

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Análise de Equipamentos por Termografia Infravermelha

Alison Candido da Silva

Campina Grande - PB

Maio de 2021

Alison Candido da Silva

Análise de Equipamentos por Termografia Infravermelha

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Área de Concentração: Eletrotécnica

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI

Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica - CGEE

Adolfo Fernandes Herbster, D.Sc.

(Orientador)

Campina Grande - PB

Maio de 2021

Alison Candido da Silva

Análise de Equipamentos por Termografia Infravermelha

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em ____ / ____ / ____

Ronimack Trajano de Souza
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Adolfo Fernandes Herbster
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Campina Grande - PB
Maio de 2021

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Edilene e Antônio, e à minha irmã, Adriana, que sempre lutaram para que eu tivesse um futuro digno, e a todos os meus estimados amigos pela paciência e companheirismo ao longo de toda essa jornada.

Agradecimentos

Primeiramente, aos meus pais, Edilene e Antônio, que sempre fizeram de tudo para que nada me faltasse e que diversas vezes precisaram se desdobrar para que eu pudesse seguir meu sonho de ser o primeiro da família a ter uma formação superior. Certamente não são vocês que precisam se orgulhar de mim, mas eu que me orgulho de vocês diariamente, principalmente você, minha mãe, que é uma mulher tão forte e resiliente e que luta por tudo que pode alcançar pra nós com unhas e dentes.

A todos da minha família que sempre estiveram ao meu lado. Minha irmã, Adriana, que por muitas vezes parou tudo de sua vida para me ajudar e dar suporte na minha jornada, lutando, sofrendo e comemorando comigo, e ao meu irmão, Lucas, que sem dúvidas nenhuma me fez ser mais forte, empático e responsável.

Aos meus amigos e colegas de curso que várias vezes me ajudaram de uma forma ou de outra. Meus amigos mais antigos, Valty e Thales, que já me viram passar por tantas fases e que me apoiaram em tantos momentos. A meus amigos de turma, que foram meu primeiro contato no curso e que estão até hoje me ajudando (Camila Pereira, Elias, Bruno, M^a Priscilla, Wislayne, Larissa Lima, Vanessa e Wemerson). Aos colegas que encontrei pelo caminho e foram essenciais para um grande crescimento e enriquecimento, seja no Ramo Estudantil ou nas disciplinas (Guerra, Isabel, Marianne, Larissa Almeida, Iago, Sara, Isys, Mateus, Hitalo, Lara e Márcia). Ao melhor Rolê Aleatório possível, que não é só um rolê, são pessoas que eu sei que posso contar a qualquer momento e em qualquer situação, são pessoas leais, que me entendem e que me alegram (Elias, Camila Caroline, Bruno, Samuel Medeiros, Monaliza, Samuel Melo, Alex, Thalís, Matheus, Ulisses e Marina). Por fim, e em especial, gostaria de agradecer profundamente a meus dois amigos que estiveram presentes em tantos momentos incríveis, que me levantaram, que lutaram várias pequenas batalhas ao meu lado, que falam comigo quase todos os dias há mais de 6 anos, que entendem meu jeito e me fazem rir espontaneamente em todos esses dias, Marília e Weverton.

Àqueles que me auxiliaram neste trabalho de uma, Guilherme e Elias, mas em especial a Binho, um colega de estágio que nessa reta final foi essencial e eu não teria conseguido a tempo sem a sua ajuda.

Ao Professor Adolfo Fernandes Herbster, pela orientação deste Trabalho de Conclusão de Curso, por toda paciência, por ter me dado o apoio necessário, sanado minhas dúvidas, ter se disponibilizado para me ajudar qualquer que fosse minha decisão e por ter sido meu orientador desde que pensei em fazer estágio no início do ano passado.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Há um excesso de cores e
de formas pelo mundo.
E tudo vibra pulsátil,
fremindo.”*

Caio Fernando Abreu

Resumo

O presente trabalho tem como propósito apresentar a análise termográfica de equipamentos industriais por meio de técnicas presentes na literatura. Será estudada a importância da termografia infravermelha, assim como a câmera e uma breve introdução às ondas no espectro eletromagnético. Posteriormente entenderemos como interpretar uma imagem térmica, analisando dados da câmera e a imagem gerada por ela, e também algumas técnicas de análise de imagens térmicas, exemplificando as principais formadoras de padrão e mostrando formas de reconhecê-las. Na sequência serão mostrados alguns exemplos reais de medições em campo com seus respectivos resultados, análises e discussões de manutenções adequadas para cada um deles. Poderemos ver que a identificação prévia de condições deteriorantes nos equipamentos são um grande diferencial para realização de reparos e esquiva de problemas maiores envolvendo quebras, perda de produção e retrabalho.

Palavras-chave: Termografia, Análise termográfica, Manutenção preditiva.

Abstract

The purpose of this work is to present the thermographic analysis of industrial machines using techniques present in the literature. The importance of infrared thermography will be studied, as well as the camera and a brief introduction to waves in the electromagnetic spectrum. Later we will understand how to interpret a thermal image, analyzing camera data and the image generated by it, as well as some thermal image analysis techniques, exemplifying the main pattern and showing ways to recognize them. In the sequence, some real examples of measurements in the field will be shown with their respective results, analysis and discussions of appropriate maintenance for each one of them. We can see that the prior identification of deteriorating conditions in the equipment is a great differential for carrying out repairs and avoiding major problems involving breakages, loss of production and rework.

Keywords: Thermography, Thermographic analysis, Predictive maintenance.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Imagem térmica de um carro.	5
Figura 2 – Nível e Amplitude	7
Figura 3 – Espectro Eletromagnético	9
Figura 4 – Imagem térmica e imagem visual de uma janela	12
Figura 5 – Imagem térmica de uma dominância de estrogênio no busto de uma mulher	14
Figura 6 – Imagem térmica auto ajustada e sintonizada termicamente	15
Figura 7 – Imagem térmica original, com ajuste de isoterma entre 50 e 60 °C e entre 65 e 68 °C.	16
Figura 8 – Imagem térmica original e imagem com várias marcações de isoterma. . .	17
Figura 9 – Exemplo de imagem nas paletas arco-íris, rosa, cinza e vermelha. . . .	18
Figura 10 – Exemplo de equipamento com análise a partir de diferentes paletas diferentes.	18
Figura 11 – Classificação de falha.	19
Figura 12 – Relatório de inspeção termográfica.	20
Figura 13 – Prognóstico de inspeção termográfica.	21
Figura 14 – Análise termográfica de um inversor.	22
Figura 15 – Análise termográfica do TP-1101	23
Figura 16 – Análise termográfica do EP-2117	23
Figura 17 – Análise termográfica de um disjuntor do CCM 2A	24

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	1
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	Metodologia	2
1.3	Estrutura do Trabalho	2
2	A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	4
2.1	Importância da Termografia Infravermelha	4
2.1.1	A Imagem Infravermelha	5
2.1.2	Aplicações	5
2.2	A Câmera Infravermelha	6
2.2.1	Faixa de Temperatura	6
2.2.2	Nível e Amplitude	6
2.2.3	Capturando uma Imagem	7
2.3	As Ondas no Espectro Eletromagnético	8
2.3.1	Ondas	8
2.3.2	A Luz Visível	8
2.3.3	O Espectro Eletromagnético	9
2.3.4	Radiação Térmica	10
3	INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DE UMA IMAGEM TÉRMICA	11
3.1	Interpretação de uma Imagem Térmica	11
3.1.1	A Câmera	11
3.1.2	Visual <i>versus</i> Infravermelho	11
3.1.3	A Imagem Térmica	12
3.2	Técnicas de Análise de Imagens Térmicas	13
3.2.1	Gradiente Térmico	13
3.2.2	Ferramentas para Ampliação de Padrões	14
3.2.2.1	Sintonia Térmica	14
3.2.2.2	Isoterma	16
3.2.2.3	Paletas	17
4	ANÁLISES E RESULTADOS	19
4.1	Análise Termográfica	19
4.1.1	Inversor de Frequência (Danfuss A87CA)	21

4.1.2	Tombador (TP-1101)	22
4.1.3	Expander (EP-2117)	23
4.1.4	Centro de Comando de Motores 2A (CCM 2A)	24
5	CONCLUSÕES	25
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1 Introdução

Todas as empresas de manufatura, de qualquer segmento e porte, incluem máquinas em sua operação. No setor fabril e industrial o parque de máquinas e motores é ainda mais robusto. Desta forma, a manutenção preditiva é importante, pois é essencial para monitoramento, desempenho e análise de condições de equipamentos, ampliando assim a vida útil das máquinas [1].

A manutenção preditiva baseia-se em uma série de medidas periódicas de acompanhamento de equipamentos e máquinas com o intuito de diminuir possíveis danos que esses dispositivos possam apresentar. A manutenção preditiva é o conjunto de atividades que aumenta a confiabilidade do maquinário, o que gera economia relacionada com manutenção. A ideia principal para esse tipo de manutenção é planejar intervenções nas máquinas a partir de parâmetros dos próprios equipamentos. Esses dados são proporcionados por programas de inspeções e monitoramento de desempenho. Parte importante desse processo de preservação é a análise termográfica [2].

Nesse contexto é proposto o estudo e análise da termografia para a realização de manutenção preditiva. De acordo com [3], “termografia é a técnica de ensaio não destrutivo que permite o sensoriamento remoto de pontos ou superfícies aquecidas por meio da radiação infravermelho”. A utilização desta técnica possibilita identificar previamente condições inadequadas de operação ou indicativos de falhas graves, que podem resultar na destruição parcial ou total das máquinas e, em muitos casos, provocar a paralisação da operação comercial.

