e R_2 , levando a formação de um novo condutor, criando uma nova resistência R_3 . Contudo essa nova resistência não pode ser considerada somente somando R_1 e R_2 , mas tem que considerar a resistência de contato (R_C), conforme equação (7).

$$R_3 = R_1 + R_2 + R_C \quad (7)$$

3 TRABALHOS CORRELATOS

Para conhecer os trabalhos relacionados com a pesquisa de estudo, utilizou-se algumas ferramentas de busca pela internet como o Google, Google Scholar e o portal de periódicos da CAPES. Através do uso de palavras chaves em português e em inglês, foram pesquisados artigos nacionais e internacionais que estudaram as principais influências que envolvem o processo de inspeção termográfica infravermelha em equipamentos elétricos, a saber a determinação da emissividade dos equipamentos e o procedimento de inspeção termográfica. Alguns trabalhos realizaram experimentos em laboratório em conectores elétricos para saber o seu comportamento térmico, tempo de vida útil e nível de degradação. Outros estudos buscaram identificar e quantificar as influências no procedimento de inspeção termográfica ao ar livre, no intuito de realizar um diagnóstico térmico mais assertivo. Os trabalhos mais relevantes serão analisados a seguir de forma cronológica.

3.1 EXPERIMENTOS TÉRMICOS EM CONECTORES

Para resolver o problema de realizar diagnóstico térmico preciso em conexões de subestações de energia e usinas elétricas, Neto *et al.* (2006)

aqueceram amostras de placas de cobre e ferro em laboratório para conhecer o comportamento da emissividade. Utilizaram termopares e um termovisor para medir a temperatura das placas, identificando valores de emissividades entre 0,85 a 0,95 para a maioria dos materiais testados. No entanto, o trabalho não aborda o estudo da emissividade de conectores de alumínio novos.

Gasperic *et al.* (2007) elaboraram numa empresa de distribuição e transmissão de energia elétrica, através da inspeção termográfica, uma forma de conhecer a emissividade de conectores, aplicando corrente elétrica e medindo a temperatura de conectores de alumínio tipo compressão novos e retirados de operação. Com o valor da temperatura do termopar, foi ajustado a emissividade do termovisor até atingir a temperatura do termopar, buscando encontrar a emissividade real das conexões. Os resultados obtidos indicam uma emissividade para conectores novos de 0,19, junções de alumínio novas de 0,25 a 0,35 e peças aquecidas nas articulações de 0,97.

Assim como no trabalho de Gasperic *et al.*, foram percebidas as diferenças de emissividades de conexões novas e retiradas de operação no estudo de Nunak *et al.* (2013). Através de um experimento em laboratório, placas de ferro, cobre, chapa de aço inoxidável, chapa de alumínio e latão foram aquecidas até 200°C dentro de um forno. Para medição de temperatura e emissividade foram usados um termopar e um termovisor, e os equipamentos com maior tempo de operação obtiveram emissividades maiores ficando entre 0,81 a 0,88, e os equipamentos novos com emissividade entre 0,16 a 0,28.

Prever o processo de tendência de falha térmica de conectores elétricos, com experimentos em laboratório, foram objetivos de Christou *et al.* e Capeli *et al.* (2016), com os últimos autores buscando em como estimar a degradação e vida útil de conexões elétricas, entre conector e cabo condutor. Para isso elaboraram dois procedimentos de montagem de conectores para testes com aumento de temperatura (CC1 ANSI/NEMA 2009) e ciclos de corrente (ANSI C119,4 2011). Dezesesseis termopares tipo k foram instalados na superfície dos conectores para medir a temperatura. A resistência foi medida pelo método kelvin de 4 fios. Observou-se durante o experimento que no gráfico de resistência versus temperatura, existe um comportamento quase linear entre as variáveis e também que o conector pode ter uma resistência

baixa, mas se a resistência da conexão for alta, gera um crescimento da temperatura aquecendo os equipamentos, possibilitando falha no sistema.

Wang *et al.* (2016) estudaram a ocorrência de um grande número de falhas em conectores com alto custo para substituição, para saber a causa do problema, que poderia ser afrouxamento da conexão com torque inadequado ou ciclos térmicos através da variação constante da corrente de operação. Os conectores estudados são aparafusados com corpo T com torque 6,2 Nm com utilização na baixa tensão em transformadores de distribuição. Através de um procedimento experimental para avaliar esse conector, levou-se em consideração a sua capacidade térmica e tempo de vida. A mesma norma ANSI C padrão 119,4 foi utilizada nesse experimento, como no trabalho de Capeli *et al.*, para testar os conectores. Esse trabalho teve como resultado o aumento de resistência 3,33 % para o ponto de medição 1, ponto 2 de 28 %, ponto 3 de 60 %, podendo ter como causa o afrouxamento ou aplicação de torque inadequado na montagem.

Szabó *et al.* (2017) fizeram além do teste térmico em conectores, o teste de resistência à tração aplicada nos cabos que estavam conectados nesses conectores. O experimento foi realizado no laboratório de alta tensão com testes mecânicos, vibrações e envelhecimento térmico em conectores elétricos utilizados na rede de distribuição, buscando investigar a durabilidade desses dispositivos. A resistência elétrica e temperatura foram medidas antes e depois do processo de envelhecimento para efeito de comparação. Através de uma câmera termográfica foram medidas as temperaturas das conexões. Concluindo que o envelhecimento que teve maior impacto em relação a resistência elétrica, temperatura medida e capacidade de tração, foi o térmico.

3.2 INFLUÊNCIAS NO PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO

Santos *et al.* (2005) enfrentaram o problema da descentralização das equipes de inspeção termográfica em subestações de energia, impactando na credibilidade dos resultados obtidos. As equipes novas criadas não tinham uma formação adequada e a experiência da equipe anterior não foi transferida. Elaboraram um programa de termografia, com as principais ações (treinamento, procedimento de inspeção escrito e padronizado, organizações

de reuniões técnicas, calibragem periódica dos instrumentos, modernização dos equipamentos e motivação da equipe). Como resultados houve a redução da periodicidade de inspeção em subestações, melhorando os níveis de temperatura encontrados nos equipamentos e substituindo manutenções emergenciais por programadas.

Bortoni *et al.* (2010) estudaram alguns fatores de influência na inspeção termográfica em subestações instaladas em ambientes sob a ação de fatores climáticos, desenvolvendo um procedimento para avaliar duas conexões elétricas, uma boa e outra defeituosa durante o dia e a noite. A conexão boa teve um aumento de 5 °C da noite para o dia, e a defeituosa de 14 °C. Para avaliar o reflexo solar foram utilizadas duas câmeras respondendo a faixas espectrais diferentes (3 - 5 μm ; 7,5 - 13 μm), chegando a medir temperaturas do reflexo solar na conexão de 250 °C quando a temperatura do aquecimento era de 159°C. O vento reduziu a temperatura real do alvo de 117 °C para 85 °C. Sendo necessário evitar a reflexo solar na inspeção em campo, ventos fortes e radiação solar nos horário com maior incidência, através de um termografista treinado. Esse trabalho evidencia que as influências climáticas não podem deixar de serem consideradas no processo de diagnóstico térmico em inspeções termográficas.

O trabalho de Litwa *et al.* (2010) realizaram testes sobre a influência do ângulo de visão na confiabilidade de medições de temperatura usando câmeras de termovisão. A configuração experimental consistiu em utilizar três câmeras de marcas diferentes e um radiador infravermelho com emissividade de 0,98, que permite ajuste de temperatura e mudanças no ângulo de visão. Os experimentos foram conduzidos em o laboratório aquecendo o radiador em uma temperatura constante e fazendo a medição de temperatura com o termovisor, com intervalos de distâncias e ângulo de visão pré-selecionados. Esse trabalho mostrou que um grande ângulo de visão pode tornar as medições de temperatura imprecisas e foi descoberto que se o ângulo entre o objeto inspecionado e o termovisor se não ultrapassar 50 graus, o resultado da medição da temperatura é suficientemente confiável.

Além dos fatores ambientais de influência no procedimento de inspeção termográfica como radiação solar, chuva, vento, umidade, distância e temperatura ambiente analisados pelos trabalhos anteriores citados acima,

Bortoni *et al.* (2011) estudaram a influência da corrente de carga na inspeção. Através da construção de uma câmara climatizada para avaliar o fator de influência, variou-se apenas a corrente de carga em um conector de aplicação em subestação de alta tensão, mantendo as outras variáveis ambientais constantes. Esse estudo evidenciou a forte influência que a corrente de carga exerce sobre a medição de temperatura com um termovisor.

Yijie (2012) em uma Companhia de Eletricidade, buscou implantar a inspeção termográfica nas 94 subestações de energia, utilizando um termovisor para avaliar a carga elétrica do equipamento como influência significativa no ponto de aquecimento em equipamentos elétricos. O autor identificou algumas influências para medição de temperatura em componentes elétricos nas inspeções termográficas, sendo a corrente de carga a que atua diretamente na temperatura.

Jadin *et al.* (2012) através de uma pesquisa de inspeção termográfica realizada durante o período de 5 anos em um sistema de distribuição de energia elétrica, verificou-se que quase metade dos problemas térmicos foram encontrados em acessórios de ligação do condutor e ligações aparafusadas. Os autores colocam que para evitar resultados mal interpretados ou incorretos, os termografistas devem ser qualificados ou certificados e conhecer o valor da emissividade dos equipamentos sob inspeção. Eles estudaram a medição de temperatura de forma qualitativa, tomando os valores de temperaturas relativas comparando um equipamento com outros similares, usando a temperatura ambiente com referência e a quantitativa por extrair mapas térmicos dos objetos sob inspeção. Chegando à conclusão que na inspeção térmica quantitativa a emissividade deve ser considerada como fator de incerteza porque influencia na temperatura medida.

Ferreira *et al.* (2015) analisaram os dados dos seis geradores existentes em uma Usina Hidroelétrica, verificando o comportamento térmico de painéis elétricos. Como o objetivo de reduzir a periodicidade da manutenção, os autores criaram um processo sistematizado para identificar equipamentos com defeito térmico. A metodologia proposta utilizou-se da formação do banco de dados com tempos previstos para execução das atividades, análise crítica das medições de temperatura e avaliação dos indicadores de continuidade da Usina. Como referência foram adotadas a máxima temperatura admissível

(MTA) do componente elétrico, com valores baseados na ABNT, para determinar a prioridade no atendimento. O resultado foi o aumento na disponibilidade de geradores e redução das intervenções para manutenções preventivas.

Muniz *et al.* (2015) realizaram as medições do ângulo de visão entre o termovisor e o componente a ser inspecionado em um ambiente sob ação de fatores climáticos, com uma trena a laser. O conhecimento do ângulo de visão permite ao termografista avaliar a emissividade da superfície inspecionada com mais precisão, diminuindo a incerteza de medição levando a diagnósticos mais afirmativos, isso porque a emissividade depende do ângulo de radiação, sendo necessário conhecer o ângulo de visão. Os autores chegaram na conclusão que uma medição com ângulo de até 60 graus, insere um erro de 4 a 5 % na medição de temperatura pelo termovisor.

3.3 OBSERVAÇÕES FINAIS

Os trabalhos demonstrados que estão relacionados com os experimentos em laboratório realizados em conectores e conexões elétricas para conhecer a sua emissividade e comportamento térmico, revelaram resultados positivos. Neto *et al.* (2006) e Gasperic *et al.* (2007) mostraram a importância de aplicar ciclos de corrente elétrica em conectores utilizados para distribuição de energia, obtendo dados conclusivos que componentes oxidados possuem emissividades maiores do que os componentes polidos e novos, impactando na temperatura dos conectores e no diagnóstico térmico.

Nessa mesma linha de avaliação térmica de conectores Capeli *et al.* (2016) e Wang *et al.* (2016) estudaram a degradação e números de falhas em conectores elétricos usados no sistema de distribuição de energia, através do aquecimento desses conectores com ciclos térmicos, observando quanto maior for a resistência da conexão, maior será a temperatura que pode ser prejudicial para os componentes elétricos. Além de testes de ciclos de corrente para saber o comportamento térmicos em conectores, Szabó *et al.* (2017) realizou teste de vibração e de tração em componentes de alta tensão, para selecionar os

melhores conectores. Uma câmera termográfica foi utilizada para medir a temperatura e eles concluíram que o envelhecimento térmico do conector teve maior impacto na sua degradação levando a uma capacidade menor de suportar a força de tração incidente sobre eles.

Para o processo de inspeção termográfica no sistema elétrico, vários autores defenderam através de estudos a criação de um procedimento padronizado para os inspetores termografistas realizarem diagnóstico térmico assertivo em equipamentos elétricos, entre eles estão DOS Santos *et al.* (2005) que encontrou a melhora nos níveis de temperatura identificados nos equipamentos e a substituição de manutenções emergenciais por programadas; Ferreira *et al.* 2015 teve como resultado o aumento na disponibilidade de geradores de energia e redução das intervenções emergenciais para manutenções preventivas.

As influências que permeiam o processo de inspeção termográfica em ambientes abertos, tiveram contribuições importantes de Litwa *et al.* (2010) e Muniz *et al.* (2015) descobrindo que o ângulo entre o objeto inspecionado e o termovisor não deve ultrapassar 60 graus, para ter um erro pequeno de 4 a 5 % na medição de temperatura. A corrente de carga de um sistema elétrico é uma forte incerteza que atua na medição de temperatura pela termovisão, sendo assim Bortoni *et al.* (2010) e Yijie (2012) avaliaram essa influência em componentes do sistema de potência, confirmando como resultado dos trabalhos que a corrente elétrica não pode deixar de ser considerada no processo de diagnóstico térmico, atuando diretamente no nível de temperatura.

Portanto com base nos trabalhos acima é possível vislumbrar um procedimento de diagnóstico térmico em conexões elétricas de subestações desabrigadas, que estão sob ação de influências na medição de temperatura, por meio do estudo da emissividade desses componentes elétricos e da elaboração de um procedimento padronizado de inspeção termográfica para utilização de inspetores não experientes e sem prática de inspeção.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Foram divididos os materiais em duas partes, sendo a primeira relacionada aos materiais utilizados no experimento em laboratório, indicados na TABELA 4, com a temperatura ambiente em 24 °C controlada pelo ar condicionado e a umidade relativa do ar não superior a 70%, sendo essas duas variáveis do ambiente monitoradas pelo termo-higro-anemômetro.

TABELA 4 - MATERIAIS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO

EQUIPAMENTO	MARCA	MODELO	FINALIDADE
Termovisor	FLIR	E45	Medição de temperatura sem contato
Termopar	TESTO	905-T2	Medição de temperatura com contato
Termo-Higro-Anemômetro	ITAN	700I	Medição de fatores climáticos
Trena a laser	Bosch	GLM20	Medição de distância
Fonte de corrente	Megger	ODEN AT	Aplicação de ciclos de corrente
Microohmímetro	MEGABRAS	MPK 103x	Medição de resistência

FONTE: O Autor (2019).

Dos conectores elétricos de média tensão, foram estudados três conectores retirados de operação, apresentando envelhecimento (sujeira e oxidação) e outros três conectores novos, para o experimento em laboratório, conforme TABELA 5. Esses seis conectores são de alumínio e frequentemente utilizados em subestações de energia para interligar equipamentos elétricos, permitindo o fornecimento de energia. Os conectores dos fabricantes A e D são do mesmo tipo chapa-cabo, dos fabricantes B e E do tipo cabo-cabo e dos fabricantes C e F do tipo paralelo.

TABELA 5 - CONECTORES UTILIZADOS NO EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO

FABRICANTE	TIPO CONEXÃO	ANO FABRICAÇÃO	ESTADO	CAPACIDADE CORRENTE
A	Chapa - cabo	2017	Novo	400 A
B	Cabo - cabo	2017	Novo	400 A
C	Paralelo	2017	Novo	400 A
D	Chapa - cabo	1979	Retirado de operação	400 A
E	Cabo - cabo	1982	Retirado de operação	400 A
F	Paralelo	1980	Retirado de operação	400 A

FONTE: O Autor (2019).

Na FIGURA 8 estão os conectores novos (FIGURA 8 A, B e C) e retirados de operação (FIGURA 8 D, E e F) pela equipe de manutenção.

FIGURA 8 - CONECTORES NOVOS E RETIRADOS DE OPERAÇÃO PARA O EXPERIMENTO



A - Chapa-Cabo



B - Cabo-cabo



C - Paralelo



D - Chapa-Cabo



E - Cabo-cabo



F - Paralelo

FONTE: O autor (2019).

A segunda parte da divisão dos materiais está relacionada ao procedimento de inspeção termográfica em subestações desabrigadas de média tensão, onde os materiais usados foram elencados na TABELA 6.

TABELA 6 - MATERIAIS UTILIZADOS NA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM SUBESTAÇÕES

EQUIPAMENTO	MARCA	MODELO	FINALIDADE
Termovisor	FLIR	E45	Medição de temperatura sem contato
Termo-Higro-Anemômetro	ITAN	700I	Medição de fatores climáticos
Trena a laser	Bosch	GLM20	Medição de distância

FONTE: O Autor (2019).

As características detalhadas dos equipamentos foram descritas a seguir:

- Termovisor portátil calibrado (câmera infravermelha) marca FLIR, modelo E45, peso 700 g, campo de visão de 19° x 14°, sensibilidade térmica de 0,1 °C até 25 °C, tipo de detector FPA (matriz de plano focal), resolução de 160 x 120 *pixels*, faixa espectral de 7,5 µm a 13 µm, umidade de operação de 20% a 80%, display LCD colorido, faixa de medição de entre - 20 °C a 350 °C, precisão de ±2%, faixa de temperatura operacional de -15 °C até 50 °C.
- Termopar de contato marca Testo calibrado, modelo 905-T2, peso 80 g, faixa de medição de -50 °C a 350 °C, precisão de ±1 °C, resolução 0,1 °C, display LCD, temperatura de operação de 0 °C a 40 °C.
- Termo-Higro-Anemômetro Digital, marca ITAN, modelo 700I, peso de 60 g, temperatura de operação -10 °C a 50 °C, umidade de operação de 0 a 99%. Medição de temperatura ambiente com faixa de -10 °C a 50 °C, resolução de 0,1 °C, precisão de ±1 °C. Medição de umidade relativa do ar com faixa de 0 a 99%, resolução 1%, precisão ±5%. Medição do vento com faixa de 0,3 m/s a 30 m/s, resolução de 0,1 m/s, precisão de ±5%.
- Trena a *laser* marca Bosch, modelo GLM 20, medição de comprimento de 3 mm a 20 m, precisão 1,5 mm, peso 100 g.
- Fonte de corrente marca Megger, modelo ODEN AT, corrente de aplicação de 0 à 2.000 A, precisão de 1%, temperatura de operação de -25 °C a 55 °C, peso 25 kg do controle e 42 kg do aplicador de corrente.
- Microohmímetro digital marca MEGABRAS, modelo MPK 103x, medição de resistência de 0 µΩ a 20.000 µΩ, precisão de 0,5%, corrente contínua de aplicação até 100 A, tensão aplicada 4,5 V, temperatura de operação de -5 °C a 50 °C.

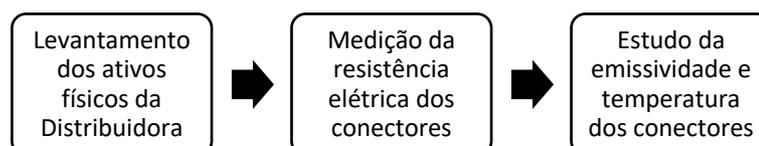
4.2 MÉTODO

A metodologia empregada nesse trabalho consiste em um experimento em laboratório para determinar a emissividade de conectores elétricos de alumínio (novos e retirados de operação), medição de suas resistências

elétricas e temperatura, para elaborar um procedimento de inspeção termográfica em subestações de energia elétrica de média tensão, visando o diagnóstico térmico em conectores que estão em operação.

O fluxograma da FIGURA 9, demonstra as etapas para desenvolver o experimento em laboratório.

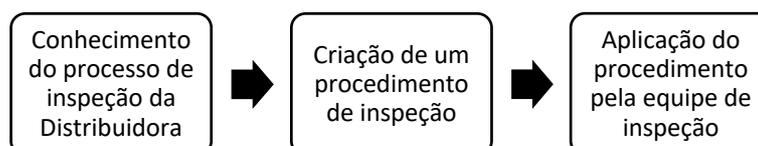
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DO EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO



FONTE: O Autor (2019).

O procedimento de inspeção termográfica está subdividido na FIGURA 10.

FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA



FONTE: O Autor (2019).

4.2.1 Levantamento dos ativos físicos da Distribuidora

A Distribuidora de energia de estudo possui como ativos físicos as redes de distribuição de energia e as subestações. Nesse trabalho foram consideradas as subestações de energia como ativos físicos, devido a sua importância para o Sistema Elétrico de Potência e para os indicadores técnicos e financeiros da empresa.

Através do programa de gestão da manutenção da Distribuidora, foi levantado o número de subestações e seus níveis de tensão de operação por região (Noroeste, Norte, Leste, Oeste e Centro Sul). A região que tem o maior número de subestações foi escolhida porque gera um maior impacto na gestão de ativos físicos pela quantidade de conexões elétricas existentes e que podem estar operando sob defeito.

A FIGURA 11 é a imagem retirada de uma subestação típica com tensão elétrica nominal de operação de 34,5 kV.

FIGURA 11 - SUBESTAÇÃO TÍPICA DE 34,5 KV



FONTE: O Autor (2019).

Foram analisados 58 relatórios das equipes que realizam termografia em subestações, com as inspeções executadas no período do mês de Abril de 2017 a Março de 2018, para classificar os tipos de anomalias térmicas por equipamento de subestação, com a intenção de selecionar os equipamentos que apresentam maior frequência de aquecimento. Em paralelo realizou-se levantamento em três subestações para identificar os tipos de conectores que existem em maior número. Os ensaios em laboratório serão realizados nos equipamentos de subestações que apresentaram no período analisado (1 ano), maior tendência a falha por aquecimento e que apresentam maior quantidade.

4.2.2 Medição da resistência elétrica dos conectores

A resistência elétrica dos conectores foram medidas com um microohmímetro digital no laboratório, antes de começar os ensaios de ciclos de corrente elétrica. Foi aplicado um torque de 47 N (valor recomendado pelo fabricante de conectores) nas porcas dos conectores para gerar um bom contato mecânico e realizado três medições de resistência elétrica nas extremidades de cada conector. Depois foi aplicado um torque de 4,7 N nas porcas dos conectores, buscando criar um mau contato na conexão, por ser um

torque de 10% do valor indicado pelo fabricante para uma boa pressão mecânica entre as faces do conector e feito três medições de resistência elétrica nas extremidades de cada conector.

Na FIGURA 12 é mostrado os pontos usados para realizar as três medições de resistências elétricas no conector chapa-cabo, sendo entre os pontos comum e M1 utilizados para medição 1, entre os pontos comum e M2 para medição 2 e os pontos comum e M3 para medição 3. Para os demais conectores, foram utilizados de forma semelhante as localizações dos pontos comum, M1, M2 e M3 para medição das três resistências elétricas por conector. O objetivo foi avaliar a resistência elétrica de cada conector medindo nas suas extremidades em três pontos diferentes.

FIGURA 12 - PONTOS USADOS PARA MEDIÇÃO DAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS



FONTE: O Autor (2019).

A FIGURA 13 mostra a forma que foram conectados as ponteiros do microohmímetro no conector tipo chapa-cabo.

FIGURA 13 - MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA COM MICROOHMÍMETRO



FONTE: O Autor (2019).

