



Integração da Termografia em Planos de Manutenção de Instalações Eléctricas

ANTÓNIO JOSÉ DOS SANTOS RAMOS CORREIA

novembro de 2018

Integração da Termografia em Planos de Manutenção de Instalações Elétricas

António José Dos Santos Ramos Correia



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2018

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: António José Dos Santos Ramos Correia, Nº 1130199, 1130199@isep.ipp.pt

Orientação científica: Fernando Maurício Teixeira De Sousa Dias, fmd@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2018

Dedico este trabalho à pequena Isabel, pela inspiração e alegria. Olhar para ti e ver-te crescer é a minha maior conquista.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o devido reconhecimento e agradecimento

Em primeiro lugar, o meu Agradecimento ao meu Orientador e Professor Doutor Fernando Maurício Teixeira De Sousa Dias pela sua paciência e tempo que dispôs em me ter acompanhado não apenas nesta Dissertação mas também ao longo deste Mestrado.

São as relações interpessoais que possibilitam e fortalecem o crescimento dos projetos, por isso quero agradecer aos Engenheiros Pedro Moreira e José Carlos que ao longo destes dois anos me acompanharam contribuindo com o seu conhecimento.

Agradeço ao Engenheiro Fábio Nogueira sendo meu confidente em momentos de incertezas, por me ter ajudado e aconselhado com a sua exigência e rigor. O seu apoio e amizade fizeram a diferença no resultado final desta Dissertação.

Os meus agradecimentos vão ainda para a minha esposa e filha pela sua compreensão e amor incondicional, para os meus pais que foram sempre um pilar bastante importante de apoio durante o meu percurso académico e profissional.

Resumo

A termografia é uma técnica de deteção sem contacto físico, visualização e registo da distribuição de energia térmica emitida pela superfície de um ou vários corpos, por radiação.

A termografia vem vindo a ser cada vez mais utilizada numa diversidade de setores, nomeadamente nos que se baseiam em instalações elétricas, com o objetivo de detetar anomalias e problemas num estágio inicial, integrando-se num plano preditivo de manutenção, com o propósito de aumentar os indicadores de fiabilidade de equipamentos, sistemas e da instalação elétrica.

A realização de inspeções termográficas periódicas de elementos críticos de uma instalação elétrica permite conhecer exatamente a evolução e o estado dos dispositivos, permitindo planejar de forma adequada as tarefas de manutenção e assim agir mais cedo, sempre que necessário.

Implementando a termografia, a deteção de falhas potenciais tornar-se-á mais eficiente, devido a muitas destas falhas não serem repentinas, mas sim desenvolverem-se ao longo do tempo, tentamos portanto com a implementação da termografia conseguir detetar o ponto a partir do qual o dispositivo começa a apresentar perda do desempenho da sua função.

Refira-se por um lado, a significativa redução do tempo e custos das desmontagens, reparações e montagens de componentes que estão em boa condição para operar, e por outro a identificação facilitada e precoce de problemas graves que existem e que estão em iminente rutura, que são assim facilmente identificados, dando tempo para a sua reparação antes que os seus efeitos (potencialmente nefastos) se façam sentir.

A interpretação de uma imagem termográfica é um aspeto fundamental nos ensaios termográficos. Para uma interpretação objetiva, correta e facilitada, normalmente recorre-se, por um lado ao estabelecimento de valores de Limite Máximo de Temperatura (LMT) – próprio de cada componente ou equipamento (dados de fabricantes) – e por outro, à análise e estabelecimento de padrões característicos de imagem para determinadas condições de funcionamento.

Após o estudo descritivo teórico dos vários tópicos, questões, considerações e resultados de casos práticos na bibliografia relacionados com a utilização da termografia, procedeu-se à reformulação de um plano de manutenção com vista à inclusão da técnica da termografia para monitorização de um conjunto diverso de dispositivos e equipamentos, tendo-se priorizado o conjunto de procedimentos existentes com vista à introdução da termografia como uma das primeiras metodologias em campo de inspeção periódica.

A execução desse plano de manutenção, em paralelo com o plano de não inclusão da técnica referida, permitiu aferir que o plano reformulado possibilitou quer a redução do tempo de monitorização periódica local das equipas de manutenção, quer a deteção mais precoce e rápida de anomalias, potencialidades de avaria e das próprias avarias.

Palavras-Chave

Termografia, Manutenção Preditiva, Planos de Manutenção

Abstract

Thermography is a technique of detection without physical contact, visualization and recording of the distribution of thermal energy emitted by the surface of one or several bodies, by radiation.

Thermography has been increasingly used in a variety of sectors, particularly those based on electrical installations, with the aim of detecting anomalies and problems at an early stage, integrating into a predictive maintenance plan, with the purpose of increasing the indicators of reliability of equipment, systems and electrical installation.

Conducting periodic thermographic inspections of critical elements of an electrical installation allows to know exactly the evolution and the state of the devices, allowing adequate planning of the maintenance tasks and thus to act sooner, when necessary.

By implementing thermography, the detection of potential failures will become more efficient, because many of these failures are not sudden but rather develop over time, so we try with the implementation of the thermography to detect the point from which the device begins to suffer loss of performance of its function.

On the one hand, there is a significant reduction in the time and costs of dismantling, repairing and assembling components that are in good condition to operate, and on the other hand, the early and easy identification of serious problems that exist and are in imminent rupture, which are thus easily identified, giving time for its repair before its (potentially harmful) effects are felt.

The interpretation of a thermographic image is a fundamental aspect in thermographic essays. For an objective, correct and easy interpretation, it is usually used, on the one hand, to establish Maximum Temperature Limit - specific to each component or equipment (manufacturers' data) - and on the other, to the analysis and establishment of characteristic image patterns for certain operating conditions.

After the theoretical descriptive study of the various topics, issues, considerations and results of practical cases in the bibliography related to the use of thermography, a maintenance plan was redesigned to include the thermography technique for monitoring a diverse set of

devices and equipment, prioritizing the set of existing procedures for the introduction of thermography as one of the first methodologies in the field of periodic inspection.

The execution of this maintenance plan, in parallel with the non-inclusion plan of the referred technique, allowed to verify that the reformulated plan made possible both the reduction of the local periodic monitoring time of maintenance teams and the earlier and faster detection of anomalies, potential of failure and of the faults themselves.

Keywords

Thermography, Predictive Maintenance, Maintenance Plans.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	5
ÍNDICE DE FIGURAS	9
SIGLAS E ACRÓNIMOS	12
CAPÍTULO 1	15
1.1 Contextualização e Motivação	15
1.2 Objetivos e Metodologia	15
1.3 Organização do Documento	16
CAPÍTULO 2	17
FUNDAMENTOS FÍSICOS	17
2.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	17
FENÓMENOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	21
2.1.1 – Condução	22
2.1.2 – Convecção	22
2.1.3 – Radiação	23
2.2 TÉCNICAS TERMOGRÁFICAS E SUAS APLICAÇÕES	26
2.2.1 Aplicações de Termografia	31
2.2.1.1 Visão noturna e vigilância	32
2.2.1.2 Dispositivos mecânicos	34
2.2.1.3 Medicina	35
2.2.1.4 Aeronáutica	36
2.2.1.4 Construção Civil	37
2.2.1.5 Indústria Automóvel	39
2.2.1.6 Eletrônica	40
2.2.1.7 Instalações Elétricas	41
APLICAÇÕES FERROVIÁRIAS	43
Caso da Companhia Ferroviária Nacional Francesa	43
Caso da Companhia Ferroviária Nacional da Sérvia	44
CAPÍTULO 3	46
APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA EM PLANOS DE MANUTENÇÃO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS	46
ESTUDO DE CASO PRÁTICO	49
METODOLOGIAS EXISTENTES	49

CASO PRÁTICO.....	50
3.1 – Caracterização do problema.....	50
3.1.1 - Identificação dos pontos de interesse.....	51
3.1.2 - Caracterização da câmara termográfica.....	52
Configuração do equipamento	54
3.1.3 – Análise e tratamento dos dados adquiridos.....	54
3.1.3.1 – Estações Sibas Klip.....	55
4.1.3.2 – Contactores	56
3.1.3.3 – Fusíveis 650V	58
3.1.3.4 – Contactor 28K23 Compressor.....	59
3.1.4 – Plano de manutenção	61
3.2 – AVARIAS DETETADAS AO LONGO DO ESTUDO	63
3.2.1 – Critérios de Avaliação.....	64
3.2.2 – Avarias Detetadas	67
3.2.2.1 – Anomalia no Contactor 52K01.1	67
3.2.2.2 – Anomalia no Contactor 34K03	68
3.2.2.3 - Anomalia na fonte de alimentação do Sibas Klip	69
3.3 ENSAIOS TERMOGRÁFICOS.....	69
3.3.1 Ensaios efetuados.....	73
3.3.2 Exemplos de avarias detetadas	75
3.3.2.1 Linha desapertada	75
3.3.2.2 Falta de alimentação	76
3.3.2.3 Barramento desapertado.....	77
3.4 ANÁLISE QUANTITATIVA DE UMA AVARIA	78
CAPÍTULO 4.....	81
CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	81
4.1 - Conclusões.....	81
4.2 - Trabalho futuro.....	83
REFERÊNCIAS.....	84

Índice de Figuras

Figura 1 - Espectro visível ([2])	18
Figura 2 - Experiência de decomposição da luz solar através de um prisma ([3])	18
Figura 3 - Espectro eletromagnético ([4])	21
Figura 4 - Ilustração do princípio da termografia. ([4])	28
Figura 5 - Termograma com escala de cores ([4])	30
Figura 6 - Termografia noturna e de vigilância. ([11])	34
Figura 7 - Termografia equipamentos mecânicos. ([12])	35
Figura 8 - Termografia de exames médicos. ([13])	36
Figura 9 - Imagens termográficas aplicadas na aeronáutica.	37
Figura 10 - Imagens termográficas aplicadas na aeronáutica. - Imagens termográficas aplicadas na aeronáutica. ([14])	37
Figura 11 - Imagens termográficas aplicadas na construção civil. ([15])	38
Figura 12 - Imagens termográficas aplicadas na Indústria Automóvel. ([16])	40
Figura 13 - Imagens termográficas de componentes eletrônicos. ([17])	41
Figura 14 - Imagens Termográficas de instalações elétricas. ([18])	42
Figura 15 - Comboio e infraestrutura do tipo TGV da Companhia Ferroviária Nacional Francesa onde se recorre à termografia. ([19])	43
Figura 16 - Ensaios termográficos com câmara montada em um vagão. ([19])	44
Figura 17 - Aplicação Sérvia	45
Figura 18 - Montagem no sub-leito	45

Figura 19 - Fluxograma de Manutenção ([21])	48
Figura 20 - Intervalo de tempo para falha. ([20])	50
Figura 21 - Disposição Quadros Eléctricos (CPA 4000)	52
Figura 22 - Infracam SD ([22])	52
Figura 23 - Passos para configuração de câmara termográfica.	54
Figura 24 - Estações Sibas Klip	55
Figura 25 - Termogramas da Estação de Sibas Klip	56
Figura 26 - Contactores	56
Figura 27 - Termogramas dos contactores	57
Figura 28 - Fusíveis 650V	58
Figura 29 - Termogramas dos Fusíveis	59
Figura 30 - Contactor 28K23 Compressor	59
Figura 31 - Termogramas do Contactor 28K23	60
Figura 32 - Relatório Software Flir	63
Figura 33 - Termograma e Foto da Avaria no Contactor 52K01.1	67
Figura 34 - Termograma e Foto da Avaria no Contactor 34K03	68
Figura 35 - Termograma e Foto da avaria da Fonte de Alimentação	69
Figura 36 - Quadros Eléctricos	71
Figura 37 - Barramentos Eléctricos	71
Figura 38 - Central Eletrónica	72
Figura 39 - Exemplo de Esquema Eléctrico	73

Figura 40 - Termograma de Contacto do Contator em Avaria	75
Figura 41 - Termograma do Contacto do Contactor Reparado	76
Figura 42 - Termograma do Transformador em Avaria	76
Figura 43 - Termograma do Transformador Reparado	77
Figura 44 - Termograma do Barramento de 400V em Avaria	77
Figura 45 - Termograma do Barramento de 400V Reparado	78

Siglas e Acrónimos

API - Application Programming Interface

ASCII - American Standard Code for Information Interchange

ASN.1 - Abstract Syntax Notation – One

ASR - Alcatel Service Router

ATM - Asynchronous Transfer Mode

CADREDE - Sistema de Gestão do Cadastro de Rede da PT

COTS - Components Of The Shelf

CPU - Communications Processor Unit

CRC - Cyclic Redundancy Check

CRM - Customer Relationship Management

CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection

DEE – Departamento de Engenharia Electrotécnica

ER - Elemento de Rede

ETOM - Enhanced Telecom Operations Model

FAB - Fulfillment, Assurance & Billing

FCAPS - Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security

FCS - Frame Check Sequence

FIFO - First In First Out

ISEP – Instituto Superior de Engenharia

LMT – Limite Máximo de Temperatura

MEE – Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

NEMA – National Electrical Manufacturers

NETA – International Electrical Testing Association

RCM – Reliability Centered Maintenance

Capítulo 1

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Este relatório traduz o trabalho realizado durante vinte e dois meses (Junho de 2016 a Abril de 2018) na UMAV – Unidade de Manutenção de Alta Velocidade, da empresa EMEF - Empresa de Manutenção de Equipamentos Ferroviários, criada em 1993 como resultado da autonomização da divisão de reparação e reabilitação do material circulante da CP.

Esse trabalho, predominantemente de campo, foi realizado com o intuito de comprovar num estudo aplicado as vantagens da termografia, incentivando e demonstrando a sua aplicação no plano de manutenção da empresa. Este trabalho insere-se no âmbito da disciplina de Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia (MEE - SEE), do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE) do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

O trabalho foi acompanhado no ISEP pelo Professor Doutor Fernando Maurício Teixeira De Sousa Dias.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Assim, o presente trabalho tem como objetivo principal a integração de ensaios termográficos em planos de manutenção industrial. Na realização do presente trabalho, além do objetivo principal foram, estipulados outros objetivos, destacando-se os seguintes:

- Conhecimento da filosofia e dinâmica de trabalho atual com ênfase posterior no futuro – na melhoria contínua estratégica;
- Estudo e definição dos pontos críticos e aplicáveis da termografia na instalação industrial;
- Elaboração de um plano de manutenção com as metodologias termográficas incluídas;
- Recolha de dados através do mecanismo /plano de recolha criado bem como pelo livro de avarias da empresa e dos diversos departamentos;
- Análise e avaliação de avarias recolhidas com base em indicadores estabelecidos;

- Criação e desenvolvimento de uma Base de Dados para compilar o histórico de ocorrências;
- Elaboração modelos quantitativos que permitam prever os impactos de ações (manutenção preditiva) em sistemas com uma taxa de falhas crescente;
- Esforços para a integração da termografia como uma ferramenta efetiva no plano de manutenção.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O trabalho está organizado da seguinte forma: Inicialmente é feita uma pequena introdução e descrição do trabalho abordado, no capítulo 1. Apresentam-se ainda os objetivos a cumprir e a entidade que permitiu a realização do trabalho bem como a duração do trabalho, com especial destaque para o intenso trabalho de campo realizado por aquele extenso período;

No capítulo 2 estão descritos os fundamentos da termografia bem como as aplicações atuais mais frequentes. Aplicação da termografia em planos de manutenção de instalações elétricas

No capítulo 3 damos ênfase às aplicações da termografia em planos de manutenção de instalações elétricas, numa ótica atual e de perspectiva futura.

Neste mesmo capítulo é apresentada a descrição do caso prático bem como da análise e interpretação de resultados obtidos.

O capítulo 4 alberga a conclusão do presente trabalho. Neste capítulo é feito o comentário geral acerca do trabalho realizado com análise dos resultados obtidos, considerando ainda os trabalhos futuros quanto a este tema;

As referências bibliográficas e anexos são o último ponto no presente trabalho.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS FÍSICOS

2.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A radiação eletromagnética tem um carácter dualista: por um lado, a natureza ondulatória associada a fenómenos de propagação, interferência, difração; por outro lado, o efeito fotoelétrico e o efeito de *Compton* admitem o carácter corpuscular da radiação.

A emissão de ondas eletromagnéticas pelos corpos aquecidos é estudada na Física mediante o que denomina-se por radiação de corpo negro, sendo essa descrita pela Lei de Planck. O estudo da radiação térmica de corpos negros apresenta-se na história da Física como o principal fenómeno que levou ao desenvolvimento da mecânica quântica.

A constante de Planck permite relacionar a frequência de fótons incidente com a energia cinética máxima dos fotoelectrões emitidos. Qualquer electrão de um átomo possui um valor de energia necessária para ser removido desse átomo ao qual pertence. O efeito fotoelétrico consiste na emissão de electrões por parte de átomos quando sobre eles incide radiação eletromagnética com energia igual ou superior à(s) energia(s) de remoção característica(s) dos electrões das orbitais electrónicas (menor nos das orbitais mais exteriores que estão menos ligados ao átomo) desse material.

A natureza composta da luz branca foi demonstrada pela primeira vez por Newton, em 1664, quando decompôs a luz solar por meio de um prisma, projetando-a numa tela. A imagem alongada e colorida do Sol foi denominada espectro. A Ilustração 1 ilustra a decomposição referida, enquanto a Ilustração 2 constitui uma fotografia captada em laboratório, replicando a experiência de Newton.

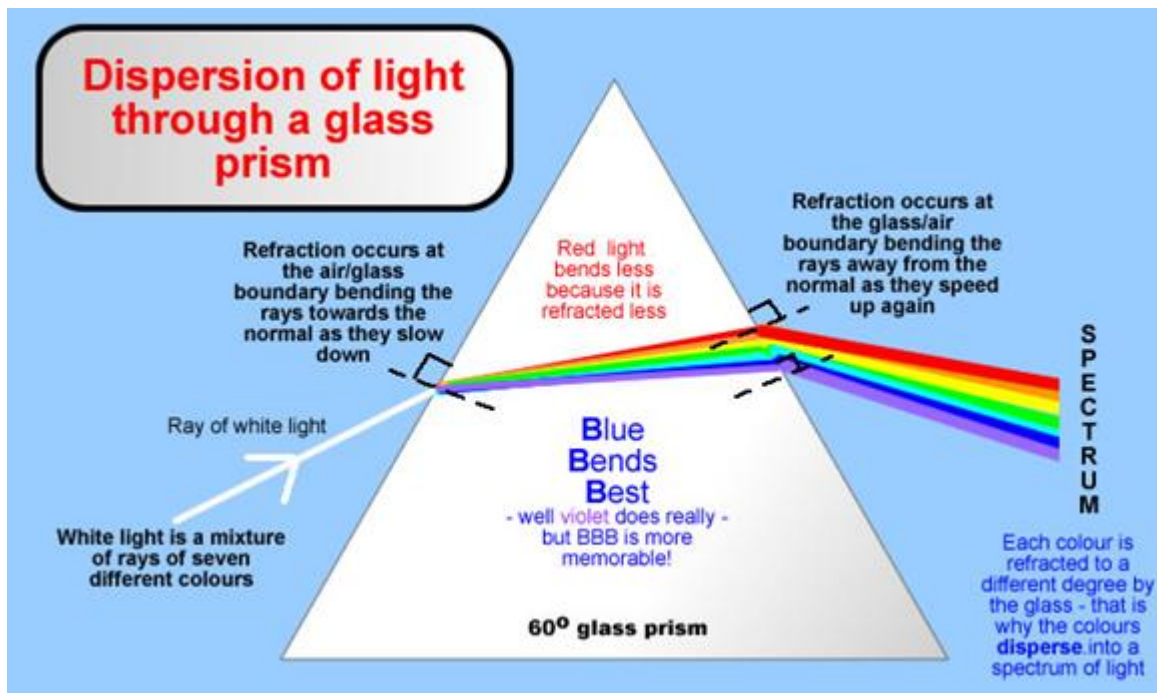


Figura 1 - Espectro visível ([2])

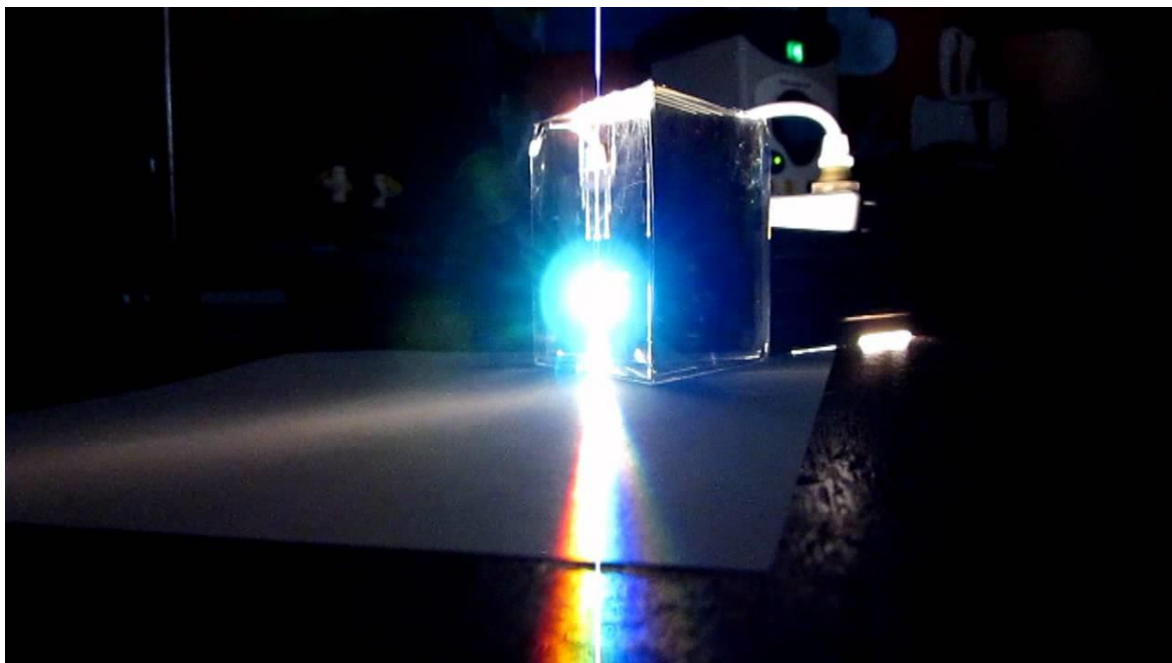


Figura 2 - Experiência de decomposição da luz solar através de um prisma ([3])

Em 1800, o astrónomo alemão naturalizado inglês William Herschel (1738 - 1822) repetiu a experiência de Newton, com a finalidade de descobrir qual das cores do arco-íris daria mais resultado no aquecimento do bulbo de um termómetro. Percebeu que o termómetro era aquecido pelo violeta, pelo azul e pelo vermelho. No entanto, o aquecimento era mais eficaz com o alaranjado e com o vermelho. Finalmente percebeu que o bulbo do termómetro aquecia ainda mais se fosse colocado na região escura que se estende além do extremo vermelho do espectro. Assim foi descoberta a radiação infravermelha.