A análise termográfica vem sendo bastante utilizada na indústria como parte das ações de manutenção preditiva, pois ela atua como uma amplificação de nossa visão, permitindo que observemos o espectro infravermelho. Com esta análise é possível observar características de operação do equipamento, mostrando de forma clara e simples as condições de peças, circuitos, motores e quadros de energias, sendo esta última aplicação uma das mais utilizadas, pois a termografia se mostra eficiente na identificação de alguns componentes defeituosos.

1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho é desenvolver uma revisão bibliográfica a respeito do uso de termografia infravermelha para o auxílio de manutenções preditivas em equipamentos industriais. Posteriormente, será realizada uma análise de caso real de identificação de falha em equipamentos e máquinas para execução de manutenção preditiva.

O objetivo citado acima é alcançado realizando imagens e análises em campo. Deseja-se analisar uma máquina e alguns circuitos elétricos da filial da Cargill para entender os parâmetros relacionados à identificação antecipada de falhas, com o intuito de minimizar os riscos de segurança e facilitar as futuras manutenções

1.1.1 Objetivo Geral

- Realizar análises de equipamentos de uma fábrica por meio de termografia infravermelha para posterior manutenção preditiva.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica a respeito de termografia infravermelha.
- Realização do *Setup* da câmera que será utilizada e coleta de dados em campo.
- Análise de dados coletados e detalhamento dos resultados.
- Proposta de manutenções preditivas a partir de análises.

1.2 Metodologia

A metodologia empregada no presente trabalho envolveu a realização de pesquisa e atualização bibliográficas sobre a análise por termografia infravermelha.

Em seguida, foi feita uma pesquisa e realização de um estudo acerca de configurações da câmera termográfica, para que possamos obter imagens vívidas do espectro infravermelho, tendo em vista que a câmera converte radiação infravermelha invisível em uma imagem visível.

Posteriormente, foram elaboradas análises das figuras e do local que o circuito ou máquina se encontram, por meio de compensações na imagem.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado de acordo com a seguinte sequência:

Capítulo 02: Embasamento teórico, apresentando os princípios fundamentais da termografia infravermelha.

Capítulo 03: Descreve os métodos das simulações e a sequência em que foram feitas, detalhando parâmetros necessários e possíveis resultados de cada etapa.

Capítulo 04: São apresentados e analisados os resultados do trabalho, com possíveis soluções para os problemas encontrados.

Capítulo 05: Conclusão, apresentando as considerações realizadas após a finalização do projeto desenvolvido e as propostas de trabalhos futuros para dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

2 A Termografia Infravermelha

Este capítulo é voltado para o estudo dos conceitos que envolvem a termografia infravermelha, abordando a operação da câmera infravermelha, um pouco da ciência térmica básica e da transferência de calor básica, além do espectro eletromagnético e de como acontece a troca de energia por radiação.

2.1 Importância da Termografia Infravermelha

A temperatura é uma variável essencial em determinadas situações e processos, o que torna a análise térmica, por meio da termografia, uma ferramenta útil.

Há três características que tornam a termografia infravermelha útil e estão listadas e definidas a seguir.

- **Não precisa de contato:** por utilizar sensor remoto, traz muitas vantagens, em que duas delas precisam ser citadas. Primeiramente, mantém o usuário longe do perigo de queimaduras e outros incidentes. Em segundo lugar, a termografia não interfere ou afeta o alvo.
- **Duas dimensões:** uma imagem permite a visualização do alvo em duas dimensões e, com a imagem, podemos determinar onde estão os problemas. Isso não quer dizer que precisamos saber imediatamente onde será feita a manutenção ou medição. A termografia visualiza padrões térmicos, por isso é importante que a análise de imagens seja feita por meio de comparação de dois ou mais pontos na mesma imagem.
- **Tempo real:** isso faz com que possamos realizar varreduras muito rápidas de pontos estacionários. Se a termografia demorasse muito tempo a chegar ao resultado, possivelmente muitas situações perigosas seriam descobertas tarde demais. Como todo alvo emite radiação e com os instrumentos adequados, os alvos não estacionários podem ser observados. O caráter de tempo real da termografia infravermelha nos permite capturar mudanças rápidas nos padrões térmicos, isso tudo sem alterar a forma com que esses padrões se modificam.

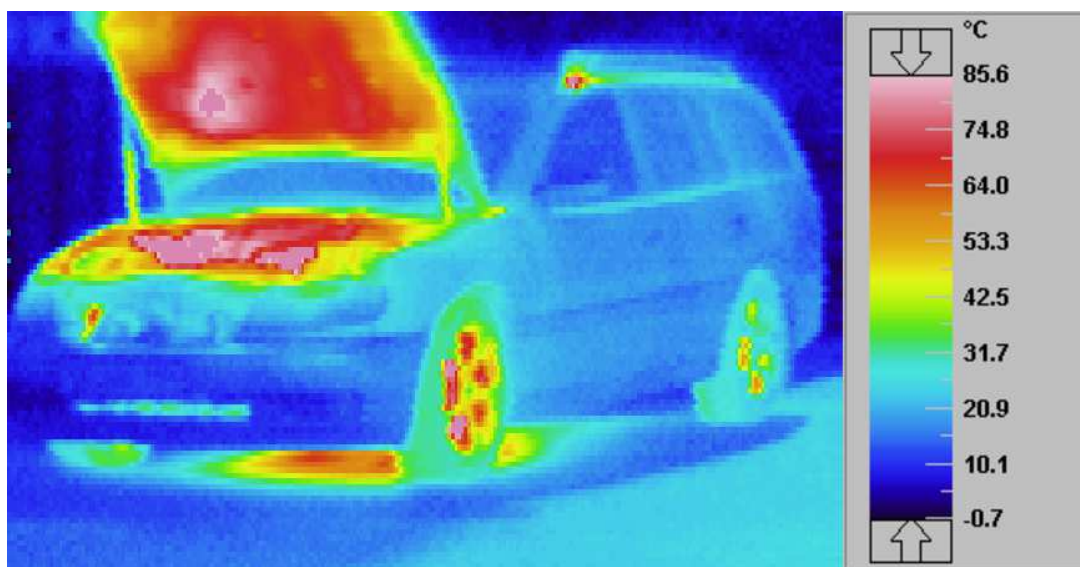
“A termografia infravermelha é a ciência de aquisição e análise de informações térmicas a partir de dispositivos de obtenção de imagens térmicas sem contato” [4]. Sendo assim, a termografia é bastante diversa e nos leva a obtenção de dados sem grande exposição.

2.1.1 A Imagem Infravermelha

Termografia significa "escrever com calor" e a figura que é gerada desse processo é chamada de termograma ou imagem térmica.

Tentaremos explicar uma imagem infravermelha na prática com a ajuda da Figura 1.

Figura 1 – Imagem térmica de um carro.



Fonte: Adaptado de [5].

As áreas mais azuis são aquelas que irradiam menos radiação térmica, o que geralmente significa que essas áreas são as mais frias. Consequentemente, as mais voltadas para os tons de amarelo e vermelho apresentam maior temperatura. Vale salientar que as cores podem mudar de acordo com a configuração da câmera e devem ser indicadas na escala ao lado da imagem.

Na Figura 1 é possível observar características do alvo indisponíveis em uma foto. Provavelmente o carro foi usado há pouco tempo, porque as rodas estão mais quentes que o resto do carro. O mesmo para o motor, que parece estar ligado e o capô acabou de ser levantado, tendo em vista sua maior temperatura.

2.1.2 Aplicações

A importância, versatilidade e utilidade da termografia foram descobertas ao longo do tempo e são dos mais variados tipos. Alguns são a otimização de manutenção e estabilização de produção para que continue funcionando bem e com segurança.

Uma das aplicações mais comuns e importantes é o Monitoramento de Condições (MC). As mais comuns aplicações do MC são na elétrica, construção, fornos, caldeiras,

mecânica, tanques etc. Além desses, temos os seguintes:

- Médica e veterinária - o processo não invasivo e sem contato torna a termografia muito útil e completamente inofensiva para essa aplicação. No meio veterinário é de grande valia pois os animais não podem nos falar o que sentem, mas as imagens nos mostrarão vários pontos indicativos.
- Controle de qualidade e monitoramento de processos - realiza medições contínuas de temperatura no processo produtivo para encontrar padrões que podem nos indicar problemas.
- Testes não destrutivos - como a radiação é obtida a partir da superfície e podemos localizar falhas debaixo dela, então não é necessário abrir e possivelmente deteriorar os equipamentos avaliados.

2.2 A Câmera Infravermelha

A operação das câmeras infravermelhas é uma habilidade que requer prática para ser aprendida. A seguir veremos alguns itens essenciais e configuráveis para um melhor controle da imagem.

2.2.1 Faixa de Temperatura

A faixa de temperatura é um ajuste básico e a maioria dos instrumentos apresentam de 1 a 3 faixas. A faixa é o ajuste acima e abaixo da qual a temperatura não pode ser medida. Quanto menos e mais largas as faixas, mais fácil é operar o instrumento. A faixa de temperatura pode ser tecnicamente obtida de formas diferentes, algumas vezes combinadas. Obter as faixas de temperatura é tão necessário quanto das câmeras convencionais.