4.2.3 Estudo da emissividade e temperatura dos conectores

A FIGURA 14 mostra o arranjo com equipamentos montados para realização dos ensaios no laboratório, possuindo três conectores novos e três conectores retirados de operação ligados em série. O objetivo é avaliar os valores das emissividades e temperaturas das conexões novas e retiradas de operação em função dos ciclos de corrente elétrica aplicados, conforme o padrão americano ANSI C119.4-2011.

FIGURA 14 - ARRANJO PARA ENSAIOS NO LABORATÓRIO



FONTE: O Autor (2019).

As três medições de temperaturas na superfície de cada conector feitas pelo termopar de contato, foram nas áreas que apresentaram maior temperatura nos conectores, sendo essas áreas indicadas pela imagem térmica gerada pelo termovisor, que apresenta valores de temperaturas por área de inspeção térmica.

De forma sucinta a realização dos ensaios foram executados conforme as etapas a seguir:

- I. Climatização do laboratório com temperatura ambiente de 24 °C e umidade relativa do ar não superior a 70%;
- II. Montagem do circuito elétrico com os seis conectores interligados em série através do cabo de alumínio 4/0 (107 mm²);
- III. Aplicação da corrente de 50 A inicial;
- IV. Aguardar 90 minutos para estabilização térmica dos conectores;
- V. Identificar com o termovisor as áreas com maiores temperaturas de cada conector usando uma emissividade convencional de 0,85;
- VI. Realizar três medições de temperatura na superfície de cada conector com o termopar de contato nas áreas com maiores temperaturas;

- VII. Ajustar a emissividade do termovisor até coincidir com a temperatura média do termopar;
- VIII. Anotar as temperaturas e as emissividades por conector;
- IX. Realizar três medições de temperatura em cada conector com o termovisor usando valores de emissividades de 0,35, 0,75, 0,80 e 0,85 e anotar as temperaturas;
- X. Incrementar 50 A de corrente e repetir os passos do V ao X até o limite máximo de 300 A.

Foi padronizado usar uma distância de 2 metros entre o termovisor e os conectores em função da limitação física do laboratório e um ângulo não superior a 60 graus para captura do termograma. Após vencidas as etapas citadas acima para o ensaio, foi realizado aperto nas porcas do conector com um torque de 4,7 N, com o objetivo de criar um mau contato na conexão elétrica, para serem aplicados as correntes de 50 a 300 A. Após a estabilização térmica, foi usado o termovisor com emissividade fixa de 0,85, para medir as temperaturas nos conectores. Buscou-se avaliar a evolução da temperatura com os acréscimos de corrente aplicados. A FIGURA 15 mostra como ficou a conexão com um mau contato mecânico criado.

FIGURA 15 - CONEXÃO ELÉTRICA COM MAU CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

4.2.4 Conhecimento do processo de inspeção da Distribuidora

A Distribuidora de energia possui a prática de inspeção termográfica em subestações desde a década de 1990, passando no decorrer dos anos por uma modernização dos equipamentos, com termovisores menores e de melhor precisão. As inspeções são realizadas semestralmente pelos técnicos da empresa, fazendo parte do programa de manutenção sistemática. Contudo não existe um procedimento de inspeção padronizado e escrito para realizar diagnóstico térmico em componentes elétricos para gestão de ativos físicos em subestações de média tensão. É utilizado o valor de 0,85 de emissividade para conectores novos e que estão em operação. As inspeções são realizadas durante o dia sem um horário específico e os fatores de influências no processo de inspeção como vento, chuva, radiação solar, temperatura ambiente, distância do alvo, corrente de carga e emissividade não são considerados precisamente.

4.2.5 Criação de um procedimento de inspeção

O procedimento proposto de inspeção termográfica em subestação de média tensão, buscando o diagnóstico térmico em conexões elétricas para gestão dos ativos físico da Distribuidora, foi baseado nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 15424 (ABNT 2006), NBR 15572 (ABNT 2012), Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos, Inspeção NA-009 (ABENDI, 2018), ISO-9712 (ISO, 2012), STN-TC-1A (ASTN, 2016) e nas boas práticas das equipes experientes que já realizaram a inspeção na Distribuidora de energia. O procedimento foi dividido conforme abaixo.

- Segurança
- Equipamentos necessários
- Equipe necessária
- Limitações e orientações
- Procedimento de inspeção

4.2.5.1 Segurança

Os inspetores devem ter como premissa a utilização dos equipamentos de proteção individual exigidos pela Distribuidora e pela norma regulamentadora NR 10. As distâncias de segurança do inspetor às partes energizadas devem ser mantidas para evitar acidentes.

4.2.5.2 Equipamentos necessários

Os equipamento necessários para inspeção foram divididos em básico e complementares, sendo os básicos o termovisor portátil, termo-higro-anemômetro e trena a *laser* calibrados. Os equipamentos complementares são ordem executável de serviço para intervir no SEP, APR e planilha impressa para anotações das anomalias térmicas, condições climáticas, data e hora.

4.2.5.3 Equipe necessária

Dois colaboradores da empresa com formação técnica, possuindo boa acuidade visual devido aos termogramas terem tons diferentes de cores, conhecimento de informática, fenômenos físicos que envolvem a termografia, as influências que permeiam o processo de diagnóstico térmico e o funcionamento e as características do termovisor.

4.2.5.4 Limitações e orientações

A termografia infravermelha está sujeita a variáveis que provocam interferência nas medições dos níveis de temperatura (termografia quantitativa), sendo a calibração dos equipamentos de medição, a emissividade das conexões inspecionadas, as variações de carga, o efeito da convecção natural, as mudanças das condições ambientais, entre as principais existentes. Com isso foram elaboradas as orientações a serem seguidas pelos termografistas na execução da inspeção, conforme abaixo:

- Calibrar os equipamentos de medição, sobretudo o termovisor.
- Utilizar emissividade conforme o estado da conexão (nova e oxidada).
- Não realizar inspeções sob sol intenso, com preferência no período da manhã, quando a influência do carregamento do sol é baixa e final de tarde, onde os reflexos solares são menores.
- Evitar inspeções com velocidade do vento acima de 20 km/h.
- Não inspecionar com umidade relativa do ar acima de 90%.
- Após a chuva, aguardar 1 hora para estabilização térmica.
- Não exceder um ângulo acima de 60° entre o termovisor e o objeto inspecionado, buscando a posição mais perpendicular possível, para não reduzir da emissividade.
- Não realizar inspeções com corrente de carga menor do que 50% da corrente máxima do circuito ou da média dos últimos três meses.

4.2.5.5 Procedimento de inspeção

As normas nacionais e internacionais que visam capacitar o termografista e elaborar um procedimento de inspeção termográfica para diagnóstico térmico, buscam mitigar a influência da corrente elétrica de carga, da emissividade de cada componente sob inspeção, da velocidade do vento, da radiação solar e umidade relativa do ar. Além disso essas normas propõe a melhor forma para configurar a câmera termográfica para obter a melhor nitidez, contraste e foco da imagem térmica obtida pelo termovisor. Com base nessas normas foram reunidas as informações que contribuem para uma inspeção quantitativa assertiva na detecção de aquecimento em conexões elétricas de alumínio em subestações desabrigadas.

Com o termovisor com precisão de 2% na medição de temperatura, a trena a *laser* com precisão de 1,5 mm da distância medida em metros e o termo-higro-anemômetro com precisão de 1% na medição de temperatura ambiente, da umidade relativa do ar e da velocidade do vento, os inspetores irão realizar a inspeção nas subestações desabrigadas seguindo as etapas mencionadas a seguir:

- I. Começar inspecionando as subestações que tenham maior probabilidade de defeitos térmicos em conexões, considerando as datas mais antigas de início de operação e as últimas inspeções e manutenções realizadas.
- II. Munir-se do termovisor, trena a laser e termo-higro-anemômetro.
- III. Ao chegar na subestação cumprir as normas de segurança.
- IV. Ajustar os parâmetros do termovisor conforme manual do fabricante para obter a melhor imagem térmica.
- V. Executar a inspeção panorâmica na subestação, inspecionando de 3 a 6 metros de distância dos componentes, circulando nos quatro lados do perímetro da subestação.
- VI. Ao localizar uma anomalia térmica, aproximar o máximo possível, ajustando no termovisor a sua faixa de temperatura em função da temperatura do alvo, o foco, a distância, a temperatura ambiente e a emissividade por tipo e estado da conexão.
- VII. Registrar a imagem térmica no termovisor.
- VIII. Registrar a corrente máxima e carregamento do circuito.
- IX. Anotar informações do nome da subestação, o local de instalação, o número do termograma registrado, o tipo de conexão, a fase elétrica, o horário, a data, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.

Repetir os passos de V a IX até identificar todas as anomalias térmicas e na sequência deslocar-se para próxima subestação selecionada.

Após finalizar as inspeções nas subestações selecionadas, no escritório técnico foram preenchidos os relatórios contendo os aquecimentos encontrados, para serem enviados para a equipe de manutenção sanar o defeito. A gravidade dos pontos quentes identificados foram priorizadas conforme FIGURA 16, que é uma tabela utilizada em várias empresas como na COPEL Transmissão, CEMIG, CELESC, ELETRONORTE e ITAIPU, prevendo um critério em função da elevação da temperatura da conexão (Δt em relação à temperatura ambiente), para determinar o prazo de atendimento do problema. A máxima temperatura admissível de 93 °C, onde inicia o processo de recozimento do cabo elétrico, diminuindo a sua vida útil foi levada em consideração na classificação da urgência do ponto quente. Depois que a

equipe de manutenção realizar o serviço de reparo, foi inspecionado novamente confirmando se o defeito foi corrigido.

FIGURA 16 - MÁXIMA TEMPERATURA ADMISSÍVEL EM CONEXÕES ELÉTRICAS

Classificação da Gravidade/Critério	Descrição do Atendimento	Δt °C Conexões (ambiente)	Prazos (Dias)
Prioridade 1	O mais breve possível, inclusive com desligamento imediato para casos que ofereçam riscos às pessoas, ao sistema elétrico ou ao(s) equipamento(s).	> 65	0
Prioridade 2	Atendimento programado dentro dos prazos legais para solicitação de desligamentos, priorizando as intervenções das anomalias de acordo com as características das conexões, materiais ou equipamentos envolvidos, com as condições operativas do sistema e com a importância do circuito.	50 a 65	90
Prioridade 3		30 a 50	
Prioridade 4	Acompanhamento da evolução e atendimento, se necessário, por aproveitamento de outras programações ou desligamentos ou de acordo com a disponibilidade da equipe de manutenção.	10 a 30	180
Prioridade 5	Condição normal de operação para conexões ou sob análise/investigação em casos especiais.	< 10	∞

FONTE: Adaptado de COPEL Transmissão (2019).

4.2.6 Aplicação do procedimento pela equipe de inspeção

O procedimento de inspeção proposto foi aplicado em uma equipe não experiente e que não executa a inspeção (categoria C), conforme a TABELA 7, recebendo instrução dos fenômenos físicos que envolvem a termografia, as influências que permeiam o processo de diagnóstico térmico e o funcionamento e características do termovisor. Essa categoria de profissionais foi selecionada para avaliar a eficácia do procedimento de inspeção proposto, avaliando os níveis de aquecimentos encontrados e a não experiência desses dois colaboradores da empresa, para conhecer a assertividade do diagnóstico térmico em conexões elétricas de subestações.

TABELA 7 - APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO POR CATEGORIA

TÉCNICO	CATEGORIA	APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO
Experiente e executa a inspeção	A	Não
Não experiente e executa a inspeção	B	Não
Não experiente e não executa a inspeção	C	Sim

FONTE: O Autor (2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados foram divididos em ativos físicos selecionados, experimento em laboratório e no procedimento criado para inspeções termográficas em campo, conforme descritos a seguir.

5.1 ATIVOS FÍSICOS SELECIONADOS

Com a utilização do programa de gestão da manutenção da Distribuidora, chegou-se na região noroeste que é uma distrital do estado do Paraná, como área selecionada para o trabalho, porque nela está concentrada um número de 90 subestações, correspondendo a 22,56% das 399 subestações, conforme TABELA 8.

TABELA 8 - QUANTIDADES DE SUBESTAÇÕES POR DISTRITAL

DISTRITAL	QUANTIDADES	PORCENTAGEM
Noroeste	90	22,56%
Norte	90	22,56%
Leste	87	21,80%
Oeste	78	19,55%
Centro Sul	54	13,53%
TOTAL	399	100,00%

FONTE: O Autor (2019).

A quantidade de 63 subestações da região noroeste operam no nível de tensão de 13,8 kV e 34,5 kV, indicado na TABELA 9. Devido a esse fato, foi usado esse nível de tensão para identificar os equipamentos elétricos para estudo no experimento em laboratório, possuindo também uma corrente elétrica maior em relação as outras que operam em níveis de tensão de 138 e 230 kV. Com isso é mais propício de identificar os aquecimentos em equipamentos por efeito *Joule*, porque a potência dissipada no conector é dado

pela resistência da conexão multiplicada pela corrente do circuito ao quadrado ($P = R * i^2$).

TABELA 9 - QUANTIDADES DE SUBESTAÇÕES POR NÍVEL DE TENSÃO ELÉTRICA

TENSAO	QUANTIDADE	PERCENTUAL
34,5	63	70,00%
138	24	26,67%
230	3	3,33%
TOTAL	90	100,00%

FONTE: O Autor (2019).

As responsabilidades de manutenção da distrital noroeste estão divididas na TABELA 10, que apresentam as quantidades de subestações por setor de manutenção e seu percentual em relação ao total. As equipes de manutenção são formadas por colaboradores contratados da empresa que possuem práticas distintas de inspeções termográficas, devido a não ter um procedimento padronizado de inspeção, levando a usar valores de emissividades diferentes para os equipamentos instalados na subestação, no momento da realização da inspeção em campo.

TABELA 10 - QUANTIDADES SUBETAÇÕES POR SETOR DE MANUTENÇÃO

SETOR MANUTENÇÃO	QUANTIDADES	PORCENTAGEM
Campo Mourão	17	26,98%
Paranavaí	17	26,98%
Maringá	15	23,81%
Umuarama	14	22,22%
TOTAL	63	100,00%

FONTE: O Autor (2019).

Por fim a área selecionada para o trabalho, após levantar os ativos físicos da Distribuidora, ficaram com 63 subestações que operam no nível de tensão de até 34,5 kV. Essas 63 subestações corresponde a 70% do total de

subestações da distrital Noroeste e 15,79% do total do estado do Paraná de subestações sob concessão da Distribuidora de energia elétrica.

Classificando os tipos de anomalias térmicas por equipamento de subestação, os dados da FIGURA 17 mostram que 70% das anomalias térmicas identificadas na inspeção termográfica são em conectores elétricos.

FIGURA 17 - PERCENTUAL DE ANOMALIAS TÉRMICAS POR TIPO DE EQUIPAMENTO



FONTE: O Autor (2019).

Como os conectores elétricos são o principal problema de aquecimento encontrado em subestações, através do levantamento por amostragem em três subestações (Mariluz, Bandeira e Mandaguaçu), identificou-se os tipos de conectores que estão instalados em maior número, conforme TABELA 11. Pelos relatórios de inspeções termográficas pesquisados, não foi possível identificar com exatidão os tipos de conectores que estavam na imagem térmica, devido à falta de regulagem de foco do termovisor na captura do termograma e não constar nas observações do relatório o tipo de conector encontrado com aquecimento.

TABELA 11 - QUANTIDADES DE CONECTORES POR TIPO EM SUBESTAÇÕES

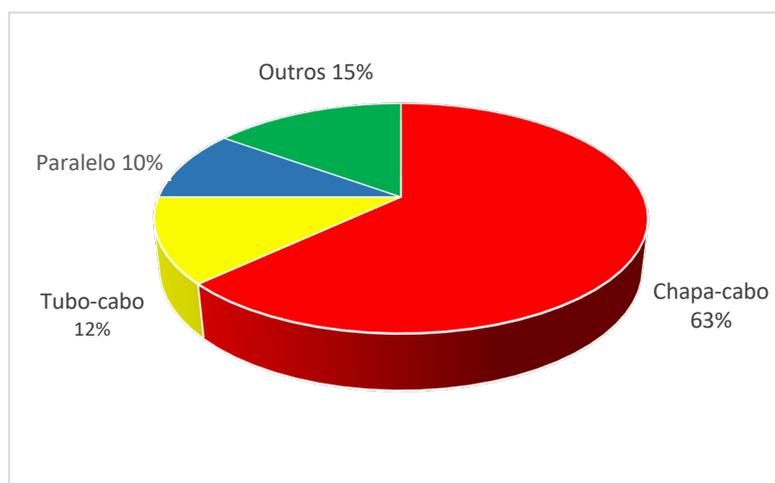
TIPO DE CONECTOR	MARILUZ	BANDEIRA	MANDAGUAÇU
Chapa-cabo	182	193	192
Tubo-cabo	33	35	36
Paralelo	32	31	30
Outros	45	48	43

Total	292	307	301
-------	-----	-----	-----

FONTE: O Autor (2019).

As subestações de média tensão de até 34,5 kV são padronizadas nos tipos de conectores instalados, havendo algumas diferenças em números de equipamentos existentes devido a demanda de energia de cada região. Com os números de conectores levantados nas três subestações de amostra, chegou-se nos maiores percentuais que são três tipos de conectores utilizados, sendo eles tipo chapa-cabo (63%), tubo-cabo (12%) e paralelo (10%), listados na FIGURA 18. Entre os conectores selecionados, três foram retirados de operação apresentando degradação e os outros três conectores são novos.

FIGURA 18 - PERCENTUAL DE CONECTORES POR TIPO



FONTE: O Autor (2019).

5.2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Os resultados obtidos com os ensaios em laboratório foram analisados a seguir, divididos nos valores de resistência elétrica dos conectores e comportamento da emissividade e temperatura deles.

5.2.1 Avaliação da resistência elétrica dos conectores

Os testes realizados no laboratório de média tensão da COPEL Distribuição, apresentaram os valores de resistências elétricas da TABELA 12, usando o torque de 47 N recomendado pelo fabricante para apertar as porcas dos conectores que são aparafusados, gerando um bom contato elétrico. Com as três medições de resistência elétrica por tipo e estado de cada conector, foram calculadas a média e o desvio padrão.

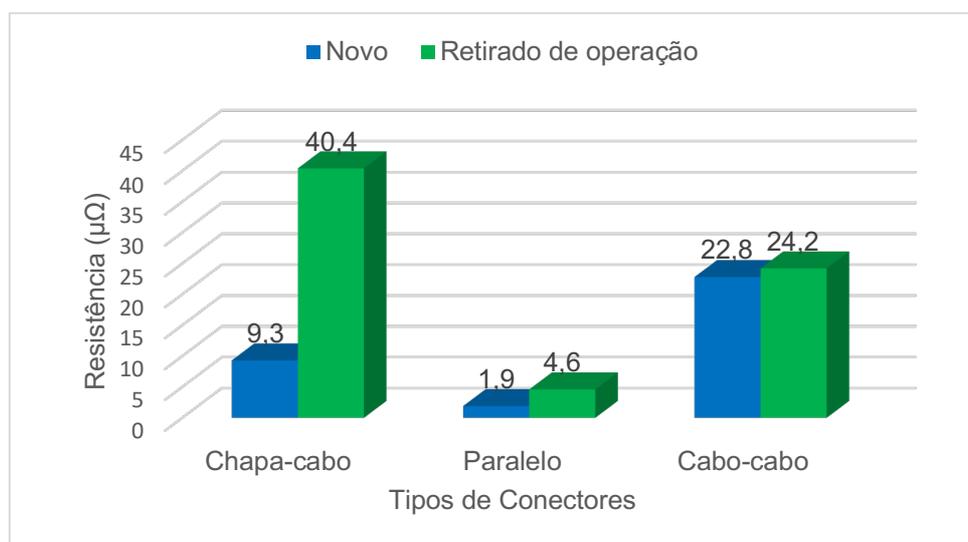
TABELA 12 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS CONECTORES COM BOM CONTATO

ESTADO	TIPO	MEDIÇÃO 1 ($\mu\Omega$)	MEDIÇÃO 2 ($\mu\Omega$)	MEDIÇÃO 3 ($\mu\Omega$)	MÉDIA ($\mu\Omega$)	DESVIO PADRÃO
Novo	Chapa-cabo	9,26	9,31	9,34	9,30	0,04
	Paralelo	1,91	1,90	1,98	1,92	0,06
	Cabo-cabo	22,65	22,76	23,10	22,84	0,23
Retirado de operação	Chapa-cabo	40,20	40,28	40,71	40,40	0,27
	Paralelo	4,55	4,52	4,72	4,60	0,11
	Cabo-cabo	23,92	24,10	24,58	24,20	0,34

FONTE: O Autor (2019).

Esses valores da TABELA 12 mostram que os conectores novos possuem uma resistência elétrica média menor, comparando os conectores por tipo, em relação aos retirados de operação. O maior valor médio de resistência elétrica foi de 40,40 $\mu\Omega$ no conector tipo chapa-cabo retirado de operação e o menor valor médio de resistência elétrica foi de 1,92 $\mu\Omega$ no conector tipo paralelo novo. A FIGURA 19 compara os valores médios de resistência elétrica dos conectores novos e dos retirados de operação com bom contato.

FIGURA 19 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS CONECTORES COM BOM CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

A TABELA 13 mostra os três valores das resistências elétricas medidas em cada conector, com um torque aplicado de 4,7 N nas porcas de cada conector. Esse torque corresponde a 10% do recomendado pelo fabricante de conectores, sendo considerado nesse trabalho como um mau contato elétrico. Através das três medições de resistência, foram calculadas a média e o desvio padrão.

TABELA 13 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS CONECTORES COM MAU CONTATO

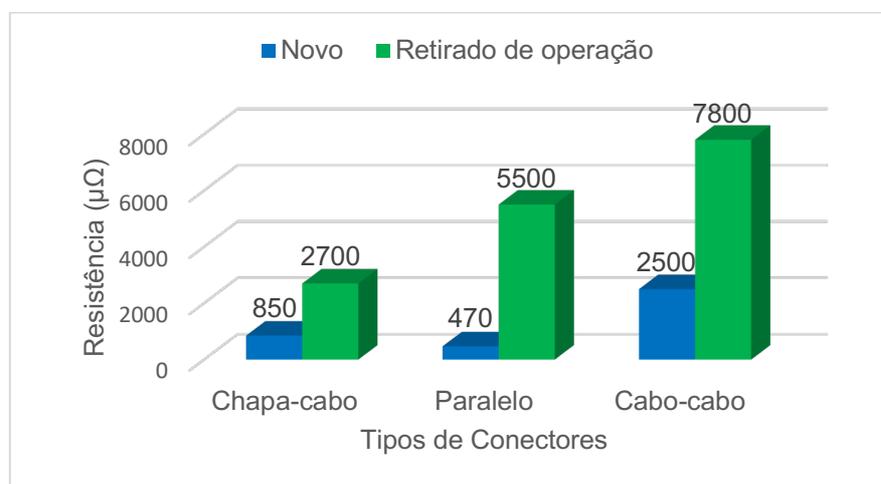
ESTADO	TIPO	MEDIÇÃO 1 (μΩ)	MEDIÇÃO 2 (μΩ)	MEDIÇÃO 3 (μΩ)	MÉDIA (μΩ)	DESVIO PADRÃO
Novo	Chapa-cabo	842,20	848,90	859,85	850,32	8,91
	Paralelo	468,30	469,22	472,90	470,14	2,43
	Cabo-cabo	2480,20	2495,10	2525,30	2500,20	22,98
Retirado de operação	Chapa-cabo	2685,20	2692,30	2723,65	2700,38	20,46
	Paralelo	5420,10	5445,30	5635,40	5500,27	117,71
	Cabo-cabo	7765,10	7740,80	7895,15	7800,35	82,99

FONTE: O Autor (2019).