A radiação eletromagnética infravermelha tem comprimento de onda entre 1 micrómetros e 1000 micrómetros. Ligeiramente mais longa que a luz visível situa-se no espectro entre a luz vermelha e as microondas. Por ser uma onda eletromagnética não necessita de um meio para se propagar, pode deslocar-se no vácuo à velocidade da luz. É assim que o calor viaja do Sol à Terra.

Embora invisível, a radiação infravermelha pode ser percebida pelas suas propriedades de aquecimento. Quando um aquecedor elétrico é ligado, sente-se o calor irradiado antes mesmo que a resistência comece a avermelhar. Se o olho humano fosse sensível a radiação de 10 micrómetros (a faixa de emissão mais comum de corpos à temperatura ambiente), não haveria necessidade de iluminação artificial, pois tudo seria brilhante durante o dia ou a noite. Os seres vivos destacavam-se com nitidez por serem mais quentes e, portanto, mais brilhantes que o ambiente. Apenas os objetos frios ficariam negros. Assim, sem luz artificial, seria difícil descobrir qualquer coisa que estivesse no interior dos frigoríficos. Alguns animais, como por exemplo as cobras, possuem uma "visão" de 10 micrómetros que lhe permite apanhar presas à noite. Esta ciência permite detetar objetos quentes no escuro, apresentando uma mais-valia a nível militar, tendo impulsionado muitas pesquisas sobre sistemas de deteção. Todos os objetos emitem radiação infravermelha. A intensidade da radiação emitida depende de dois fatores: a temperatura do objeto e a capacidade do objeto de emitir radiação. Esta última é conhecida por emissividade. Existe uma lei da Física que diz que todos os materiais com uma temperatura acima do zero absoluto (-273°C) radiam calor. A radiação de calor significa o mesmo que radiação infravermelha. Quanto mais quente está o objeto, maior a radiação. A termografia faz uso da faixa de infravermelho, através do uso de uma câmara radiométrica, usualmente denominadas como câmara termográfica.

A Luz visível é bastante semelhante ao infravermelho de várias maneiras. A luz branca é uma mistura de comprimentos de onda, quando vemos algo azul, é porque o objeto tem a capacidade de refletir mais a parte azul do espectro. ([1])

Assim, diferentes comprimentos de onda são compreendidos pelo olho humano como diferentes cores. As limitações do olho humano são de aproximadamente $0,4 \mu\text{m}$ (violeta) a $0,7 \mu\text{m}$ (vermelho), entre estes dois valores todas as cores são visíveis, tendo a forma do arco-íris.

A Ilustração 3 demonstra alguns comprimentos de onda, para diferentes faixas.

- Visível $0.4-0.7 \mu\text{m}$
- Próximo $0.8-1.7 \mu\text{m}$
- Onda Curta $1-2.5 \mu\text{m}$
- Onda média $2-5 \mu\text{m}$
- Onda Longa $8-14 \mu\text{m}$

As bandas do comprimento de onda não são bem definidas, elas mudam gradualmente e sobrepõem-se. As definições das ondas são baseadas nas características físicas das bandas de frequência a usar. Visível é sempre visível pois é possível vê-lo. Existem variações entre humanos e algumas espécies de animais. Há também várias definições do que significa infravermelho, e há mais do que uma sugestão de denominações para diferentes partes da banda de frequência infravermelha.

A emissão térmica, que é o processo de emissão de radiação devido à temperatura do material, pode ocorrer em qualquer material. Como exemplo dessa emissão podemos citar a luz emitida por uma lâmpada de filamento ou por um pedaço de carvão em brasa. No caso da emissão térmica o comprimento de onda de luz emitida está diretamente relacionado com a temperatura do material. Ao contrário da emissão térmica, a emissão de luz através da luminescência pode ocorrer a baixas temperaturas, como nos casos das lâmpadas de mercúrio e de sódio e da tela de televisão. ([5])

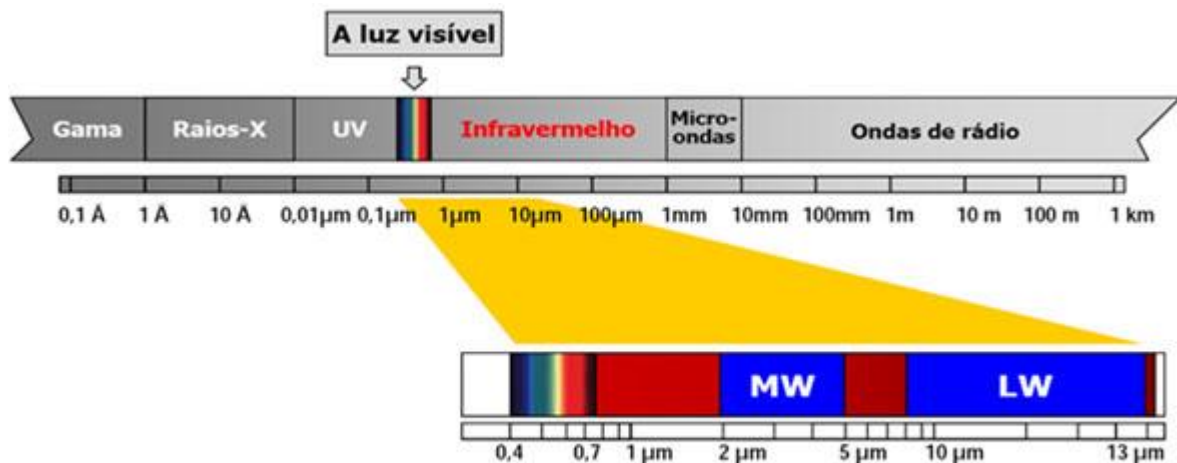


Figura 3 - Espectro eletromagnético ([4])

FENÓMENOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O calor é a energia térmica em transição. Como todas as outras formas de energia, o calor nem pode ser criado nem destruído. Pode, no entanto, ser convertido de e para outras formas de energia como, por exemplo, energia elétrica em bombas de calor, dispositivos termoelétricos e geradores de vapor. Uma fonte de criação de calor (aquecedor elétrico, por exemplo) é, na verdade, um sistema de conversão de energia. O calor é dinâmico, ou seja, ele resiste à estabilidade, fluindo a partir de pontos de maior temperatura para os pontos de temperatura mais baixa. A transferência de calor continuará até que os dois pontos se encontrem à mesma temperatura, encontrando assim um equilíbrio térmico. ([6])

A transferência de calor é quantificada pelo fluxo de calor ou fluxo térmico, que representa uma taxa de energia térmica (calor) transferida através de uma superfície. ([7])

Existem três modos de Transferência de Calor:

- Condução – A transferência de calor dá-se no interior ou entre corpos;
- Convecção – A transferência de calor dá-se entre uma superfície sólida e um fluido.

- Radiação – A transferência de calor dá-se através de ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer através de meios transparentes ou do vácuo. É o único modo de transferência de calor detetado diretamente pelo equipamento de infravermelhos.

Temperatura é diferente de calor e define-se como a medida da velocidade média das moléculas e átomos que formam a substância. A temperatura é um escalar e pode ser medida em °C (Celsius) ou K (Kelvin), no Sistema Internacional de Unidades ([8]). Num determinado espaço, pode definir-se um campo de temperaturas (campo térmico), que é um campo escalar.

2.1.1 – CONDUÇÃO

O processo de condução é simples, estando associado à transferência de calor efetuada ao nível molecular. As partículas mais energéticas (maior temperatura), ao colidir com as partículas contíguas menos energéticas (menor temperatura), transferem parte da sua energia vibracional, rotacional e translacional. O movimento da energia térmica é transmitido ao longo de um átomo para outro. A transferência de calor ocorre em gases, líquidos ou sólidos.

A transferência de calor por condução pode ser avaliada pela sua rapidez, sendo dependente da condutividade térmica do material. Os metais têm alta condutividade térmica, enquanto os isolantes têm baixa condutividade térmica. Outros fatores que afetam a transferência de calor por condução são a diferença de temperaturas, a área de superfície e a qualidade da superfície de contacto. Estes fatores são diretamente proporcionais à rapidez da transferência de calor.

2.1.2 – CONVECÇÃO

O fluxo de calor por convecção ocorre quando, um gás ou um líquido flui ao passar numa superfície sólida, cuja temperatura é diferente da temperatura do fluido. O movimento pode ser provocado por agentes externos, como por exemplo pela atuação de uma ventoinha, ou por diferenças de densidade resultantes do próprio aquecimento do fluido. No primeiro caso, diz-se que a transferência de calor se processa por convecção forçada, enquanto, no segundo,

por convecção natural ou livre. Assim, mesmo que um fluido se encontre em repouso (do ponto de vista macroscópico), a diferença de temperaturas gera diferenças de densidade no seio do fluido que poderão ser suficientes para induzir um movimento ascendente do fluido mais quente (sob a ação da gravidade).

A transferência de calor por convecção pode ser afetada por fatores como a diferença de temperatura entre objeto e fluido, a densidade do fluido, a área da superfície, a velocidade do fluido e a rugosidade da superfície. Quanto maiores forem a diferença de temperatura, a área da superfície e a velocidade do fluido, maior será a taxa de transferência de calor. Em relação à densidade do fluido, uma menor densidade implica uma maior rapidez da transferência de calor. Em relação à rugosidade da superfície, superfícies rugosas diminuem a velocidade do fluido o que implica uma transferência de calor mais lenta.

2.1.3 – RADIAÇÃO

A Radiação térmica é um conceito mais amplo que apenas o de infravermelho.

A radiação térmica é a energia emitida de um dado material, dada a sua temperatura diferente de zero. A radiação térmica está relacionada com a energia libertada devido às oscilações ou transições dos elétrons que constituem os átomos, iões ou moléculas mantidos pela energia interna do material. Toda a forma de matéria com temperatura acima do zero absoluto emite energia por radiação. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas através do espaço vazio. A transferência de energia por condução ou convecção exige a presença de um meio material, ao contrário da radiação, que ocorre de um modo mais eficiente no vácuo. ([8])

A radiação tem a capacidade de transferência de calor através da emissão e absorção. Não é só a radiação infravermelha que é capaz de transferir energia térmica. Na verdade, a radiação do sol tem maior intensidade na parte visível do espectro. A radiação térmica ocorre na parte do espectro eletromagnético que começa dentro da faixa ultravioleta, e continua durante todas as bandas de frequência visível e infravermelha.

É muito difícil encontrar números exatos para definir onde começa e termina a radiação térmica. Podemos constatar a existência da radiação térmica ao aproximarmos-nos de uma brasa incandescente. Mesmo se o ar ao nosso redor estiver frio, sentimos um aquecimento da nossa pele. Nesta situação, a maior parte do calor que nos atinge não se propaga por convecção no ar, e sim na forma de radiação eletromagnética.

Também percebemos esta radiação na cor avermelhada adquirida pelo carvão ao queimar. O carvão é normalmente preto, ou seja não reflete a luz, mas ao alcançar uma temperatura suficientemente alta, passa a emitir na parte visível do espectro uma quantidade de radiação suficiente para observação. Se observarmos o aquecimento de um pedaço de ferro com uma fonte intensa de calor, por exemplo uma forja, poderemos notar, além do rápido aumento com a temperatura da quantidade de radiação emitida, uma modificação na cor do objeto: após tornar-se vermelho, o objeto passará a adquirir uma cor branca ou até azulada. Isto indica que a distribuição da radiação em comprimento de onda desloca-se com o aumento da temperatura para valores menores. Equivalentemente, a distribuição da radiação em frequência desloca-se para valores maiores.

O facto de existir uma correlação entre temperatura e emissão de radiação não é em si surpreendente. Afinal, de acordo com a visão corpuscular da matéria, temperatura é uma medida da agitação randômica das partículas. Como as partículas que constituem a matéria possuem cargas e cargas em movimento acelerado emitem radiação, o fenómeno de radiação térmica é qualitativamente entendível na luz da teoria clássica.

Existem alguns fatores que afetam a transferência de calor por radiação. Quanto uma maior diferença de temperaturas entre objetos implica maior rapidez de transferência de calor, a mesma pode ser diminuída por fatores atmosféricos (humidade, CO₂, e partículas). Uma menor distância ao corpo quente e uma maior emissividade do objeto implicam maior rapidez de transferência de calor.

Seguem ainda alguns conceitos essenciais e complementares que estão associados a este tipo de radiação, e que por sua vez servem de base para a formação e compreensão das imagens termográficas:

Emissividade - A emissividade mede a capacidade de um objeto emitir a energia infravermelha. A emissividade varia desde 0 (espelho) até 1,0 (corpo negro). Grande parte das superfícies revestidas ou oxidadas possuem emissividade de 0,95.

A seguir é apresentado o valor de Emissividade típico de alguns materiais:

- Alumínio Bruto: $\varepsilon=0,68$;
- Alumínio Oxidado: $\varepsilon=0,85$;
- Alumínio Polido: $\varepsilon=0,1$;
- Plástico Branco: $\varepsilon=0,84$;
- Plástico Negro: $\varepsilon=0,95$;
- Plástico Branco: $\varepsilon=0,84$;
- Óxido de Cobre: $\varepsilon=0,78$;
- Óxido de Ferro: $\varepsilon=0,78$ a $0,82$;
- Tecidos: $\varepsilon=0,90$;

Para uma avaliação do poder emissivo de uma superfície, tem que se explicar o conceito do corpo negro. Um corpo negro é um corpo capaz de absorver toda a radiação incidente, independentemente do comprimento de onda e direção da radiação. Para uma determinada temperatura e comprimento de onda, não existe nenhuma superfície capaz de emitir mais energia que um corpo negro. Apesar da emissão de radiação ser em função da temperatura e comprimento de onda, é independente da sua direção, ou seja, é um emissor difuso. Um corpo negro representa um sistema físico que, em equilíbrio térmico, possui a capacidade máxima de emitir e de absorver toda a energia recebida por radiação, ou seja, considera-se teoricamente um emissor perfeito. ([8])

Varição da emissividade com o ângulo de visão - A emissividade de uma superfície diminui quando o ângulo de visão aumenta, em relação à sua normal. Medidas exatas só podem ser efetuadas com um ângulo menor que 30° . Nas medidas efetuadas com um ângulo entre 30° e 60° , introduz-se um erro moderado na medição da radiação infravermelha. Quando o ângulo é maior que os 60° ocorrem grandes erros na medição da radiação infravermelha.

Varição da emissividade com a temperatura do objeto - Os metais têm uma emissividade total pouco elevada, que aumenta com o aumento da temperatura do metal. Um

aumento de temperatura corresponde à redução da condutividade elétrica devido ao movimento térmico da estrutura molecular, que produz um aumento da emissividade.

Variação da emissividade com a condição e forma de uma superfície - A emissividade depende consideravelmente do estado da superfície do material, como se pode comprovar nos metais. O nível de oxidação de um metal faz variar a sua emissividade. Quanto mais baixo for o nível de oxidação, mais baixa será a sua emissividade, como, por exemplo, em metais polidos. Quando aumenta o nível de oxidação, também aumenta a emissividade desse material. A geometria da superfície também influencia a quantidade de energia emitida por um objeto. As alterações de forma de um objeto causam variações na emissividade. Formas côncavas aumentam o valor da emissividade, enquanto formas convexas diminuem o valor da emissividade. Sendo assim, cabos, tubos e veios emitem uma menor quantidade de energia na zona exterior, pelo que as câmaras termográficas apresentam uma diferença de temperaturas nas zonas exteriores, surgindo assim um erro de medição. Cada vez que um feixe de luz é refletido, a sua intensidade é reduzida pela refletividade de uma superfície.

2.2 TÉCNICAS TERMOGRÁFICAS E SUAS APLICAÇÕES

Para uma correta compreensão e análise de imagens termográficas (termogramas), apresentaram-se e descreveram-se os principais conceitos associados à radiação eletromagnética e aos fenómenos de transmissão de calor, nomeadamente a associada à radiação.

Como vimos, o espectro eletromagnético é o intervalo de todas as frequências da radiação eletromagnética. O espectro eletromagnético de um objeto é a distribuição característica da radiação eletromagnética emitida ou absorvida por esse objeto em particular, estando dividido em vários campos. A luz visível encontra-se após a radiação ultravioleta, entre os comprimentos de onda de $0,4\mu\text{m}$ e os $0,7\mu\text{m}$.

A partir deste valor entra-se na gama dos raios infravermelhos, estando dividida em três principais zonas, a zona Near-Infrared (NIR) ($0,7$ a $2\mu\text{m}$), Mid-wavelength Infrared (MIR) (2 a $4\mu\text{m}$) e Far-Infrared (FIR) (4 a $1000\mu\text{m}$). Depois destes encontram-se as microondas. Existem dois grandes tipos de sistemas de visão infravermelha utilizados em sistemas de

deteção e seguimento de vídeo que funcionam em gamas distintas do espectro, um funciona na gama NIR e outro na FIR. Cada um com as suas vantagens e desvantagens que serão descritas de seguida:

- *Near-Infrared*

Para o funcionamento das câmaras infravermelhas é necessária a existência de uma fonte de raios infravermelhos própria. Os raios emitidos pela fonte são depois refletidos pelos objetos e é criada a imagem infravermelha. Este tipo de câmaras tem um consumo elevado de energia pois a fonte necessita de estar ligada para a aquisição das imagens, no entanto consegue-se facilmente distinguir o tipo de objetos presentes na imagem (Fig. 3).

As aplicações típicas destas câmaras passam pela vigilância em locais de acesso restrito, parques de estacionamento, e também pela monitorização de tráfego.

- *Far-Infrared*

As imagens na gama FIR são também conhecidas como imagens térmicas. Estas câmaras absorvem as radiações emitidas pelos objetos e traduzem-nas numa imagem que pode ser a cores ou em escala de cinzento, onde cada intensidade corresponde a uma temperatura (Fig. 4). Segundo a lei de Stefan-Boltzmann, deduzida em 1879, a energia irradiada por um corpo negro é proporcional à sua temperatura absoluta e é dada por $E = \sigma \cdot T^4$, onde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ é a constante de Stefan-Boltzmann, sendo T a temperatura absoluta do corpo em Kelvin. Considerando que os objetos não são radiadores ideais, esta lei expressa-se na forma $E = \epsilon \sigma \cdot T^4$, onde ϵ é a emissividade do objecto ($\epsilon=1$ para radiadores ideais).

Pelo facto de estas câmaras captarem as radiações que são emitidas pelos objetos não necessitam de uma fonte própria de raios infravermelhos. Isto permite que o consumo de energia tenha valores reduzidos. As imagens resultantes têm pouca resolução e não se distingue facilmente todos os objetos que fazem parte da imagem, têm a vantagem de ser possível ver através de materiais como plástico, poeira, fumo, etc. No entanto, quanto maior for a distância ao objecto, menor é a qualidade da captação.

São tipicamente utilizadas como complemento a imagens infravermelhas e também em cenários de vigilância em locais de escuridão total ou com luzes brilhantes, uma vez que são imunes às condições de iluminação.