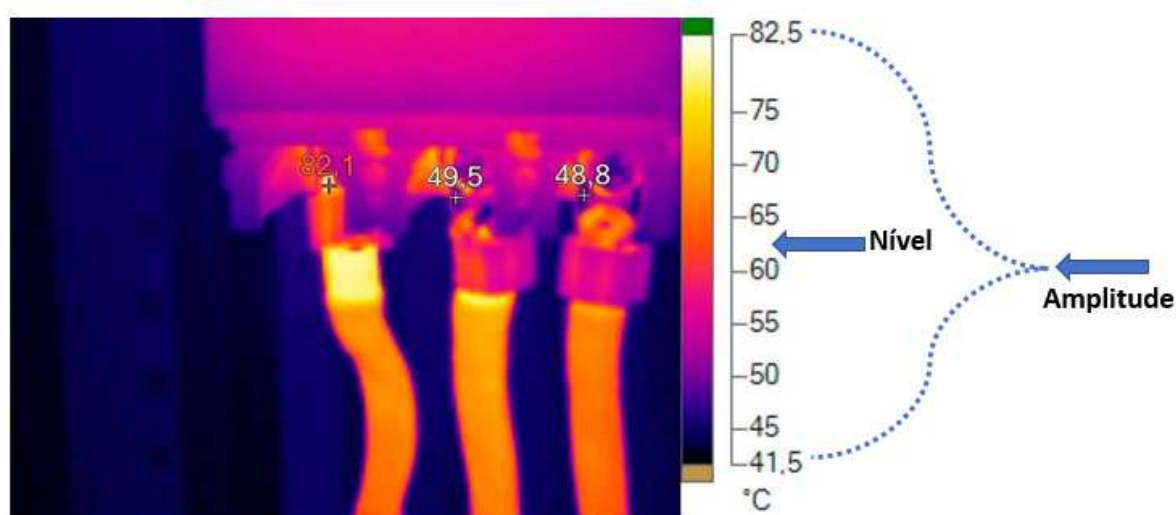
Precisamos limitar a radiação que chega ao detector, caso contrário a imagem pode ficar saturada (sobrecarregada de energia). Dois métodos para contornar esse problema são colocar um filtro no caminho da radiação, que limita a radiação que chega ao detector, e limitar eletronicamente a sensibilidade do detector. Se exibissemos as cores da paleta de imagens em toda a faixa de temperaturas, somente algumas poucas cores corresponderiam às temperaturas na imagem, o que nos levaria a uma imagem muito imprecisa.

2.2.2 Nível e Amplitude

Amplitude é o tamanho total da faixa de temperaturas que utilizamos na imagem e outra forma de pensar na amplitude é em termos de contraste térmico. Lembrando que podemos tornar a amplitude mais larga ou mais estreita. Na Figura 2 podemos entender

um pouco mais a respeito de como é visualizado o nível, que será falado um pouco mais a frente, e a amplitude.

Figura 2 – Nível e Amplitude



Fonte: Autoria própria.

Então, por exemplo, digamos que nossa amplitude foi ajustada para 20 °C, as cores se dividiriam nessa faixa de temperaturas, mas essa amplitude estaria entre 42.5 e 62.5, 52.5 e 72.5 ou 62.5 e 82.5 °C? Se for entre 62.5 e 82.5 e estivermos observando uma cena na temperatura ambiente, nenhuma imagem será exibida, já todas as temperaturas abaixo de 62.5 provavelmente apareceriam na cor preta.

O nível é definido como o ponto intermediário na amplitude. Outra forma de pensar no nível é em termos de brilho térmico. A solução apresentada na Figura 2 é mover nossa amplitude cerca de 20 graus para baixo na escala, a fim de fazer com que as cores cubram a cena na temperatura ambiente à qual estamos observando. Ao fazer isso podemos descobrir que não estamos usando todas as cores da escala.

Os instrumentos de visualização incorporam uma função chamada de “Auto Ajuste” que nos fornece um ajuste grosseiro do nível e da amplitude da imagem. O uso dessa função não é aconselhável em uma análise precisa do alvo, portanto, é necessário que o operador ajuste os valores de nível e amplitude do equipamento.

2.2.3 Capturando uma Imagem

A captura de uma imagem é feita congelando e armazenando, consecutivamente, a imagem. Há algumas regras que são gerais, independente de qual câmera seja usada. Três coisas nunca podem ser alteradas depois de congelar e armazenar a imagem. É necessário

se certificar que estes fatores estão corretos, caso contrário você não terá resultados ou esses serão bastante insatisfatórios.

- **Faixa de temperatura:** é necessário ajustar uma faixa que inclua a temperatura que deseja medir. Para a maioria dos equipamentos se você ajustar mais que o necessário, sua medida não ficará precisa.
- **Foco óptico:** o foco é importante porque uma imagem bem focada refletirá muito bem no termógrafo, além disso, o foco fará com que as medidas sejam mais precisas.
- **Composição da imagem:** A imagem é composta por partes. Ela lida com a forma em que você apresenta o alvo na imagem. O erro mais cometido é ficar longe do alvo, pois devemos chegar perto para conseguir medir a temperatura apropriadamente, mantendo a segurança sempre. Do mesmo jeito que com o foco, a composição da imagem não é simplesmente uma questão de obter imagens do alvo.

É de suma importância congelar a imagem antes de analisá-la, a menos que estejamos querendo analisar um evento variante no tempo.

2.3 As Ondas no Espectro Eletromagnético

Antes de partirmos para questões mais técnicas e aprofundadas, é imprescindível falar um pouco do que é o espectro eletromagnético. Além disso, entenderemos um pouco a razão pela qual temos câmeras que funcionam com variados tipos de ondas.

2.3.1 Ondas

Segundo [6], “Ondas são um meio de transportar informação ou energia”. Em termografia as ondas eletromagnéticas são caracterizadas pelos seus comprimentos de onda, λ (lambda). O comprimento de onda é a distância entre picos de onda adjacentes. A unidade mais comumente usada do λ em termografia é μm , micrômetro ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 1/1000 \text{ mm}$).

As ondas eletromagnéticas viajam a uma velocidade muito elevada, mais precisamente na velocidade da luz. Ela varia com o meio ao qual está inserida, por isso é geralmente definida pelo vácuo para estudos.

2.3.2 A Luz Visível

A luz visível branca é uma mistura de sinais com diferentes comprimentos de onda. Quando vemos um objeto na cor azul, é porque o objeto tem a habilidade de refletir mais a parte azul do espectro do que outros comprimentos de onda.

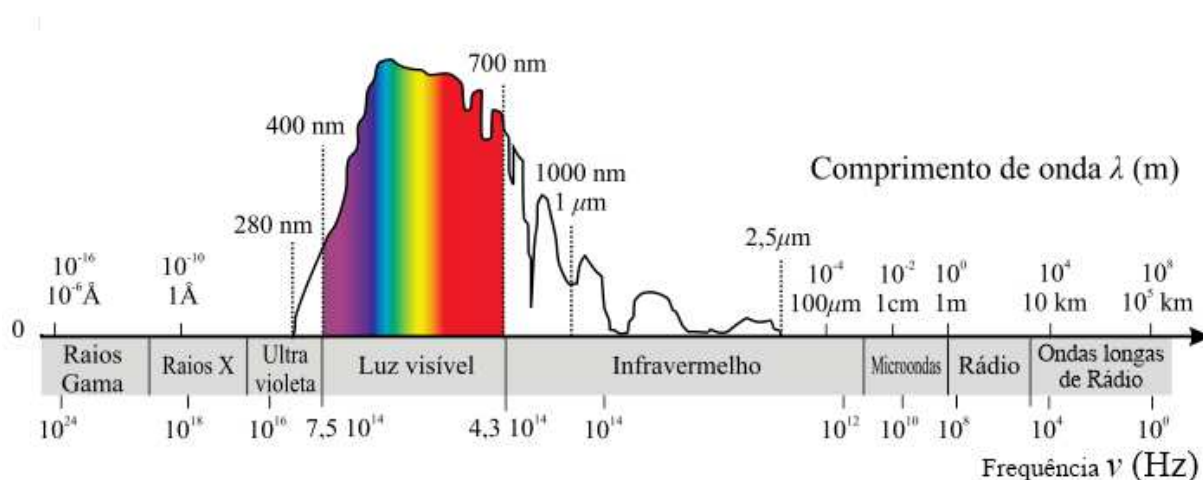
Dessa forma, diferentes comprimentos de onda são percebidos pelo olho humano como diferentes cores. As limitações do olho é de aproximadamente $0,4 \mu\text{m}$ (cor violeta) a $0,7 \mu\text{m}$ (cor vermelha). Neste intervalo estão situadas todas as cores do espectro visível, como vemos em um arco-íris.

2.3.3 O Espectro Eletromagnético

As faixas de comprimentos de onda são fixamente definidas e as definições são baseadas em características físicas das ondas, pois de acordo com as características, são definidas as utilizações.

Há também algumas definições do que significa infravermelho, e mais sugestões ainda para definir as diferentes partes da faixa de ondas infravermelhas. Abaixo temos a Figura 3 para que tenhamos uma ideia do que são alguns dos comprimentos de onda e as faixas de luz que eles estão inseridos.

Figura 3 – Espectro Eletromagnético



Fonte: Adaptado de [7]

Como resumo, as faixas são:

- Visível: $0,42 - 0,78 \mu\text{m}$
- Infravermelho próximo: $0,8 - 1,7 \mu\text{m}$
- Onda curta: $1,0 - 2,5 \mu\text{m}$
- Infravermelho onda média (antigamente chamado de onda curta): $2 - 5 \mu\text{m}$
- Infravermelho onda longa: $7,5 - 14 \mu\text{m}$

2.3.4 Radiação Térmica

O conceito de radiação térmica é muito amplo e refere-se à energia que é emitida em forma de ondas eletromagnéticas, que tem a habilidade de transmitir calor por emissão e absorção [8].