Conforme a TABELA 13 os conectores novos possuem uma resistência elétrica média menor, comparando com os conectores retirados de operação. O maior valor médio de resistência elétrica foi de 7800 μΩ no conector tipo cabo-cabo retirado de operação e o menor valor médio de resistência elétrica foi de 470 μΩ no conector tipo paralelo novo.

Na FIGURA 20 apresenta os valores médios de resistência elétrica, comparando os conectores novos e retirados de operação com mau contato.

FIGURA 20 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS CONECTORES COM MAU CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

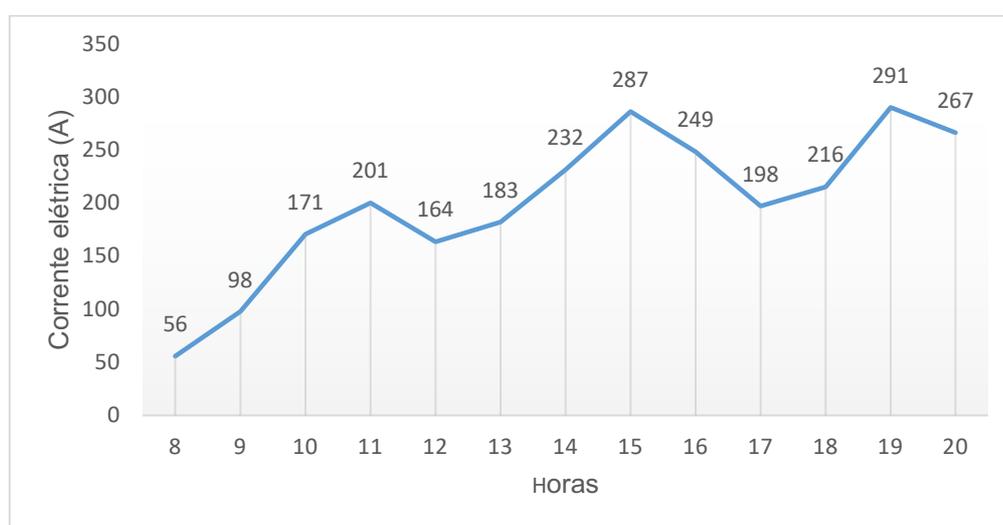
Comparando a TABELA 12 e a TABELA 13, os conectores com mau contato tiveram um grande aumento de resistência elétrica em relação aos conectores com bom contato. O conector tipo paralelo retirado de operação com bom contato teve um valor médio de resistência elétrica de $4,6 \mu\Omega$ e comparando com o mesmo conector com mau contato, a resistência chegou a $5500 \mu\Omega$. Esse tipo de conector paralelo retirado de operação que obteve esse grande aumento de resistência elétrica do bom contato para o mau contato, foi o que apresentou visualmente a menor área de contato entre as duas peças do conector. Com isso o microohmímetro como equipamento de medição, mediu uma resistência elevada em decorrência do mau contato elétrico existente.

5.2.2 Avaliação da emissividade e temperatura dos conectores

Nas subestações de estudo, os transformadores de potência servem para rebaixar a tensão de 34,5 kV para 13,8 kV, possuindo uma potência de 5 MVA em condições normais de funcionamento e 7 MVA com uso da ventilação forçada. Através do sistema de monitoração de grandezas elétricas de subestações da Distribuidora em estudo, identificou-se que a corrente elétrica máxima nos barramentos de energia não ultrapassam 300 A, em função da

limitação de potência dos transformadores. Os valores de correntes no intervalo de tempo de 12 horas (das 8 às 20 horas) estão representados na FIGURA 21, de uma subestação que atende consumidores residenciais e industrias, percebendo que a corrente não ultrapassa os 300 A, valor máximo que foi utilizado no ensaio em laboratório para atender as condições reais de campo, ou seja, das subestações desabrigadas.

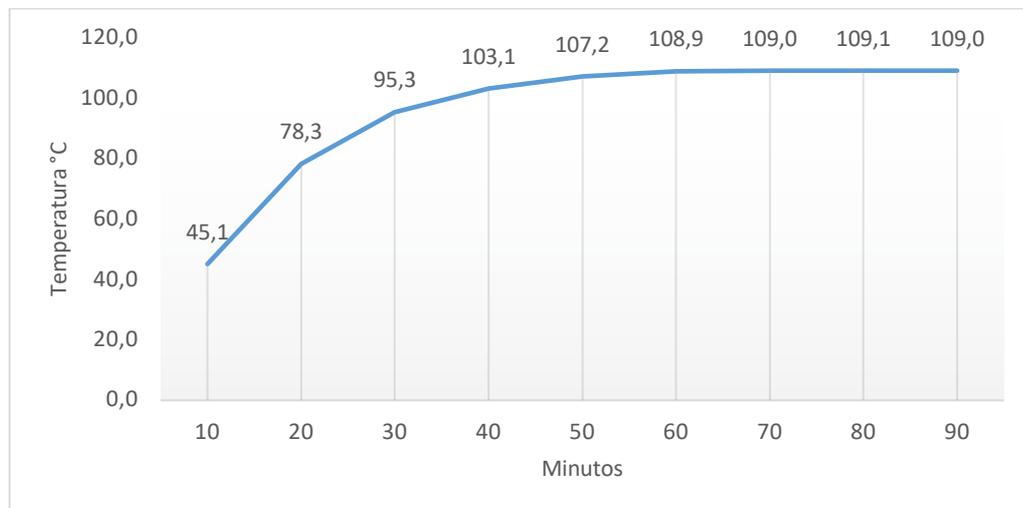
FIGURA 21 - VARIAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA EM UMA SUBESTAÇÃO DAS 8 ÀS 20 HORAS



FONTE: O Autor (2019).

Aplicando o ciclos de correntes de 50 a 300 A nos conectores e aguardando a sua estabilização térmica, houve a variação de temperatura em função do tempo, conforme a FIGURA 22, demonstrando que o tempo necessário para estabilização térmica dos conectores é de 90 minutos, onde a sua faixa de temperatura não variou mais que 2 °C, com duas medições realizadas a cada 5 minutos, que foi medida pelo termovisor resultando em um valor de 109,1 °C. Esse nível de temperatura foi obtido no conector chapa-cabo novo, aplicando uma corrente de 300 A, usando uma emissividade de 0,35. A estabilização térmica foi aguardada para todos os conectores que foram ensaiados pelos ciclos de correntes.

FIGURA 22 - TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO TÉRMICA DO CONECTOR



FONTE: O Autor (2019).

A FIGURA 23 mostra a medição da temperatura com o termopar tipo K, e a FIGURA 24 da medição com o termovisor, alterando a emissividade até coincidir com a temperatura média do termopar, nos ciclos de correntes aplicados.

FIGURA 23 - MEDIÇÃO DA TEMPERATURA COM O TERMOPAR DE CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

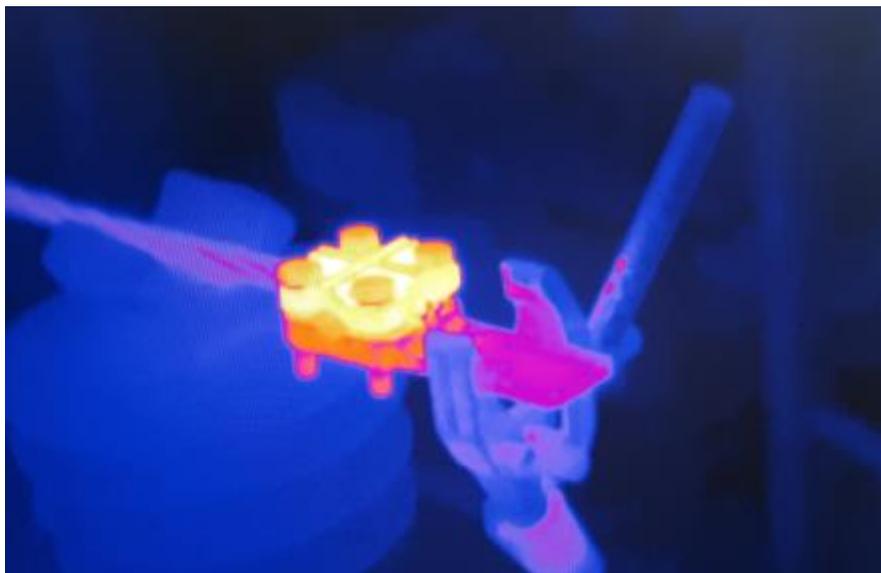
FIGURA 24 - MEDIÇÃO DA TEMPERATURA COM O TERMOVISOR SEM CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

A FIGURA 25 apresenta um termograma do conector tipo chapa-cabo retirado de operação e a FIGURA 26 uma imagem do mesmo conector, no arranjo montado para ensaios de ciclos de corrente.

FIGURA 25 - IMAGEM TÉRMICA DO CONECTOR TIPO CHAPA-CABO RETIRADO DE OPERAÇÃO



FONTE: O Autor (2019).

FIGURA 26 - IMAGEM DO CONECTOR TIPO CHAPA-CABO RETIRADO DE OPERAÇÃO

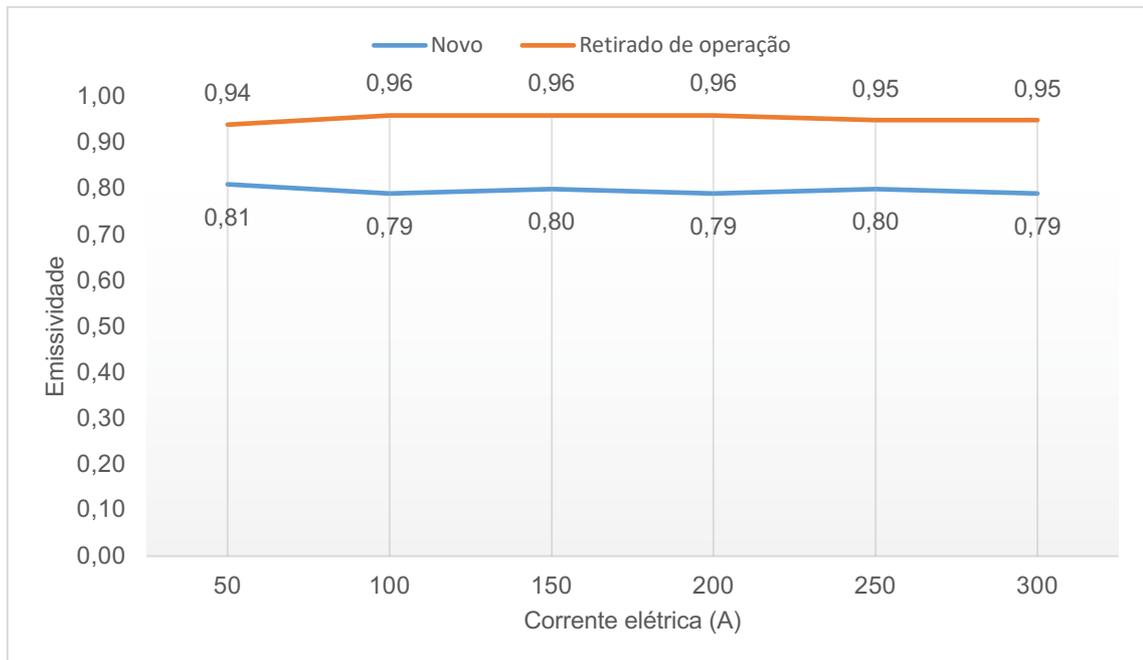


FONTE: O Autor (2019).

Foi calculado o valor médio da temperatura, considerando as três medições feitas pelo termopar por conector, para alterar a emissividade do termovisor até coincidir com a temperatura média do termopar. Assim foi possível encontrar a variação e média da emissividade, com o uso do termovisor, para os conectores elétricos de estudo, em função dos ciclos de corrente elétrica de 50 a 300 A.

Através do termovisor, os valores de emissividades encontrados aplicando os ciclos de correntes e comparando os conectores novos e retirados de operação com bom contato, estão mostrados na FIGURA 27, para os conectores tipo chapa-cabo. Os valores de emissividades para o conector novo tipo chapa-cabo variaram entre 0,79 a 0,81, diferente do conector retirado de operação do mesmo tipo que ficou entre 0,94 a 0,96, gerando uma diferença de emissividade entre eles de até 0,17. Os diferentes valores de emissividades encontrados, foi através da variação da emissividade no termovisor para coincidir com a temperatura média de cada conector medida pelo termopar de contato.

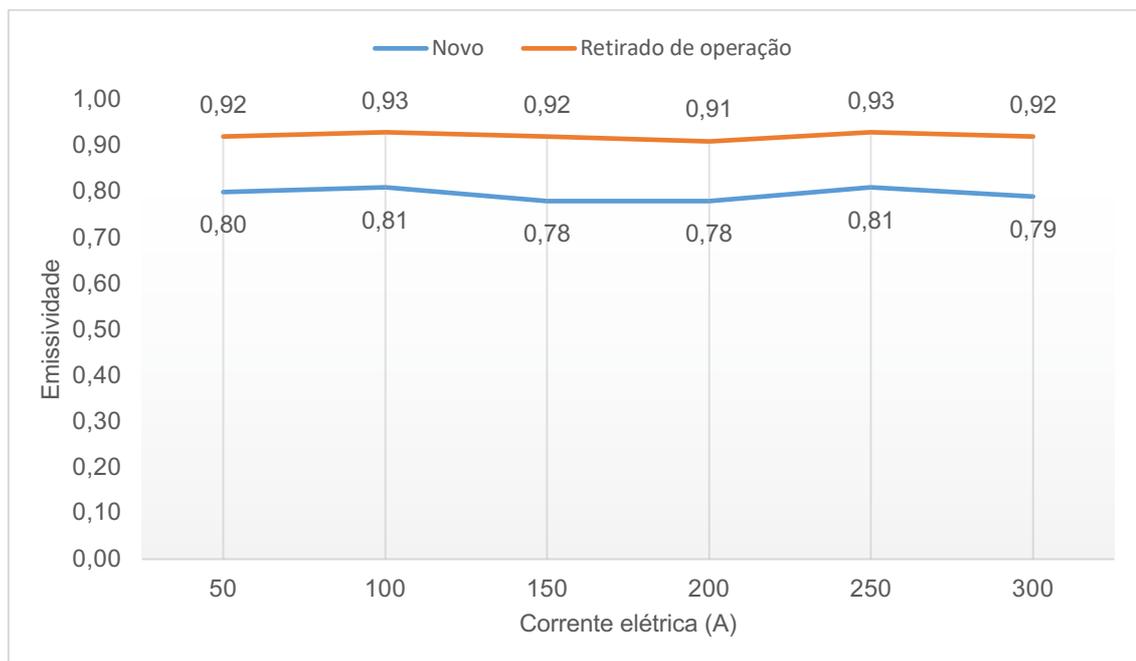
FIGURA 27 - EMISSIVIDADES DOS CONECTORES TIPO CHAPA-CABO NOVO E RETIRADO DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

Para o conector tipo paralelo novo e retirado de operação com bom contato, os resultados de emissividades estão apresentados na FIGURA 28. Comparando os valores de emissividades entre eles, chega-se a uma diferença de 0,15. O conector novo apresentou valores de emissividades de 0,78 a 0,81 e o retirado de operação de 0,91 a 0,93.

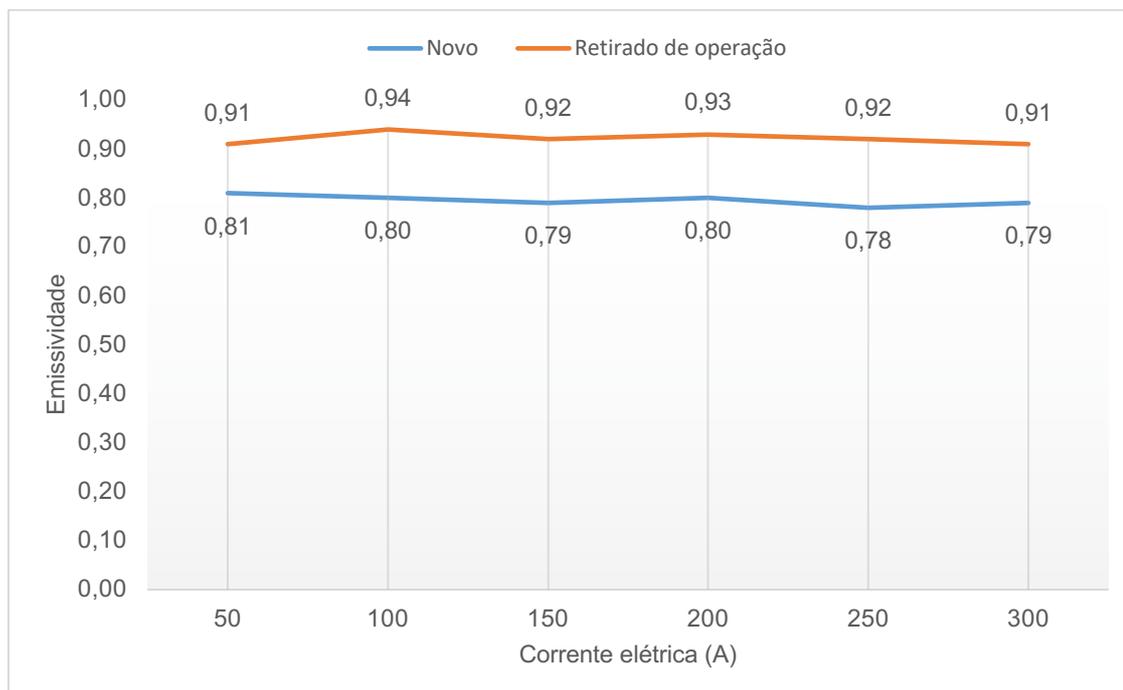
FIGURA 28 - EMISSIVIDADES DOS CONECTORES TIPO PARALELO NOVO E RETIRADO DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

A FIGURA 29 apresenta as emissividades dos conectores tipo cabo-cabo com bom contato. As alterações de emissividades para o conector novo ficaram entre 0,78 a 0,81 e para o conector retirado de operação de 0,91 a 0,94, com uma diferença máxima de emissividade entre eles de 0,16.

FIGURA 29 - EMISSIVIDADES DOS CONECTORES TIPO CABO-CABO NOVO E RETIRADO DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

A TABELA 14 apresenta em resumo os valores de emissividades encontrados no ensaio em laboratório para os três tipos de conectores, no estado novo e retirado de operação com bom contato e a variação de emissividades entre o valor mínimo encontrado do conector novo e o valor máximo encontrado do conector retirado de operação.

TABELA 14 - VALORES DE EMISSIVIDADES ENCONTRADAS NO ENSAIO EM LABORATÓRIO PARA CONECTORES NOVOS E RETIRADOS DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO

TIPO	NOVO	RETIRADO DE OPERAÇÃO	DIFERENÇA DE EMISSIVIDADE
Chapa-cabo	0,79 - 0,81	0,94 - 0,96	0,17
Paralelo	0,78 - 0,81	0,91 - 0,93	0,15
Cabo-cabo	0,78 - 0,81	0,91 - 0,94	0,16

FONTE: O Autor (2019).

Através da TABELA 14 o valor de emissividade de 0,35 indicado pelo fabricante de conectores não aplica-se na prática. O valor de emissividade encontrado para conectores novos pelo ensaio de ciclos de corrente, manteve-

se para o tipo chapa-cabo, paralelo e cabo-cabo na média de 0,80, indicado na TABELA 15, que apresenta também a variação da emissividade e o desvio padrão calculados, usando o termovisor para alterar a emissividade até coincidir com a temperatura média medida pelo termopar em cada conector, para os seis ciclos de corrente aplicados, que variaram entre 50 a 300 A.

TABELA 15 - EMISSIVIDADES ENCONTRADAS PARA CONECTORES NOVOS COM BOM CONTATO

TIPO	VARIÇÃO DA EMISSIVIDADE NO TERMOVISOR						MÉDIA	DESVIO PADRÃO
Chapa-cabo	0,81	0,79	0,80	0,79	0,80	0,79	0,80	0,01
Paralelo	0,80	0,81	0,78	0,78	0,81	0,79	0,80	0,01
Cabo-cabo	0,81	0,80	0,79	0,80	0,78	0,79	0,80	0,01

FONTE: O Autor (2019).

A TABELA 16 relaciona os conectores novos, com o valor de emissividade recomendado pelo fabricante de conectores, os valores médios encontrados pelo ensaio em laboratório e os valores utilizados pela Distribuidora de estudo.

TABELA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE EMISSIVIDADES PARA OS CONECTORES NOVOS COM BOM CONTATO

TIPO	RECOMENDADO PELO FABRICANTE	ENCONTRADO NO ENSAIO	UTILIZADO PELA DISTRIBUIDORA
Chapa-cabo	0,35	0,80	0,85
Paralelo	0,35	0,80	0,85
Cabo-cabo	0,35	0,80	0,85

FONTE: O Autor (2019).

Comparando as emissividades de conectores novos da TABELA 16, é notável a grande variação entre o recomendado pelo fabricante (0,35) e o encontrado no ensaio (0,80), chegando a 0,45. Para o valor de emissividade empregado pela Distribuidora (0,85) a variação chegou apenas a 0,05.

A TABELA 17 mostra a variação da emissividade nos conectores retirados de operação, a média e o desvio padrão calculados, usando o

termovisor para alterar a emissividade até coincidir com a temperatura média medida pelo termopar em cada conector.

TABELA 17 - EMISSIVIDADES ENCONTRADAS PARA CONECTORES RETIRADOS DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO

TIPO	VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE NO TERMOVISOR						MÉDIA	DESVIO PADRÃO
Chapa-cabo	0,94	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,01
Paralelo	0,92	0,93	0,92	0,91	0,93	0,92	0,92	0,01
Cabo-cabo	0,91	0,94	0,92	0,93	0,92	0,91	0,92	0,01

FONTE: O Autor (2019).

Para os conectores retirados de operação, a média de emissividades encontradas foram para o tipo chapa-cabo de 0,95, para o paralelo e cabo-cabo de 0,92.

A TABELA 18 compara os valores de emissividades utilizadas pela Distribuidora de energia de estudo, os encontrados no ensaio e o recomendado por manuais de termografia e de termovisores para conectores em operação. Comparando as emissividades utilizadas pela Distribuidora de 0,85 para conectores retirados de operação, com a encontrada no ensaio, existe uma diferença de 0,10 para o conector tipo chapa-cabo e de 0,07 para os conectores paralelo e cabo-cabo.

TABELA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE EMISSIVIDADES PARA OS CONECTORES RETIRADOS DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO

TIPO	UTILIZADO PELA DISTRIBUIDORA	ENCONTRADO NO ENSAIO	RECOMENDADO POR MANUAIS
Chapa-cabo	0,85	0,95	0,95
Paralelo	0,85	0,92	0,95
Cabo-cabo	0,85	0,92	0,95

FONTE: O Autor (2019).

A variação da emissividade dos conectores impactam diretamente no aumento ou redução das temperaturas calculadas pelo termovisor. A TABELA 19 mostra as três medições de temperatura utilizando o termovisor, nas áreas com maiores temperaturas do conector tipo chapa-cabo com bom contato, para

calcular a média e desvio padrão. Foram usados os valores de emissividades de 0,35, 0,75, 0,80 e 0,85 no termovisor, para medir as temperaturas no conector.