Termografia é a técnica que estende a visão humana através do espectro infravermelho. A vibração de campos elétricos e magnéticos que se propagam no espaço à velocidade da luz, gera uma onda eletromagnética, e o conjunto de ondas eletromagnéticas formam o espectro eletromagnético. O infravermelho é uma frequência eletromagnética naturalmente emitida por qualquer corpo, com intensidade proporcional à sua temperatura. A termografia hoje tem um papel muito importante na área de manutenção preventiva. Através da sua utilização, é possível eliminar muitos problemas de produção, evitando falhas elétricas, mecânicas e fadiga de materiais.

A termografia utiliza a transmissão de calor por radiação, nomeadamente a infravermelha, como variável relacionada com a temperatura, que é possível medir com um equipamento termográfico, como podemos ver na Figura 4.

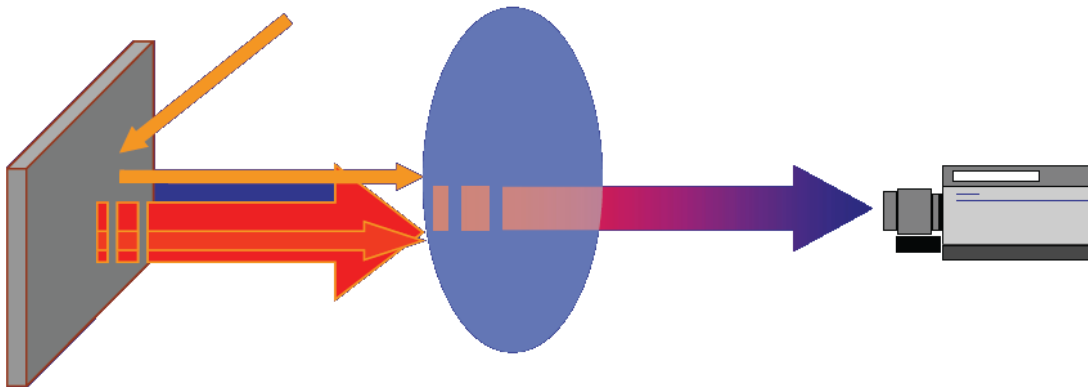


Figura 4 - Ilustração do princípio da termografia. ([4])

Complementando os conceitos teóricos apresentados, indica-se a **Lei de Stephan-Boltzmann** que relaciona temperatura e energia, como equação essencial na fundamentação e compreensão dos princípios subjacentes à termografia.

Estabelece que a quantidade de calor transferido por radiação, por unidade de área de superfície de um corpo negro, na unidade de tempo (radiação do corpo negro), é diretamente proporcional à quarta potência da sua temperatura:

$$W = \sigma \varepsilon T^4$$

- W : Radiação total emitida [W/m^4]
- σ : constante de Boltzman [$5.8 * 10^{-8} W m^{-2}K^{-4}$]
- ε : emissividade [K]

Observando a equação de Stephan-Boltzmann, temos que a energia total radiada por unidade de área superficial de um corpo negro na unidade de tempo (radiação do corpo negro), (ou a densidade de fluxo energético (fluxo radiante) ou potencia emissora), é diretamente proporcional à quarta potência da sua temperatura termodinâmica T . Assim, além da constante surge a emissividade ε como variável importante no estabelecimento desta relação – valor relacionado com o material em causa. As câmaras termográficas atuais possuem a possibilidade de ajuste de emissividade, que pode ser selecionada antes da medição, corrigindo automaticamente os valores da temperatura de acordo com as características da superfície medida. Os aparelhos que não possuem este ajuste necessitam que a superfície medida seja revestida com um produto opaco antes da medição ou através do uso de uma tabela de correção.

Uma câmara termográfica não mede apenas a radiação emitida a partir de um objeto, como também mede a radiação do ambiente refletida através da superfície de um objeto. Ambas as radiações esbatem-se no meio de transmissão, existindo também uma radiação da atmosfera.

Todos os objetos com uma temperatura superior ao zero absoluto podem ser vistos às escuras através de câmaras termográficas, uma vez que emitem radiações infravermelhas. Quanto maior for a temperatura do objeto, maior será a quantidade de radiação infravermelha por ele emitida. Os infravermelhos podem ser representados de forma visível através de termogramas, onde as diferentes temperaturas da superfície do objeto são apresentadas com diferentes cores, numa escala escolhida pelo utilizador.

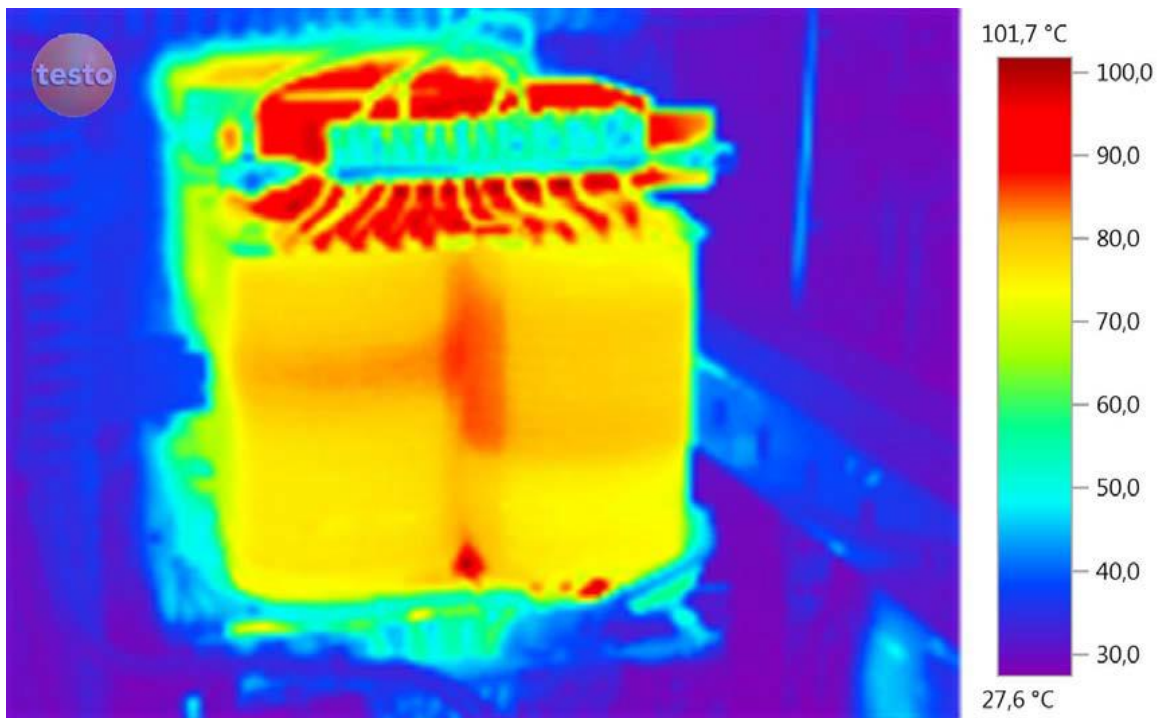


Figura 5 - Termograma com escala de cores ([4])

Uma das suas vantagens é a falta de contacto com o corpo a analisar, é uma técnica sem contacto de deteção da distribuição de energia térmica emitida pela superfície de um ou vários corpos ou objetos, por radiação. É um método não invasivo, capaz de detetar, visualizar e gravar diferentes níveis de distribuição de temperatura através da superfície de um objeto. A termografia sem contacto permite o estudo da temperatura dos corpos, através da radiação infravermelha emitida pelos mesmos usando uma câmara radiométrica ([9]). Na maioria dos processos e atividades industriais, o parâmetro temperatura é muito importante. Uma câmara radiométrica é uma câmara térmica com capacidade de medir temperaturas apresentando algumas vantagens em relação aos outros sistemas de medição de temperatura, nomeadamente aos que usam técnicas de contacto ([8]) ([10]):

- Fácil medição da temperatura de objetos móveis e de difícil acesso;
- Técnica sem contacto, não interferindo com o funcionamento e com o comportamento do elemento a medir;

- Mantêm o utilizador fora de perigo, um exemplo importante é a manutenção de aplicações elétricas, porque quando os componentes se encontram em carga não deveram ser tocados, no entanto caso estes componentes não estejam em carga não haverá aumento de temperatura e daí o exame não funcionará, outro exemplo é equipamentos em movimento ou rotação.
- Facilidade e rapidez na medição de grandes superfícies;
- Medição da temperatura de vários objetos de forma simultânea;
- Tempo rápido de resposta, permitindo seguir fenómenos transitórios de temperatura;
- Precisão elevada, alta repetibilidade e fiabilidade das medições.

O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas levou ao aparecimento de vários equipamentos usados nas mais diversas áreas, como se verá no próximo capítulo. Esses equipamentos fazem uso de todas as gamas espectrais do espectro eletromagnético, tais como equipamentos de esterilização (raios gama), raios X para auxílio de diagnóstico médico, lâmpadas de “luz negra” (radiação ultravioleta), forno de micro-ondas, redes sem fio *bluetooth* e WIFI (micro-ondas), estações de radiodifusão, serviços de comunicação aérea ou marítima (ondas rádio).

2.2.1 APLICAÇÕES DE TERMOGRAFIA

A termografia é aplicável em qualquer situação onde o conhecimento do padrão térmico através de uma superfície forneça dados significativos de uma estrutura, processo ou sistema, nomeadamente ([8]):

- Sistemas Elétricos;
- Sistemas Mecânicos;
- Sistemas de Fluidos e Vapor;
- Indústria Automóvel;

- Indústria de processo;
- Perdas de Energia (Edifícios, Fornos e Caldeiras);
- Eletrônica;
- Aeronáutica;
- Vigilância e Segurança;
- Aplicações Médicas: Medicina e Medicina Veterinária;
- (etc.).

É uma ferramenta com forte implementação em Manutenção Preditiva, Manutenção Preventiva, Manutenção Condicionada, Garantia da Qualidade e Forenses e pode ser usada, com vantagens, em fase de desenvolvimento de novos produtos onde a temperatura seja uma variável crítica. Refira-se que a existência de limites de temperatura de operação para diversos produtos, potencia a utilização de aparelhos de medição facilitada dos corpos. A evolução dos equipamentos de aquisição de imagens termográficas coloca a termografia como elemento de manutenção em destaque.

De uma forma sucinta, indicam-se e descrevem-se as principais áreas e aplicações da termografia a seguir, com especial destaque para a relacionada com a monitorização e manutenção de instalações elétricas e infraestruturas ferroviárias.

2.2.1.1 Visão noturna e vigilância

As missões de vigilância e de segurança estão cada vez mais a aumentar, com o recurso a câmaras termográficas é possível aumentar a capacidade de resposta.

Utilizadas desde longa data pelos exércitos, patrulhas fronteiriças e outras agências governamentais ou relacionadas, as câmaras térmicas têm-se assumido cada vez mais como uma mais-valia para proteger valiosos recursos e pessoal.

O terrorismo, o vandalismo e a violência aleatória ameaçam a segurança do pessoal e a integridade das instalações públicas e privadas. Um programa abrangente de segurança que utiliza câmaras de imagens térmicas é útil para a proteção de ativos e mitigação de riscos. As imagens térmicas expõem ameaças escondidas na escuridão, ocultas por condições climáticas adversas, poeira, nevoeiro e fumaça.

A principal tarefa dos profissionais de busca e resgate é encontrar pessoas que estão em perigo, perdidas, doentes ou feridas. Ou em uma área remota ou de difícil acesso, como montanhas, deserto ou floresta ou no mar, perto da costa ou não. Frequentemente, quando disponível, o suporte aéreo tem sido usado - câmaras de imagens térmicas são acopladas em aeronaves que voam sobre a cena a ser pesquisada. O sensor térmico deteta a atividade humana em áreas de forma remota para que a vítima possa ser encontrada antes que seja tarde demais. Uma câmara termográfica pode fazer isso nas noites mais escuras, em terra, no ar ou no mar.

De uma forma resumida temos então as seguintes aplicações atuais nesta área:

- Visão Noturna;
- Vigilância Aérea;
- Combate a incêndios;
- Controlo de tráfego marítimo;
- Visão através do fumo e nevoeiro.

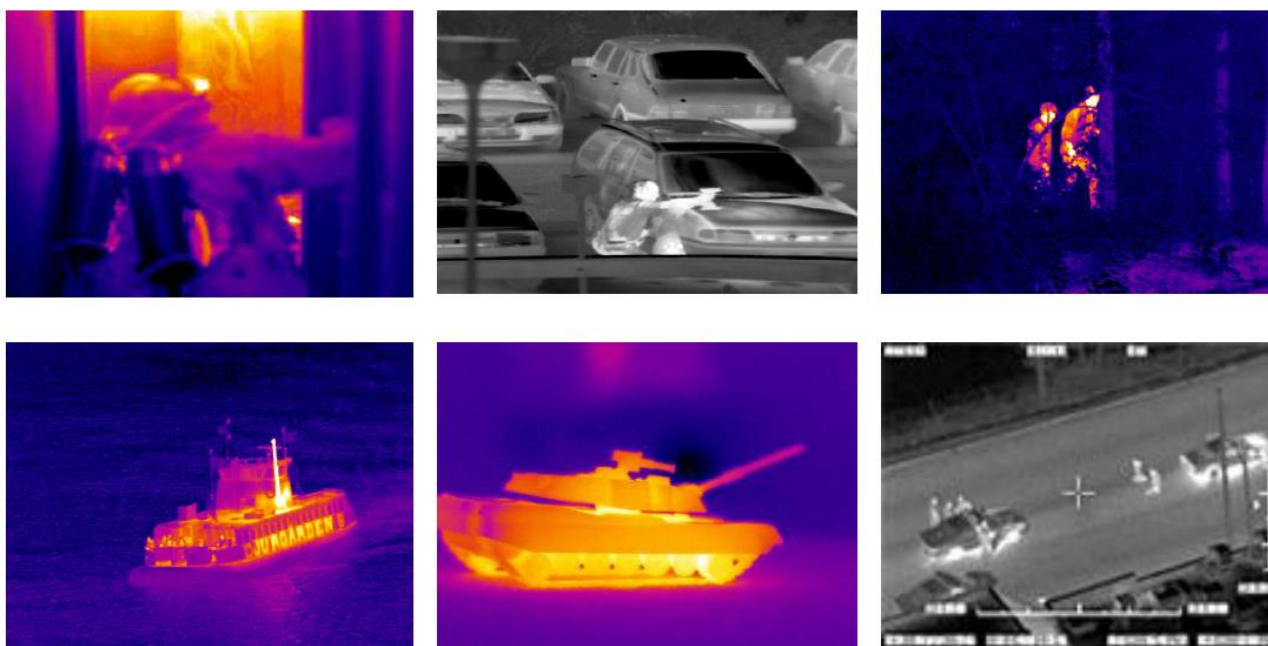


Figura 6 - Termografia noturna e de vigilância. ([11])

2.2.1.2 Dispositivos mecânicos

Cada vez mais com a evolução tecnológica temos cada vez mais equipamentos mecânicos sujeitos a enormes esforços gerando elevadas quantidades de energia térmica, com recurso à termografia é facilitado o estudo e desenvolvimento de novos materiais.

Com recurso a esta tecnologia torna-se fácil a deteção de sobreaquecimentos de equipamentos mecânicos que poderá levar à de gripagem de equipamentos (rolamentos, casquilhos), diminuindo os custos de reparação.

- Análise de aquecimentos de chumaceiras;
- Deteção de aquecimentos por fricção;
- Estudo de aquecimento das escovas;
- Determinação do estado das escovas;
- Determinação do estado dos enrolamentos.

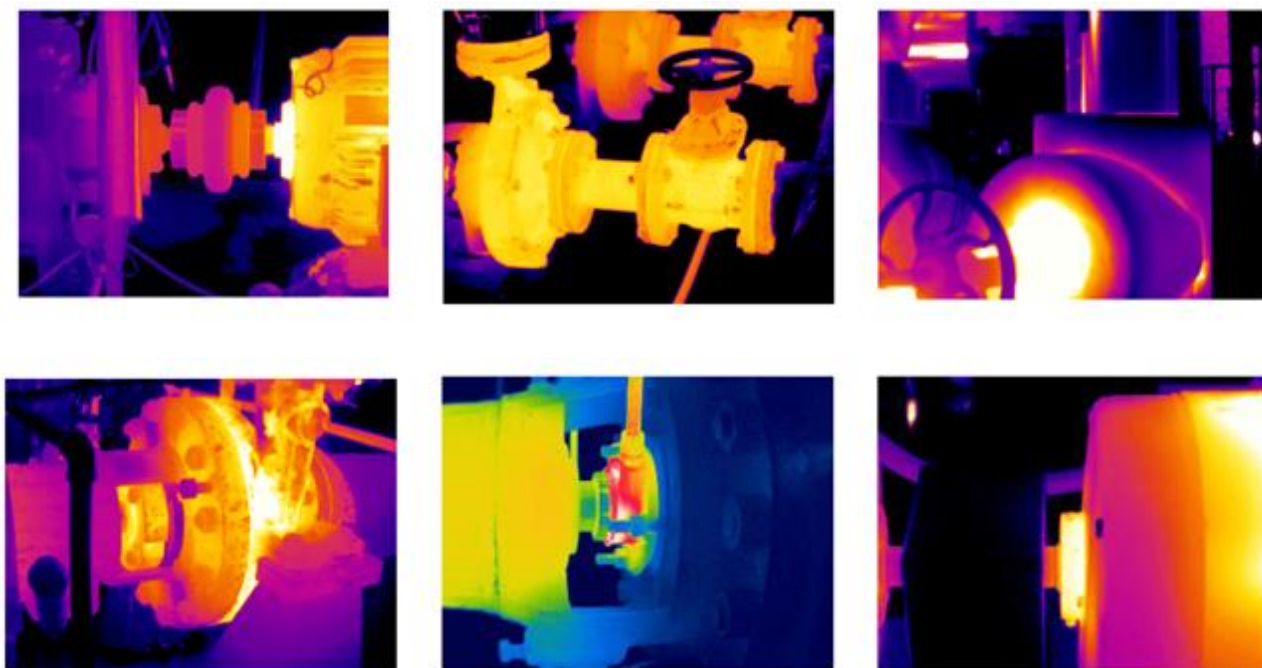


Figura 7 - Termografia equipamentos mecânicos. ([12])

2.2.1.3 Medicina

Na medicina, a termografia é uma técnica de registro gráfico das temperaturas da superfície da pele que utiliza uma câmara termográfica de alto desempenho. O aparelho deteta a radiação infravermelha (calor) emitida pelo corpo, podendo refletir uma fisiologia normal ou anormal. Uma cor é atribuída baseada na temperatura registrada naquela parte da pele.

Pela capacidade de identificar a origem da dor, é muito valiosa no diagnóstico, tratamento e monitorização do cancro, processos inflamatórios, fibromialgia, disfunções vasculares e lesões neuro-músculo-esqueléticas (hérnias, lesões em chicote, lesões musculares etc.).

- Determinação de problemas circulatórios;
- Localização de infeções ocultas;
- Análise de danos musculares;
- Estudo de problemas de locomoção;
- Medicina veterinária.

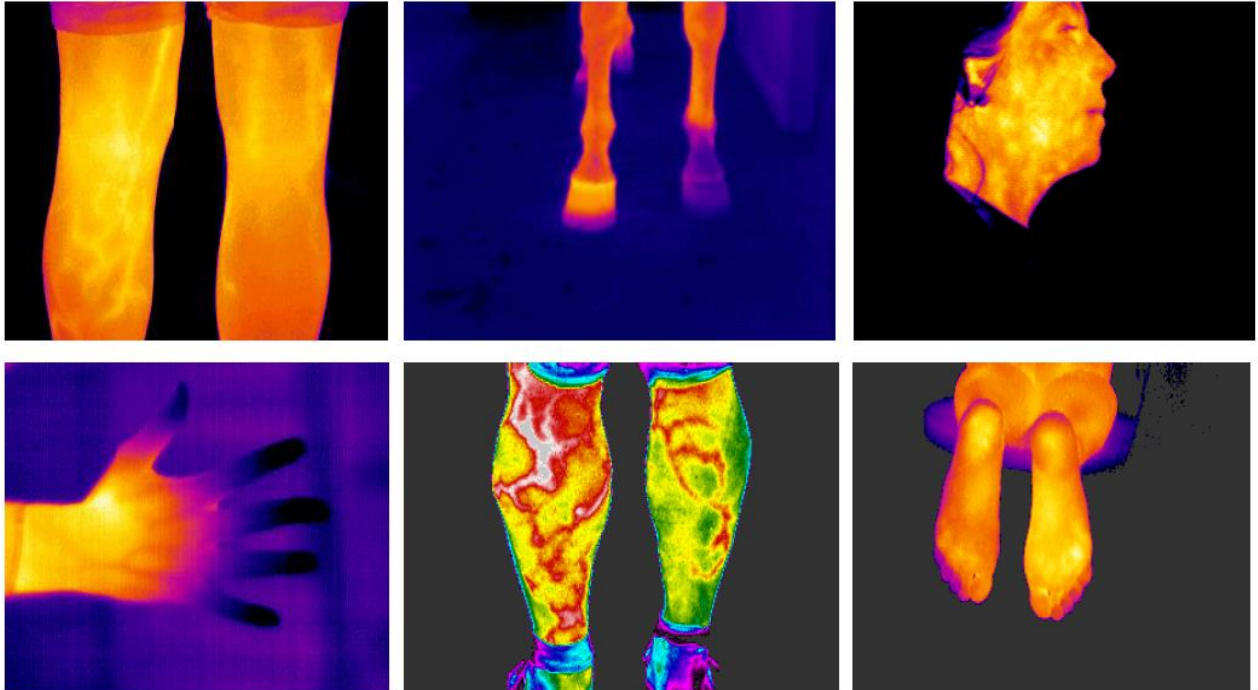


Figura 8 - Termografia de exames médicos. ([13])

2.2.1.4 Aeronáutica

Na indústria aeronáutica é utilizada no ensaio de materiais compostos para se detetar dupla laminação ou outros tipos de ruturas. Pontos quentes assim como falhas de coesão em componentes elétricos e eletrônicos podem ser determinados através da termografia.