A radiação térmica ocorre no espectro eletromagnético inteiro e sua intensidade depende da fonte e em que parte do espectro estamos olhando. Nas temperaturas que encontramos normalmente, a maior intensidade está na faixa do infravermelho.

3 Interpretação e Análise de uma Imagem Térmica

3.1 Interpretação de uma Imagem Térmica

As imagens térmicas são amplas e podem nos mostrar muitos dados, tanto que é possível descobrir novos indícios a cada vez que olharmos, mesmo que se passem anos, e fazer uma nova análise completamente diferente.

Neste capítulo será descrito as principais características da imagem térmica e os seus parâmetros essenciais.

3.1.1 A Câmera

A câmera converte radiação infravermelha invisível em uma imagem. Essa radiação passa por lentes e é focalizada no detector, muito semelhante ao que acontece com uma câmera convencional.

O detector gera um sinal elétrico que varia de acordo com a intensidade da radiação infravermelha. Em seguida, o sinal elétrico é amplificado e digitalizado. E, em seguida, ser enviado para os componentes elétricos da câmera. A partir deste ponto, o sinal é convertido em uma figura, que será exibida no visor.

3.1.2 Visual *versus* Infravermelho

Há duas diferenças entre as imagens produzidas pela câmera infravermelha e pelo sistema visual humano:

- Na faixa de luz visível, nossos olhos veem a radiação refletida, já a câmera infravermelha detecta tanto a radiação infravermelha refletida quanto a emitida.
- Além de detectar os comprimentos de onda na faixa de luz visível, o sistema visual humano detecta a intensidade e brilho, entretanto, com uma câmera infravermelha (8 - 12 μm), somente a intensidade da radiação dentro dessa faixa espectral será detectada e exibida.

A menos que algum objeto esteja numa temperatura muito elevada (cerca de 550 °C), quando olhamos para ele normalmente, o que estamos vendo principalmente são reflexos, pois estaremos olhando para a luz visível que está sendo emitida por outra fonte e é refletida pelo objeto.

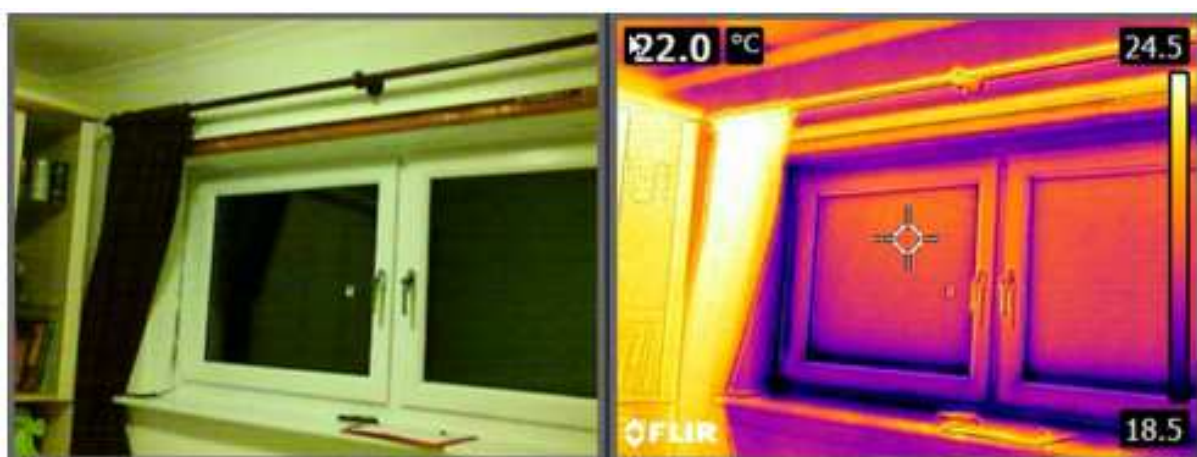
Busca-se alvos de alta emissividade e com baixa reflexão. A parte refletida é tratada como um distúrbio, pois a câmera infravermelha não veja nenhuma diferença dentro da faixa de comprimento de onda que ele é sensível. Uma câmera de onda longa (que trabalha na faixa de onda de 7 a 12 μm), por exemplo, não sabe se a radiação que atinge o detector tem 8, 9, 10, 11 ou 12 μm , ela apenas soma ao total geral da intensidade da radiação. A imagem usará uma escala fictícia, que pode ser colorida ou em escala de preto e branco, onde uma extremidade da escala significa a maior intensidade de radiação e outra significa a menor intensidade.

3.1.3 A Imagem Térmica

A imagem térmica é uma imagem da intensidade de radiação térmica. Um erro muito comum é achar que essa se trata de uma imagem de distribuição de temperatura.

A Figura 4 nos mostra um exemplo, que temos a foto visual e a foto infravermelha de uma janela. Na imagem visual as partes mais claras, que correspondem à pintura da janela, refletem mais do que a parte preta que está presente na cortina e no vidro. Entretanto, na imagem térmica, as partes mais claras são justamente correspondentes à cortina. Isso acontece porque provavelmente a cortina está com uma emissividade muito mais alta. Portanto, a imagem térmica mostra as diferenças de intensidade e não de temperatura.

Figura 4 – Imagem térmica e imagem visual de uma janela



Fonte: Autoria própria.

No nosso caso, a diferença no contraste não diz respeito a temperatura, mas sim a emissividade. Tanto a parte clara da janela como a preta da cortina receberam uma quantidade total de radiação vinda dos objetos aos seus arredores, porém, possivelmente a radiação advinda de objetos na faixa do espectro estão mais voltadas para o preto do que para o branco e, por isso, a cortina se destacou bastante na imagem térmica.

A definição de temperatura aparente é:

“A temperatura aparente corresponde àquela que realmente é sentida pelo corpo humano em função da temperatura e umidade do ar” [9] e é a leitura não compensada de uma câmera infravermelha, contemplando toda a radiação incidente no objeto, não importando sua origem. A imagem térmica sempre será uma imagem de temperatura aparente, já que esta é a forma que a câmera infravermelha verá o objeto, sem compensações.

Se quisermos de fato “medir” a temperatura aparente, devemos ajustar a emissividade para 1 e a distância para 0 metros, pois não estaremos fazendo compensação alguma. Todos instrumentos que são capazes de realizar medições reais terão uma configuração para os parâmetros do objeto, que é onde podemos realizar os ajustes de emissividade.

Como foi pontuado até agora, a emissividade tem uma função importante nas análises termográficas, pois a forma que uma superfície parecerá dependerá bastante da emissividade e não somente da temperatura. Podemos resumir os efeitos da emissividade.

Com um alvo de emissividade alta:

- Você terá alta confiabilidade;
- A temperatura aparente do objeto é próxima da real.

Com um alvo de emissividade baixa:

- Você não pode confiar no que vê;
- A temperatura aparente do objeto será próxima apenas da sua temperatura aparente.

A baixa emissividade é enganosa. Um alvo com emissividade baixa sempre “tentará” se camuflar para parecer com aquilo que está próximo. Como exemplo, se o alvo estiver mais frio do que o ambiente ao qual está inserido, ele parecerá mais quente que o que realmente está.

3.2 Técnicas de Análise de Imagens Térmicas

Como a imagem térmica é diferente da imagem visual, é necessário aprender técnicas para analisá-las corretamente.

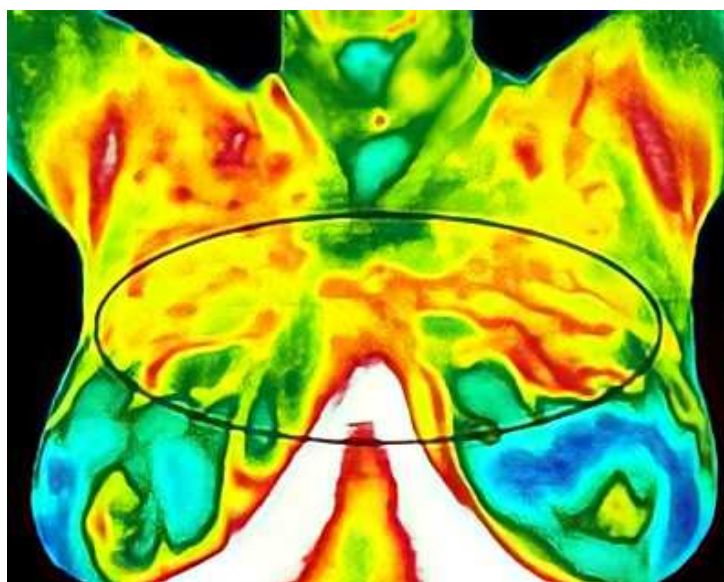
3.2.1 Gradiente Térmico

Um gradiente térmico é uma mudança gradual na temperatura localizada em alguma superfície e indica que há transferência de calor.

Na termografia, a maioria dos objetos analisados são sólidos opacos e a única forma que pode haver de transferência de calor nesses objetos é por condução. É essencial analisar os gradientes, pois mostrarão onde o fluxo de calor se origina apontando a origem do problema.