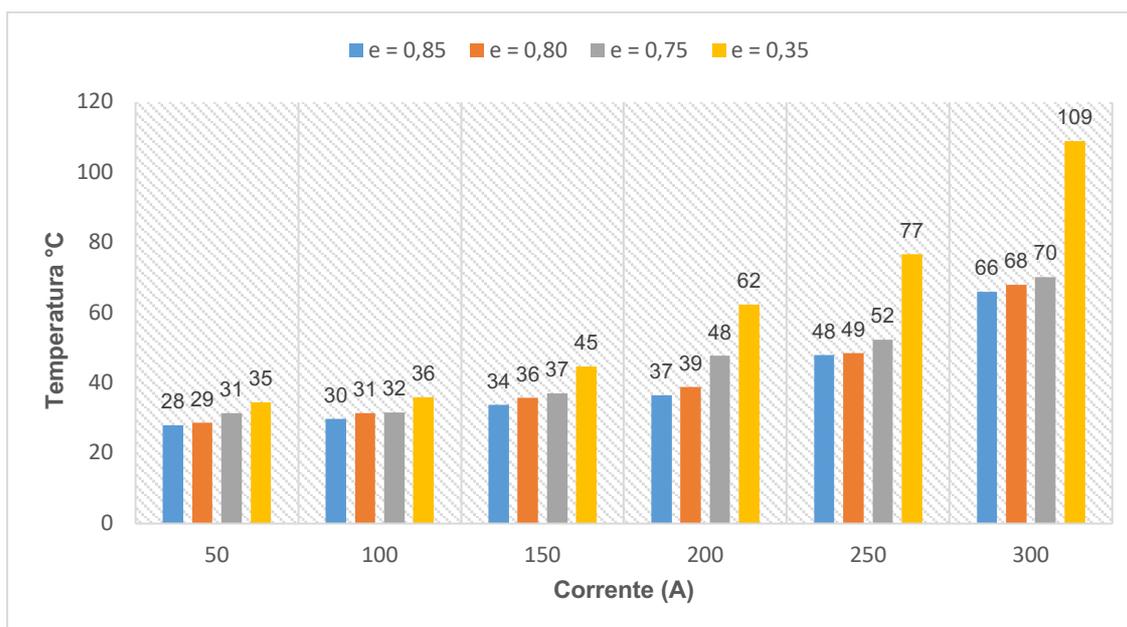
TABELA 19 - TEMPERATURA MEDIDAS NO CONECTOR CHAPA-CABO NOVO COM BOM CONTATO

EMISSIVIDADE 0,35					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	34,8	35,4	35,2	35,1	0,31
100	36,3	36,4	35,8	36,2	0,32
150	44,7	45,1	45,4	45,1	0,35
200	63,1	60,8	63,4	62,4	1,42
250	71,5	79,1	81,3	77,3	5,14
300	101,5	110,9	115,8	109,4	7,27
EMISSIVIDADE 0,75					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	31,1	31,2	31,5	31,3	0,21
100	31,9	32,4	32,1	32,1	0,25
150	35,9	36,8	38,8	37,2	1,48
200	46,1	48,2	50,8	48,4	2,35
250	50,5	52,3	53,9	52,2	1,70
300	66,8	71,2	74,5	70,8	3,86
EMISSIVIDADE 0,80					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	29,1	28,8	29,5	29,1	0,35
100	30,9	32,4	30,8	31,4	0,90
150	35,2	36,8	36,9	36,3	0,95
200	38,1	38,5	41,5	39,4	1,86
250	49,1	49,2	49,8	49,4	0,38
300	67,1	68,4	69,7	68,4	1,30
EMISSIVIDADE 0,85					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	28,3	28,2	28,1	28,2	0,10
100	30,4	30,1	30,8	30,4	0,35
150	33,1	33,9	35,7	34,2	1,33
200	35,2	36,5	40,3	37,3	2,65
250	47,5	47,9	48,9	48,1	0,72
300	64,9	65,3	67,9	66,0	1,63

FONTE: O Autor (2019).

A FIGURA 30 mostra as diferenças de temperaturas medidas no conector tipo chapa-cabo novo com bom contato, usando os valores médios inteiros de temperaturas da TABELA 19, medidos com o termovisor, comparando as emissividades de 0,85 (emissividade utilizada pela COPEL Distribuição), de 0,80 (encontrada nos ensaios em laboratório), de 0,75 (valor usado por algumas Distribuidoras de energia do Brasil) e de 0,35 (indicada por fabricantes de conectores). 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).

FIGURA 30 - TEMPERATURAS MEDIDAS NO CONECTOR CHAPA-CABO NOVO COM BOM CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

Através da FIGURA 30 e analisando a emissividade fixa de 0,85, tem uma temperatura de 28 °C no ciclo de corrente de 50 A, 30 °C no ciclo de 100 A, 34 °C para 150 A, 37 °C em 200 A, 48 °C para 250 A e 66 °C aplicando 300 A. Essa diferença de aumento de temperatura atingiu um valor de 38 °C (66 °C a 300 A menos 28 °C a 50 A) em função do aumento de corrente, sendo explicado pelo efeito *Joule* ($P=R \times i^2$), porque a resistência desse conector

medida pelo microohmímetro é de $9,3 \mu\Omega$ e com o acréscimo de corrente, aumenta a potência dissipada e por conseguinte a sua temperatura de operação. Essa mesma análise para o aumento de temperatura pela corrente aplicada, na emissividade de 0,80 e 0,75 tiveram uma diferença de aumento de temperatura de $39 \text{ }^\circ\text{C}$ e com a emissividade de 0,35 uma valor de diferença de temperatura de $74 \text{ }^\circ\text{C}$.

A TABELA 20 resume as informações de aumento de temperatura pela corrente elétrica aplicada numa mesma emissividade usada, ou seja, aumentou a temperatura devido ao aumento de corrente elétrica para um valor fixo de emissividade. Ela mostra a temperatura medida para as emissividades de 0,85, 0,80, 0,75 e 0,35 aplicando 50 A e 300 A para cada emissividade. Um aumento de temperatura calculando a diferença da temperatura em 300 A e 50A num mesmo valor de emissividade. Essa informação de aumento de temperatura pelo aumento de corrente aplicado em função da emissividade fixa, direcionam as equipes de termografia para realizar a inspeção em subestações, obrigatoriamente nos horários de ponta de carga, onde a corrente elétrica está próxima da máxima, facilitando a identificação de pontos quentes em decorrência das temperaturas maiores que atingem os componentes elétricos.

TABELA 20 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR CHAPA-CABO NOVO PARA AS CORRENTES DE 50 A E 300 A

EMISSIVIDADE	TEMPERATURA $^\circ\text{C}$ (50 A)	TEMPERATURA $^\circ\text{C}$ (300 A)	AUMENTO DE TEMPERATURA $^\circ\text{C}$
0,85	28	66	38
0,80	29	68	39
0,75	31	70	39
0,35	35	109	74

FONTE: O Autor (2019).

Outro aspecto a ser abordado analisando a FIGURA 30 é para um valor fixo de corrente elétrica, mas alterando a emissividade impacta diretamente na temperatura. No ciclo de 50 A com a emissividade de 0,85 a temperatura chegou a $28 \text{ }^\circ\text{C}$, para emissividade de 0,80 uma temperatura de $29 \text{ }^\circ\text{C}$, usando 0,75 de emissividade a temperatura chegou a $31 \text{ }^\circ\text{C}$ e com a emissividade de 0,35 a temperatura alcançou o nível de $35 \text{ }^\circ\text{C}$. A diferença do aumento de

temperatura para as quatro emissividades usadas, chegou a 7 °C (35 °C para emissividade de 0,35 menos 28 °C para 0,85) no ciclo de corrente de 50 A, conforme TABELA 21. Essa mesma analogia de manter a corrente fixa e alterar a emissividade para a corrente 300 A, medindo uma diferença máxima de temperatura de 43 °C (109 °C para emissividade de 0,35 menos 66 °C para 0,85).

TABELA 21 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR CHAPA-CABO NOVO COMPARANDO AS EMISSIVIDADES 0,85 A 0,35

CORRENTE (A)	TEMPERATURA °C				AUMENTO DE TEMPERATURA °C
	e = 0,85	e = 0,80	e = 0,75	e = 0,35	
50	28	29	31	35	7
100	30	31	32	36	6
150	34	36	37	45	11
200	37	39	48	62	25
250	48	49	52	77	29
300	66	68	70	109	43

FONTE: O Autor (2019).

Esses dados da TABELA 21, mostram que quanto menor for o valor da emissividade parametrizada no termovisor para cálculo da temperatura, maior será a temperatura medida do componente sob inspeção. Esse cálculo interno do termovisor, onde ele aumenta a temperatura com a redução da emissividade, é explicado por ele ter um algoritmo com uma lógica, que na parametrização do termovisor com emissividades menores, é interpretado que o componente está emitindo através da radiação infravermelha somente um percentual do total da temperatura, ou seja, se a conexão possui uma temperatura de 100 °C e uma emissividade de 0,35, faz com que ela transmita somente 35% em radiação da sua temperatura superficial real. Por isso o termografista deve saber a emissividade das conexões que ele realiza inspeções, para não medir uma temperatura maior do que a real, quando é utilizado emissividades menores que a verdadeira. O inverso também pode acontecer quando o inspetor utiliza emissividades maiores, medindo temperaturas menores do que a realmente está operando o equipamento.

Deve ser ressaltado que utilizando o valor de emissividade encontrado no ensaio para o conector tipo chapa-cabo novo de 0,80 e a emissividade

recomendada pela Distribuidora de 0,85, produz uma diferença de temperatura de no máximo 2 °C para todos os ciclos de corrente, sendo uma variação pequena de temperatura que gera pouca interferência no diagnóstico térmico de conectores em operação.

As análises realizadas no conector tipo chapa-cabo novo, considerando variação de temperatura em função do aumento de corrente elétrica e alteração da emissividades, também foram realizadas para o conector tipo paralelo novo e cabo-cabo novo.

A TABELA 22 mostra as três medições de temperatura realizadas com o termovisor no conector tipo paralelo novo com bom contato, a média e desvio padrão calculados, para as emissividades de 0,35, 0,75, 0,80 e 0,85.

TABELA 22 - TEMPERATURA MEDIDAS NO CONECTOR PARALELO NOVO COM BOM CONTATO

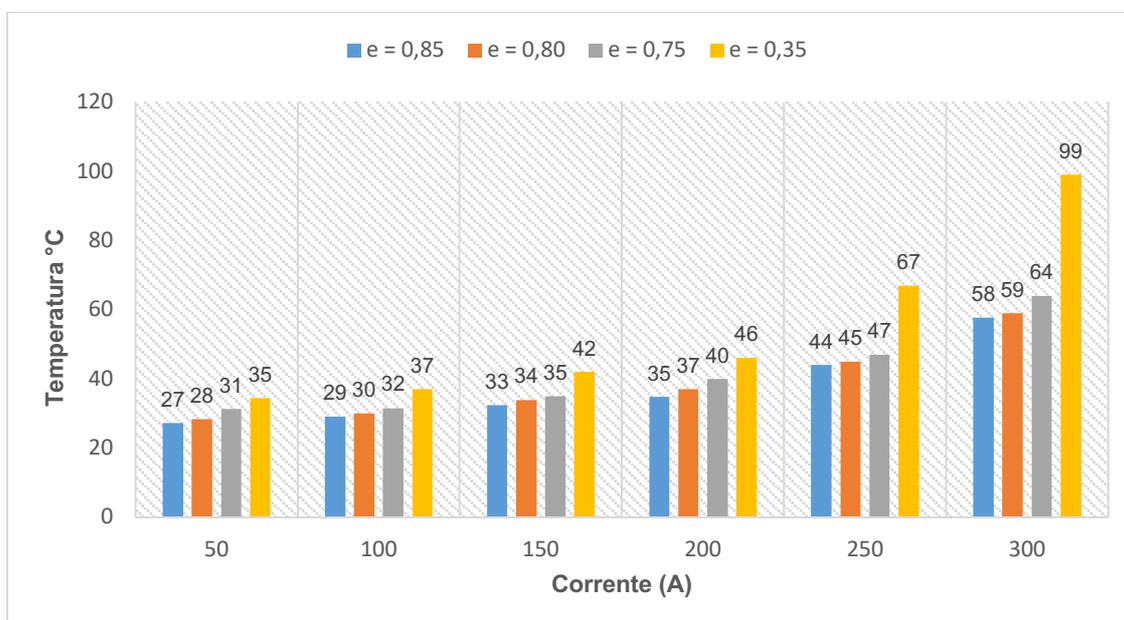
EMISSIVIDADE 0,35					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	34,5	34,9	35,9	35,1	0,72
100	36,4	36,9	37,8	37,0	0,71
150	40,6	42,5	43,7	42,3	1,56
200	45,5	46,5	46,7	46,2	0,64
250	64,8	66,7	69,9	67,1	2,58
300	96,1	98,6	103,2	99,3	3,60
EMISSIVIDADE 0,75					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	30,8	31,1	31,4	31,1	0,30
100	31,9	32,3	32,5	32,2	0,31
150	34,6	35,4	35,9	35,3	0,66
200	38,9	39,7	42,7	40,4	2,00
250	46,8	46,1	48,7	47,2	1,35
300	62,5	63,4	66,3	64,1	1,99
EMISSIVIDADE 0,80					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	28,1	27,8	28,6	28,2	0,40
100	29,9	30,5	30,7	30,4	0,42
150	33,8	33,9	34,8	34,2	0,55
200	36,1	37,3	38,5	37,3	1,20
250	45,1	45,6	45,7	45,5	0,32
300	58,9	60	59,7	59,5	0,57

EMISSIVIDADE 0,85					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	27,1	26,8	27,5	27,1	0,35
100	29,1	28,8	29,6	29,2	0,40
150	33,4	33,2	33,5	33,4	0,15
200	34,1	35,5	36,2	35,3	1,07
250	44,1	43,6	45,7	44,5	1,10
300	57,2	57,8	58,9	58,0	0,86

FONTE: O Autor (2019).

A FIGURA 31 apresenta os níveis de temperaturas para o conector paralelo novo, usando os valores médios inteiros de temperaturas da TABELA 22, aplicando os ciclos de correntes e alterando a emissividade no termovisor. Comparando as diferentes emissividades usadas no ciclo de 300 A, a maior temperatura encontrada de 99°C para a emissividade de 0,35 e a menor temperatura de 58°C com o uso da emissividade de 0,85, mostrando que diferentes emissividades para o mesmo ciclo de corrente nesse conector paralelo, gera uma diferença de temperatura de 41°C.

FIGURA 31 - TEMPERATURAS MEDIDAS NO CONECTOR PARALELO NOVO COM BOM CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

Nesse conector o maior aumento de temperatura comparando a corrente de 50 A e 300 A, chegou a 64 °C para a emissividade fixa de 0,35, conforme

TABELA 23, sendo necessário realizar inspeção termográfica no conector paralelo nos horários de ponta de carga, para evitar variações de temperaturas no diagnóstico térmico.

TABELA 23 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR PARALELO NOVO PARA AS CORRENTES DE 50 A E 300 A

EMISSIVIDADE	TEMPERATURA °C (50 A)	TEMPERATURA °C (300 A)	AUMENTO DE TEMPERATURA °C
0,85	27	58	31
0,80	28	59	31
0,75	31	64	33
0,35	35	99	64

FONTE: O Autor (2019).

O aumento de temperatura no conector alterando a emissividade de 0,85 para 0,35, obteve um acréscimo de temperatura máxima de 41 °C no ciclo de corrente de 300 A, conforme TABELA 24. Nesse conector a variação de temperatura usando a emissividade da Distribuidora de 0,85 e a identificada no laboratório de 0,80, variou a temperatura num valor máximo de apenas 2 °C.

TABELA 24 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR PARALELO NOVO COMPARANDO AS EMISSIVIDADES 0,85 A 0,35

CORRENTE (A)	TEMPERATURA °C				AUMENTO DE TEMPERATURA °C
	e = 0,85	e = 0,80	e = 0,75	e = 0,35	
50	27	28	31	35	8
100	29	30	32	37	8
150	33	34	35	42	9
200	35	37	40	46	11
250	44	45	47	67	23
300	58	59	64	99	41

FONTE: O Autor (2019).

A TABELA 25 mostra as três medições de temperatura realizadas com o termovisor no conector tipo cabo-cabo novo com bom contato, a média e desvio padrão calculados, nas emissividades de 0,35, 0,75, 0,80 e 0,85.

TABELA 25 - TEMPERATURA MEDIDAS NO CONECTOR CABO-CABO NOVO COM BOM CONTATO

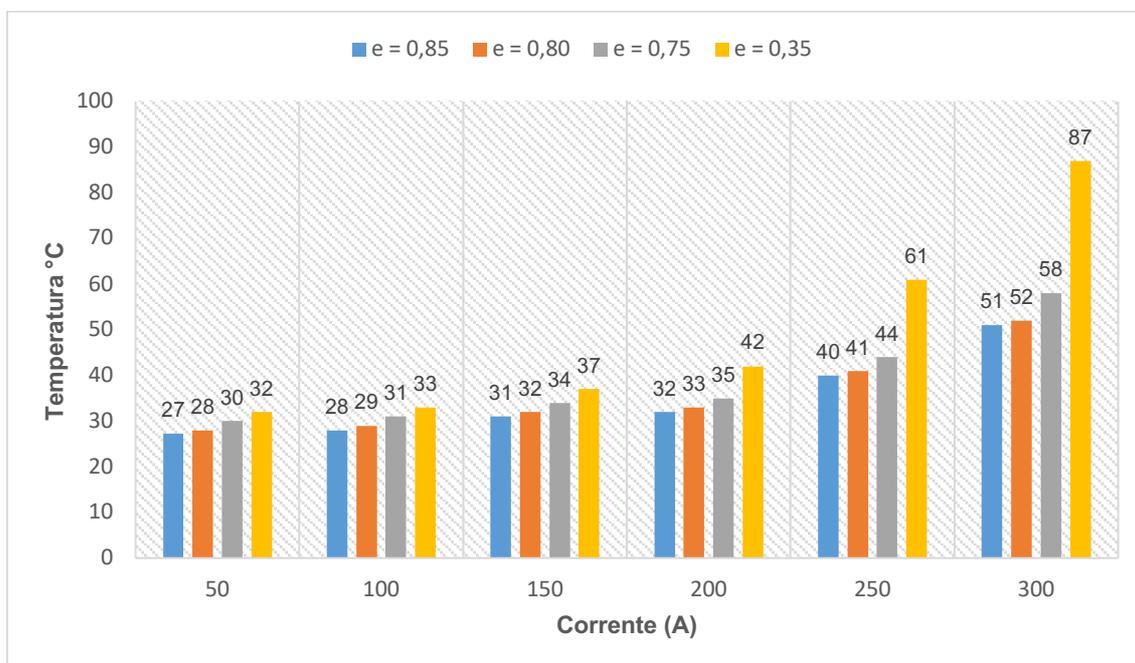
EMISSIVIDADE 0,35					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	31,9	32,1	32,5	32,2	0,31
100	32,5	32,9	33,9	33,1	0,72
150	36,6	37,4	38,1	37,4	0,75
200	40,9	41,7	43,8	42,1	1,50
250	59,8	62,1	62,7	61,5	1,53
300	84,6	87,2	89,7	87,2	2,55
EMISSIVIDADE 0,75					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	29,8	30,2	30,7	30,2	0,45
100	30,7	31,1	31,5	31,1	0,40
150	33,2	33,9	34,9	34,0	0,85
200	34,6	34,9	35,7	35,1	0,57
250	42,3	43,4	47,8	44,5	2,91
300	56,8	57,7	60,2	58,2	1,76
EMISSIVIDADE 0,80					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	27,8	28,2	28,1	28,0	0,21
100	28,9	29,5	29,4	29,3	0,32
150	31,8	32,1	32,4	32,1	0,30
200	33,1	33,4	33,6	33,4	0,25
250	41,2	41,5	41,3	41,3	0,15
300	52,7	52,4	52,2	52,4	0,25
EMISSIVIDADE 0,85					
CORRENTE (A)	MEDIÇÃO 1 (°C)	MEDIÇÃO 2 (°C)	MEDIÇÃO 3 (°C)	MÉDIA (°C)	DESVIO PADRAO
50	26,8	26,9	27,3	27,0	0,26
100	28,1	28,3	28,5	28,3	0,20
150	30,7	30,8	31,8	31,1	0,61
200	32,2	32,5	32,8	32,5	0,30
250	39,7	39,6	40,9	40,1	0,72
300	50,8	51,2	51,7	51,2	0,45

FONTE: O Autor (2019).

No conector tipo cabo-cabo novo, a FIGURA 32 apresenta os valores de temperaturas atingidos pela conexão em função da variação da corrente e

emissividade, utilizando os valores médios inteiros de temperaturas da TABELA 25.

FIGURA 32 - TEMPERATURAS MEDIDAS NO CONECTOR CABO-CABO NOVO COM BOM CONTATO



FONTE: O Autor (2019).

No tipo de conector cabo-cabo novo a diferença de temperatura para as correntes de 50 A e 300 A, foi de 55 °C, conforme TABELA 26. Essa diferença de temperatura encontrada de 55 °C é relevante no diagnóstico térmico em conectores elétricos, alertando o termografista para considerar o nível de corrente elétrica no momento da inspeção termográfica.

TABELA 26 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR CABO-CABO NOVO PARA AS CORRENTES DE 50 A E 300 A

EMISSIVIDADE	TEMPERATURA °C (50 A)	TEMPERATURA °C (300 A)	AUMENTO DE TEMPERATURA °C
0,85	27	51	24
0,80	28	52	24
0,75	30	58	28
0,35	32	87	55

FONTE: O Autor (2019).

O valor de elevação de temperatura de para emissividades de 0,85 e 0,35 foi de um valor máximo de 36 °C no ciclo de corrente de 300 A, demonstrado na TABELA 27. A variação de temperatura comparando as emissividades de 0,85 e 0,80, atingiu um valor máximo de 1 °C.

TABELA 27 - AUMENTO DE TEMPERATURA NO CONECTOR CABO-CABO NOVO COMPARANDO AS EMISSIVIDADES 0,85 A 0,35

CORRENTE (A)	TEMPERATURA °C				AUMENTO DE TEMPERATURA °C
	e = 0,85	e = 0,80	e = 0,75	e = 0,35	
50	27	28	30	32	5
100	28	29	31	33	5
150	31	32	34	37	6
200	32	33	35	42	10
250	40	41	44	61	21
300	51	52	58	87	36

FONTE: O Autor (2019).

De forma sintetizada, o acréscimo de temperatura através do experimento em laboratório para conectores novos tipo chapa-cabo, paralelo e cabo-cabo, estão demonstrados na TABELA 28, com o objetivo de comparar as diferentes emissividades utilizadas pela Distribuidora de estudo, a recomendada pelos fabricantes de conectores e a encontrada no experimento em laboratório. A variação de temperatura aconteceu em função das três comparações entre as emissividades de 0,85 - 0,80, 0,80 - 0,35 e 0,85 - 0,35.

TABELA 28 - ACRÉSCIMO DE TEMPERATURA COMPARANDO VALORES DE EMISSIVIDADES E DE CORRENTES PARA CONECTORES NOVOS COM BOM CONTATO

CORRENTE	TIPO CONECTOR	TEMPERATURA °C		
		e 0,85 - 0,80	e 0,80 - 0,35	e 0,85 - 0,35
50 A	Chapa-cabo	1	6	7
	Paralelo	1	7	8
	Cabo-cabo	1	4	5
300 A	Chapa-cabo	2	41	43
	Paralelo	1	40	41
	Cabo-cabo	1	35	36

FONTE: O Autor (2019).

A comparação entre a emissividade de 0,85 (utilizada pela Distribuidora) e 0,35 (recomendada por fabricantes), é a que resultou nas maiores diferenças de temperaturas medidas para os três tipos de conectores novos, atingindo a temperatura de 43 °C. Comparando as temperaturas medidas usando as emissividades de 0,85 e 0,80 (encontrada nos ensaios em laboratório), a maior diferença de temperatura foi de apenas 2 °C. Analisando os níveis de corrente elétrica, na corrente de 50 A, a maior diferença de temperatura chegou a 8 °C, contudo na corrente de 300 A, a maior diferença de temperatura foi de 43 °C, ressaltando a importância do nível de corrente elétrica na medição de temperatura.