- Análise do comportamento térmico de pás;
- Caracterização térmica de reatores;
- Localização de infiltrações de água;
- Estudos em túnel de vento.

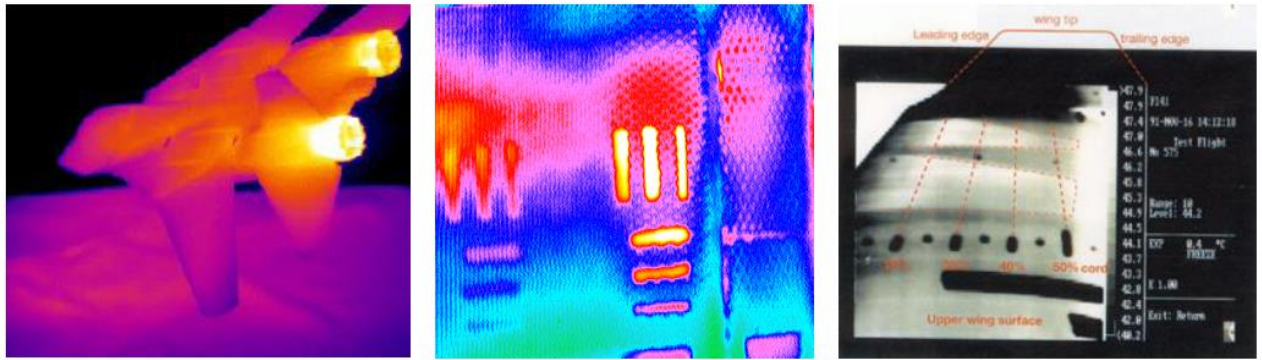


Figura 9 - Imagens termográficas aplicadas na aeronáutica. ([14])

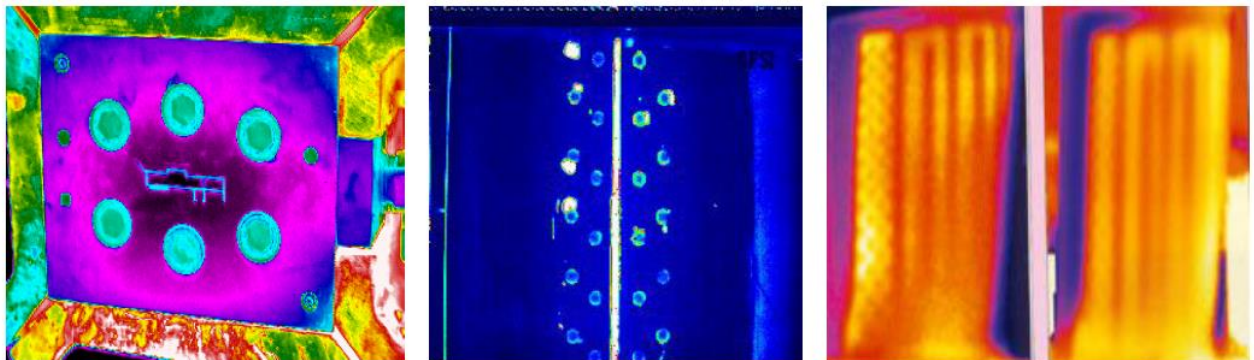


Figura 10 - Imagens termográficas aplicadas na aeronáutica. - Imagens termográficas aplicadas na aeronáutica. ([14])

2.2.1.4 Construção Civil

A análise termográfica de um edifício procura detetar a existência de incoerências nos padrões de temperatura dos elementos da construção, quando analisados nas mesmas condições. A ocorrência de diferenças nos padrões de temperatura indicia a existência de problemas.

As câmaras termográficas de infravermelhos permitem-nos, num exame não destrutivo, detetar e localizar problemas tão diversos como infiltrações em paredes e coberturas, falta de isolamento térmico em fachadas e coberturas, roturas em tanques, depósitos, em canalizações de água e em sistemas de ar condicionado; identificar o traçado de tubagens e a localização e dimensões de elementos estruturais embebidos em paredes; detetar a

existência de colónias de insetos no interior de elementos de madeira da construção; analisar o sistema e equipamentos elétricos.

A termografia é hoje reconhecida como uma técnica de análise de edifícios rápida, económica e extremamente potente.

- Localização de fugas caloríficas;
- Estudo de perdas energéticas através de paredes;
- Detecção de problemas de isolamento;
- Localização de humidades internas.

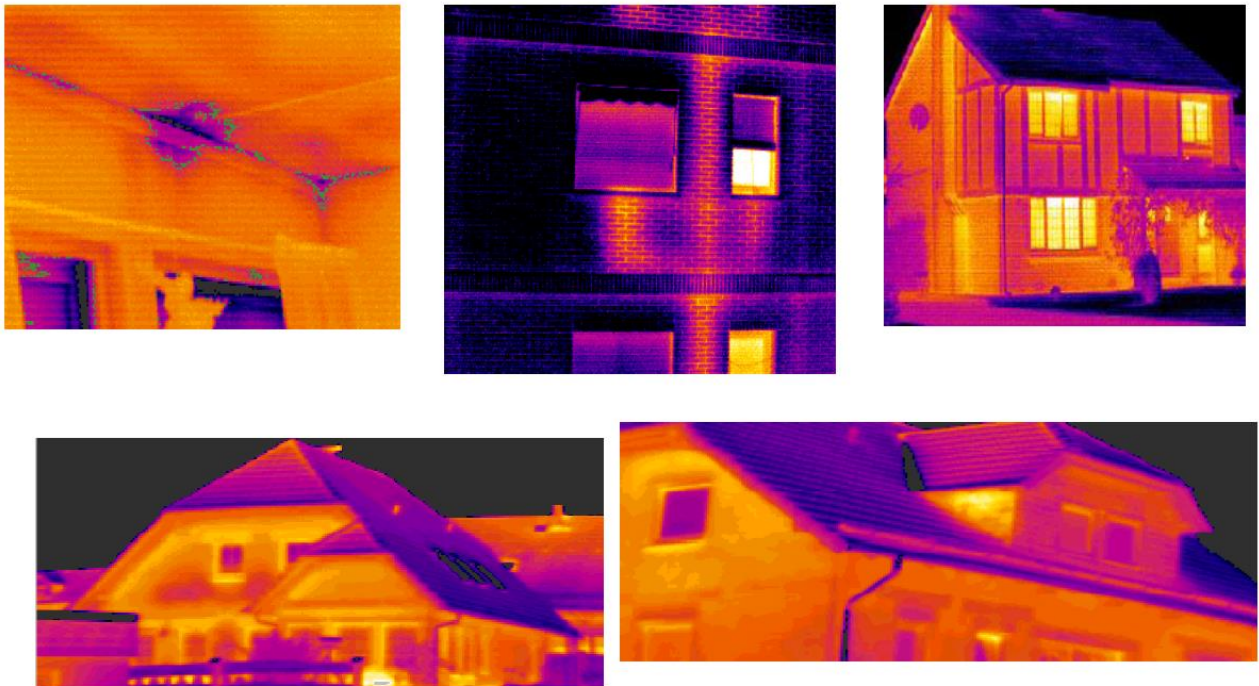


Figura 11 - Imagens termográficas aplicadas na construção civil. ([15])

2.2.1.5 Indústria Automóvel

Na indústria automóvel manter um alto nível de lucro é sinónimo de manter a eficiência do equipamento, garantir a qualidade, a funcionalidade do que foi projetado e definido e a confiabilidade a longo prazo. Isto é particularmente verdadeiro para a indústria automóvel.

A maioria das partes de um veículo têm alterações de temperatura durante o seu funcionamento, conhecer e/ou controlar estas temperaturas é extremamente importante na fase de desenvolvimento destas partes.

A termografia na área automóvel permite investigar e melhorar o design de: pneus, travões, placas eletrónicas, iluminação, eficiência no ar condicionado, motores, bancos aquecidos, instalação e motores elétricos e muito mais.

As principais aplicações da termografia atuais e em potencialidade são:

- Análise das características térmicas de motores;
- Estudo do aquecimento dos travões;
- Controlo dos sistemas de descongelação;
- Análise de aquecimento dos faróis;
- Verificação de temperaturas em pneus.

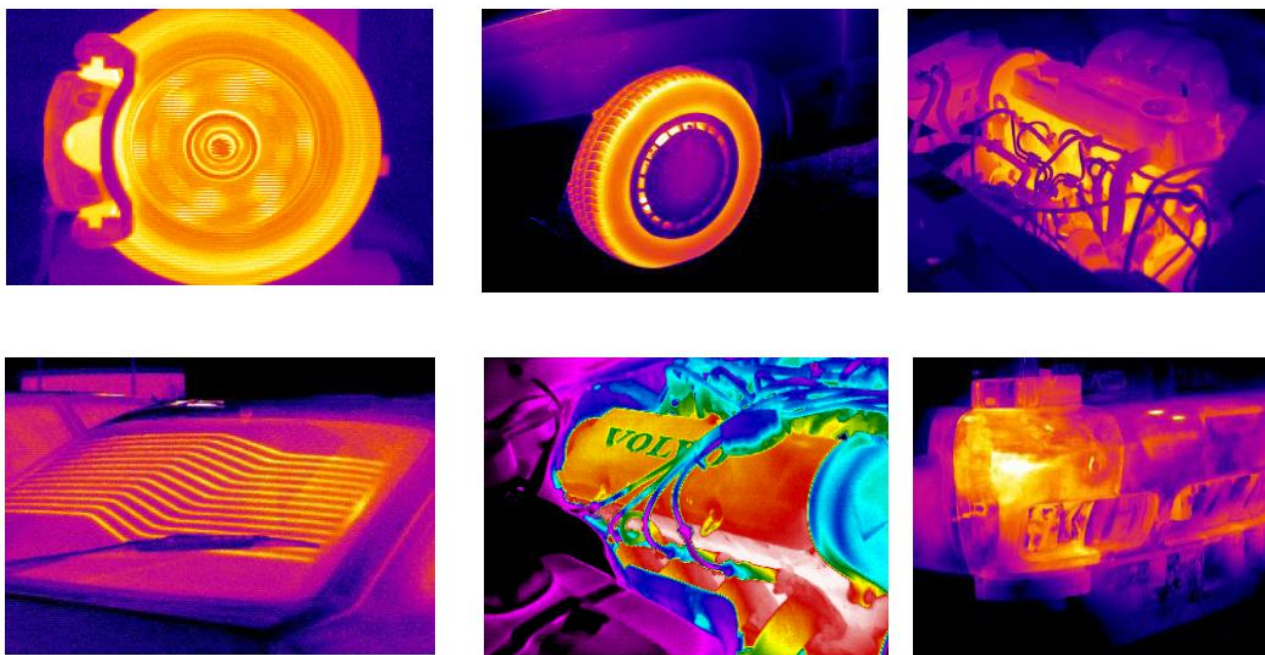


Figura 12 - Imagens termográficas aplicadas na Indústria Automóvel. ([16])

2.2.1.6 Eletrónica

No campo da investigação e do desenvolvimento, as câmaras termográficas também são utilizadas para a análise da distribuição da temperatura, por exemplo, em placas de circuitos. Os componentes eletrónicos das placas de circuitos são cada vez mais pequenos, e isso aumenta a dificuldade em relação à dissipação de calor. Apenas as câmaras termográficas de qualidade excepcional com uma resolução geométrica realmente fina são adequadas para enfrentar esta tarefa. A análise do comportamento do aquecimento e refrigeração durante um período de tempo também é útil para a otimização dos circuitos.

- Distribuição de temperatura em circuitos impressos;
- Análise térmica de placas de circuito impresso;
- Inspeção e qualidade das placas;
- Detecção e localização de curto-circuitos;
- Controlo de especificações na receção de componentes.

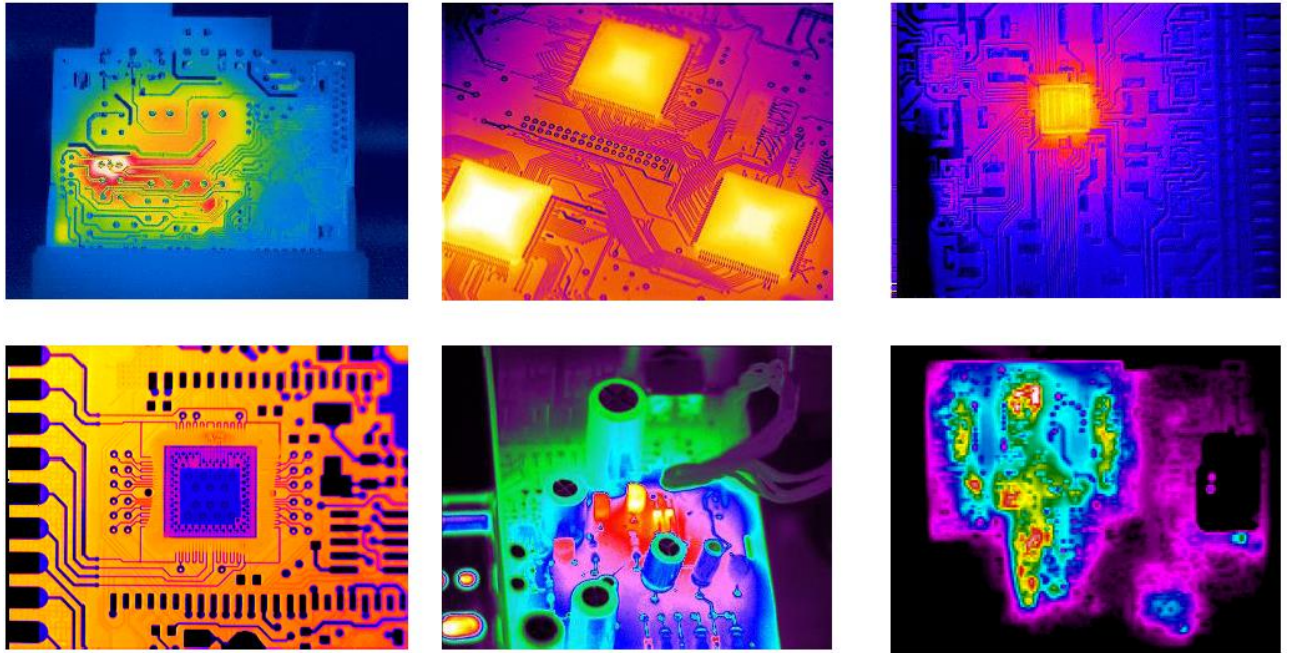


Figura 13 - Imagens termográficas de componentes eletrônicos. ([17])

2.2.1.7 Instalações Elétricas

Circuitos elétricos em funcionamento geram calor devido à sua resistência elétrica. A quantidade de calor gerada está relacionada à quantidade de corrente que circula pelo sistema e à resistência dos componentes e ligações. Conforme os componentes se vão deteriorando a sua resistência à passagem da corrente elétrica aumenta, causando um aumento de temperatura. Da mesma forma que um mau contacto numa ligação elétrica terá maior resistência do que uma ligação com bom contacto. A termografia pode ser usada para detetar essas diferenças de temperatura.

Estima-se que uma percentagem significativa de incêndios em instalações elétricas, nomeadamente do tipo industrial, estão relacionadas a falhas no sistema elétrico, como falha de isolamento elétrico, terminais e componentes relacionados. Além disso, as falhas podem causar a exposição dos funcionários a circuitos elétricos ativos, tornando-os suscetíveis a ferimentos graves ou morte por eletrocussão.

Vantagens para detetar e reparar de forma precoce essas falhas são as economias de custos decorrentes da conservação de energia e menores custos de reparos e interrupção. De notar

que a alta resistência nos circuitos provoca um aumento no fluxo de corrente. Quando o fluxo de corrente aumenta, o consumo de energia resultante aumenta igualmente. Além disso, o consumo de corrente alta pode causar a falha prematura de componentes críticos do circuito elétrico, como fusíveis, disjuntores e transformadores. Essas falhas resultam em custos mais elevados de manutenção e reparações e em indisponibilidade de equipamento.

- Localização de sobreaquecimentos nos contactos e conexões dos disjuntores e contactores;
- Detecção de aquecimentos em bornes de transformadores;
- Estudo dos radiadores de refrigeração dos transformadores para localização de obstruções;
- Detecção de conexões mal apertadas.

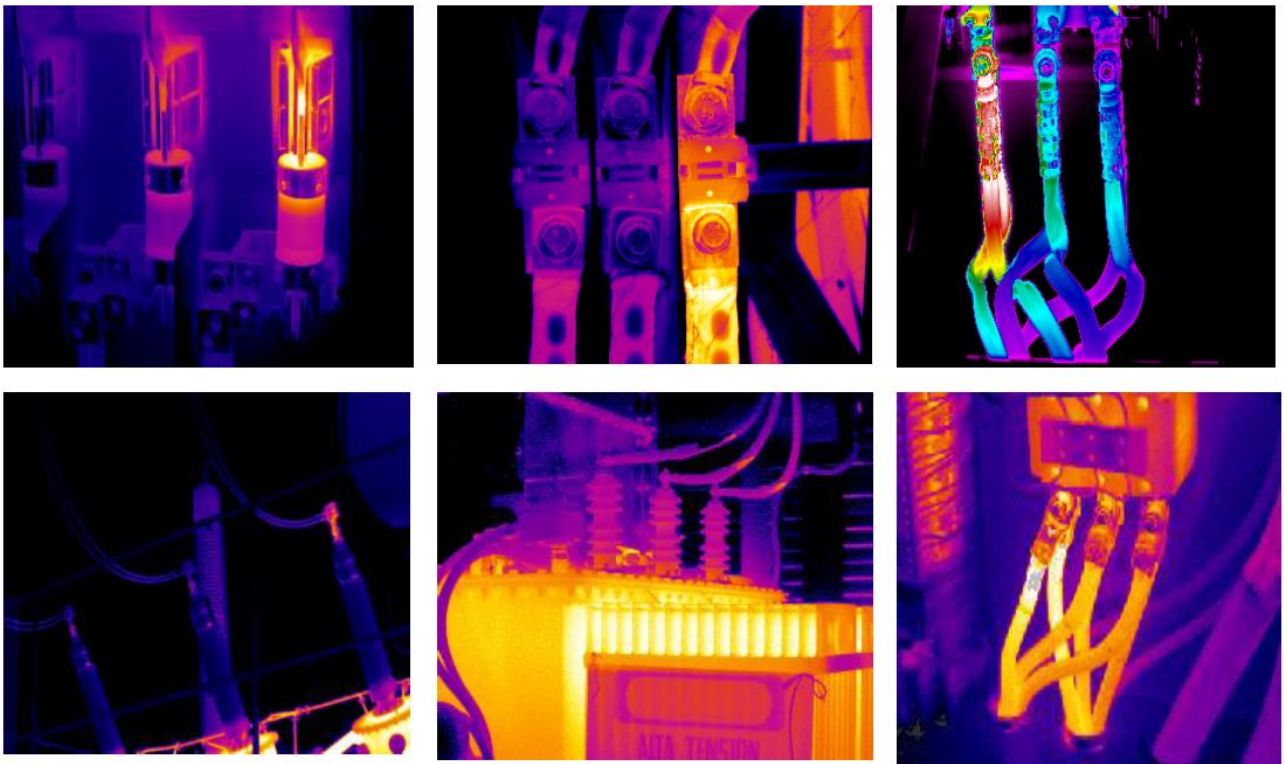


Figura 14 - Imagens Termográficas de instalações elétricas. ([18])

APLICAÇÕES FERROVIÁRIAS

CASO DA COMPANHIA FERROVIÁRIA NACIONAL FRANCESA

A companhia ferroviária nacional francesa (SNCF) utiliza a termografia para manter a sua extensa rede de fornecimento de energia e operações de sinalização em funcionamento. A SNCF também já está a utilizar o potencial da termografia para inspecionar os seus mais de 20000 km de catenária com recurso a uma câmara FLIR Systems montada num vagão de ensaios.