Apesar do nosso estudo ser voltado para a análise de equipamentos mecânicos e elétricos, a termografia tem muitas finalidades, como prevenção ou diagnóstico precoce de doenças. Na Figura 5 podemos ver a mamografia de uma mulher que a partir do gradiente térmico foi possível descobrir uma certa dominância de estrogênio em uma região do busto, podendo evoluir para câncer.

Figura 5 – Imagem térmica de uma dominância de estrogênio no busto de uma mulher



Fonte: Adaptado de [10]

3.2.2 Ferramentas para Ampliação de Padrões

Muitas vezes a análise de imagens térmicas é a análise de padrões térmicos, que são de difícil compreensão, e por esse motivo as câmeras possuem várias características para ajudar a amplificar tais padrões. Quando temos experiência em usá-las temos condições bastante favoráveis para descobrir o que de fato estamos procurando.

As ferramentas mais importantes para amplificar padrões são: **sintonia térmica**, **isoterma** e **paletas**.

3.2.2.1 Sintonia Térmica

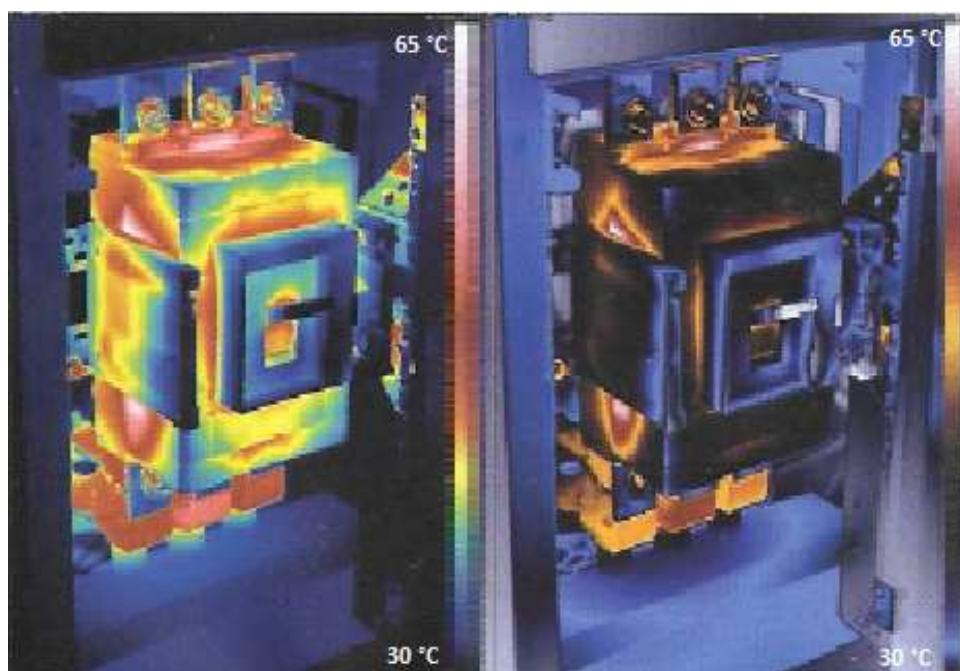
Sintonia térmica, também chamada de foco térmico, é a configuração responsável por ajustar a escala da imagem no objeto de análise com a finalidade de termos um

contraste mais otimizado.

Para realizar a sintonia térmica, usamos os controles de nível e de amplitude. Após a escolha da parte da imagem que iremos que estamos interessados, iremos ajustar o nível e a amplitude de modo que as cores da barra de cores lateral sejam correspondentes apenas àquela parcela. As partes não interessantes são deixadas de fora da escala e ficam em escala de cinza ou preto e branco.

Usando a configuração de auto ajuste da imagem obteremos uma imagem com quase todas as cores presentes na imagem térmica original, permitindo que vejamos todas as partes da imagem e, conseqüentemente, teremos uma visualização geral daquele objeto. Entretanto, se analisar o local mais profundamente, podemos comprimir a escala de cores para focar naquela parte desejada. É o que acontece na Figura 6, em que vemos a imagem térmica de um painel de comando. A primeira parte nos mostra uma imagem auto ajustada e que mostra todo o objeto com suas cores presentes, porém foi necessário realizar a sintonia térmica, mostrada na segunda parte, só em uma parte do painel para que pudesse ser analisado mais corretamente e entender o motivo da temperatura estar tão elevada nos pontos colorido.

Figura 6 – Imagem térmica auto ajustada e sintonizada termicamente



Fonte: Adaptado de [11]

O caso da Figura 6 indica condições de temperatura fora dos normais nas extremidades do objeto, se fôssemos comparar com um equipamento instalado recentemente, por exemplo. A sintonia térmica é importante no aperfeiçoamento de imagens autoajustadas que não destacaram possíveis problemas.

Vale salientar que a sintonia térmica deve ser feita antes de armazenar a imagem, ainda em campo.

3.2.2.2 Isoterma

A isoterma é a configuração responsável pela substituição de certas cores da escala por uma ou mais cores que possam contrastar suficientemente a fim de realizarmos melhores análises.

Com a isoterma é possível rastrear o fluxo de calor ou descobrir se há qualquer fluxo naquele objeto/local. Se ao aplicarmos a isoterma, ela cobrir a superfície de maneira uniforme, significa que não há fluxo de calor naquela superfície, mas isso não quer dizer que não há um fluxo de calor partindo dele, pois este pode estar mais frio ou mais quente que os objetos nos seus arredores. Um exemplo interessante para isso: se um condutor elétrico, digamos um fio de cobre, tem um padrão térmico uniforme e está quente, provavelmente é porque ele está conduzindo carga, mas se ele estiver quente demais, pode significar que a carga é muito elevada e não que está com alguma conexão danificada.

A isoterma pode ser usada para encontrarmos a localização exata do ponto com maior irradiação e nos mostrará onde poderá estar a fonte de calor por meio da superfície. Na Figura 7 podemos ver um exemplo que ao aumentarmos a temperatura que queremos evidenciar em análise a isoterma se expande para se adequar à temperatura desejada. Neste caso, provavelmente se marcássemos entre 68 e 70 °C a isoterma estaria mais próxima do centro do objeto.

Figura 7 – Imagem térmica original, com ajuste de isoterma entre 50 e 60 °C e entre 65 e 68 °C.

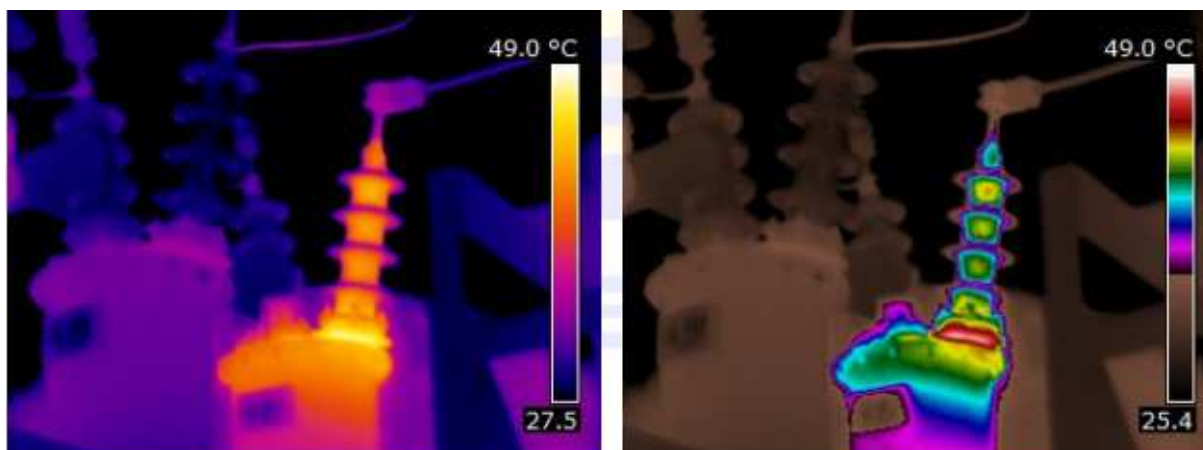


Fonte: Adaptado de [12].

Já a Figura 8 mostra a análise termográfica de um transformador de corrente (TC). Neste caso, foi usada uma câmera que possui a configuração de marcar diversas isotermas, cada uma representando uma faixa de valores diferente e fazendo com que a análise possa se tornar ainda mais detalhada, tendo em vista que já teremos todas as temperaturas separadas e mostradas de uma única vez. Neste TC foi identificado que realmente havia

condição fora do normal e um dos terminais (mostrado na cor vermelha) estava com ajuste inadequado.

Figura 8 – Imagem térmica original e imagem com várias marcações de isoterma.



Fonte: Adaptado de [13]

3.2.2.3 Paletas

O termo “paletas” vem de paletas de cores e se dá ao fato de que a paleta de cores da imagem dispõe diferentes cores para marcar níveis de temperatura aparente. Dependendo das cores utilizadas as paletas podem dar mais ou menos contraste na imagem.

A imagem térmica pode ser apresentada como um máximo de 256 tons diferentes de cores e os tons devem estar bem ajustados em cada cor para que possamos conseguir distingui-los. Devemos escolher a paleta que mais se adequa à situação. Na Figura 9 podemos ver o mesmo objeto, porém sob o efeito de quatro paletas diferentes, apenas a título de exemplo.