Essas análises das diferenças de temperaturas medidas em função da emissividade usada e do nível de corrente elétrica de operação, são importantes para o profissional que realiza a inspeção termográfica quantitativa em subestações, para não medir com o termovisor temperaturas que não indicam a realidade térmica dos conectores sob inspeção, gerando um diagnóstico térmico falso. A emissividade de 0,35 não é praticável, porque além de não corresponder às características da conexão, proporciona uma leitura de temperatura errada. Já a emissividade de 0,85 usada pela Distribuidora interfere pouco no diagnóstico térmico, comparada com a emissividade de conectores novos encontrada nesse trabalho.

Até o momento foram apresentados os resultados e análises dos três tipos de conectores novos. Para os três tipos de conectores retirados de operação, foram realizadas as mesmas análises de verificação da variação da temperatura dos conectores em decorrência dos ciclos de correntes aplicados e da alteração dos valores de emissividades. As emissividades comparadas foram a de 0,85 (utilizada pela Distribuidora), 0,92 (encontrada no experimento para os conectores retirados de operação tipo paralelo e cabo-cabo), 0,95 (encontrada no experimento para o conector retirado de operação tipo chapa-cabo) e 0,95 (recomendada por manuais e termovisores). Essas informações estão resumidas na TABELA 29, com os ciclos de corrente de 50 e 300 A, para avaliar o aumento de temperatura e as comparações entre as emissividades.

Para o conector chapa-cabo foram comparadas somente a emissividade encontrada em laboratório, que coincide com a recomendada por manuais, com a usada pela Distribuidora. Nos conectores paralelo e cabo-cabo, foram comparadas a emissividade indicada por manuais, encontradas no ensaio e utilizada pela Distribuidora. Através da TABELA 29, analisando o ciclo de corrente de 50 A, a maior diferença de temperatura chegou a 2 °C, contudo no ciclo de 300 A, a maior diferença de temperatura foi de 18 °C no conector chapa-cabo. Assim como nos conectores novos e retirados de operação o aumento da corrente provoca uma variação de temperatura, que impacta no diagnóstico térmico em conectores.

TABELA 29 - ACRÉSCIMO DE TEMPERATURA COMPARANDO VALORES DE EMISSIVIDADES E DE CORRENTES PARA CONECTORES RETIRADOS DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO

CORRENTE	TIPO CONECTOR	TEMPERATURA °C		
		ϵ 0,95 - 0,92	ϵ 0,92 - 0,85	ϵ 0,95 - 0,85
50 A	Chapa-cabo	—	—	2
	Paralelo	0,4	0,6	1
	Cabo-cabo	1,8	0,2	2
300 A	Chapa-cabo	—	—	18
	Paralelo	1,5	10,7	12,2
	Cabo-cabo	2,1	4	6,1

FONTE: O Autor (2019).

Comparando os valores de emissividades da TABELA 29, a diferença maior de temperatura chegou a 18 °C, entre as emissividades de 0,95 e 0,85. Analisando as emissividades de 0,92 e 0,85, a maior diferença de temperatura foi de 10,7 °C e entre as emissividades de 0,95 e 0,92 a maior diferença foi de apenas 2,1 °C. Nos conectores retirados de operação tipo chapa-cabo e paralelo, é necessário parametrizar o termovisor com as emissividades encontradas nesse trabalho ao invés de usar a emissividade de 0,85 da Distribuidora, porque geraram uma diferença de temperatura significativa de 18 °C e 10,7 °C, respectivamente. Mas para o conector cabo-cabo a diferença de temperatura chegou apenas a 4 °C, sendo pouco expressiva para termografia quantitativa.

Esses erros de emissividades usadas, tanto para conectores novos quanto para os retirados de operação, provocam um diagnóstico térmico errôneo, levando o inspetor a solicitar intervenção através da equipe de manutenção em conexões elétricas em bom estado térmico de operação, aumentando os custos de manutenção. Outra situação que pode ocorrer é deixar os equipamentos com aquecimentos em operação, elevando a risco de um defeito tornar-se uma falha no sistema elétrico, quando usa-se emissividades maiores do que as reais de cada tipo e estado da conexão, provocando uma leitura menor de temperatura em relação a temperatura que está operando a conexão.

A TABELA 30 apresenta os valores reais de emissividades para os conectores novos e retirados de operação, tipo chapa-cabo, paralelo e cabo-cabo. É importante utilizar essas emissividades pelo profissional que executa a inspeção termográfica quantitativa em subestações de energia elétrica de média tensão, com o objetivo realizar um diagnóstico térmico assertivo em conexões elétricas para gestão de ativos físicos.

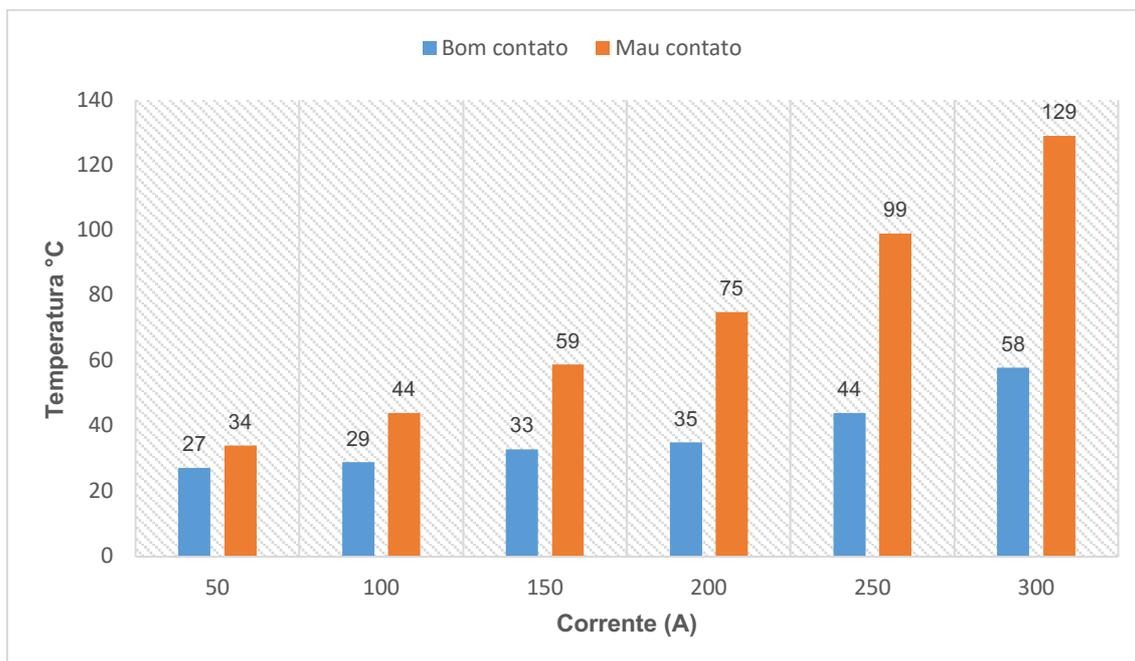
TABELA 30 - EMISSIVIDADES DE CONECTORES NOVOS E RETIRADOS DE OPERAÇÃO PARA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA QUANTITATIVA

ESTADO	TIPO	EMISSIVIDADE
Novo	Chapa-cabo	0,80
	Paralelo	0,80
	Cabo-cabo	0,80
Retirado de operação	Chapa-cabo	0,95
	Paralelo	0,92
	Cabo-cabo	0,92

FONTE: O Autor (2019).

Após os análises das conexões novas e retiradas de operação com bom contato, foram analisadas os níveis de temperaturas nas conexões com mau contato, medidas pelo termovisor com emissividade fixa de 0,85. A FIGURA 33 relaciona a temperatura do conector tipo paralelo novo com bom contato e com mau contato.

FIGURA 33 - COMPARAÇÃO DE TEMPERATURA ENTRE A CONEXÃO PARALELA NOVA COM BOM CONTATO E COM MAU CONTATO ($e = 0,85$)

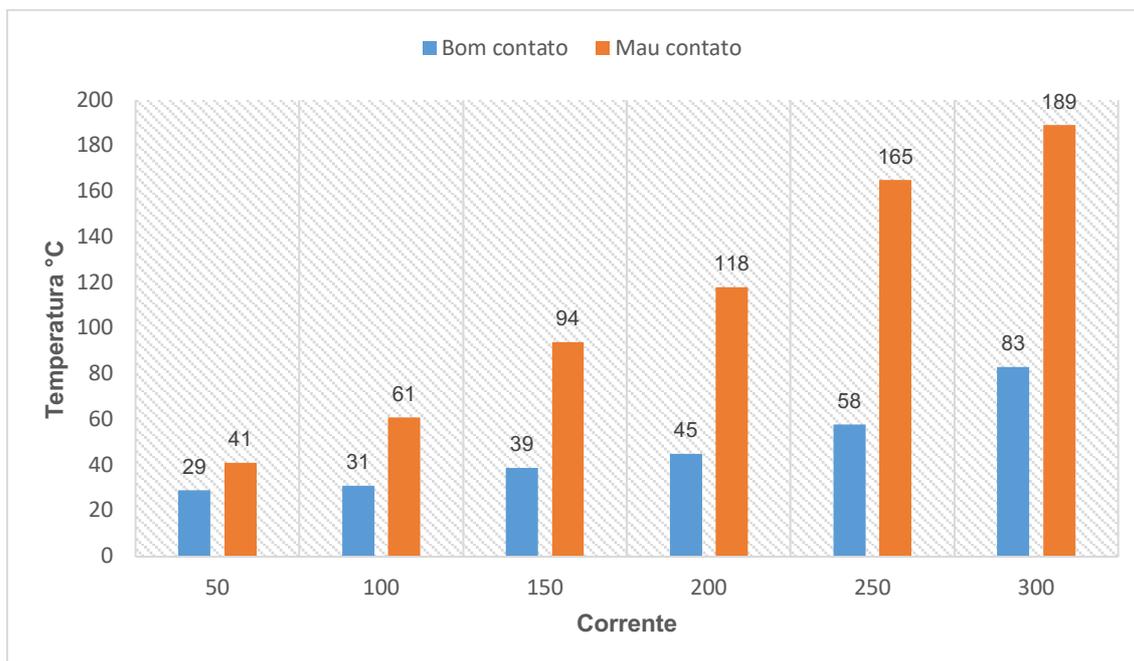


FONTE: O Autor (2019).

Na FIGURA 33 as temperaturas do conector com bom contato são menores comparadas com o mesmo conector com mau contato. Esse fato é explicado devido a esse conector com bom contato possuir uma resistência elétrica de $1,9 \mu\Omega$ e o com mau contato de $470 \mu\Omega$, aumentando a temperatura no conector com mau contato em função da resistência elétrica ser maior. No maior ciclo de corrente elétrica de 300 A, o conector com bom contato chegou a uma temperatura de $58 \text{ }^\circ\text{C}$ e o com mau contato de $129 \text{ }^\circ\text{C}$, obtendo uma diferença de temperatura bastante acentuada de $71 \text{ }^\circ\text{C}$.

No conector paralelo retirado de operação com bom contato e mau contato a diferença de temperatura no ciclo de corrente de 300 A, atingiu um valor de $106 \text{ }^\circ\text{C}$ ($189 \text{ }^\circ\text{C}$ menos $83 \text{ }^\circ\text{C}$), conforme a FIGURA 34. As resistências elétricas do conector com bom contato de $4,6 \mu\Omega$ e o com mau contato de $5500 \mu\Omega$, explicam essa elevada diferença de temperatura encontrada.

FIGURA 34 - COMPARAÇÃO DE TEMPERATURA ENTRE A CONEXÃO PARALELA RETIRADA DE OPERAÇÃO COM BOM CONTATO E COM MAU CONTATO ($e = 0,85$)



FONTE: O Autor (2019)

Como os conectores novos e retirados de operação tipo chapa-cabo e cabo-cabo apresentaram aumento significativo de temperatura comparando o bom contato e o mau contato, esses dados não foram analisados nesse trabalho, porque a análise do conector paralelo já indica o perfil de resposta de temperatura em função do aumento de resistência elétrica do conector. Porém é reforçado a informação para o inspetor termográfico que uma conexão com bom contato físico, caso ocorra algum evento que provoque o seu mau contato quando ela estiver em operação, a sua temperatura irá aumentar consideravelmente conforme a corrente de operação, gerando um problema térmico para a subestação de energia.

5.3 Procedimento de inspeção termográfica em subestações

Na aplicação do procedimento de inspeção termográfica para diagnóstico térmico em conexões elétricas, foram selecionadas as subestações com maior tempo de operação, levando em consideração as melhorias realizadas com manutenções em equipamentos, que podem diminuir o número

de pontos quentes em conexões. A TABELA 31 mostra as oito subestações da região noroeste do Paraná selecionadas como ativos físicos para o procedimento proposto, sendo duas por setor de manutenção (Campo Mourão, Umuarama, Paranavaí e Maringá), que obtiveram o maior tempo de operação e menor frequência de manutenção e inspeção, das 63 do parque de ativos físicos da Distribuidora. Ressaltando que para validar o procedimento de inspeção é necessário ter um cenário na subestação que possibilite encontrar aquecimento em conectores, e isso é proporcionado quando tem conectores com maior tempo de operação e pouca manutenção, facilitando a sua degradação e mau contato.

TABELA 31 - RELAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DA REGIÃO NOROESTE SELECIONADAS PARA APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

NOME	LOCALIDADE	TENSÃO (kV)	RESPONSÁVEL	INICIO DE OPERAÇÃO
Bandeira	Campo Mourão	34,5	Campo Mourão	02/10/1964
Araruna	Araruna	34,5	Campo Mourão	20/03/1965
Mariluz	Mariluz	34,5	Umuarama	15/02/1968
Xambrê	Xambrê	34,5	Umuarama	05/03/1969
Paranacity	Paranacity	34,5	Paranavaí	15/06/1966
Tamboara	Tamboara	34,5	Paranavaí	05/11/1968
Floriano	Maringá	34,5	Maringá	11/09/1965
Mandaguaçu	Mandaguaçu	34,5	Maringá	13/04/1966

FONTE: O Autor (2019).

Como a variação da corrente elétrica é um fator que influencia na temperatura medida pela termografia quantitativa, a TABELA 32 apresenta o perfil de carga que repete-se durante os dias da semana nas subestações do setor de manutenção de Campo Mourão, Umuarama, Paranavaí e Maringá. Com essa tabela, foram realizadas as inspeções termográfica no horário das 7 às 10 horas para as subestações Bandeira e Araruna e para as demais subestações no horário das 18 às 20 horas, em função das horas de pico de carga onde a corrente elétrica é próxima da máxima e a influência da radiação solar na temperatura dos conectores elétricos é reduzida. Nas subestações Bandeira, Araruna e Mandaguaçu, a corrente de pico superou os 300 A (valor máximo utilizado no ensaio em laboratório), devido aos transformadores de potência operarem no regime de sobrecarga por alguns minutos. A variação da

corrente em percentual, definida pela relação da corrente máxima pela mínima, na subestação Xambrê chegou a 314%, ou seja, é necessário realizar inspeções em horários de ponta de carga em função das grandes diferenças de correntes durante o dia.

TABELA 32 - HORÁRIO DE PONTA DE CARGA DIÁRIO NAS SUBESTAÇÕES

NOME	SIGLA	PONTA DE CARGA (HORAS)			CORRENTE (A)		VARIÇÃO DE CORRENTE (%)
		7 às 10	13 às 15	18 às 20	MÍNIMA	MÁXIMA	
Bandeira	BAN	X		X	221	409	185
Araruna	ARU	X	X		151	366	242
Mariluz	MIS			X	44	106	241
Xambrê	XAM			X	14	44	314
Paranacity	PTY			X	79	122	154
Tamboara	TAM			X	27	57	211
Floriano	FLO			X	33	64	194
Mandaguaçu	MCU			X	151	311	206

FONTE: O Autor (2019).

A quantidade de aquecimento identificados pela equipe de inspeção não experiente e que não executava a inspeção, realizando a termografia em conexões elétricas nas 8 subestações selecionadas, estão demonstrados na TABELA 33. Nessa tabela os pontos quentes foram classificados por tipo de equipamento da subestação onde a conexão está instalada e por tipo de conector. No conector tipo paralelo, apesar de estar presente em várias conexões, nele não foi identificado problemas térmicos, contudo no tipo chapa-cabo e tubo-cabo, somaram-se no total 14 aquecimentos.

TABELA 33 - QUANTIDADE DE AQUECIMENTOS IDENTIFICADOS PELA EQUIPE DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA POR TIPO DE EQUIPAMENTO E CONECTOR

TIPO DE EQUIPAMENTO	TIPO DE CONECTOR		
	Chapa-cabo	Tubo-cabo	Paralelo
Chave seccionadora unipolar	2	0	0
Chave seccionadora tandem	6	0	0
Barramento de carga	0	2	0
Religador automático	0	1	0
Regulador de tensão	0	3	0
TOTAL	8	6	0

FONTE: O Autor (2019).

A equipe de inspeção através da câmera termográfica registrou os 14 termogramas (APÊNDICE 2) com os aquecimentos, que pela configuração feita no termovisor são os pontos mais claros em relação ao restante da imagem térmica com pontos mais escuros. Esses pontos com aquecimentos foram classificados por tipo, estado do conector e equipamento da subestação, conforme a TABELA 34.

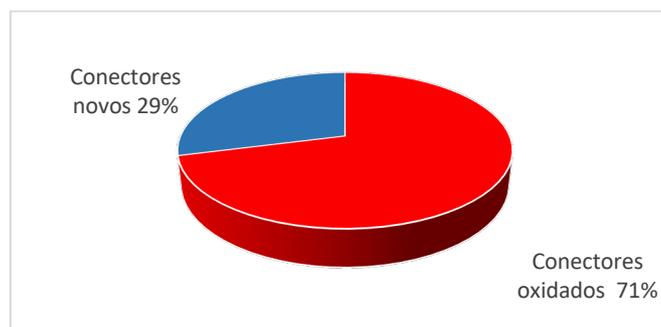
TABELA 34 - ESTADO DOS CONECTORES COM OS AQUECIMENTOS IDENTIFICADOS PELA EQUIPE DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

TERMOGRAMA	ESTADO DO CONECTOR	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO
1	Chapa-cabo novo	Chave seccionadora unipolar
2	Chapa-cabo oxidado	Chave seccionadora unipolar
3	Chapa-cabo novo	Chave seccionadora tandem
4	Chapa-cabo oxidado	Chave seccionadora tandem
5	Chapa-cabo oxidado	Chave seccionadora tandem
6	Chapa-cabo oxidado	Chave seccionadora tandem
7	Chapa-cabo oxidado	Chave seccionadora tandem
8	Chapa-cabo oxidado	Chave seccionadora tandem
9	Cabo-cabo novo	Barramento de carga
10	Cabo-cabo novo	Barramento de carga
11	Cabo-cabo oxidado	Religador automático
12	Cabo-cabo oxidado	Regulador de tensão
13	Cabo-cabo oxidado	Regulador de tensão
14	Cabo-cabo oxidado	Regulador de tensão

FONTE: O Autor (2019).

A FIGURA 35 mostra que 71% das anomalias térmicas são em conectores oxidados e 29% em conectores novos.

FIGURA 35 - PERCENTUAL DE ANOMALIAS TÉRMICAS POR ESTADO DO CONECTOR



FONTE: O Autor (2019).

Esses dados do estado dos conectores apresentarem maior percentual de aquecimentos são importantes para o inspetor termográfico e para a divisão de engenharia que faz a gestão de ativos de subestações, porque são nesses estados de componentes que possuem maior frequência de defeitos térmicos que podem evoluir para uma falha elétrica.

Na coleta dos termogramas nas inspeções realizadas, foram considerados para cálculo da temperatura pelo termovisor, a distância entre o inspetor e o alvo, a umidade relativa do ar (URA), a velocidade do vento, a temperatura ambiente (Ambiente), a corrente instantânea no momento do registro do termograma, as emissividades encontradas nos ensaios em laboratório para cada tipo e estado do conector, para chegar na temperatura aparente medida de cada aquecimento, conforme TABELA 35. A temperatura aparente, não é uma temperatura medida exatamente igual a real da conexão, caso pudesse ser mensurada por um termopar de contato, e sim uma temperatura medida indiretamente pelo termovisor que sofre influências dos fatores climáticos, técnicos e humano. Nesse trabalho buscou-se mitigar os fatores de influência na medição da temperatura pela termovisão, através da determinação da emissividade dos conectores, criação de um procedimento de inspeção para capacitação dos termografistas, medição de distância, umidade do ar, velocidade do vento, temperatura ambiente e corrente elétrica nas inspeções em ambientes abertos.

TABELA 35 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TERMOGRAMAS COLETADOS NA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

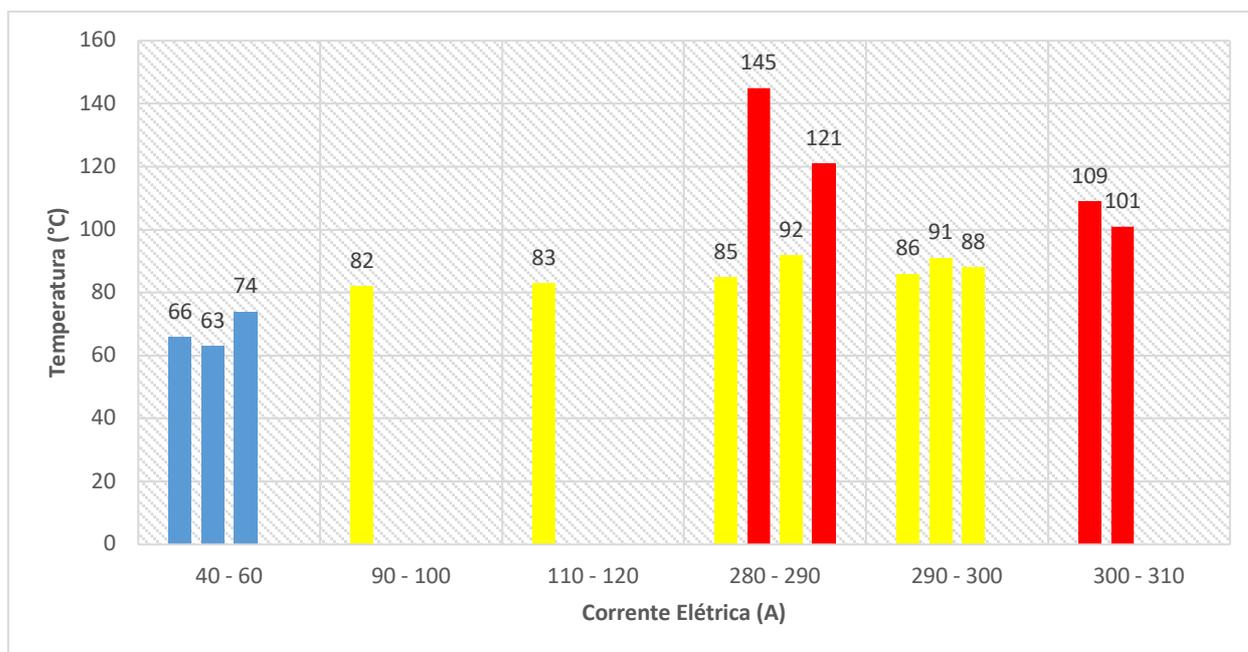
Termograma	SE	Distância (m)	URA (%)	Vento (Km/h)	Ambiente (°C)	Corrente (A)	e	Temperatura Lida (°C)
1	MIS	3,21	45	16	30	91	0,80	82
2	BAN	3,85	52	15	31	289	0,95	121
3	ARU	3,76	54	17	29	302	0,80	109
4	ARU	3,53	49	19	30	296	0,95	88
5	FLO	3,10	46	15	27	51	0,95	63
6	PTY	2,30	61	11	32	115	0,95	83

7	TAM	4,36	41	10	32	53	0,95	74
8	MCU	3,10	68	14	30	288	0,95	92
9	MCU	2,90	65	13	28	295	0,80	91
10	BAN	3,15	51	16	29	281	0,80	85
11	ARU	2,05	55	17	28	287	0,92	145
12	ARU	2,36	54	16	27	294	0,92	86
13	XAM	3,23	61	12	26	41	0,92	66
14	BAN	2,67	50	15	26	303	0,92	101

FONTE: O Autor (2019).