Figura 15 - Comboio e infraestrutura do tipo TGV da Companhia Ferroviária Nacional Francesa onde se recorre à termografia. ([19])

A SNCF começou a introduzir termografia em grande escala, depois de uma inspeção aos quadros elétricos da sinalização. A inspeção realizada em 2001 revelou que até 45% das instalações tinham sérias anomalias.

Convencida com os benefícios da termografia a SNCF adquiriu várias máquinas termográficas e iniciou a formação de termografia a vários colaboradores, neste momento uma equipa de 80 colaboradores efetua diariamente inspeções termográficas.

A SNCF viu-se confrontada com um problema de sobretensão da catenária numa das principais linhas Parisienses, foi detetado que a catenária se encontrava constantemente em sobrecarga. No início a equipa de manutenção pensou que o problema seria provocado pelo imenso tráfego na linha, para tentar resolver o problema foram reforçados os cabos do sistema de suspensão e alimentadores, no entanto o problema não foi resolvido.

De seguida tentaram resolver o problema ao efetuar ensaios termográficos para obter padrões de temperatura da catenária, assim foi montada uma câmara termográfica num vagão para fazer ensaios ao longo de entroncamentos ferroviários, os ensaios revelaram-se um sucesso, em alguns locais a catenária estava prestes a derreter e poderia partir a qualquer momento.



Figura 16 - Ensaios termográficos com câmara montada em um vagão. ([19])

CASO DA COMPANHIA FERROVIÁRIA NACIONAL DA SÉRVIA

A companhia ferroviária nacional da Sérvia utiliza termografia infravermelha para manter o abastecimento da rede de energia e de sinalização em funcionamento, e para inspecionar os freios e rolamentos de locomotivas e vagões.

Devido a fugas de óleo persistentes nas caixas de eixo dos vagões de passageiros, os responsáveis da manutenção decidiram recorrer à termografia, para visualizar a evolução de temperatura dos rolamentos durante um determinado espaço de tempo, os rolamentos foram testados numa plataforma específica para ensaios, e o teste revelou diferenças significativas no comportamento de aquecimento dos rolamentos novos e usados, no entanto os ensaios não foram totalmente convincentes, para tornar o ensaio mais real foi decidido testar em condições reais de operação para tornar os dados mais convincentes sobre a origem das fugas.



Figura 17 - Aplicação Sérvia

Para efetuar os ensaios em condições reais foi instalada uma câmara termográfica para monitorização permanente, a câmara foi colocada numa caixa de proteção conforme demonstrado na figura acima, com saída de vídeo e uma frequência de imagens até 50 Hz, a caixa de proteção foi montada no subleito de um vagão de ensaios, para conseguir verificar a temperatura do rolamento em operação. Os ensaios foram efetuados ao longo de 360 km durante dois dias.

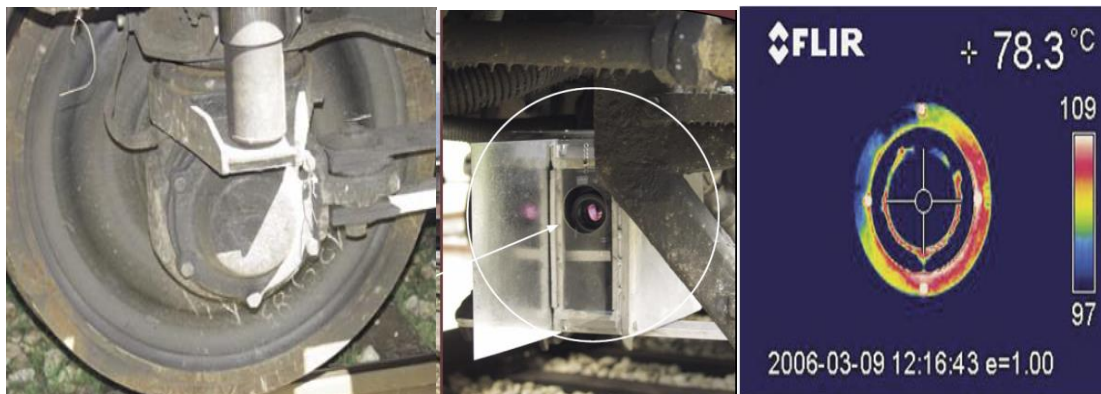


Figura 18 - Montagem no sub-leito

A elevação de temperaturas nas caixas de eixo durante o serviço deu lugar à evolução da condição física da viscosidade da massa lubrificante, a sobrecarga mecânica no sistema levava ao aquecimento de fugas de lubrificante, o aparecimento destas fugas era diretamente ligado ao excesso de massa lubrificante. Os resultados obtidos obrigaram os responsáveis a alterar os procedimentos de manutenção e reduzir substancialmente a quantidade de massa lubrificante aplicada.

Até o ano 2016 as técnicas termográficas não tinham aplicação na manutenção de equipamento ferroviário nacional. Apenas se utilizam os detetores de caixa quente implantados na linha ferroviária, os detetores de caixa quente são um conjunto de sensores que detetam aquecimento nas caixas de rolamento (rodados) das composições.

Em 2016 a EMEF-UMAV deu início ao processo de implementação de termografia no plano de manutenção dos CPA4000 (Alfa Pendular). Permitindo-me com a aquisição de equipamentos a elaboração deste trabalho.

Capítulo 3

APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA EM PLANOS DE MANUTENÇÃO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Como antes referido, as imagens térmicas são uma ferramenta simples para identificar diferenças de temperatura em circuitos elétricos trifásicos industriais, comparativamente com as suas condições normais de funcionamento. Ao inspecionar o gradiente térmico das três fases lado a lado, os técnicos podem localizar rapidamente anomalias no funcionamento dos circuitos, devido a sobrecargas ou desequilíbrios:

- Um desequilíbrio elétrico pode ser causado por diversos fatores: um problema no fornecimento de energia, tensão baixa numa fase, ou uma avaria na resistência do isolamento nos enrolamentos do motor.
- Mesmo um pequeno desequilíbrio de tensão pode deteriorar as ligações, reduzindo a quantidade de tensão fornecida enquanto os motores e outros equipamentos vão

utilizar corrente em excesso, fornecer um binário mais baixo (com o respetivo esforço mecânico associado) e falhar mais cedo do que era previsto.

- Um desequilíbrio grave pode queimar um fusível, reduzindo todas as operações do sistema a apenas uma fase do circuito. Ao mesmo tempo, a corrente resultante do desequilíbrio das fases regressará pelo neutro, fazendo com que a *utility* fornecedora aplique coimas pela utilização de picos de potência. Na prática, é virtualmente impossível equilibrar de forma perfeita a tensão nas três fases.

A manutenção industrial tem como finalidade implementar um conjunto de medidas com o objetivo de aumentar a vida útil dos equipamentos reduzindo o recurso à manutenção corretiva, diminuindo os custos de reparação e indisponibilidade dos equipamentos.

Os planos de manutenção preventiva estão cada vez mais a ser implementados nas grandes indústrias, uma boa gestão de manutenção reduz bastante os custos associados a paragens por avaria.

A manutenção encontra-se dividida em dois grandes grupos, a manutenção planeada e a manutenção não planeada:

- Na manutenção planeada temos toda a manutenção preventiva e também existe a componente de manutenção corretiva na qual será agendada uma reparação para uma paragem do plano de manutenção.
- Na manutenção não planeada apenas existe a manutenção corretiva, ou seja apenas é feita reparação quando ocorre a falha.

Podemos melhor compreender as divisões da manutenção na ilustração apresentada.

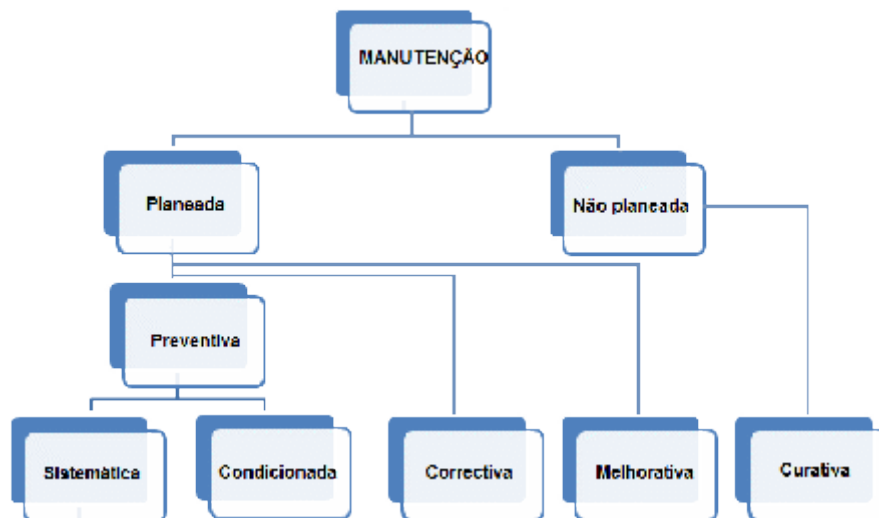


Figura 19 - Fluxograma de Manutenção ([21])

Nos atuais planos de manutenção estudados e aplicados atualmente, muitas das inspeções de equipamentos industriais passam pela utilização dos nossos sentidos, visão, tato e olfato.

Por diversas vezes seguimos instruções de trabalho que apenas pedem verificações visuais, por tato ou por olfato; Será isso suficiente?

Com o objetivo de aumentar a fiabilidade dos equipamentos e reduzir a indisponibilidade será cada vez mais importante recorrer às novas tecnologias de apoio à manutenção. No caso em estudo a implementação da termografia representa que a evolução tecnológica é uma mais-valia no apoio à manutenção.

Podemos usar como exemplo uma inspeção a um quadro elétrico, sem recurso a qualquer tecnologia teríamos apenas de fazer uma inspeção visual ao equipamento, cheirar na tentativa de detetar algum cheiro a queimado e talvez em situações não perigosas usar o tato para detetar ponto quentes. Neste ultimo será sempre perigoso tocar em componentes elétricos com tensão presente.

Recorrendo a uma câmara termográfica essa mesma inspeção torna-se muito mais segura e eficaz. A tecnologia da câmara termográfica permite-nos detetar qualquer ponto quente e

detetar anomalias que não seriam detetadas com outro tipo de inspeção tais como sobrecargas, fases desequilibradas, falhas internas de componentes por exemplo disjuntores e contactares com desgaste nos contactos.

ESTUDO DE CASO PRÁTICO

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias aplicadas na manutenção de instalações elétricas em estudo, apresentado o caso em estudo e a análise dos resultados obtidos.

O objetivo principal será o estudo de temperaturas de funcionamento de equipamentos presentes nas instalações elétricas e criação dos seus respetivos padrões de funcionamento.

METODOLOGIAS EXISTENTES.

No equipamento ferroviário em estudo encontra-se implementada a metodologia do RCM (Reliability Centered Maintenance) - Manutenção Centrada em Confiabilidade. A metodologia RCM, como é mais usualmente referenciada, é usada para determinar os requisitos de manutenção de qualquer item físico no seu contexto operacional. Para isso, a metodologia analisa as funções e padrões de desempenho: de que forma ocorre a falha, o que causa cada falha, o que acontece quando ocorre a falha e o que deve ser feito para preveni-la. Como resultado, obtém-se um aumento da disponibilidade, o que permite um aumento de produção.

A metodologia RCM teve sua origem na década de 60, na indústria aeronáutica americana. Desde então, vem sendo aplicada com sucesso por muitos anos, primeiramente na indústria aeronáutica e, mais tarde, nas centrais nucleares, refinarias de petróleo e muitas outras indústrias.

Na aplicação da termografia em planos de manutenção com metodologia RCM apenas será abrangida a Manutenção Preditiva.

Analisando a curva P-F nas imagens seguintes verifica-se que a metodologia RCM estuda o ponto P ou seja o ponto de falha potencial para um componente. Quando ultrapassado o ponto P o risco de falha é elevado.

Após a passagem do ponto P serão tomadas medidas para evitar que se alcance o ponto F ou seja o ponto de falha funcional. O intervalo P-F define o tempo para a falha.

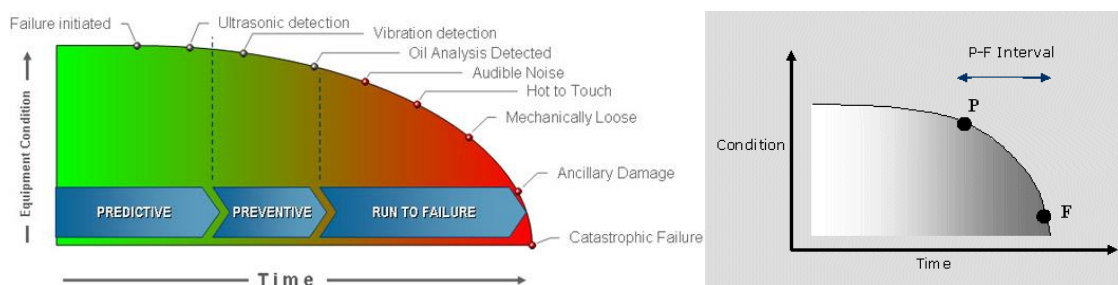


Figura 20 - Intervalo de tempo para falha. ([20])

CASO PRÁTICO

O objetivo proposto terá o âmbito experimental da aplicação da termografia em instalações elétricas. O caso estudado foi efetuado num ambiente industrial, mais concretamente em manutenção industrial de equipamento ferroviário.

O estudo permitirá a criação de padrões de temperatura de alguns componentes que garantem o bom funcionamento das composições ferroviárias, com essa criação de padrões podem ser implementados ensaios termográficos em planos de manutenção, com o objetivo de aumento da eficácia da equipa de manutenção e consequentemente a disponibilidade e a fiabilidade do equipamento ferroviário.

3.1 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Nos planos de manutenção industrial existem instruções de trabalho com inspeções, muitas dessas inspeções são apenas visuais e em muitas delas os equipamentos encontram-se ao

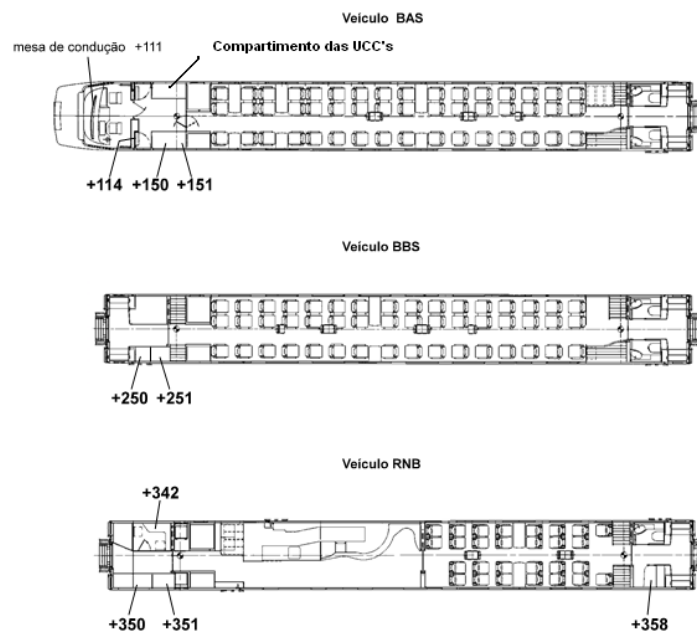
serviço não existindo por isso a possibilidade de desligar os mesmos para uma inspeção mais profunda.

Com a implementação da tecnologia termográfica será possível obter uma maior eficácia por parte da equipa de manutenção na deteção de avarias e na resolução das mesmas, integrando esses tipos de análise em instruções de trabalho.

3.1.1 - IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE INTERESSE

Com a aquisição de uma câmara termográfica tornou-se possível efetuar um estudo termográfico aos quadros elétricos de uma série de composições ferroviárias, na tentativa de definir padrões da temperatura de funcionamento dos diversos componentes.

Para uma melhor perceção estrutural do estudo, apresento na figura 21 a disposição dos quadros elétricos nas composições ferroviárias (Série CPA 4000).



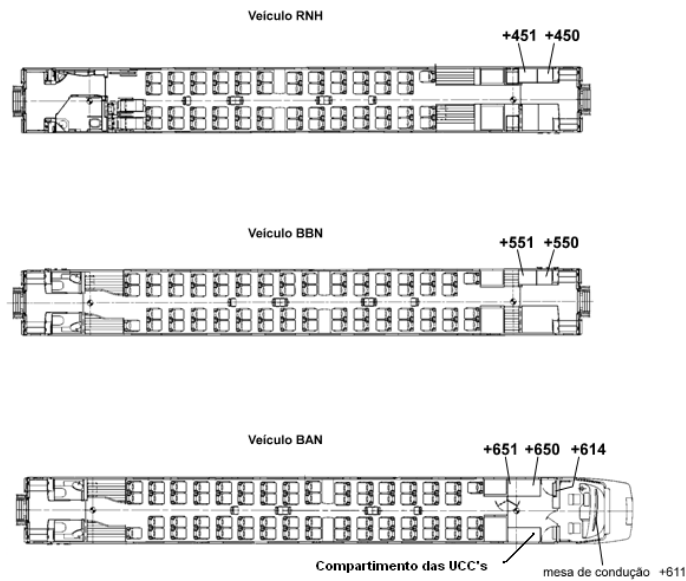


Figura 21 - Disposição Quadros Elétricos (CPA 4000)

3.1.2 - CARATERIZAÇÃO DA CÂMARA TERMOGRÁFICA

O caso em estudo de termográfica por infravermelhos foi realizado utilizando uma camara termográfica da marca FLIR modelo Infracam SD.



Figura 22 - Infracam SD ([22])

Caraterísticas principais da câmara utilizada.

Field of view/min focus distance Fixed 25° x 25°/0.3m

Thermal sensitivity < 0.15° C at 25° C

Detector type Focal plane array (FPA) uncooled microbolometer; 120 x 120 pixels

Spectral range 7.5 to 13 μm

Image Display

Display 3.5" color LCD, 240 x 240 pixels

Image controls Palettes (color, B/W), level, span, auto adjust (continuous/manual)

Temperature range -10° C to +100° C (+14° F to +212° F)

Uma câmara de termografia por infravermelhos é um aparelho que deteta energia infravermelha (calor), a converte em sinal elétrico e produz imagens, efetuando cálculos de temperatura.

A radiação calorífica está próxima da radiação luminosa visível, e pertence à vulgarmente chamada radiação eletromagnética. Propaga-se a 300.000 km/s, ou seja, à habitualmente designada velocidade da luz.

Apesar de até ao momento, apenas se ter referido radiação, o utilizador desta tecnologia está interessado apenas em temperatura. Como a relação entre radiação e temperatura é uma lei física, tornou-se possível que as câmaras termográficas meçam radiação e a convertam em temperatura.

A nova tecnologia utilizada nos detetores (componente principal das câmaras termográficas), a imagem visual integrada e o *software* hoje disponível, permitem a realização de inspeções termográficas exceccionalmente produtivas e precisas.

CONFIGURAÇÃO DO EQUIPAMENTO



Figura 23 - Passos para configuração de câmara termográfica.

As imagens demonstram como se deve configurar a máquina termográfica, no botão menu e com as setas no primeiro bloco seleciona-se a opção temperatura, no segundo bloco deverá ser selecionada a opção ferro, no terceiro bloco deverá ser selecionada a opção emissividade/cobre, no quarto bloco deverá ser selecionada a Unidade/Celsius

3.1.3 – ANALISE E TRATAMENTO DOS DADOS ADQUIRIDOS

Para definir valores padrão dos quadros elétricos em estudo, foi efetuado um estudo minucioso aos quadros elétricos no equipamento ferroviário, durante o estudo foram efetuados dezenas de termogramas a todos os quadros elétricos, depois de analisados os termogramas foi possível chegar a diversas conclusões sobre temperaturas de funcionamento dos equipamentos, seguidamente serão apresentadas as temperaturas de funcionamento padrão dos quadros elétricos.