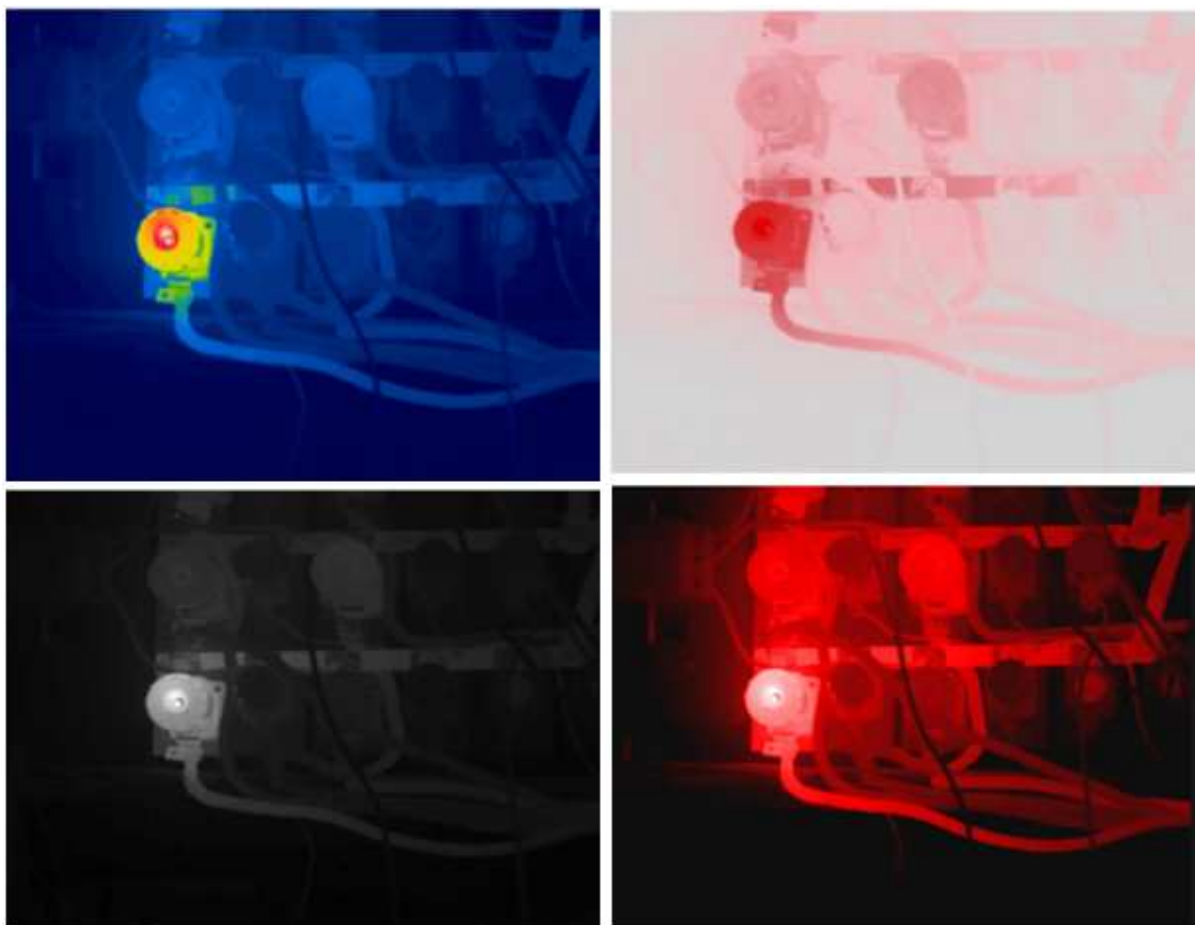
Aqui uma regra básica e prática para o uso de paletas:

- Use paletas de contraste alto em objetos de contraste baixo;
- Use paletas de contraste baixo em objetos de contraste alto.

Em uma superfície grande e regular, com pequenas variações de temperatura, o mais indicado seria usar uma paleta com contraste mais alto, por exemplo. Irregularidades elétricas geralmente possuem um contraste razoavelmente mais alto e se o componente estiver rodeado de outros similares, a análise com alto contraste pode ser difícil.

Na Figura 10 podemos ver mais um exemplo de um equipamento. Na primeira parte é mostrada uma imagem visual, na segunda a paleta é em tons de cinza e consegue enfatizar muito bem a geometria do equipamento, já a terceira parte está na paleta de

Figura 9 – Exemplo de imagem nas paletas arco-íris, rosa, cinza e vermelha.



Fonte: Adaptado de [14].

arco-íris e a sua vantagem é enfatizar a quantidade ou intensidade da informação que está presente.

Figura 10 – Exemplo de equipamento com análise a partir de diferentes paletas diferentes.



Fonte: Adaptado de [14]

4 Análises e Resultados

4.1 Análise Termográfica

Todas as imagens foram formadas e as inspeções foram realizadas na fábrica da Cargill, localizada na cidade de Barreiras - BA.

As inspeções referentes às análises termográficas são feitas por funcionários da própria Cargill. O electricista é responsável pelo monitoramento das subestações e CCMs da fábrica, cumprindo um roteiro de inspeções dos equipamentos e componentes que são vistoriados trimestralmente.

A câmera utilizada para as inspeções foi a câmera termográfica FLIR T460. Esta tem a resolução 320x240 pixels, são capazes de medir temperaturas de até 1.500 °C com alta sensibilidade térmica e uma inclinação de 120 °C da unidade óptica. Essa câmera possui lentes intercambiáveis, permitindo maior flexibilidade e ampliação na utilização de seu termovisor e pode realizar medições a longas distâncias com a lente de 6°, alcançando até 0,35mrad.

A classificação da falha é feita segundo a Figura 11, fornecida pela consultora Global Risk:

Figura 11 – Classificação de falha.

Diferença de Tempo entre Fases	Classificação	Comentários
< 1 °C	Nenhum deficiência	-
1 a 10 °C	Problema menor	PD1 - Investigar Se a reparação for necessária, repare como parte da manutenção regular; há pouca probabilidade de dano físico
11 a 35 °C	Problema intermediário	PD2 - Monitoramento e Reparo Repare no futuro próximo. Monitore as mudanças nesse meio tempo. Inspeccionar por danos físicos
> 35 °C	Problema sério	PD3 - Reparo Imediato Inspeccione também os componentes ao redor quanto a prováveis danos

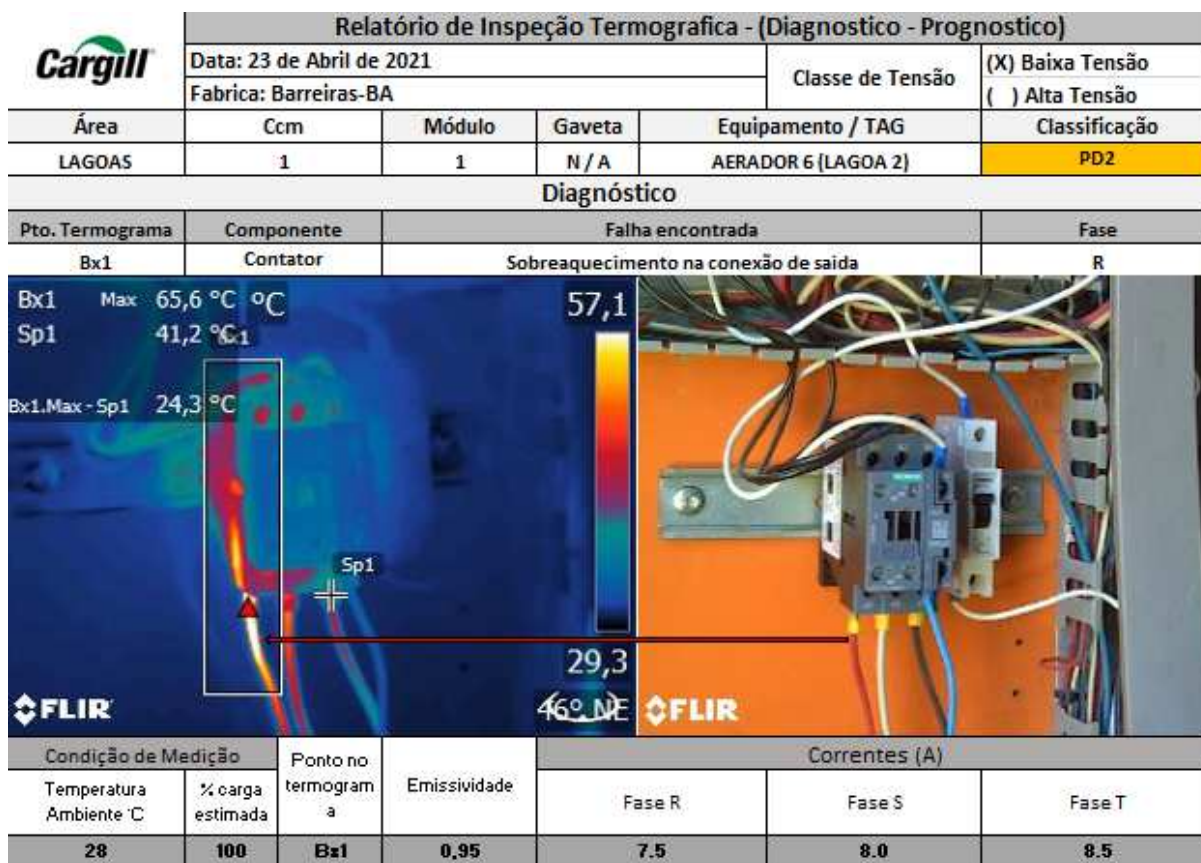
Fonte – Autoria Própria

De acordo a Figura 11 é possível definir a situação do equipamento usando como

base a diferença de temperatura entre as fases, o ativo pode ser classificado como **nenhuma deficiência, problema menor, problema intermediário e problema sério**.