A FIGURA 36 mostra os níveis de temperatura em função da corrente de operação no instante da inspeção termográfica, dos 14 termogramas salvados no termovisor. A menor temperatura encontrada de 63 °C foi no ciclo de corrente entre 40 a 60 A e maior temperatura foi de 145 °C no ciclo de 280 a 290 A. O maior número de aquecimentos com as maiores temperaturas estão acima da corrente de 280 A, sendo nove anomalias térmicas das quatorze encontradas, gerando um percentual de 64%.

FIGURA 36 - VALORES DE TEMPERATURAS DOS TERMOGRAMAS EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE OPERAÇÃO



FONTE: O Autor (2019).

Para determinar a prioridade de atendimento e prazo em dias para executar a manutenção nos pontos quentes encontrados, foi utilizado o aumento de temperatura do aquecimento em relação a temperatura ambiente. As temperaturas ambientes foram usadas para determinar a elevação de temperatura (Δt em relação à temperatura ambiente) dos pontos quentes, conforme TABELA 36. A prioridade 1 nessa tabela determina o prazo de atendimento pela equipe de manutenção de no máximo 30 dias, devido ao nível elevado de temperatura que encontra-se a conexão. A prioridade 2 e 3 corresponde ao prazo de 60 e 90 dias respectivamente. Não apresentaram temperaturas na prioridade 4 de 180 dias e a prioridade 5 não foi utilizada porque não tem prazo de atendimento. Os termogramas 2, 3, 11 e 14 apresentam temperaturas acima de 93 °C, que é uma temperatura onde o cabo ligado a esse conector começa a passar pelo processo de recozimento, levando a perda da sua resistência mecânica de projeto, que pode culminar no rompimento do cabo.

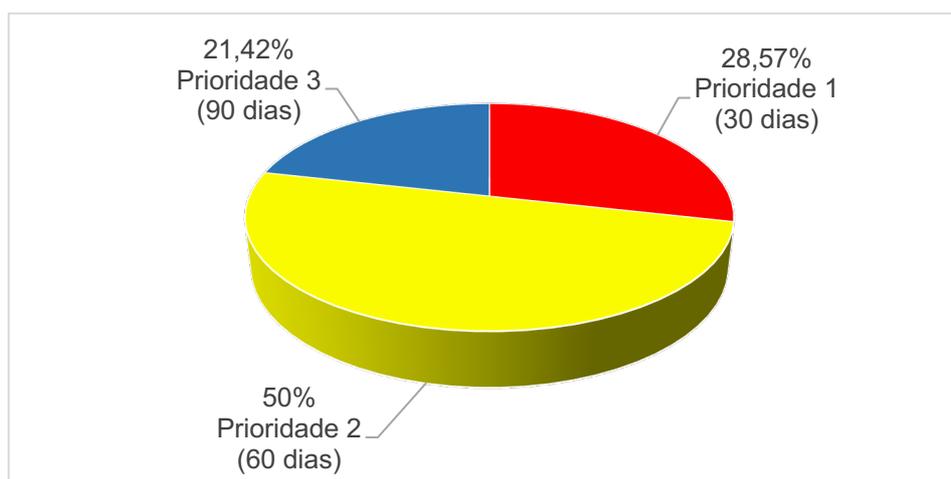
TABELA 36 - PRIORIDADE E PRAZO DE MANUTENÇÃO DOS AQUECIMENTOS

Termograma	SE	Ambiente	Aquecimento	Δt	Prioridade	Prazo (Dias)
		(°C)	(°C)	(°C)		
1	MIS	30	82	52	2	60
2	BAN	31	121	90	1	30
3	ARU	29	109	80	1	30
4	ARU	30	88	58	2	60
5	FLO	27	63	36	3	90
6	PTY	32	83	51	2	60
7	TAM	32	74	42	3	90
8	MCU	30	92	62	2	60
9	MCU	28	91	63	2	90
10	BAN	29	85	56	2	60
11	ARU	28	145	117	1	30
12	ARU	27	86	59	2	60
13	XAM	26	66	40	3	90
14	BAN	26	101	75	1	30

FONTE: O Autor (2019).

Pelo cálculo do percentual das anomalias térmicas por prioridade de atendimento, ficaram 28,57% na prioridade 1, 50% na prioridade 2 e 21,42% na prioridade 3, listados na FIGURA 37.

FIGURA 37 - PERCENTUAL DE ANOMALIAS TÉRMICAS POR PRIORIDADE DE ATENDIMENTO DA MANUTENÇÃO



FONTE: O Autor (2019).

Após a execução da manutenção nos 14 aquecimentos identificados, foram realizadas as reinspeções nesses pontos para confirmar se o defeito térmico foi sanado pela equipe de manutenção. A TABELA 37 mostra as características dos termogramas das reinspeções realizadas, onde o termograma 1 - R, corresponde a reinspeção realizada após a manutenção do termograma 1 e assim sucessivamente até o ponto quente 14, que foi nomeado como 14 - R. A maior temperatura encontrada foi de 41 °C no termograma 11 - R, com um Δt de elevação de temperatura em relação à temperatura ambiente de 9 °C. Com isso não houve após a manutenção nenhum ponto de aquecimento, porque conforme a FIGURA 16, para o menor grau de prioridade que é o número 4, tem que haver um Δt de elevação de temperatura de no mínimo 10 °C, contudo Δt maior foi de 9 °C.

TABELA 37 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TERMOGRAMAS COLETADOS NA REINSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

Termograma	SE	Distância (m)	URA (%)	Vento (Km/h)	Ambiente (°C)	Corrente (A)	e	Temperatura da Conexão °C
------------	----	---------------	---------	--------------	---------------	--------------	---	---------------------------

1 - R	MIS	3,19	55	12	28	88	0,80	36
2 - R	BAN	3,81	52	13	30	276	0,80	39
3 - R	ARU	3,79	58	14	33	300	0,80	39
4 - R	ARU	3,61	61	14	33	287	0,80	36
5 - R	FLO	3,23	62	12	28	49	0,80	31
6 - R	PTY	2,42	64	13	31	98	0,80	38
7 - R	TAM	4,29	60	11	29	52	0,80	32
8 - R	MCU	3,34	66	14	30	293	0,80	37
9 - R	MCU	2,88	66	14	28	291	0,80	30
10 - R	BAN	3,09	53	12	31	277	0,80	35
11 - R	ARU	2,24	59	16	32	291	0,80	41
12 - R	ARU	2,18	59	16	32	269	0,80	36
13 - R	XAM	3,32	58	12	27	34	0,80	29
14 - R	BAN	2,74	53	13	30	301	0,80	39

FONTE: O Autor (2019).

A TABELA 38 demonstra a descrição do reparo realizado pela equipe de manutenção em cada equipamento onde havia a anormalidade térmica. Analisando as conexões, apenas nos termogramas 1 – R e 10 – R foram realizadas limpeza na conexão e aperto com torquímetro, nas demais foram necessário a substituição do conector. Em alguns termogramas foram substituídos além do conector, mas também a chave (termograma 2 –R), o cabo (termograma 9 – R e 14 - R) e no caso mais grave a bucha do religador automático (termograma 11- R). Com essas informações da manutenção executada, é evidenciado que o nível de aquecimento que possuía esses ativos físicos de subestações em função do tempo exposto, levou a danificar de forma irreversível alguns conectores e equipamentos, em função disso que eles foram substituídos e não puderam serem reaproveitados. A emissividade usada na reinspeção foi de 0,80, devido a todos os conectores estarem em um estado de conservação considerado novo.

TABELA 38 - DESCRIÇÃO DO SERVIÇO EXECUTADO NA MANUTENÇÃO DOS TERMOGRAMAS

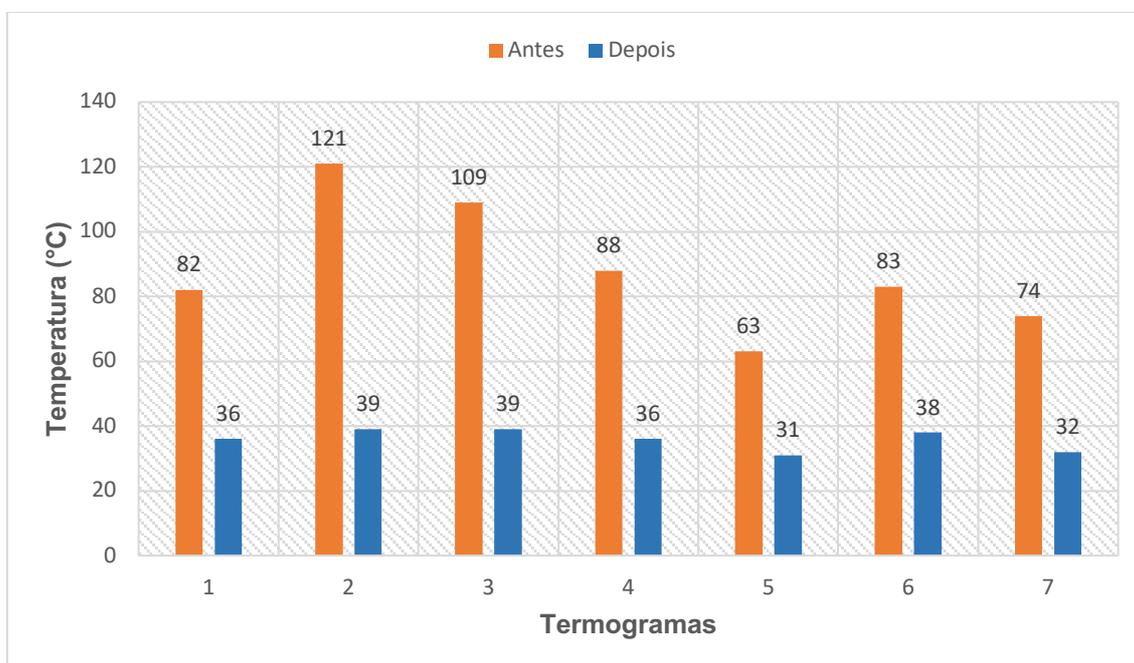
Termograma	SE	Emissividade	Descrição da Manutenção realizada
1 - R	MIS	0,80	Limpeza da conexão
2 - R	BAN	0,80	Substituição do conector e da chave
3 - R	ARU	0,80	Substituição dos conectores

4 - R	ARU	0,80	Substituição dos conectores
5 - R	FLO	0,80	Substituição do conector
6 - R	PTY	0,80	Substituição do conector
7 - R	TAM	0,80	Substituição do conector
8 - R	MCU	0,80	Substituição do conector
9 - R	MCU	0,80	Substituição do conector e do cabo
10 - R	BAN	0,80	Limpeza da conexão
11 - R	ARU	0,80	Substituição do conector e da bucha do religador
12 - R	ARU	0,80	Substituição do conector
13 - R	XAM	0,80	Substituição dos conectores
14 - R	BAN	0,80	Substituição do conector e do cabo

FONTE: O Autor (2019).

Comparando os níveis de temperaturas dos termogramas de 1 a 7, antes da manutenção e após ela, a FIGURA 38 mostra os dados, onde a maior redução de temperatura em relação a inicial foi de 82 °C no termograma 2 e a menor redução de temperatura de 32 °C no termograma 5.

FIGURA 38 - COMPARAÇÃO ENTRE OS NÍVEIS DE TEMPERATURAS ANTES E DEPOIS DA MANUTENÇÃO DOS TERMOGRAMAS DE 1 A 7

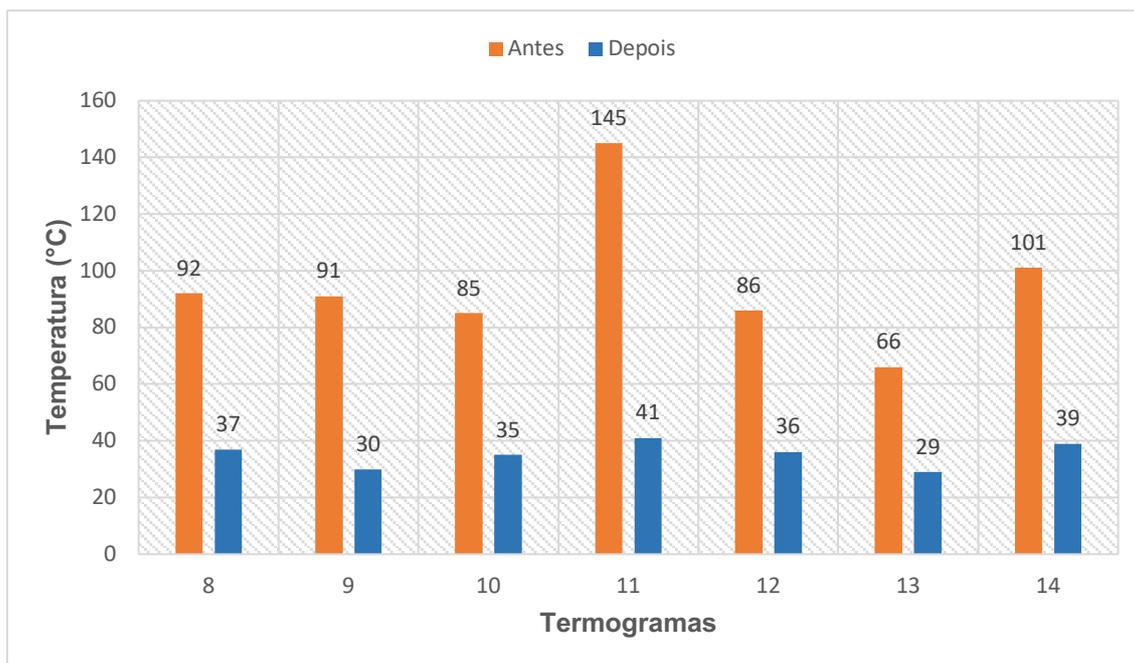


FONTE: O Autor (2019).

Analisando os termogramas de 8 a 14 através da FIGURA 39, a maior redução de temperatura de 104°C foi no termograma 11 e o menor valor de

redução de 37 °C foi no termograma 13. Através das FIGURAS 38 e 39, é evidenciado a redução do níveis de temperaturas após a manutenção nas conexões identificadas com pontos quentes, possibilitando fazer a gestão de ativos físicos de componentes de subestações de energia, através da medição de temperatura de operação.

FIGURA 39 - COMPARAÇÃO ENTRE OS NÍVEIS DE TEMPERATURAS ANTES E DEPOIS DA MANUTENÇÃO DOS TERMOGRAMAS DE 8 A 14



FONTE: O Autor (2019).

Os dados obtidos em função do procedimento de inspeção termográfica em subestações de média tensão desabrigadas foram satisfatórios para validar a eficácia do procedimento proposto nesse trabalho. A equipe com dois técnicos da COPEL Distribuição, foram capacitados pelo método desse trabalho para realizar inspeção e diagnóstico térmico nos ativos físicos selecionados.

Quatorze termogramas foram identificados com aquecimentos e após a realização da manutenção, esses pontos quentes foram sanados, não possibilitando deixar um defeito térmico evoluir para uma falha elétrica no sistema, podendo provocar desligamentos não programados no fornecimento de energia, que é prejudicial aos indicadores técnicos que monitora a frequência e tempo que os consumidores ficam sem energia e também os

índices financeiros, pelo lucro cessante que a Distribuidora deixa de faturar e as multas financeiras aplicadas pela ANEEL.

6 CONCLUSÕES

Conhecendo a COPEL Distribuição com sua área de concessão no estado do Paraná, foi identificado como ativos físicos de maior importância para os sistema elétrico de potência, as subestações de energia, onde a maior quantidade delas operam no nível de tensão de até 34,5 kV e estão instaladas na região noroeste do Estado. Através de 58 relatórios analisados de inspeções termográficas em subestações, chegou-se aos conectores elétricos que apresentam maior frequência de anomalias térmicas, sendo os tipos de conectores chapa-cabo, paralelo e cabo-cabo os que são mais encontrados em subestações. Esses dados de grande importância subsidiaram selecionar esses tipos de conectores para estudo da emissividade.

Com o experimento em laboratório nos tipos de conectores selecionados no estado novo e retirado de operação em função dos ciclos de corrente elétrica aplicados, que variaram de 50 a 300 A, foi verificado que os conectores novos possuem uma resistência menor, comparando com os retirados de operação. Através da geração de um mau contato mecânico entre as peças que compõem os conectores, houve uma maior resistência elétrica para os com mal contato comparado com os de bom contato. Esse aumento de resistência impactou diretamente no valor da temperatura medida pelo termovisor, fato verificado no conector tipo paralelo novo que obteve uma temperatura de 58 °C para o bom contato e 129 °C para o mau contato. Esse mesmo tipo de conector retirado de operação teve um aumento de temperatura maior ainda, chegando a 83 °C no bom contato e 189 °C no mau contato. O valor da corrente aplicada influenciou na temperatura, surgindo as maiores temperaturas nas maiores resistências e correntes, sendo explicado pelo efeito *Joule* que relaciona essas variáveis. Com isso os conectores retirados de

operação com mau contato e com nível de corrente de 300 A, foram os que apresentaram os casos de níveis mais elevados de temperatura medidos

Com relação ao estudo da emissividade, alterando os valores de corrente elétrica nos conectores novos e retirados de operação para encontrar a emissividade usando o termovisor, não houve uma variação significativa da emissividade, chegando no máximo a 0,03. Contudo a emissividade encontrada para os conectores novos ficou em 0,80, entretanto no conector retirado de operação do tipo chapa-cabo ficou em 0,95, no paralelo e no cabo-cabo retirado de operação em 0,92, apresentando diferenças da fornecida pelos fabricantes de conectores de 0,35, da usada pela Distribuidora de 0,85 e da recomendada por manuais de termovisores de 0,95. Essas variações de emissividades utilizadas levam a uma medição de temperatura equivocada e a um diagnóstico térmico falso, que no caso do conector chapa-cabo novo com bom contato comparando a emissividade de 0,35 e 0,85, levou a uma diferença de temperatura de 43 °C.

A partir da elaboração de um procedimento de inspeção termográfica em subestações desabrigadas, considerando a maior tendência de defeito em conectores e os fatores de influência na medição de temperatura sem contato, como as diferentes emissividades dos componentes inspecionados, as variações na corrente de carga, as mudanças nas condições ambientais, foi possível aplicá-lo na equipe não experiente e que não executava a inspeção.

Como resultados da inspeção termográfica feita em 8 subestações, foram identificados 14 aquecimentos, sendo 71% em conectores oxidados e 21% nos novos. A menor temperatura medida de 63 °C foi encontrada com a aplicação de corrente entre 40 a 60 A, a maior temperatura de 145 °C com a corrente de 280 a 300 A, demonstrando que a corrente de operação tem forte influência na elevação de temperatura. Pelo nível de temperatura de cada ponto quente, foram estabelecidos prioridades de atendimento na realização do reparo para sanar o defeito térmico, ficando 28,5% na prioridade 1 (prazo de 30 dias), 42,8 % na prioridade 2 (prazo de 60 dias) e 28,5% na prioridade 3 (prazo de 90 dias). Após a realização da manutenção nos aquecimentos em

conectores, a maior temperatura medida com a reinspeção termográfica ficou em 41°C, evidenciando que os defeitos térmicos foram corrigidos.

Por fim o procedimento proposto que capacitou os profissionais da área de manutenção a realizar inspeção termográfica, permitiu identificar anomalias térmicas no parque de ativos físicos da Distribuidora, gerando um diagnóstico térmico mais assertivo para gestão de ativos físicos, devido a conhecer os fatores de influência e a ponderá-los.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A escolha desse trabalho de elaborar um procedimento de diagnóstico térmico em conectores elétricos de subestações desabrigadas para gestão de ativos físicos, motivará os seguintes estudos futuros com a mesma linha de pesquisa:

- Mensurar o nível de degradação dos conectores elétricos retirados de operação, através de estudos químicos.
- Determinar através de experimentos a emissividade de conectores elétricos utilizados em subestações de energia com nível de tensão de 138 kV.
- Montar um experimento em ambiente aberto para analisar as influências dos fatores climáticos como a velocidade do vento, a umidade relativa do ar, a distância entre o termovisor e objeto sob inspeção, a chuva e a radiação solar, na alteração da emissividade, da resistência elétrica e do nível de temperatura em conectores elétricos de subestação.
- Realizar um estudo por meio da aplicação de ciclos térmicos, aquecendo e resfriando os componentes da subestação, para avaliar o tempo que existe de um defeito evoluir para uma falha elétrica e suas consequências técnicas e financeira para a Distribuidora de energia.

REFERÊNCIAS

ABENDI, Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção; **NA-009 - Qualificação e Certificação de pessoas em termografia**. <http://www.abende.org.br>, visualizado em 08/2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15424, Ensaio Não Destrutivos – Termografia – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas; **“ABNT NBR 15572:2012 - Ensaio não destrutivo - Termografia por infravermelho - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos”**; abril/2012.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS IEC/TR 60643 **Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals**. 2009.

ANEEL 2018: Agência Nacional de Energia Elétrica. **“Contratos de Concessão”**, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/contratos1>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

AKISHINO, J. K. **Desenvolvimento e Avaliação de Sensor Termossensível para Detecção de Aquecimento de Conectores Elétricos**. Curitiba. p. 20. Dissertação de Mestrado 2014. Universidade Federal do Paraná.

ANSI C119.4 **American National Standard for Electric Connectors - Testing Methods and Equipment Common to the ANSI C119 Family of Standards 2011**.

ASNT, The American Society for Nondestructive Testing; **“Recommended Practice N° SNT-TC-1A”**; ASNT 2016 Edition.

BORTONI, E. C.; DOS SANTOS, L. Development of models to extract ambient variables influence from outdoor thermographic inspections. **International Conference on Quantitative InfraRed Thermography**. July. 2010.

BORTONI, E. C.; DOS SANTOS, L.; BASTOS, G. S. Extracting Load Current Influence From Infrared Thermal Inspections. **IEEE Transactions on Power Delivery**. v. 26, n. 2, April. 2011.

BURNDY; **“Connectors for Substation, Distribution and Industrial Applications”**, Framatome Connections International, 1995.

CAPELLI, F.; RIBA, J.R.; GONZALEZ, D. Thermal Behavior of Energy-Efficient Substation Connectors. **IEEE Compatibility, Power Electronics and Power Engineering**. July. 2016.

CHRZANOWSKI, K.; “**Non-Contact Thermometry - Measurement errors**”, SPIE PL, Research and development Treaties, Vol. 7, Warsaw, 2001.

COPEL. **Subestações de Energia**, 2012. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/normas>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

COPEL Transmissão. **Procedimento para Inspeções Termográficas em Subestações e Equipamentos de Transmissão**. ITP 0937042-01. Setembro de 2012.

DOS SANTOS, L. et al. Infrared thermography applied for outdoor power substations. **Proceedings of the SPIE**, 6939, 2008.