3.1.3.1 – Estações Sibas Klip

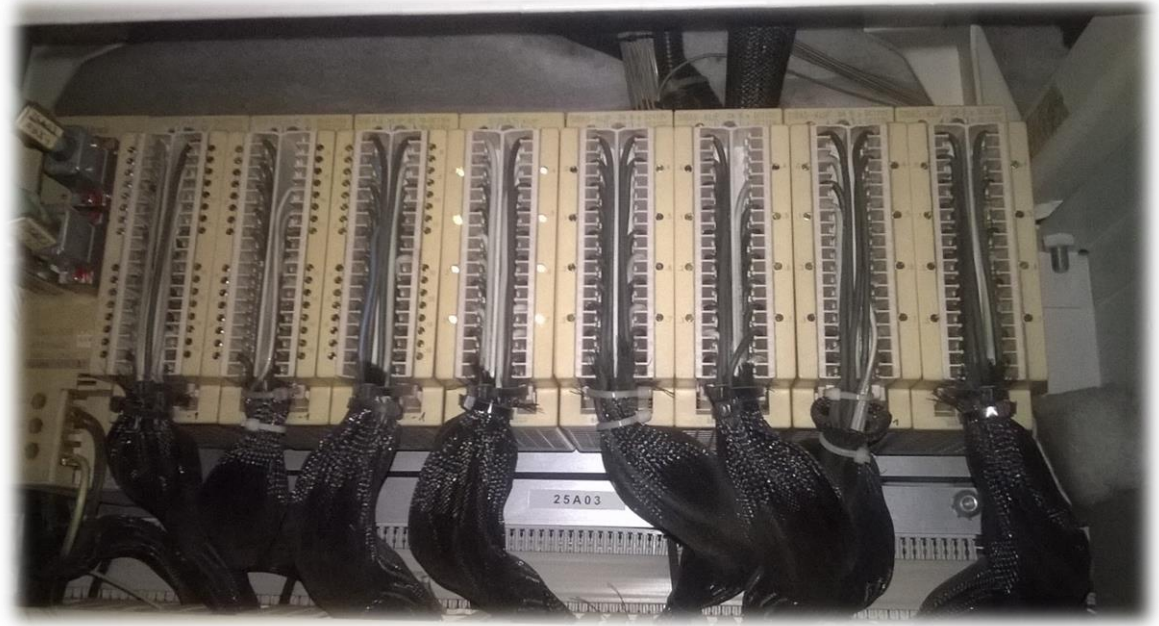
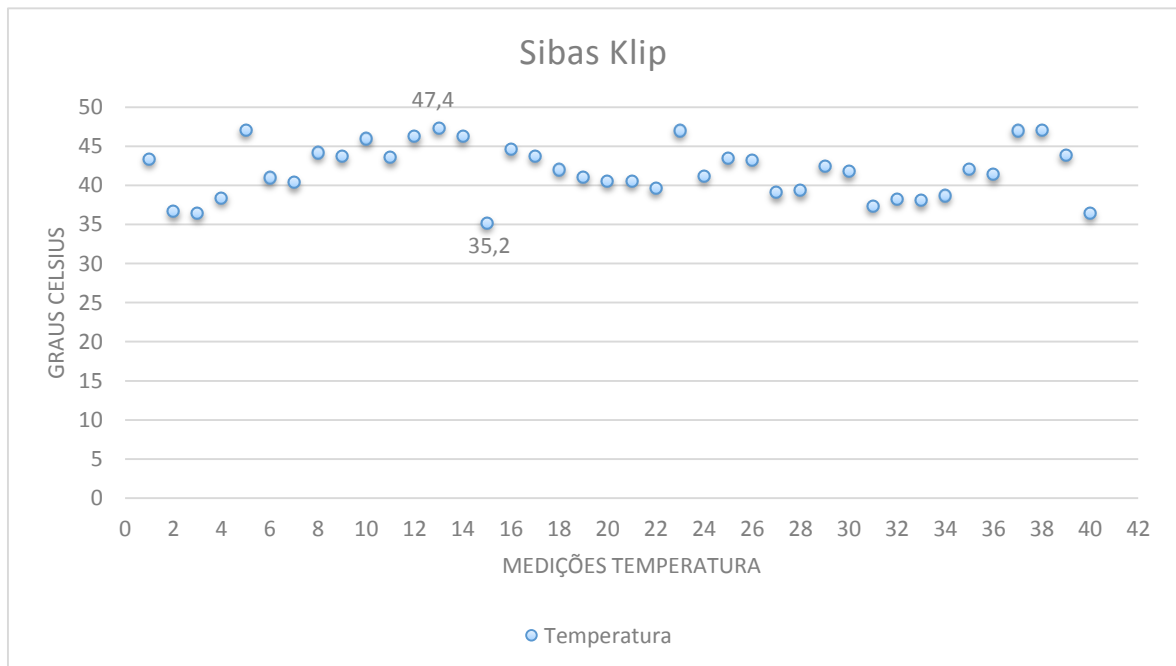


Figura 24 - Estações Sibas Klip



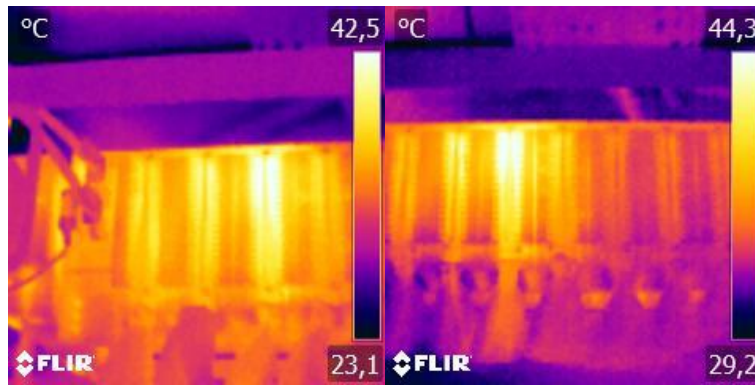


Figura 25 - Termogramas da Estação de Sibas Klip

As estações de sibas-klip foram analisadas em vários regimes de funcionamento, depois de analisadas todos os termogramas verificou-se que as temperaturas de funcionamento encontram-se entre 32,5 °C e 47,4 °C.

O valor médio de temperatura de funcionamento para estações Sibas-Klip obtido é de 41,92 °C.

4.1.3.2 – Contactores

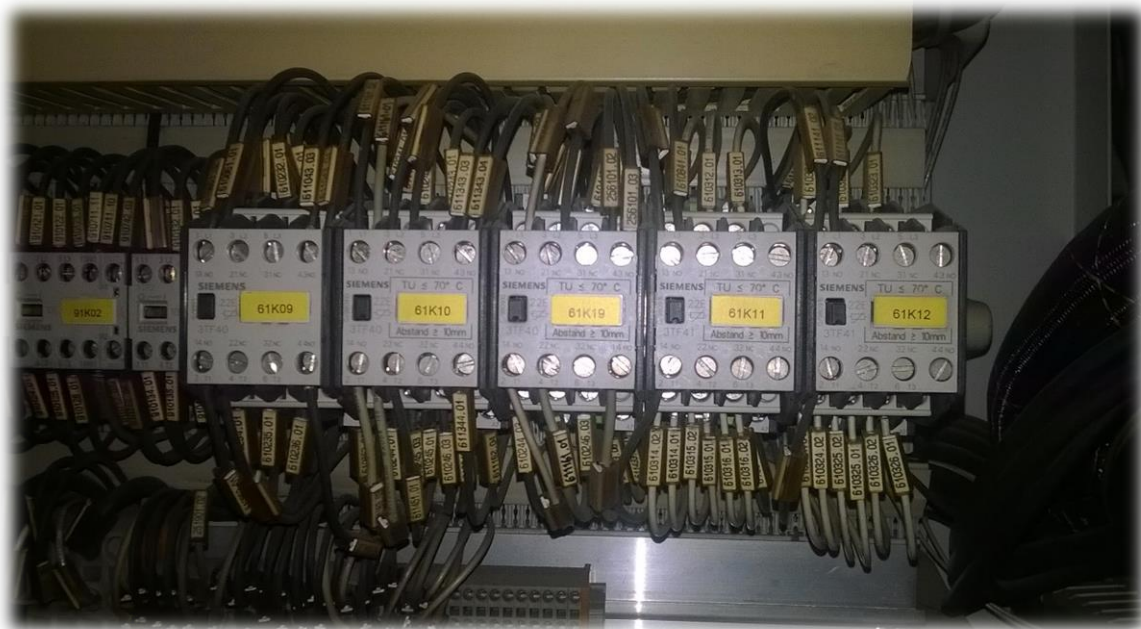


Figura 26 - Contactores

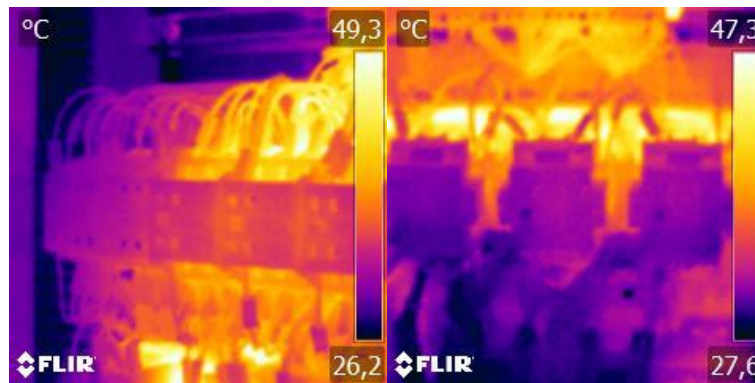
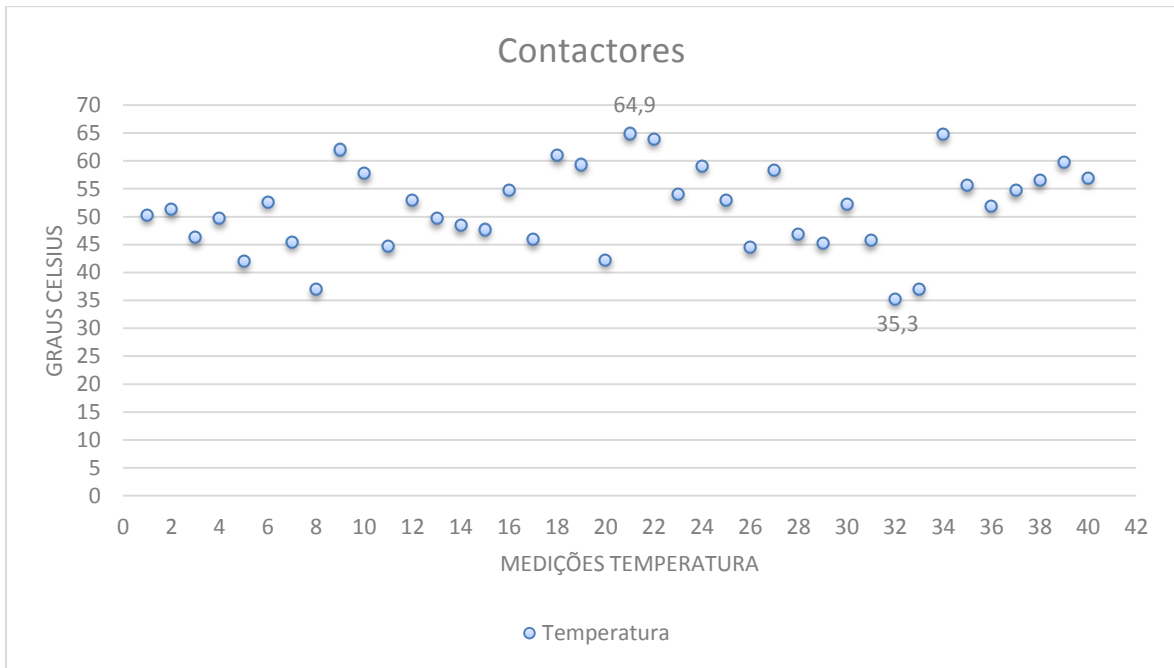


Figura 27 - Termogramas dos contactores

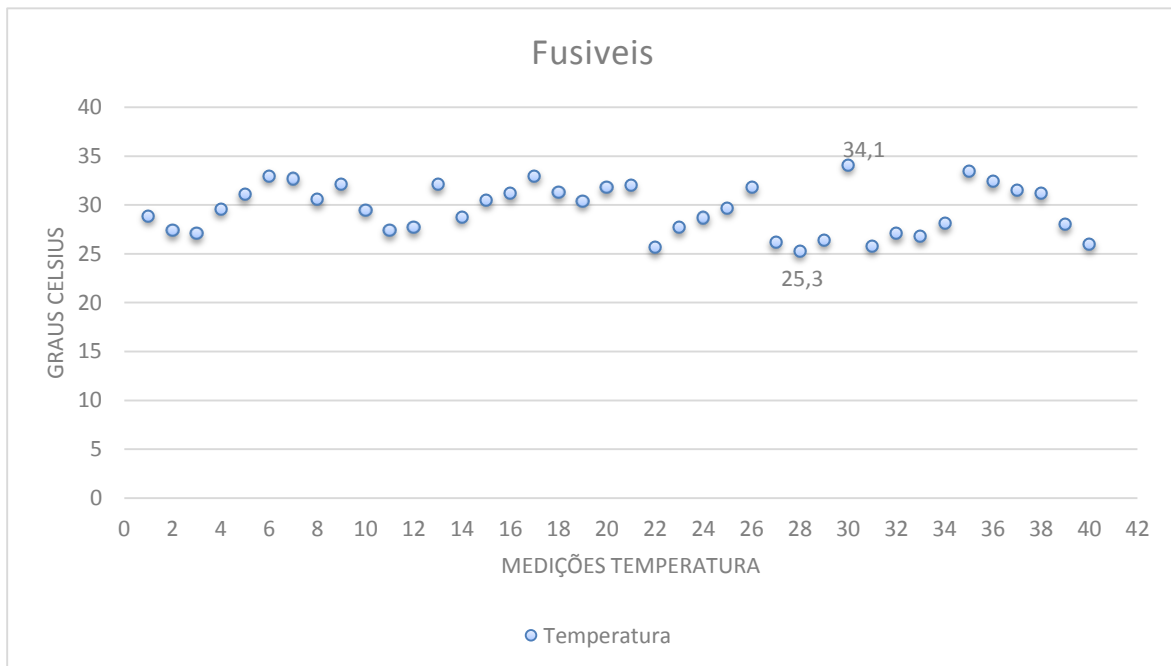
Os contactores são os componentes que emitem maior radiação nos quadros elétricos, as bobinas emitem elevada radiação o inspetor deverá ter uma atenção especial aos fenómenos de reflexão. As fases deveram ser comparadas entre si, as temperaturas de funcionamento dos contactores encontram-se entre 35,3°C e 64,9 °C em carga.

O valor médio de temperatura de funcionamento para Contactores obtido é de 51,56 °C.

3.1.3.3 – Fusíveis 650V



Figura 28 - Fusíveis 650V



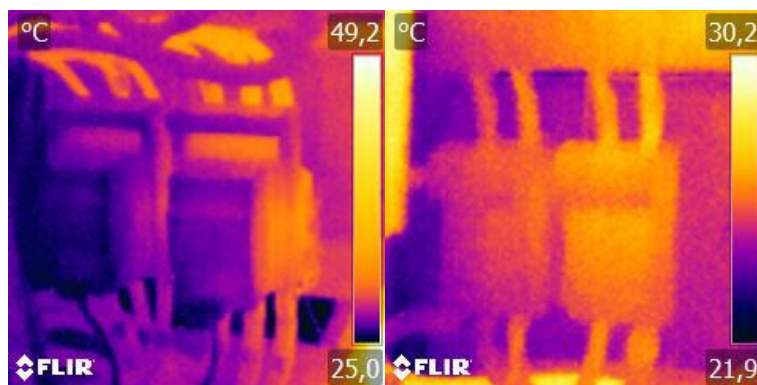


Figura 29 - Termogramas dos Fusíveis

A verificação da zona dos fusíveis é uma zona muito sensível, as temperaturas de funcionamento variam entre os 25,3°C e 34,1°C.

O valor médio de temperatura de funcionamento para Fusíveis obtido é de 29,61 °C.

3.1.3.4 – Contactor 28K23 Compressor

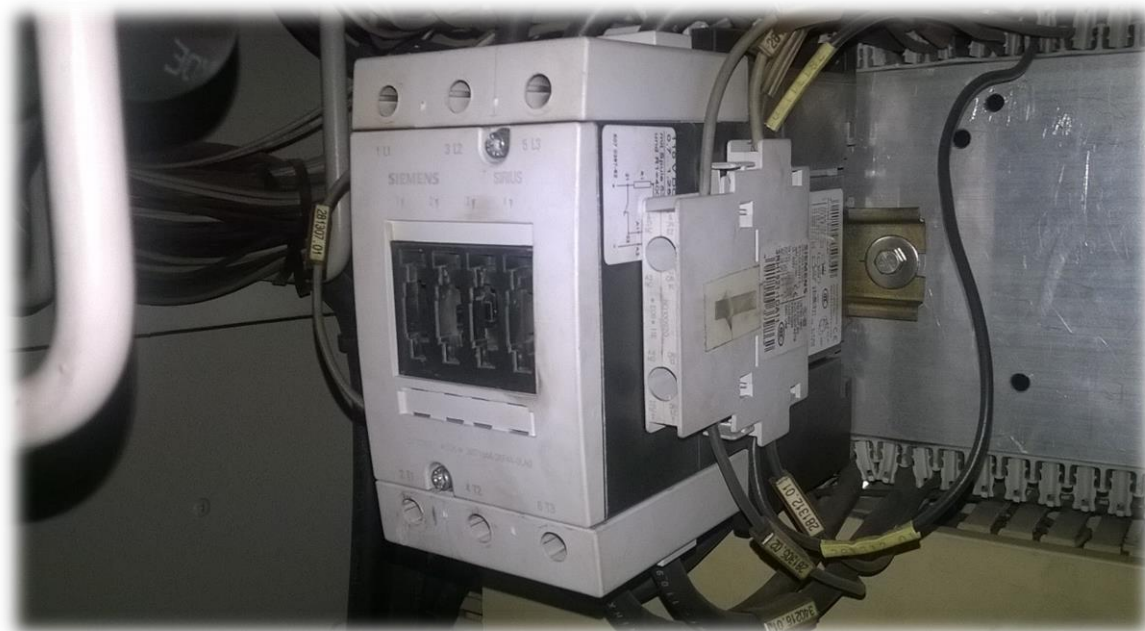


Figura 30 - Contactor 28K23 Compressor

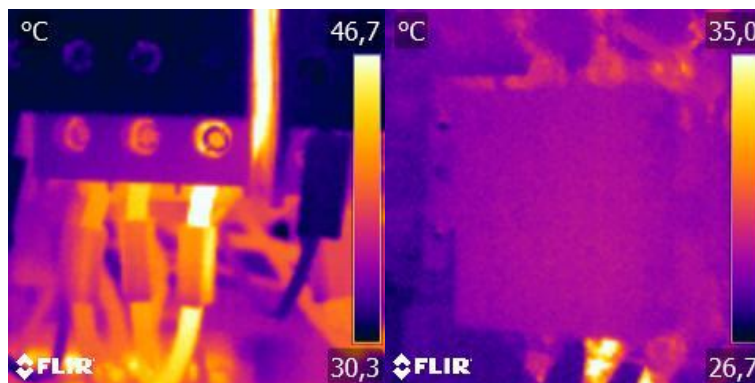
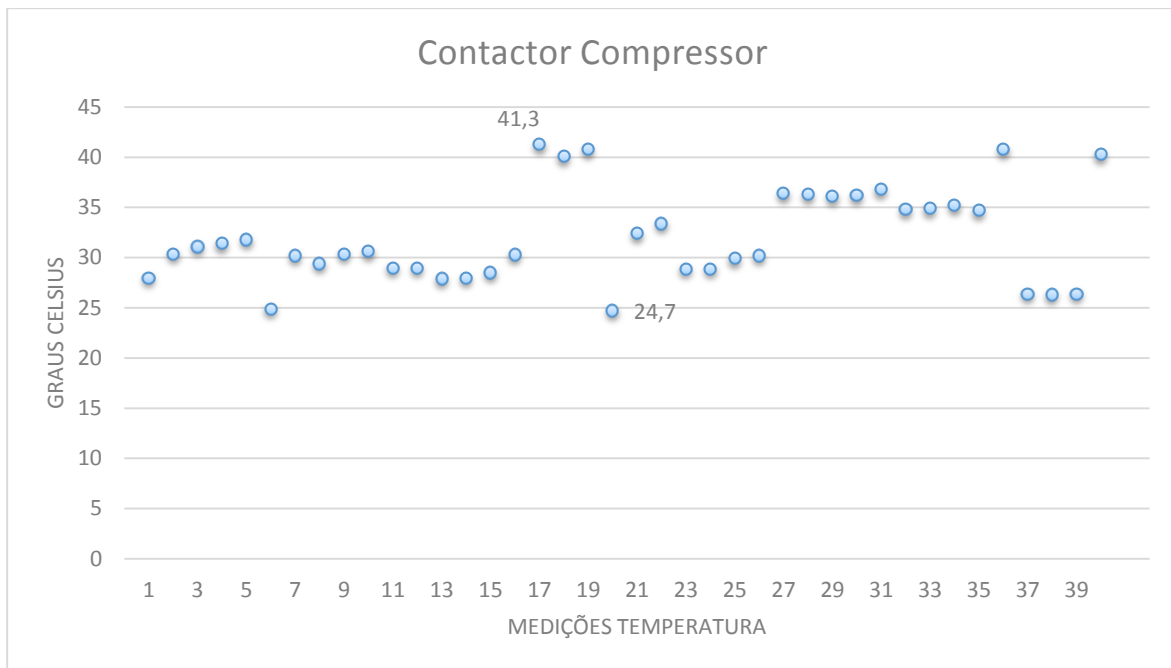


Figura 31 - Termogramas do Contactor 28K23

Os contactores são os componentes que emitem maior radiação nos quadros elétricos, as bobines emitem elevada radiação o inspetor deverá ter uma atenção especial aos fenómenos de reflexão. As fases deveram ser comparadas entre si, as temperaturas de funcionamento dos contactores encontram-se entre 24,7°C e 41,3 °C em carga.