Após as inspeções o eletricista fornece um laudo (Figuras 12 e 13) referente ao equipamento analisado. Essas análises são efetuadas utilizando as imagens obtidas pela câmera infravermelha (FLIR T460).

Figura 12 – Relatório de inspeção termográfica.







Fonte – Autoria Própria

Na Figura 12 são indicadas as seguintes informações: data da inspeção, local, equipamento, diagnóstico da falha, locais de aquecimento, classificação da falha e condições de medição. Importante salientar que na Cargill a emissividade usada é de 0,95 para qualquer medição e análise.

A Figura 13 fornece um prognóstico do eletricista, o tempo estimado para intervenção, a classificação da falha e uma legenda que segue o princípio da Figura 11.

Figura 13 – Prognóstico de inspeção termográfica.

Prognóstico			
Ponto no termograma	Ação Recomendada	Tempo Estimado Para Intervenção	Classificação
Bx1	Substituir terminais de saída do Contator, Avaliar contator em seus pontos de conexão	00:30	PD2
		cabos 4 mm ² - terminal pre-isolado - pino	
Legenda		Aprovado por: _____ _____	
	Severamente Aquecido		
	Aquecido		
	Temperatura abaixo do limite, porém intervenção recomendada em função da diferença de		
	Nenhuma Deficiência		

Fonte – Autoria Própria

Sabendo de todos esses pontos, podemos seguir para as análises realizadas em campo e suas respectivas análises.

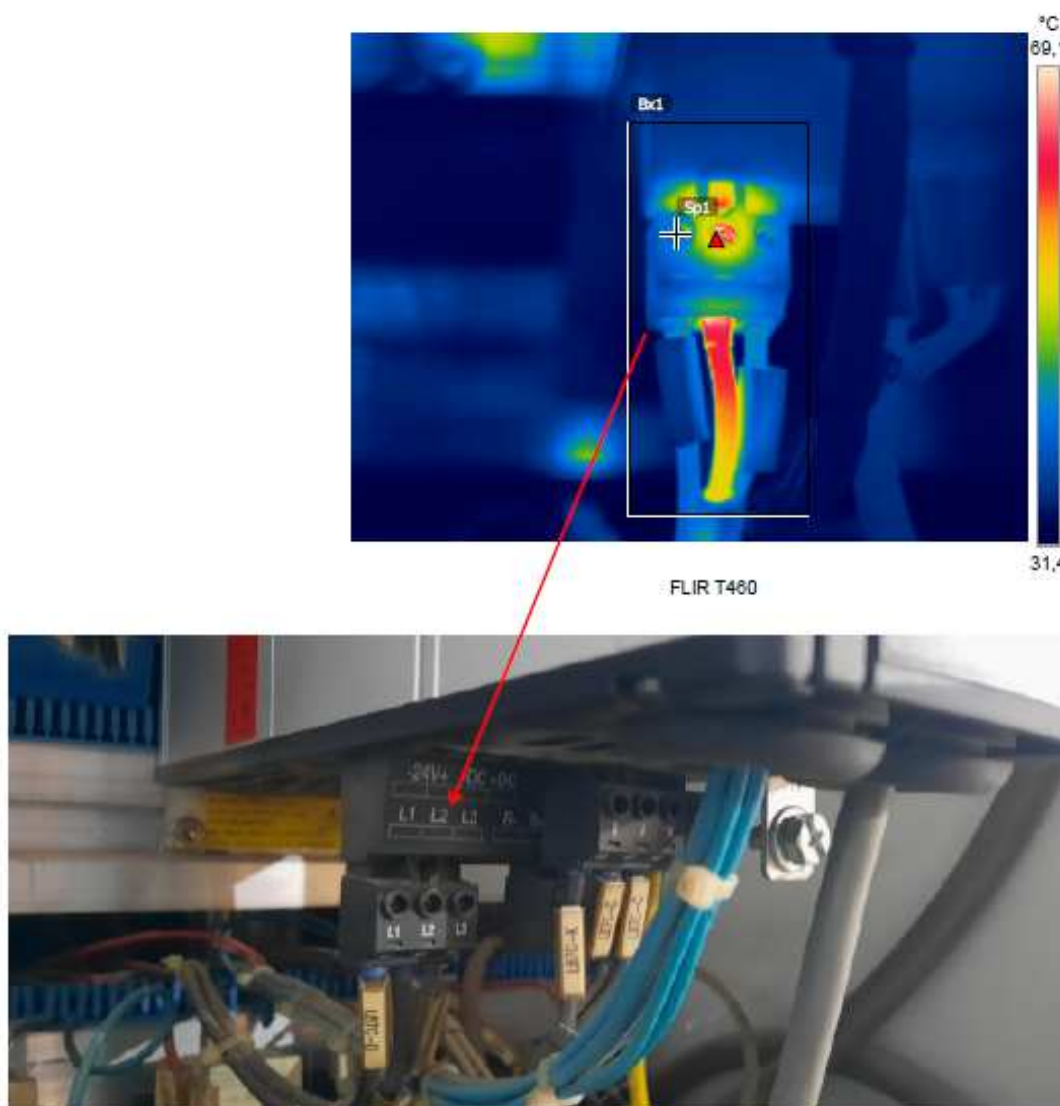
4.1.1 Inversor de Frequência (Danfuss A87CA)

Na Figura 14 temos a imagem visual de um dos inversores da máquina sopradora do setor de envase em que apresentou algumas alterações na imagem termográfica de um dos pontos.

Com esta análise foi percebido que a temperatura máxima do Bx1 chegou a 72,1 °C. Medindo no Sp1, tínhamos 39,9 °C. Analisando essa diferença de temperatura entre as fases, que foi de 32,2 °C, a falha se encaixa como PD2.

Seguindo prognóstico, o electricista responsável realizou intervenções e testes e descobriu que um dos condutores havia sido instalado com muita pressão no conector, o que o fez romper e criar um pequeno curto circuito, levando ao mau funcionamento do equipamento. O tempo estimado para esta atividade foi de 30 minutos.

Figura 14 – Análise termográfica de um inversor.



Fonte – Autoria Própria

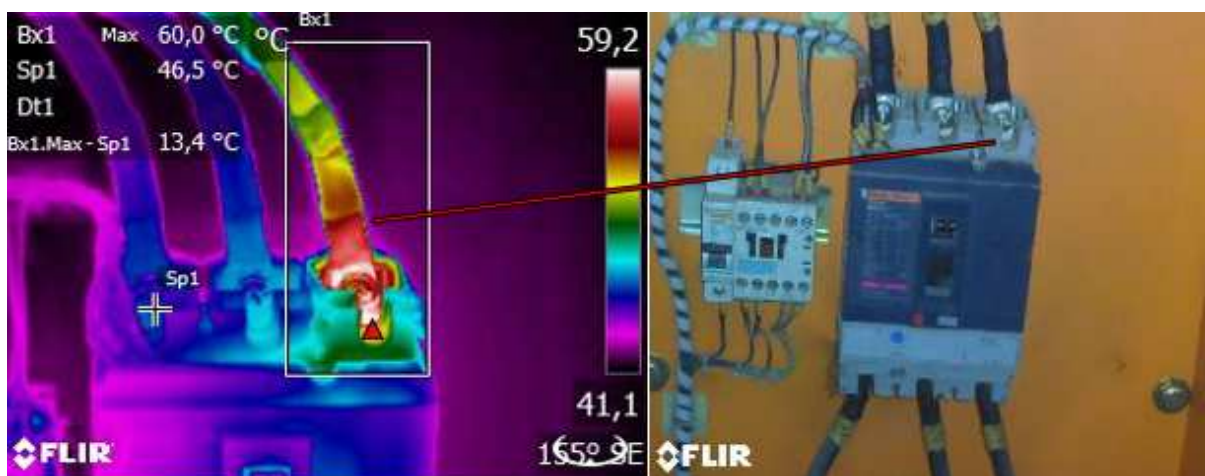
4.1.2 Tombador (TP-1101)

Analisando agora o TP-1101, mostrado na Figura 15, podemos perceber que é um bom exemplo de uso de isoterma para entender como a temperatura vai aumentando dentro do componente.

A partir da Figura 15 pode-se notar que o TP-1101 apresenta sobreaquecimento na conexão de saída do disjuntor, caracterizado pela diferença de temperatura de 13,4 °C entre fases. Como o valor se encontra entre 11 e 35 °C a falha é classificada com PD2. Além disso, foram medidas as correntes para possível auxílio, sendo estas: fase R = 38,5 A, fase S = 38,2 A e fase T = 40 A.