DOS SANTOS, L. **Termografia Infravermelha em Subestação de Alta Tensão Desabrigadas**. Itajubá. 68 p. Dissertação de Mestrado 2006. Universidade Federal de Itajubá.

DOS SANTOS, L.; BORTONI, E. C.; BARBOSA, L. C.; ARAUJO, R. A. Centralized vs. decentralized thermal IR inspection policy: Experience from a major Brazilian electric power company. **Proc. SPIE 5782, Thermosense XXVIII**. March. 2005.

DOS SANTOS, L. **Classificação e Modelagem de Fatores de Influências Sobre Inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados**. Itajubá. Tese de Doutorado 2012. Universidade Federal de Itajubá.

EPPERLY, R.A.; HEBERTEIN, G.E.; EADS, L.G.; “**A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography**”; IEEE IAS 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Sept. 1997, pág. 59 a 68.

FERREIRA, U. M.; FORTES, M. Z.; DIAS, B. H. Thermography as a Tool in Electric Panels Maintenance. **IEEE Latin América Transactions**. v. 13, n. 9, p. 3005 – 3009, Sept. 2015

FLUKE. **Introdução aos princípios da termografia**. USA: American Technical Publishers Inc., 2009.

GASPERIC, S; SPRAJCAR, B; BERNARD, R; GLAVIC, R. The Analysis of Thermographic Reports With Emphasis on Emissivity Coefficient Determination of Bare Conductors and Joints. **International Conference on Electricity Distribution**. May. 2007.

GAUSSORGUES, G.; “**Infrared Thermography**”; Microwave Technology Series 5; Chapman & Hall, 1994.

HALLIDAY, D.; RESNICK, J. W. **Fundamentos da Física volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 2010. 300p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2002. 680 p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; Lavine, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 644 p.

INCROPERA, Frank P.; Bergman, Theodore L.; Lavine, Adrienne S.; DeWitt, David P.; "Fundamentals of Heat and Mass Transfer"; John Wiley & Sons, 2011.

ISO, The International Organization for Standardization; "**ISO 9712, Non-Destructive Testing – Qualification and Certification of Personnel**"; Edition 2012.

JADIN, M. S.; TAIB, S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. **Infrared Physics & Technology**. v. 55, n. 4, p. 236-345. July 2012.

Kaplan, H.; "**Infrared spectral bands - The Importance of Color in the Infrared**"; Inframation, 2000.

LITWA, M. Influence of Angle of View on Temperature Measurements Using Thermovision Camera. **IEEE Sensor Journal**. v. 10, n. 10, Oct. 2010.

MUNIZ, P. R.; MAGALHÃES, R. S.; CANI, S. P. N.; DONADEL, C. B. D. **Non-contact measurement of angle of view between the inspected surface and the thermal imager**. *Infrared Physics & Technology*. v. 72. p. 77-83, Sept. 2015.

NETO, E. T. W.; COSTA, E. G.; MAIA, M. J. A. Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging. **IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America**, 2006. 1-4.

NUNAK, N.; ROONPRASANG, K.; SUESUT, T.; NUNAK, T. Emissivity Estimation Using Thermographic Camera. **Advanced Materials Research**. v. 811, p. 380-387, Sept. 2013.

NR 10, Norma Regulamentadora N° 10; "**Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**", D.O.U de 08/12/2004 – Seção I.

OIML R141, O. I. D. M. L. **Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments**. [S.l: s.n.], 2008.

OZISICK, M. **Heat Transfer - A basic approach**. Raleigh: MCGraw-Hill, 1985.

PELIZZARI, E. et al. **Aplicações da termografia como ferramenta de manutenção preditiva em conectores elétricos**. CBECimat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR: [s.n.]. 2006. p. 6315-6325.

Quites, Eduardo E. C.; Lia, Luiz R. B.; “**Introdução à Transferência de Calor**”; Unisanta, 2005.

Rogalski, A; Chrzanowski; “**Infrared Devices and Techniques**”; Opto-Electronics Rev.10, n° 2, 2002.

SHEPARD, S. M.; HOU, J.; LHOTA, J. R.; GOLDEN, J. M. Automated Processing of Thermographic Derivatives for Quality Assurance. **Optical Engineering**, v. 46, n. 5, p. 051008–051008, maio 2007. ISSN 0091-3286.

SZABÓ, D.; GÖCSEI, G.; NÉMETH, B.; MAGYAR, B.; MIKLÓS, A. Inspection of conductor connectors in the medium voltage grid. **IEEE Electrical Insulation Conference**. June. 2017.

TEIXEIRA, G. G. D. **Confiabilidade Metrológica em Termografia Aplicada em Sistemas Elétricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UFMG, Belo Horizonte, BRA, fev. 2012.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Engenheiros e Cientistas. Volume 1: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**. 6ª ed. Rio Grande do Sul. LTC. 2016. 755p.

URSINE, W.A.M. **Monitoramento Autônomo de Para-Raios de ZnO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFMG, Belo Horizonte, 2013.

WANG, X.; ETHA, P.; KARADY, G.G.; DYER, M. Experimental Evaluation of Thermal Capability of Integrated T-body Connectors. **IEEE Transmission & Distribution Construction, Operation & Live-Line Maintenance**. September. 2016.

YIJIE, Y. Effect of substation infrared temperature measurement results of factors and solving methods. **IEEE China International Conference on Electricity Distribution**. Sept. 2012.

**APÊNDICE 1 – PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM
SUBESTAÇÕES DESABRIGADAS**

SUPERINTENDÊNCIA DE ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO
DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO DE SUBESTAÇÕES
DIVISÃO NORORESTE DE MANUTENÇÃO

MIT – MANUAL DE INSTRUÇÃO TÉCNICA

INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM CONEXÕES DE SUBESTAÇÃO

2019

MANUAL DE INSTRUÇÃO TÉCNICA - MIT**TÍTULO: INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM CONEXÕES DE SUBESTAÇÃO**

MIT Nº 01

VERSÃO: 2019

Folha: 2/10

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. OBJETIVO	3
3. APLICAÇÃO.....	3
4. INSPETOR TERMOGRAFISTA	3
5. INSTRUMENTOS NECESSÁRIOS.....	4
6. LIMITAÇÕES DA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA.....	4
7. PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO.....	5
8. DEFINIÇÕES ADOTADAS.....	7
8.1 Atenuação Atmosférica.....	7
8.2 Anomalia Térmica.....	7
8.3 Corpo Negro.....	7
8.4 Emissividade.....	7
8.5 Foco Térmico.....	8
8.6 Inspeção Termográfica.....	8
8.7 Inspeção Qualitativa.....	8
8.8 Inspeção Quantitativa.....	8
8.9 Temperatura Aparente.....	8
8.10 Termovisor.....	8
8.11 Termograma.....	9
9. REFERÊNCIAS.....	9



MANUAL DE INSTRUÇÃO TÉCNICA – MIT

TÍTULO: INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM CONEXÕES DE SUBESTAÇÃO

MIT Nº 01

VERSÃO: 2019

Folha: 3/10

1. INTRODUÇÃO

A inspeção termográfica é uma técnica de inspeção não destrutiva que permite a medição de temperatura a partir da intensidade de radiação infravermelha emitida pelos corpos. Ela proporciona um diagnóstico rápido e eficaz para a detecção de aquecimentos em equipamentos elétricos, otimizando prazos e evitando que defeitos evoluam para uma falha, sendo portanto, uma ferramenta de técnica preditiva de grande importância.

2. OBJETIVO

Este MIT foi elaborado para estabelecer um procedimento na realização da inspeção termográfica em conexões elétricas, buscando um diagnóstico térmico em conectores e gestão de ativos físicos de subestações.

3. APLICAÇÃO

O presente manual aplica-se aos conectores de alumínio tipo chapa-cabo, paralelo e tubo-cabo que estão instalados em grande número em subestações desabrigadas de energia com nível de tensão até 34,5 kV.

4. INSPETOR TERMOGRAFISTA

É o profissional treinado e capacitado com o curso NR 10 SEP (Norma Regulamentadora nº 10 do Sistema Elétrico de Potência) e as

informações contidas nesse MIT, para inspecionar os equipamentos elétricos em operação de subestações com segurança e qualidade.

MANUAL DE INSTRUÇÃO TÉCNICA - MIT

TÍTULO: INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM CONEXÕES DE SUBESTAÇÃO

MIT Nº 01

VERSÃO: 2019

Folha: 4/10

5. INSTRUMENTOS NECESSÁRIOS

- a) Termovisor
- b) Trena a *laser*
- c) Termohigrômetro
- d) Anemômetro

Observação: Os instrumentos devem estarem calibrados, com periodicidade bienal (2 anos).

6. LIMITAÇÕES DA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

O ensaio termográfico está sujeito a variáveis que podem interferir na precisão das medições, como as diferentes emissividades dos componentes inspecionados, as variações na corrente de carga, a velocidade do vento, as mudanças nas condições ambientais. Para mitigar as influências na termografia quantitativa, seguem as orientações abaixo:

- Utilizar a emissividade conforme o estado da conexão, TABELA 1 (nova e oxidada).
- Não realizar inspeções sob sol intenso, com preferência no período da manhã, quando a influência do carregamento do sol é baixa e final da tarde, onde os reflexos solares são menores.
- Evitar inspeções com velocidade do vento acima de 20 km/h.
- Não inspecionar com umidade relativa do ar acima de 90%.

- Após a chuva, aguardar 1 hora para estabilização térmica.
- Não exceder um ângulo acima de 60° entre o termovisor e o objeto inspecionado, buscando a posição mais perpendicular possível, para não reduzir da emissividade.

MANUAL DE INSTRUÇÃO TÉCNICA – MIT

TÍTULO: INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM CONEXÕES DE SUBESTAÇÃO

MIT Nº 01

VERSÃO: 2019

Folha: 5/10

- Não realizar inspeções com corrente de carga menor do que 50% da corrente máxima do circuito ou da média dos últimos três meses.

TABELA 1 – EMISSIVIDADES DE CONECTORES NOVOS E RETIRADOS DE OPERAÇÃO PARA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA QUANTITATIVA

ESTADO	TIPO	EMISSIVIDADE
Novo	Chapa-cabo	0,80
	Paralelo	0,80
	Cabo-cabo	0,80
Retirado de operação	Chapa-cabo	0,95
	Paralelo	0,92
	Cabo-cabo	0,92

FONTE: O Autor (2019).

7. PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO

Com os equipamentos necessários, observando as normas de segurança e considerando as orientações, os inspetores realizarão a inspeção nas subestações desabrigadas seguindo as etapas mencionadas a seguir:

- I. Começar inspecionando as subestações que tenham maior probabilidade de defeitos térmicos em conexões, considerando as

datas mais antigas de início de operação e as últimas manutenções e inspeções realizadas.

- II. Munir-se dos materiais necessários.
- III. Ao chegar na subestação cumprir as normas de segurança.

MANUAL DE INSTRUÇÃO TÉCNICA – MIT

TÍTULO: INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM CONEXÕES DE SUBESTAÇÃO

MIT Nº 01

VERSÃO: 2019

Folha: 6/10

- IV. Ajustar os parâmetros do termovisor conforme manual do fabricante para obter a melhor imagem térmica.
- V. Executar a inspeção panorâmica na subestação, inspecionando de 3 a 6 metros de distância dos componentes, circulando nos quatro lados do perímetro da subestação (termografia qualitativa).
- VI. Ao localizar uma anomalia térmica, aproximar-se o máximo possível, ajustando no termovisor a sua faixa de temperatura em função da temperatura do alvo, o foco, a distância, a temperatura ambiente e a emissividade por tipo e estado da conexão (termografia quantitativa).
- VII. Registrar a imagem térmica no termovisor.
- VIII. Registrar a corrente máxima e carregamento do circuito consultando o programa da subestação.
- IX. Anotar informações do nome da subestação, o local de instalação, o número do termograma registrado, o tipo de conexão, a fase, o horário, a data, a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento.
Repetir os passos de V a IX até identificar todas as anomalias térmicas na subestação.
- X. Preencher o relatório com os termogramas identificados com os aquecimentos e determinar a gravidade e prazo de atendimento,

baseado na FIGURA 1.

- XI. Realizar reinspeções dos pontos quentes mantidos e se houver permanência do aquecimento, enviar novamente o relatório até sanar o defeito térmico pela equipe de manutenção.

MANUAL DE INSTRUÇÃO TÉCNICA – MIT

TÍTULO: INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM CONEXÕES DE SUBESTAÇÃO

MIT Nº 01

VERSÃO: 2019

Folha: 7/10

FIGURA 1 – MÁXIMA TEMPERATURA ADMISSÍVEL EM CONEXÕES ELÉTRICAS

Classificação da Gravidade/Critério	Descrição do Atendimento	Δt °C Conexões (ambiente)	Prazos (Dias)
Prioridade 1	O mais breve possível, inclusive com desligamento imediato para casos que ofereçam riscos às pessoas, ao sistema elétrico ou ao(s) equipamento(s).	> 65	0
Prioridade 2	Atendimento programado dentro dos prazos legais para solicitação de desligamentos, priorizando as intervenções das anomalias de acordo com as características das conexões, materiais ou equipamentos envolvidos, com as condições operativas do sistema e com a importância do circuito.	50 a 65	90
Prioridade 3		30 a 50	
Prioridade 4	Acompanhamento da evolução e atendimento, se necessário, por aproveitamento de outras programações ou desligamentos ou de acordo com a disponibilidade da equipe de manutenção.	10 a 30	180
Prioridade 5	Condição normal de operação para conexões ou sob análise/investigação em casos especiais.	< 10	∞

FONTE: O Autor (2019).

8. DEFINIÇÕES ADOTADAS

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 15424 com a primeira edição em 30.10.2006, foram adotadas as terminologias abaixo:

8.1. Atenuação atmosférica

Perda resultante da propagação da radiação infravermelha pelo meio atmosférico.

8.2. Anomalia Térmica

Também chamada de ponto quente e aquecimento, sendo qualquer indicação de temperatura que se desvie do esperado.

8.3. Corpo Negro

Corpo capaz de absorver e emitir toda a radiação nele

incidente. Valor de emissividade igual a 1.

8.4. Emissividade

Parâmetro adimensional de 0 a 1, que estabelece a relação entre a quantidade de energia irradiada por um corpo sob inspeção e a que seria emitida por um corpo negro.

MANUAL DE INSTRUÇÃO TÉCNICA - MIT

TÍTULO: INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM CONEXÕES DE SUBESTAÇÃO

MIT Nº 01

VERSÃO: 2019

Folha: 8/10

8.5. Foco térmico

Intervalo de temperaturas selecionado para evidenciar uma característica específica do termograma

8.6. Inspeção termográfica

Técnica de inspeção não destrutiva, utilizando um termovisor para medição de temperaturas de equipamentos em operação, visando verificar a condição térmica dos componentes sob inspeção.

8.7. Inspeção qualitativa

Tipo de inspeção que busca analisar padrões térmicos comparativos entre equipamentos com as mesmas características.

8.8. Inspeção quantitativa

Tipo de inspeção que o termografista determina o nível específico de temperatura, ponderando a influências envolvidas no processo.

8.9. Temperatura aparente

Temperatura de um corpo medida pelo termovisor, antes das ponderações das influências envolvidas no processo.

8.10. Termovisor

Instrumento de medição à distância destinado a detectar a radiação térmica e convertê-la em sinais eletrônicos, que após processados, permitem a formação de imagens térmicas.

MANUAL DE INSTRUÇÃO TÉCNICA - MIT

TÍTULO: INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA EM CONEXÕES DE SUBESTAÇÃO

MIT Nº 01

VERSÃO: 2019

Folha: 9/10

8.11. Termograma

Imagem com mapa térmico do componente sob inspeção, obtida através da radiação térmica naturalmente emitida pelos corpos.

9. REFERÊNCIAS

ABENDI, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção; **NA-009 - Qualificação e Certificação de pessoas em termografia.** <http://www.abende.org.br>, visualizado em 08/2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15424, Ensaios Não Destrutivos – Termografia – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2006.

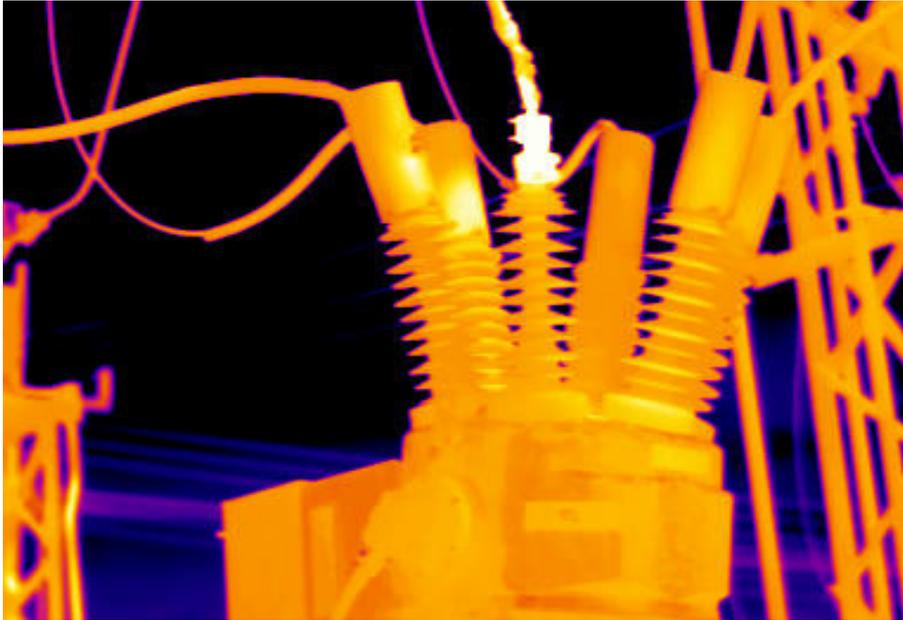
ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas; “**ABNT NBR 15572:2012 - Ensaios não destrutivos - Termografia por infravermelho - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos**”; abril/2012.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS IEC/TR 60643 **Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals.** 2009.

NR 10, Norma Regulamentadora N° 10; “**Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**”, D.O.U de 08/12/2004 – Seção I.

SZABÓ, D.; GÖCSEI, G.; NÉMETH, B.; MAGYAR, B.; MIKLÓS, A. Inspection of conductor connectors in the medium voltage grid. **IEEE Electrical Insulation Conference**. June. 2017.

YIJIE, Y. Effect of substation infrared temperature measurement results of factors and solving methods. **IEEE China International Conference on Electricity Distribution**. Sept. 2012.

RELATÓRIO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA						Folha: 10/10
Relatório	01	Data:	04/10/2018	Inspetor:	Anderson	
Subestação	Araruna	Circuito/Alimentador		Pinduca		
Conector	Cabo-cabo	Estado	Oxidado	Fase	C	
Equipamento		Religador automático				
Termograma	11	Aquecimento		145°C	Δt	117°C
Prazo de atendimento		30 dias	Prioridade	1		
Ambiente	28°C	Umidade	55 %	Vento	17 km/h	
Distância	2,05 m	Emissiv.	0,92	Corrente	287 A	
Observações		Realizar a manutenção o mais breve possível em função da alta temperatura medida				
Termograma 11						
						

Executantes	Equipe LM 337	Data da manutenção	10/10/2018
Ordem de serviço	1152129		
Serviço executado	Substituição do conector e da bucha do religador		
Data reinspeção	18/10/2018	Ponto Sanado	Sim
Termograma	11 - R	Temperatura	41°C
		Δt	9°C

APÊNDICE 2 – TERMOGRAMAS DOS AQUECIMENTOS IDENTIFICADOS NA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

FIGURA 1 – TERMOGRAMA 1 - SUBESTAÇÃO MARILUZ (MIS)

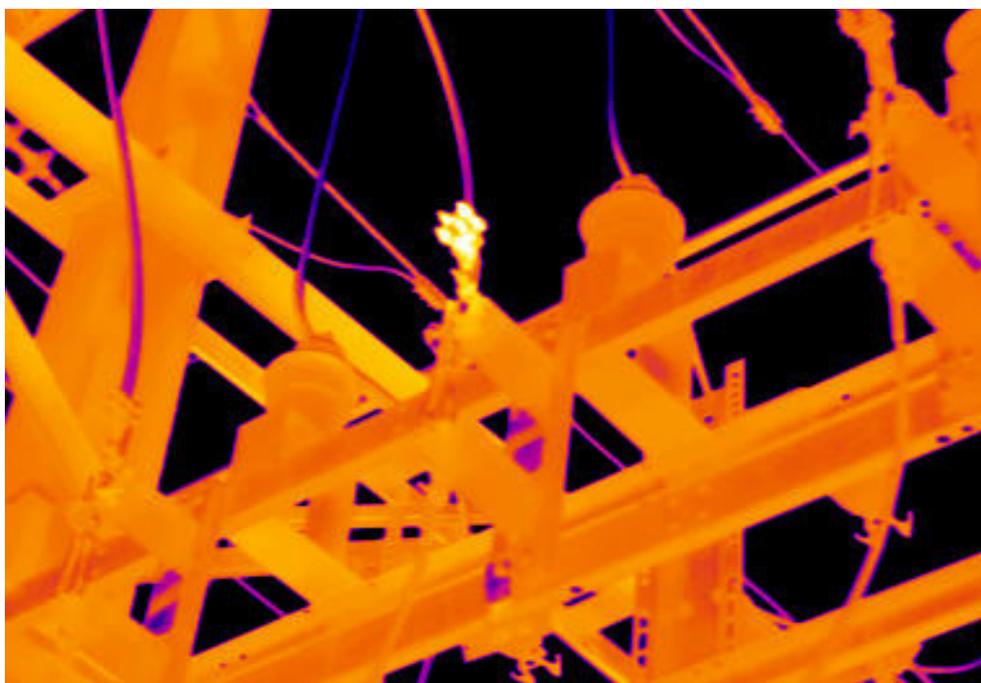


FIGURA 2 – TERMOGRAMA 2 - SUBESTAÇÃO BANDEIRA (BAN)

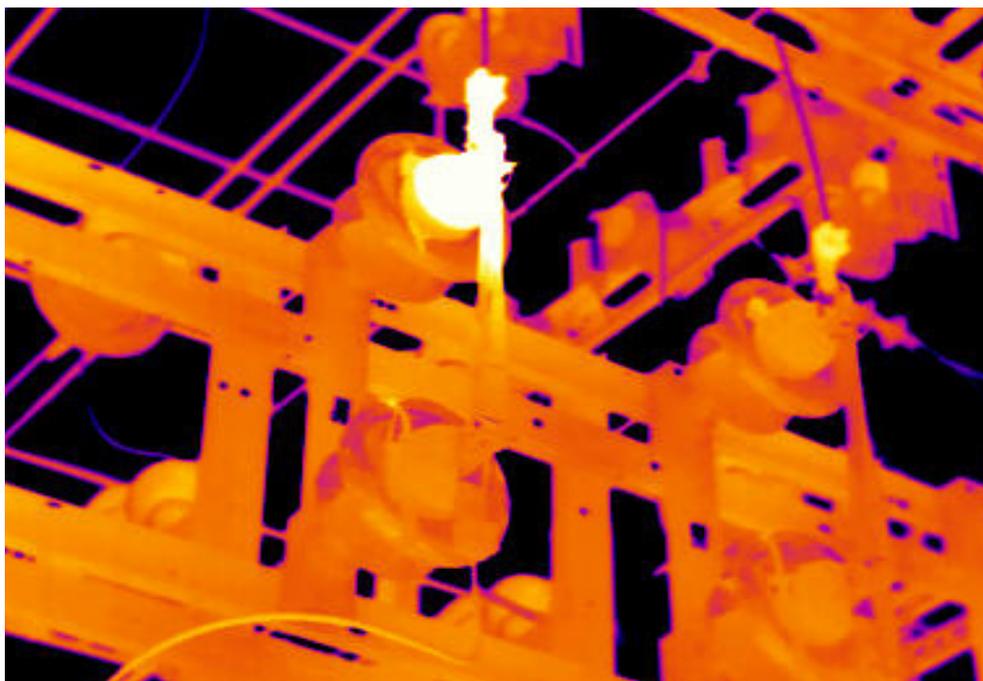


FIGURA 3 – TERMOGRAMA 3 – SUBESTAÇÃO ARARUNA (ARU)