O valor médio de temperatura de funcionamento para Contactor Compressor obtido é de 32,08 °C.

Este contator em especial deve ser alvo de grande minúcia na sua análise sendo um elemento crítico no bom funcionamento do equipamento ferroviário em estudo, tendo a capacidade de deixar o mesmo inativo. Este contator alimenta um circuito de produção de ar comprimido essencial para o funcionamento o bom funcionamento da composição.

3.1.4 – PLANO DE MANUTENÇÃO


Após análise de dados e com resultados obtidos será possível a integração da utilização do equipamento termográfico nos planos de manutenção preventivos.

A utilização da câmara termográfica terá como base uma formação inicial da utilização do equipamento. Todo e qualquer equipamento de medição requer uma utilização por pessoal qualificado na utilização do mesmo.

Com a utilização apenas por pessoas qualificadas reduz-se a margem de erro de medição e o risco de utilização do equipamento, sendo a utilização deste equipamento maioritária das vezes em circuitos sob tensão. A grande vantagem deste tipo de equipamento é a não necessidade de existir contacto físico para efetuar medições.

Para a instrução de trabalho foram utilizados os valores médios obtidos na análise dos dados com uma margem aproximada de 20 °C. Sendo estes valores predefinidos para a inspeção, ultrapassados estes valores serão ativados os métodos de deteção da anomalia detetada.

Instrução de trabalho de inspeção de quadros elétricos Semanal

3.2.3 - Inspeção Quadro Elétrico 1
 Atenção – Os ensaios termográficos devem ser efetuados com a máxima atenção uma vez que os circuitos se encontram sob tensão. Uma pequena distração pode causar acidentes de trabalho graves.

<ul style="list-style-type: none"> • Efetuar termogramas às estações Sibas-Klip à procura de zonas de aquecimento e de pontos quentes. • Verificar que a temperatura de funcionamento se encontra com um valor inferior a 62°C. <p>Se o valor medido exceder a temperatura deverá ser registada a anomalia na folha de registo de avarias e deverá ser anexado o relatório com o fotograma recorrendo ao Flir Tools Software.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Efetuar termogramas aos contadores à procura de zonas de aquecimento e de pontos quentes • Verificar que a temperatura de funcionamento se encontra com um valor inferior a 72°C. <p>Se o valor medido exceder a temperatura de referência deverá ser registada a anomalia na folha de registo de avarias e deverá ser anexado o relatório com o fotograma recorrendo ao Flir Tools Software.</p>
<p>*****</p>
<p><i>Após conclusão da instrução de trabalho deve assinar o documento de registo da inspeção efetuada e notificar o Chefe de Equipa das anomalias detetadas não esquecendo de fazer o registo das mesmas no documento de registo de avarias.</i></p>

Uma das inovações possíveis com a aquisição do equipamento será a criação de relatórios da anomalia detetada, recorrendo ao Flir Tool Software disponibilizado pela marca da máquina termográfica sendo assim mais fácil a resolução da avaria. No caso de a avaria não ser reparada no momento em que é detetada será reparada oportunamente e com acesso a um relatório no qual existe o fotograma com a anomalia será muito mais rápida a análise e resolução da mesma.

A deteção e a reparação podem ser executadas por diferentes técnicos e com recurso à tecnologia disponibilizada a informação é mais pormenorizada, aumentando a eficácia da equipa de manutenção.

Exemplo de Relatório de Anomalia (**Flir Tools Software.**)

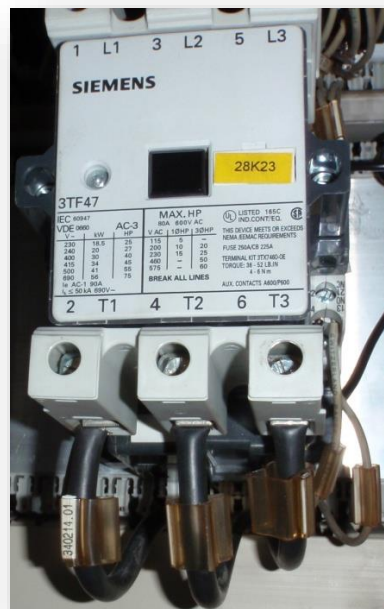


Figura 32 - Relatório Software Flir

3.2 – AVARIAS DETETADAS AO LONGO DO ESTUDO

Durante a elaboração do estudo para a criação de padrões de temperaturas de funcionamento foram detetadas algumas avarias. A integração da termografia não ficou apenas limitada à criação deste estudo mas fez parte integrante do trabalho diário sempre que existia aplicação prática para a utilização do mesmo.

Com a interação diária com o equipamento foi-se adquirindo sensibilidade na análise e interpretação dos dados. Sendo o equipamento uma excelente ferramenta de diagnóstico quando utilizado corretamente.

Para as avarias detetadas foram criadas medidas de ação corretiva, as quais serão classificadas por grau de importância. Foi possível a criação de um novo documento de

registo recorrendo ao Flir Tools Software que possibilita a criação de um relatório anexo à ficha de registo de avaria reduzindo o tempo de análise na reparação.

3.2.1 – CRITERIOS DE AVALIAÇÃO

Os critérios e metodologia aplicados na realização das inspeções são divididos em duas fases:

1. Inspeção termográfica em campo e fotos de referência com o intuito de facilitar a localização dos possíveis pontos quentes.
2. Tratamento das imagens termográficas obtidas, avaliação dos resultados.

Uma vez tratadas as imagens termográficas obtidas, estas são classificadas em classes de acordo com a gravidade da situação, isto decidirá a prioridade da reparação, no caso concreto do equipamento em estudo as avarias deveram ser reparadas imediatamente uma vez que o equipamento ferroviário se encontra em manutenção.

O significado das três classes, é o seguinte:

Classe “A” - uma avaria muito séria que requer uma reparação imediata.

Classe “B” - uma avaria séria que requer reparação o mais rápido possível.

Classe “C” – uma avaria que requer monitoramento e inspeção programada assim que possível.

Foram ainda tidas em conta as guidelines da Natural Electrical Manufacturers Association (NEMA. Estas normas são uma importante base de comparação durante os procedimentos de manutenção e a correção de avarias. A seguir alguns exemplos de adoção para este estudo e a sua interpretação:

- Capturar imagens térmicas de todos os painéis elétricos e outros pontos de ligação de cargas elevadas, como contactores, disjuntores, controlos, entre outros. Onde encontrar temperaturas mais elevadas do que o normal, deve seguir o circuito correspondente e examinar os sectores e cargas associados.

- Verificar os painéis elétricos e outras ligações sem qualquer cobertura exterior. O mais recomendado é verificar os dispositivos elétricos após a fase de aquecimento e num estado de funcionamento estável, com pelo menos 40% da sua carga típica. Desta forma, as medições podem ser avaliadas e comparadas com as condições normais de funcionamento.
- Cargas iguais devem gerar temperaturas iguais. Numa situação de carga desequilibrada, as fases com maior carga irão aparecer mais quentes do que as outras, devido ao calor gerado pela resistência. No entanto, uma carga desequilibrada, uma sobrecarga, uma má ligação, ou um desequilíbrio harmónico podem criar um padrão semelhante. Medir a carga elétrica é imprescindível para diagnosticar o problema.
- Um circuito com uma temperatura inferior à normal pode indiciar uma falha num dos componentes do sistema. Nestes casos o mais recomendável é criar uma rotina regular de inspeção, que inclua todas as principais ligações elétricas. Com a utilização do software que é fornecido com a câmara termográfica, guarde no computador todas as imagens captadas e siga as medições ao longo do tempo. Desta forma terá imagens de referência para comparar mais tarde com outras. Este procedimento ajuda a determinar se um ponto quente ou frio da imagem no sistema é invulgar. Após as acções corretivas, as novas imagens irão ajudá-lo a determinar se a reparação foi bem-sucedida.
- A prioridade nas reparações deve ser a segurança, ou seja, as condições dos equipamentos que possam constituir um risco de segurança, seguida pela importância de cada equipamento e a magnitude do aumento da temperatura. As especificações da NETA (InterNational Electrical Testing Association) definem que devem ser tomadas medidas corretivas imediatas quando a diferença de temperatura (ΔT) entre componentes elétricos sob cargas semelhantes exceder os 15° C ou quando a ΔT entre um componente elétrico e a temperatura ambiente for superior a 40° C.
- As normas da NEMA (NEMA MG1 – 12.45) advertem contra o perigo de utilizar qualquer motor com um desequilíbrio de tensão superior a 1%. De facto, a NEMA recomenda que os motores sejam desclassificados se funcionarem com um

desequilíbrio maior. As percentagens de desequilíbrio seguras variam conforme o tipo de equipamento.

- Quando uma imagem térmica mostra que um condutor tem uma temperatura mais elevada do que outros componentes de um circuito, pode ser um indício de que o condutor está subdimensionado ou em sobrecarga. Deve verificar-se a classificação do condutor e a carga real para determinar a causa do problema.
- Utilize um multímetro com uma sonda de corrente, uma pinça amperimétrica ou um analisador de qualidade elétrica para verificar o equilíbrio de corrente e a carga em cada fase. No que diz respeito à tensão, deve verificar se existem quebras de tensão nas proteções e/ou nos comutadores. Por norma, a tensão da linha deve ter cerca de 10% do valor indicado na sua placa de características. A tensão entre o neutro e a terra indica a carga no sistema e ajuda a determinar se existem correntes harmónicas. Uma tensão entre neutro e terra superior a 3% do valor nominal de fase deverá ser objeto de uma inspeção mais exaustiva.
- As cargas podem variar e a carga de uma fase pode descer em 5% num circuito, se se registar uma carga monofásica elevada. As quebras de tensão através dos fusíveis e dos comutadores podem também aparecer como um desequilíbrio no motor e um calor excessivo na raiz do problema. Antes de assumir que já se localizou a origem do problema, deve voltar a realizar-se a medida tanto com uma câmara termográfica como com um multímetro ou com uma pinça amperimétrica.
- Nem o circuito de alimentação, nem os subcircuitos devem ser carregados até ao limite máximo permitido. A carga do circuito também deve prever a existência de harmónicos.
- A solução mais habitual para eliminar a sobrecarga é a redistribuição de cargas através dos circuitos, ou gerir quando há cargas durante o processo. Utilizando o software fornecido com a câmara termográfica, cada problema suspeito descoberto através de uma imagem térmica pode ser documentado num relatório que inclui uma imagem térmica e outra digital relativa ao equipamento. Esta é a melhor forma de comunicar os problemas e sugerir as reparações que devem ser feitas.

3.2.2 – AVARIAS DETETADAS

3.2.2.1 – Anomalia no Contactor 52K01.1

O contactor 52K01.1 encontra-se situado num dos quadros elétricos principais da composição ferroviária CPA4000 e tem como função o controlo da iluminação interior de passageiros.

Descrição de Avaria: Temperatura elevada no contacto nº3 do Contactor 52K01.1

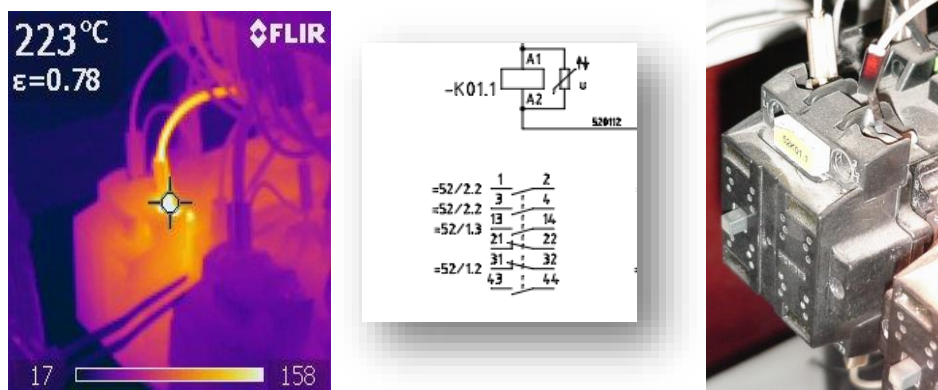


Figura 33 - Termograma e Foto da Avaria no Contactor 52K01.1

Avaria de Classe “A”

Conclusões: Depois de efetuado o diagnóstico verificou-se que o contacto nº 3 do 52K01.1 se encontra aliviado. A temperatura a que se encontra leva a que o condutor entre em ponto de fusão. Assim terá de ser realizada uma intervenção imediata pois a avaria à muito que ultrapassou a falha potencial estando na iminência de uma falha funcional. A falha funcional poderá provocar a falta de iluminação assim como um incêndio no quadro elétrico.

3.2.2.2 – Anomalia no Contactor 34K03

O contactor 34K03 encontra-se situado num dos quadros eléctricos principais da composição ferroviária CPA4000 e tem como função o controlo da bomba de óleo de refrigeração do transformador principal.

Descrição de Avaria: Temperatura elevada no contacto nº5 do Contactor 34K03

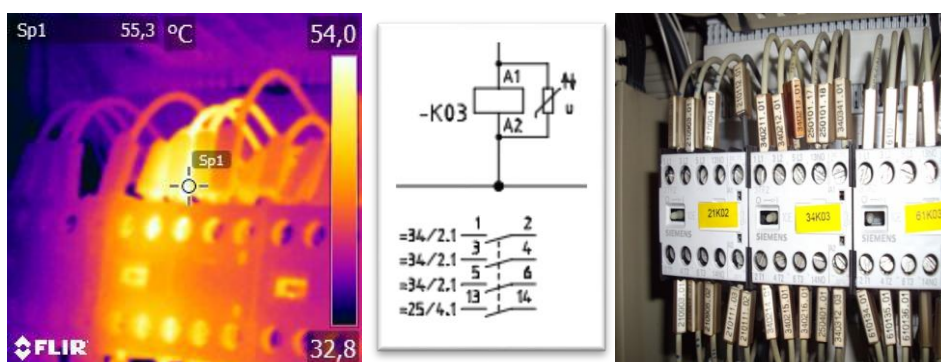


Figura 34 - Termograma e Foto da Avaria no Contactor 34K03

Avaria de Classe “A”

Conclusões: Depois de efetuado o diagnóstico verificou-se que o contacto nº5 do Contactor 34K03 se encontra aliviado, a temperatura do condutor da fase 3 é ligeiramente mais alta em relação às outras fases, esta será a falha potencial da avaria, é aconselhável a reparação da falha, em caso de avaria a bomba de óleo não funcionará o que provocará um aquecimento do óleo no transformador e consequentemente o bloqueio automático do mesmo devido atuação das proteções.

3.2.2.3 - Anomalia na fonte de alimentação do Sibas Klip

A estação Sibas Klip encontra-se situada num dos quadros elétricos principais da composição ferroviária CPA4000 e tem como função a receção e envio de sinais analógicos e digitais.

Descrição de Avaria: Temperatura elevada no contacto L2+ da Fonte de Alimentação

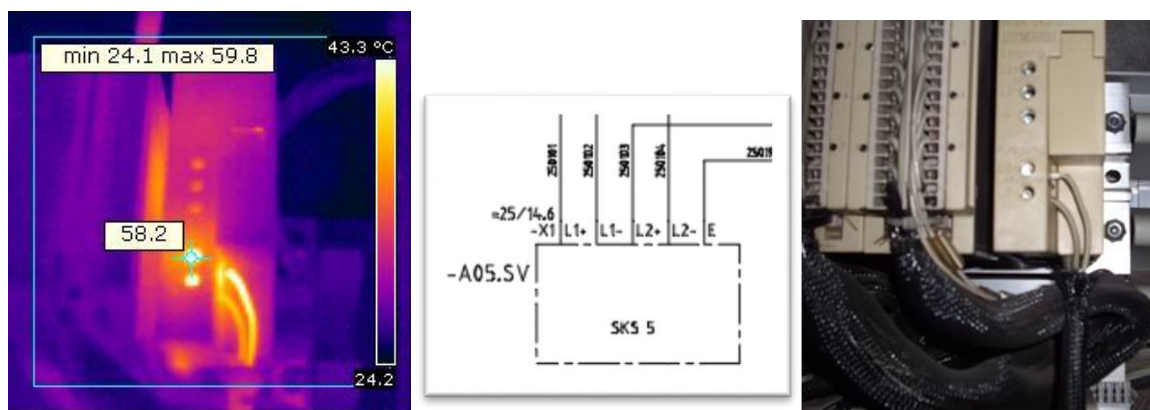


Figura 35 - Termograma e Foto da avaria da Fonte de Alimentação

Avaria de Classe “A”

Conclusões: Depois de efetuado o diagnóstico verificou-se que o contacto L2+ da Fonte de Alimentação se encontra aliviada, esta será a falha potencial da avaria, é aconselhável a reparação imediata da falha, em caso de avaria a estação de Sibas Klips deixará de funcionar.

3.3 ENSAIOS TERMOGRÁFICOS

Após o estudo efetuado foi implementada uma instrução de trabalho para verificação geral de todas as instalações elétricas para a deteção de avarias.

As instalações a serem inspecionadas fazem parte integrante de dez composições ferroviárias para as quais já existe um plano de manutenção definido com base nos quilómetros percorridos, sendo inseridas em média quatro inspeções termográficas semanais.

Nessas inspeção são inspecionados um numero elevados de equipamento sendo que os equipamentos se encontram divididos por oito quadros eléctricos.

São também verificados todos os barramentos, fichas de ligação e centrais electrónicas.

Para uma maior fiabilidade dos resultados obtidos os equipamentos são sempre que possível testados com carga máxima, por exemplo num sistema de refrigeração por líquido refrigerante com radiador (permutador) refrigerado por ventilação tentamos sempre manter os ventiladores na carga máxima durante os ensaios.

Com este tipo de ensaios na carga máxima dos equipamentos aumentos bastante a possibilidade de deteção da falha, por exemplo um contactor com os contactos desgastados se for ensaiado com baixas correntes possivelmente não será detetada nenhuma anomalia pois o contacto poderá ser suficiente para suportar essa mesma corrente.

Aplicando o máximo de corrente admissível no circuito a probabilidade de deteção da avaria aumenta bastante no momento inicial poderá não perçetível mas em pouco tempo constatamos uma subida de temperatura exagerada do contactor, que pode levar a destruição do mesmo e causar avarias nos seus dependentes.

Para uma melhor perceção da dimensão dos ensaios a serem efetuados apresento alguns exemplos de imagens dos equipamentos testados.

Quadros eléctricos, armários que incluem disjuntores, contactores, transformadores, fusíveis.

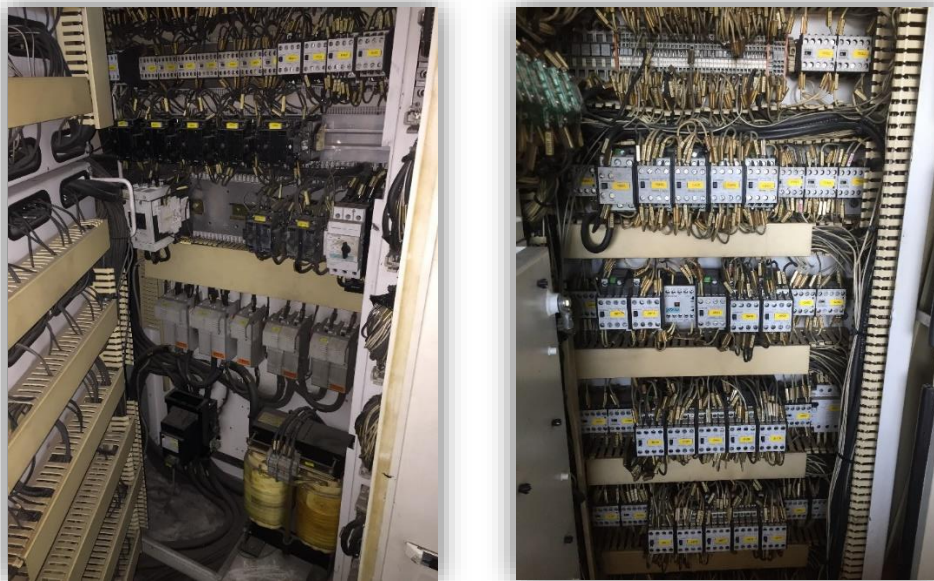


Figura 36 - Quadros Eléctricos

Barramentos, são equipamentos existem em vários locais nos quais existam necessidade de derivar circuitos, são uma zona crítica durante a inspeção termográfica devido ao risco de mau contacto nas conexões.



Figura 37 - Barramentos Eléctricos

Centrais eletrônicas são equipamentos com a função de gestão de equipamentos nestes são controladas a temperaturas das suas ligações de entrada e saída, e sua temperatura interna de funcionamento.



Figura 38 - Central Eletrônica

Para uma melhor percepção da quantidade de ligações/conexões e equipamentos que necessitam de inspeção apresento um pequeno excerto de um esquema elétrico que apresenta fichas de ligação numa central eletrônica, barramentos, contactores e disjuntores.