Seguindo o prognóstico realizado com auxílio do supervisor de manutenção elétrica,

Figura 15 – Análise termográfica do TP-1101



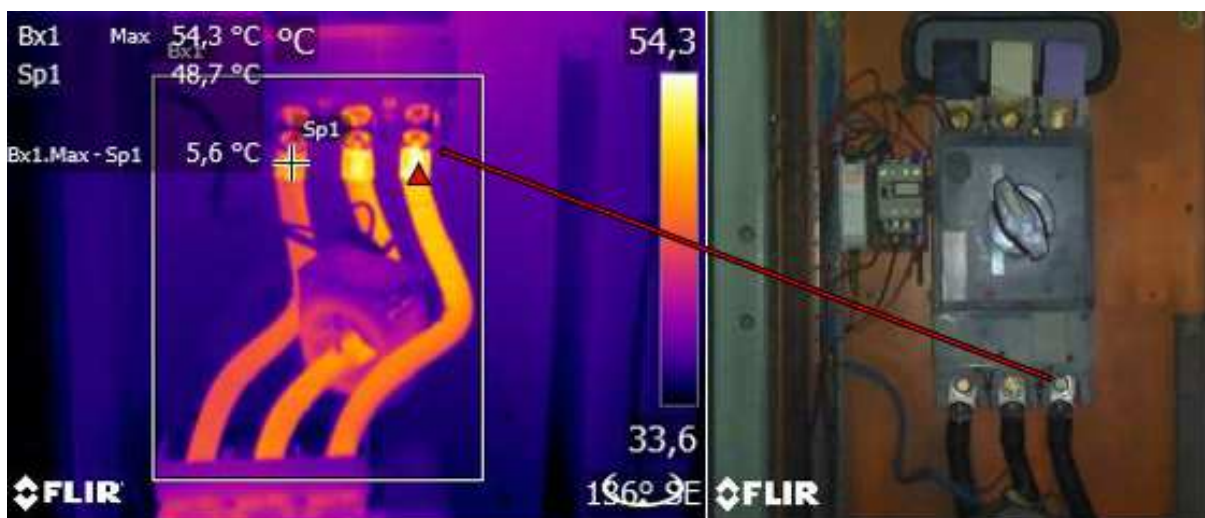
Fonte – Autoria Própria

recomenda-se substituir o terminal de conexão, os cabos de alimentação e avaliar as condições do disjuntor. O tempo estimado para essa intervenção é de uma hora e o elemento encontra-se aquecido.

4.1.3 Expander (EP-2117)

Analisando agora o EP-2117 e a partir da Figura 16, pode-se notar que o disjuntor da EP-2117 apresenta sobreaquecimento na conexão de saída, caracterizado pela diferença de temperatura de 5,6 °C entre uma fase e outra (Bx1 máx = 54,3 °C e Sp1 = 48,7 °C, cada um desses localizado em uma fase diferente). Como o valor se encontra entre 1 e 10 °C a falha é classificada com PD1.

Figura 16 – Análise termográfica do EP-2117



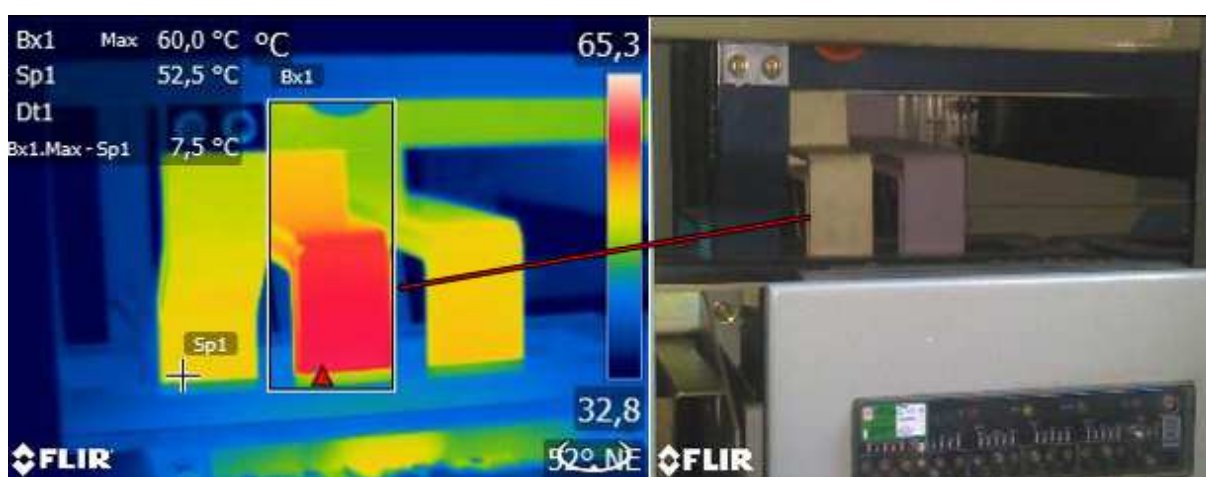
Fonte – Autoria Própria

Seguindo o prognóstico realizado pelo electricista, recomenda-se realizar uma nova crimpagem do terminal de conexão. O tempo estimado para essa intervenção é de uma hora e o elemento encontra-se com temperatura abaixo do limite, entretanto recomenda-se uma intervenção em função da diferença de temperatura.

4.1.4 Centro de Comando de Motores 2A (CCM 2A)

A partir da Figura 17 pode-se notar que o CCM 2A apresenta sobreaquecimento no barramento de entrada, caracterizado pela diferença de temperatura de $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre um barramento e outro (Bx1 máx = $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e Sp1 = $52,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Como o valor se encontra entre 1 e $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a falha é classificada com PD1.

Figura 17 – Análise termográfica de um disjuntor do CCM 2A



Fonte: Autoria Própria

Seguindo o prognóstico, recomenda-se avaliar a distribuição de cargas, verificar as condições dos pontos de conexão do disjuntor e verificar se há desgaste no barramento. O tempo estimado para essa intervenção é de duas horas e o elemento encontra-se com temperatura abaixo do limite, entretanto recomenda-se uma intervenção em função da diferença de temperatura.

5 Conclusões

Esse trabalho objetivou a análise termográfica de equipamentos industriais da filial de uma empresa multinacional para a descoberta de pontos com necessidade de manutenção preditiva ou corretiva.

A partir da literatura foi possível perceber que as técnicas de manutenção preditiva vêm sendo bastante utilizadas na indústria ao compararmos a outras técnicas, tendo em vista que com sua execução passam a garantir equipamentos com maior durabilidade e menos de substituição, além de expandir os intervalos entre manutenções dos equipamentos devido a quebras e reparos programados.

A aplicação da análise termográfica nas fábricas podem ser de grande utilidade, levando em consideração que é possível chegar aos problemas com maior facilidade e reesolvê-los sem a necessidade de “esperar” atingir um estado de emergência, com a parada de produção ou situação de risco da vida de colaboradores. As análises são cada vez mais aperfeiçoadas a partir da experiência daqueles que estão aptos a operar a câmera termográfica, pois é necessário ter prática para conseguir distinguir cada um dos métodos de análise e como usá-los corretamente para um melhor aproveitamento. Um ponto que é desenvolvido quando se tem experiência é o ajuste de emissividade na câmera para ter melhores resultados, sendo este um dos mais importantes.

Durante os resultados e discussões foi notória a identificação prévia de condições que poderiam levar a falhas funcionais, fornecendo ao time de manutenção elétrica e mecânica tempo suficiente para planejamentos e programações de parada. Por meio das análises exemplificadas foi possível compreender a eficácia da aplicação da manutenção preditiva, pois torna possível evitar paradas de produção com maiores perdas financeiras.

Referências Bibliográficas

- [1] M. M. DE CASTRO, “A utilização de manutenção preditiva na indústria,” https://monografias.brasilecola.uol.com.br/engenharia/a-utilizacao-da-manutencao-preditiva-na-industria.htm#indice_2, 2017, acesso em 01 Abr. 2021. Citado na página 1.
- [2] R. L. Soares, “Estudo de caso sobre a importância da manutenção preditiva em uma empresa de cal na região centro-oeste de minas gerais,” 2011. Citado na página 1.
- [3] H. R. G. Viana, *PCM-Planejamento e Controle da manutenção*. Qualitymark Editora Ltda., p. 14, 2002. Citado na página 1.
- [4] J. M. Leão, J. A. M. Lima, F. P. Pôssas, and L. G. R. Pereira, “Uso da termografia infravermelha na pecuária de precisão.” *Embrapa Gado de Leite-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, p. 98, 2015. Citado na página 4.
- [5] T. Henning, “Opel omega bcaravan thermography,” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OpelOmegaBCaravanThermography_ty_200609205col1.jpg, 2006, acesso em 05 Abr. 2021. Citado na página 5.
- [6] M. N. O. Sadiku, *Elementos de eletromagnetismo*. Ed. Bookman, p. 371, 2004. Citado na página 8.
- [7] V. S. Pereira, “Entenda o que é sensoriamento remoto,” <https://www.austertecnologia.com/single-post/sensoriamento-remoto>, 2019, acesso em 21 Abr. 2021. Citado na página 9.
- [8] R. Helerbrock, “Irradiação térmica,” <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/irradiacao-termica.htm>, 2021, acesso em 01 Mai. 2021. Citado na página 10.
- [9] A. E. d. S. Cunha and C. M. Paiva, “Experimento de temperatura aparente na estação meteorológica da ilha do fundão durante um dia típico de verão,” *SBAgro*, p. 1, 1999. Citado na página 13.
- [10] C. H. C. Centre, “Thermography – how it works. . .,” <http://healthandchiropractic.com/services/holistic-healing-services/thermal-imaging/>, 2021, acesso em 05 Mai. 2021. Citado na página 14.
- [11] Abendi, “Panoramas de minas,” *Revista Abendi*, 2015. Citado na página 15.
- [12] I. Z. da Silva, “Aplicação da termografia na manutenção de instalações industriais,” 2020. Citado na página 16.

-
- [13] R. S. Orrego, “Punto caliente en tc de circuito de 22,9 kv,” *Infrared Training Center*, 2012. Citado na página 17.
- [14] A. B. Veratti, “As paletas e a interpretação visual de termogramas,” *ABENDI ICON Tecnologia Termográfica*, 2015. Citado na página 18.