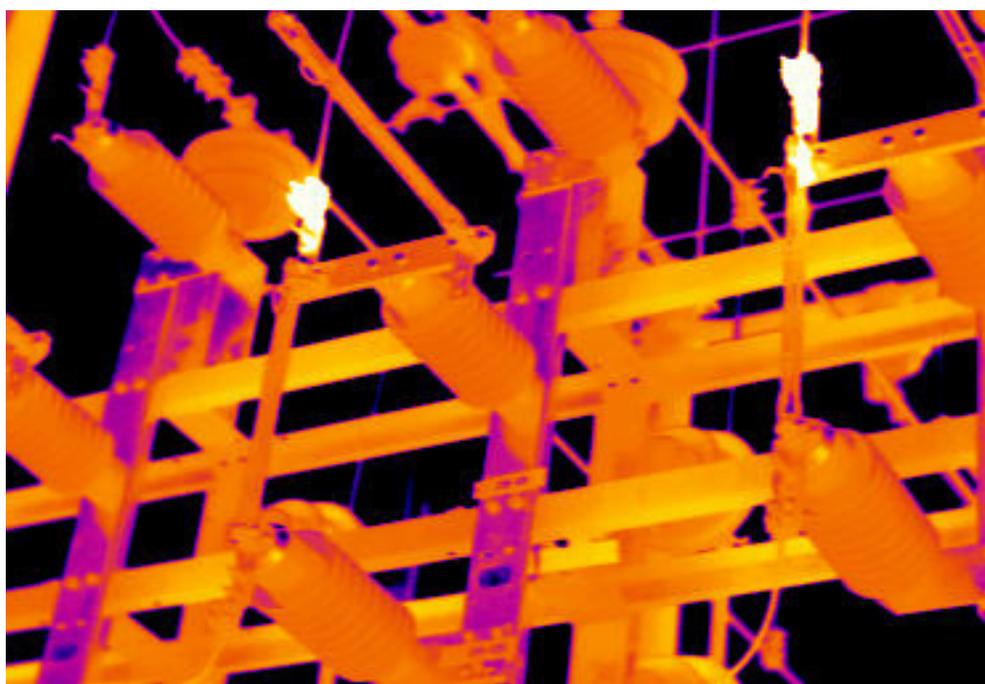


FIGURA 4 – TERMOGRAMA 4 - SUBESTAÇÃO ARARUNA (ARU)

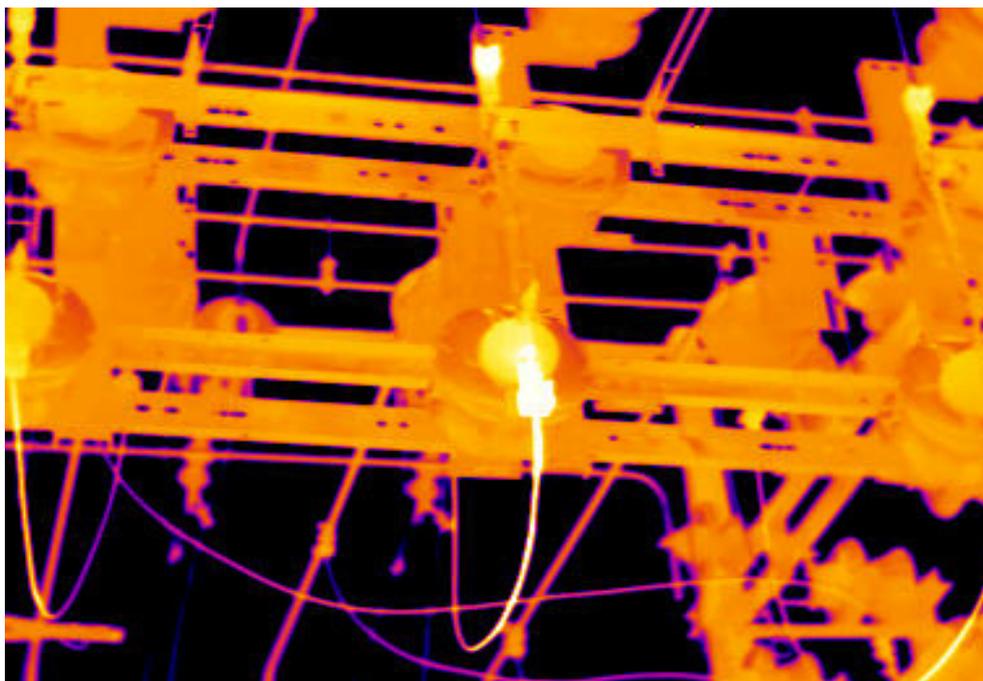


FIGURA 5 – TERMOGRAMA 5 – SUBESTAÇÃO FLORIANO (FLO)

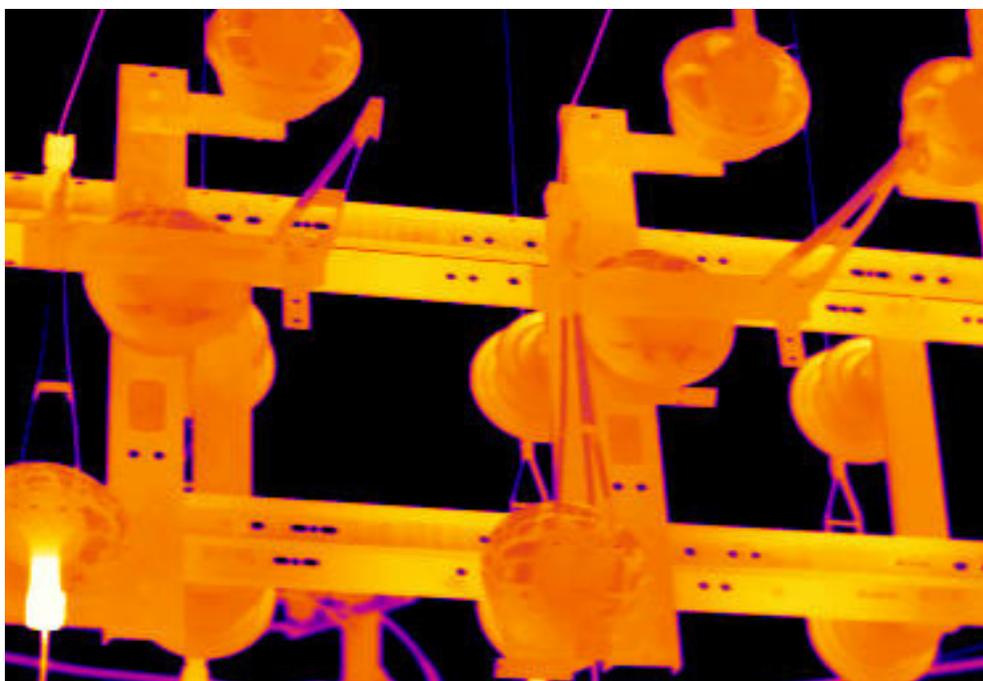


FIGURA 6 – TERMOGRAMA 6 - SUBESTAÇÃO PARANACITY (PTY)

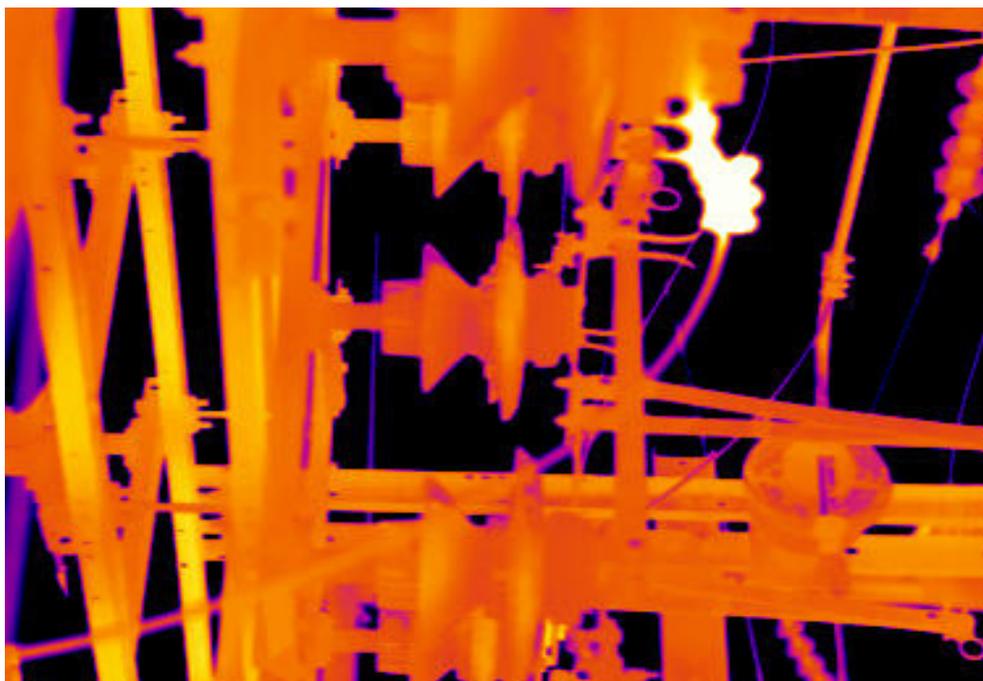


FIGURA 7 – TERMOGRAMA 7 – SUBESTAÇÃO TAMBOARA (TAM)

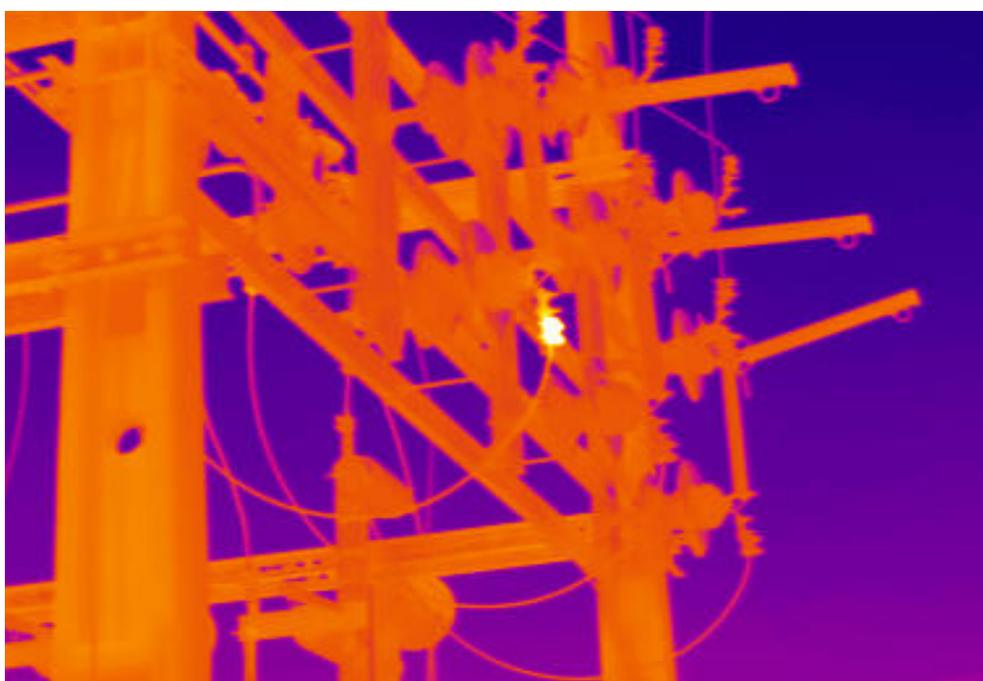


FIGURA 8 – TERMOGRAMA 8 - SUBESTAÇÃO MANDAGUAÇU (MCU)

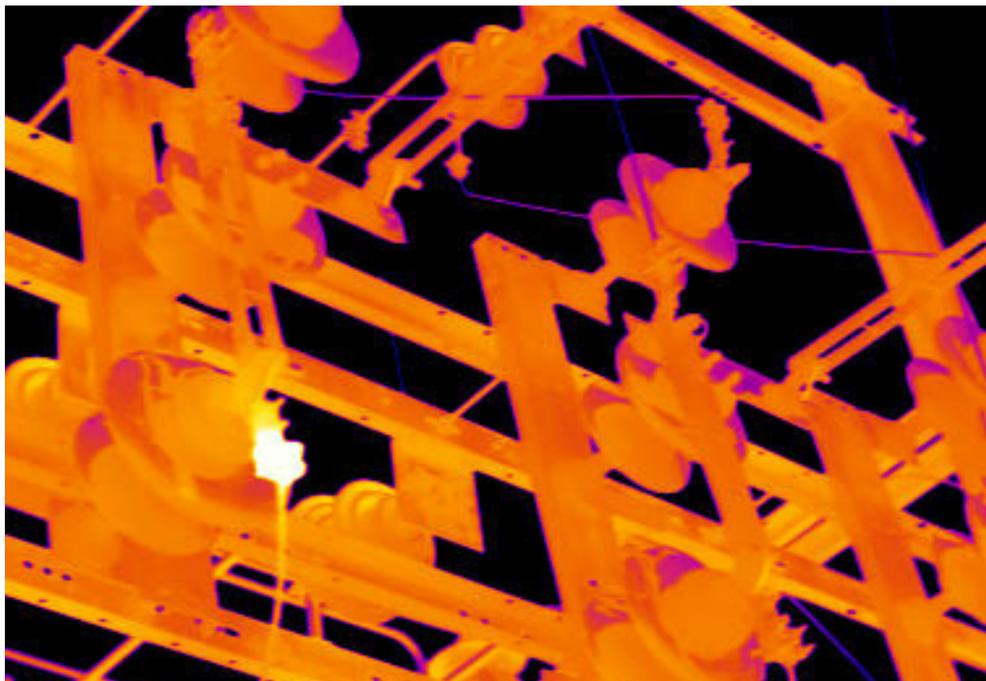


FIGURA 9 – TERMOGRAMA 9 – SUBESTAÇÃO MANDAGUAÇU (MCU)



FIGURA 10 – TERMOGRAMA 10 - SUBESTAÇÃO BANDEIRA (BAN)

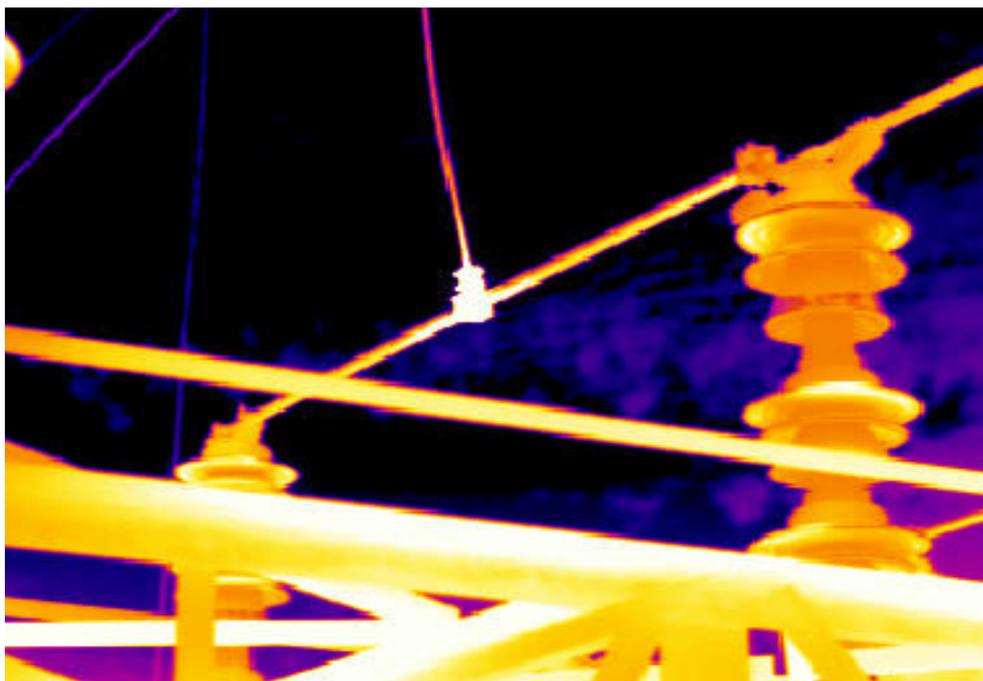


FIGURA 11 – TERMOGRAMA 11 – SUBESTAÇÃO ARARUNA (ARU)

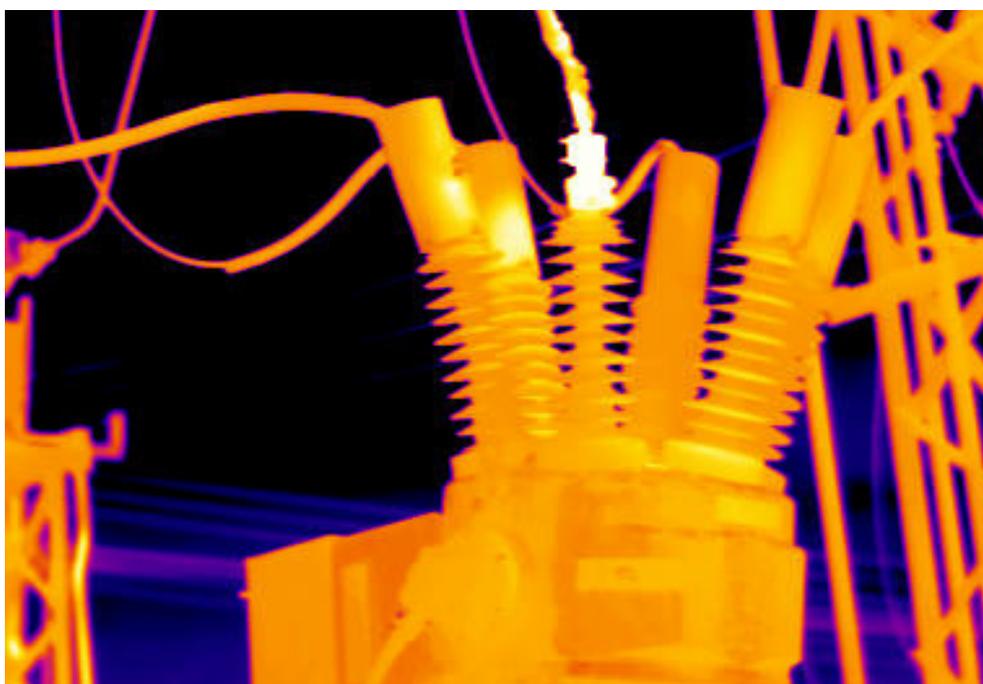


FIGURA 12 – TERMOGRAMA 12 - SUBESTAÇÃO ARARUNA (ARU)

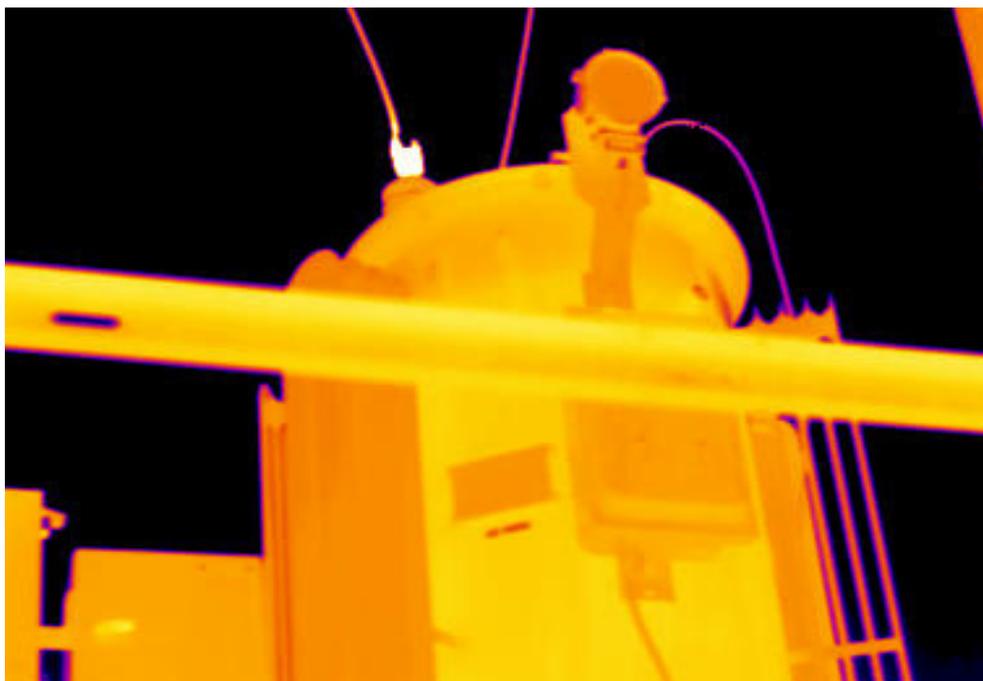


FIGURA 13 – TERMOGRAMA 13 – SUBESTAÇÃO XAMBRÊ (XAM)

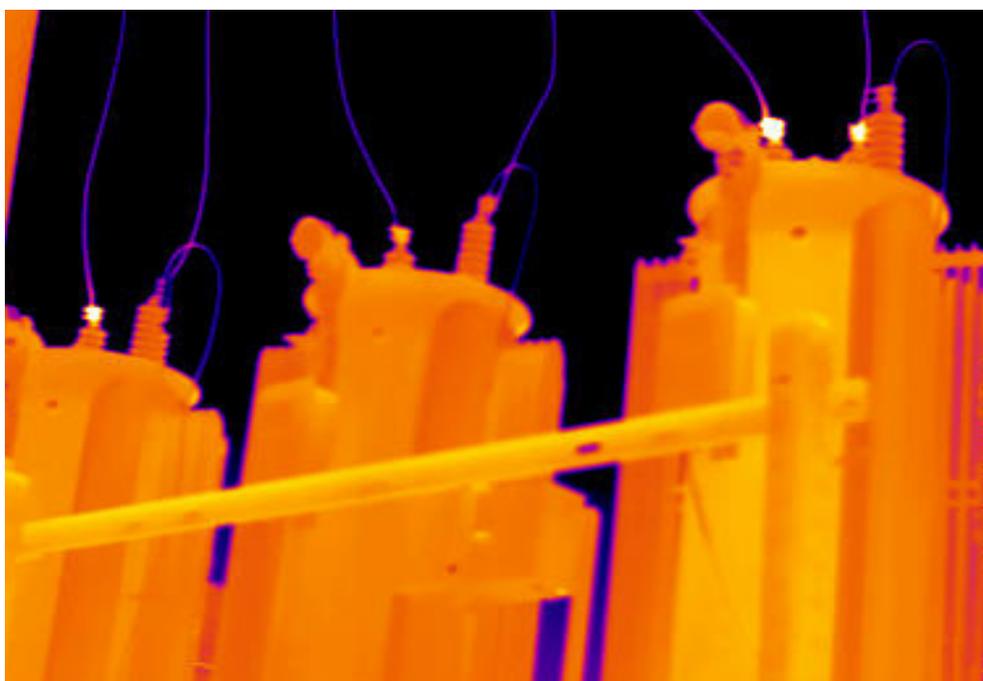


FIGURA 14 – TERMOGRAMA 14 - SUBESTAÇÃO ARARUNA (ARU)