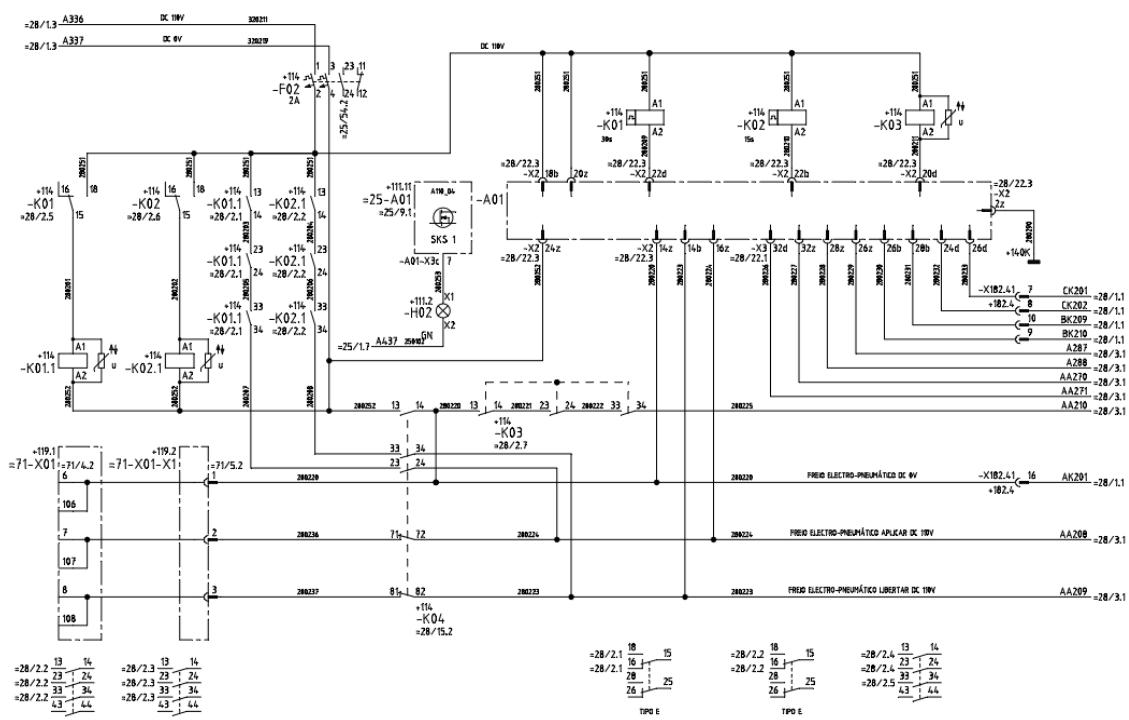
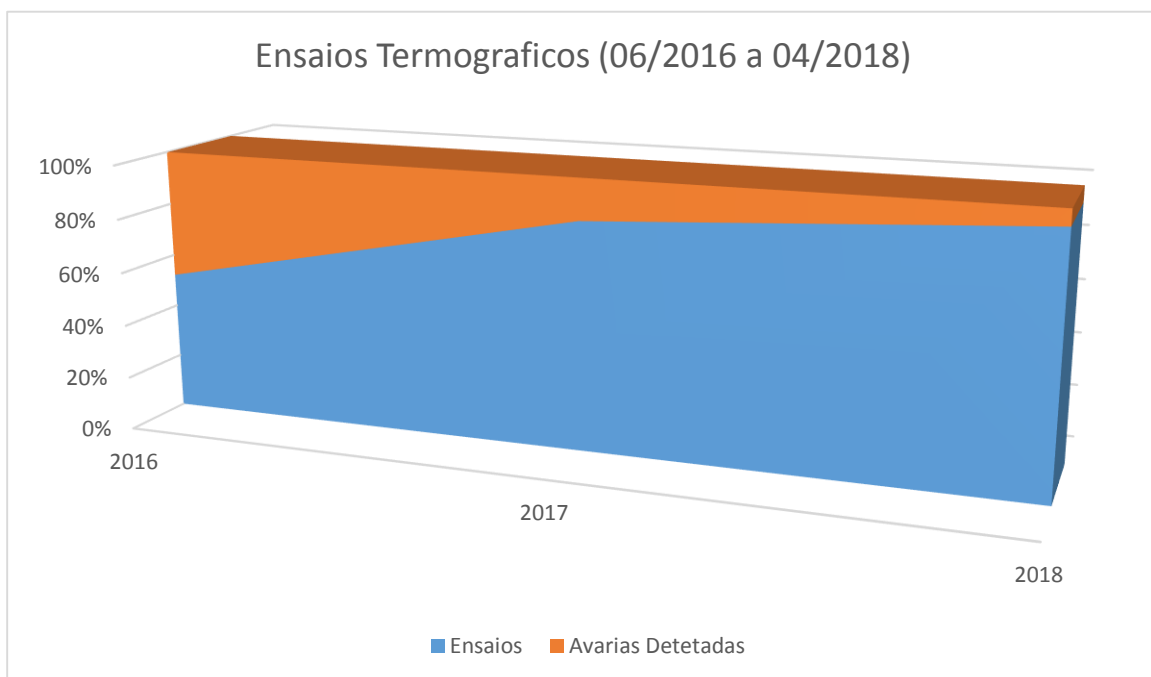
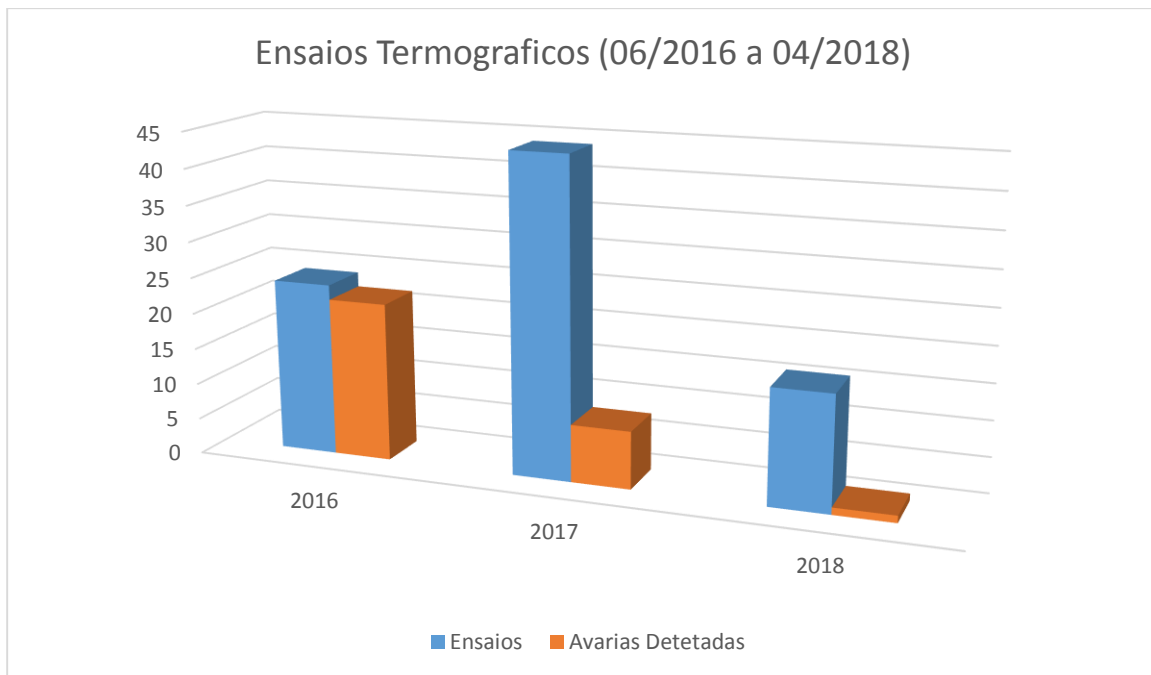


Figura 39 - Exemplo de Esquema Elétrico

Durante o período acompanhado verificou-se que a termografia é cada vez uma mais-valia na manutenção industrial pois foram detetadas anomalias que apenas seriam detetadas por falha de sistemas ou destruição de equipamentos.

3.3.1 ENSAIOS EFETUADOS

Durante o período de acompanhado na implementação dos ensaios termográficos foram efetuados 84 ensaios e detetadas 31 anomalias.



Após análise dos dados adquiridos verificamos que com a implementação da termografia nos planos de manutenção o número de avarias detetado foi diminuindo.

Podemos verificar que no ano de 2017 com um maior número de ensaios efetuados as avarias diminuíram em relação a 2016 que com uma menor quantidade de ensaios efetuados foram detetadas mais do dobro de avarias.

Em 2018 só contabilizando os primeiros meses verificou-se uma diminuição drástica de avarias detetadas, sendo apenas detetada uma avaria.

Pode-se com isto tirar algumas conclusões, a introdução de uma inspeção termográfica periódica no plano de manutenção é uma mais-valia na deteção de avarias. Sendo uma tecnologia não evasiva reduz bastante os custos associados à sua aplicação.

3.3.2 EXEMPLOS DE AVARIAS DETETADAS

Neste ponto serão apresentadas algumas das avarias mais comuns detetadas durante a execução da inspeção termográfica com os respetivos termogramas

3.3.2.1 Linha desapertada

As linhas desapertadas causam bastantes problemas em circuitos elétricos principalmente nos circuitos sujeitos a grandes vibrações.

No fotograma seguinte foi detetada uma temperatura excessiva em umas das linhas de um contactor atingindo a temperatura de 102,3 °C.

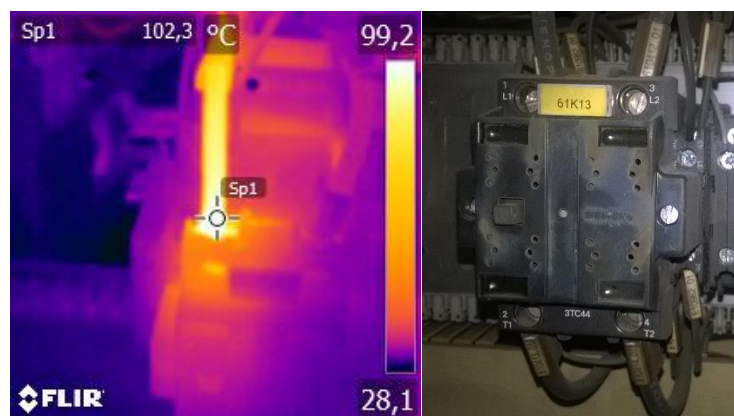


Figura 40 - Termograma de Contacto do Contactor em Avaria

Após análise verificou-se uma linha desapertada, a mesma foi reapertada ficando a temperatura de funcionamento nos 33,6 °C.

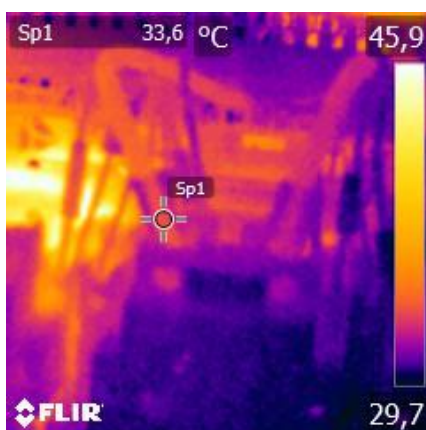


Figura 41 - Termograma do Contacto do Contactor Reparado

3.3.2.2 Falta de alimentação

No fotograma seguinte verificou-se que apenas um dos enrolamentos de um transformador se encontrava quente.

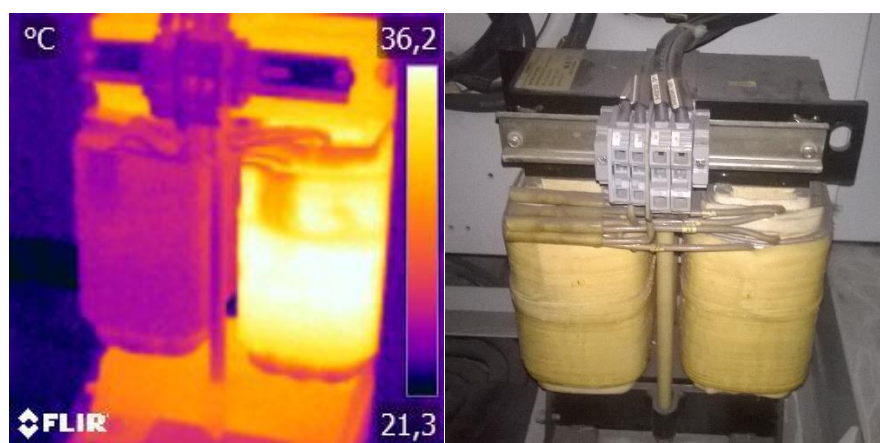


Figura 42 - Termograma do Transformador em Avaria

Após análise da avaria verificou-se a que uma das linhas de alimentação do transformador tinha partido.

Após reparação da linha ficaram ambos enrolamentos em funcionamento.

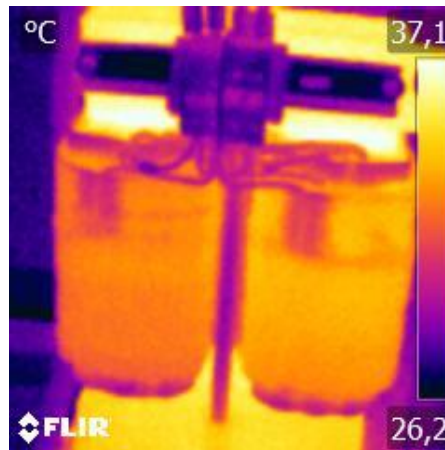


Figura 43 - Termograma do Transformador Reparado

3.3.2.3 Barramento desapertado

No fotograma seguinte foi detetada uma temperatura excessiva em um barramento de alimentação de vários circuitos com temperatura de 60,9 °C.

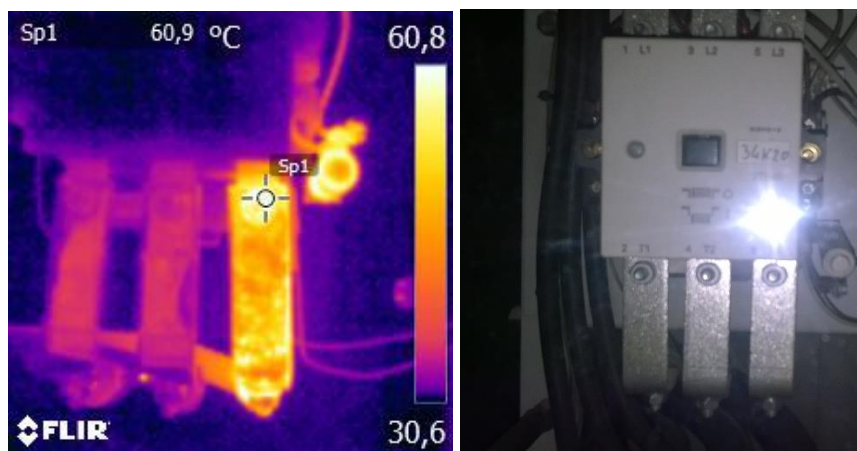


Figura 44 - Termograma do Barramento de 400V em Avaria

Após análise verificou-se que o barramento se encontrava desapertado, o mesmo foi reapertado ficando com uma temperatura de funcionamento de 29,9 °C.

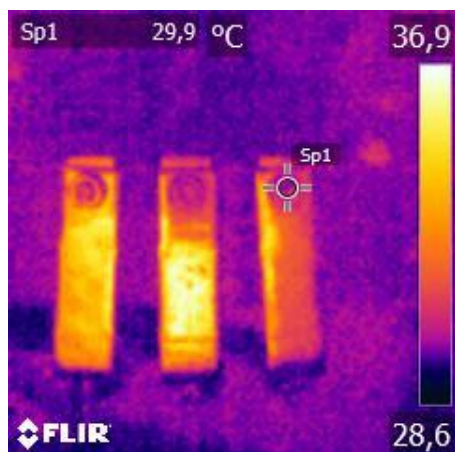


Figura 45 - Termograma do Barramento de 400V Reparado

3.4 ANÁLISE QUANTITATIVA DE UMA AVARIA

Neste ponto serão apresentados os custos associados a uma avaria detetada durante os ensaios termográficos (manutenção preventiva) e os custos associados à falha do equipamento durante o seu funcionamento normal (manutenção corretiva).

O exemplo que iremos usar será a falha de um contactor de um grupo de produção de ar comprimido neste caso para quantificar serão utilizados parâmetros do setor de transportes, especificamente parâmetros do setor ferroviário.

No caso de uma falha detetada durante uma inspeção de manutenção preventiva, os custos associados à reparação serão apenas o custo do equipamento acrescido da mão-de-obra imputada à substituição do mesmo. (uma vez que a composição ferroviária se encontra já imobilizada para inspeção periódica obrigatória).

Neste primeiro caso com deteção durante a inspeção os custos associados à avaria seriam apenas o custo do contactor e uma hora de trabalho de um técnico especializado.

No caso da avaria se manifestar no decorrer de um serviço comercial (considerando um equipamento ferroviário), os custos da reparação serão mais elevados, estamos perante um caso de manutenção corretiva.

Para análise de custos e tempo associados a uma avaria inesperada serão analisados os seguintes parâmetros:

1. Deslocação forçada à oficina por avaria

A deslocação forçada à oficina por avaria acarreta um custo elevado devido à necessidade de deslocação a composição ferroviária à oficina no Porto podendo a mesma se encontrar em qualquer parte do País.

Os custos associados a está deslocação são vários, aluguer de linha, consumo de energia, técnico de condução.

2. Indisponibilidade do material circulante

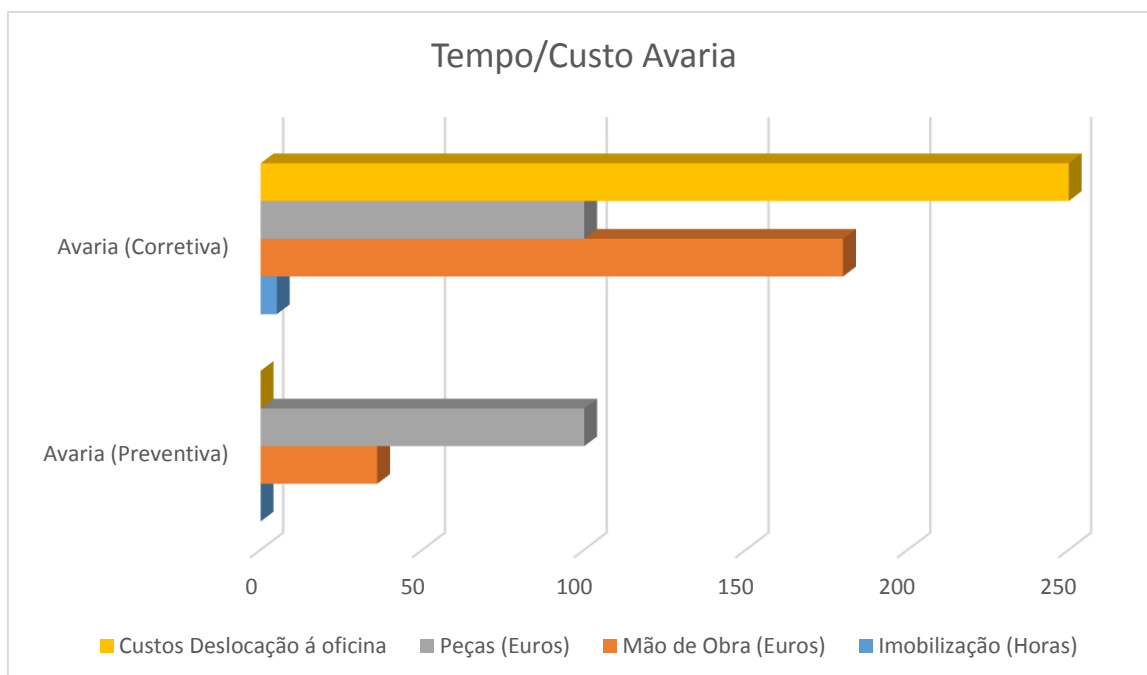
A indisponibilidade de material também tem custo elevados associados devido à composição estar parada quando devia estar a fazer serviço comercial.

3. Tempo de deteção e reparação da avaria

Na deteção de avaria temos associado o tempo que o material ferroviário se encontra parado para deteção e reparação da avaria.

4. Custo do equipamento avariado

5. Mão-de-obra



Concluindo esta análise verificamos que a detecção prematura da avaria recorrendo à termografia reduz bastantes os custos de reparação de uma avaria e a indisponibilidade do material.

Neste caso foi usado como exemplo um equipamento ferroviário podendo esta análise ser aplicada a qualquer empresa de produção industrial, principalmente em linhas de produção em série que os equipamentos são dependentes uns dos outros.

Em caso de falha de um desses equipamentos em série temos tempos de indisponibilidade desse equipamento e de todos os equipamentos associados ao mesmo.

Capítulo 4

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

4.1 - CONCLUSÕES

As conclusões a tirar são bastante positivas apesar de ser muito prematura a implementação da termografia em planos de manutenção no caso em estudo, mas já existem provas dadas da eficácia da termografia aplicada em manutenção de sistemas elétricos, e em varias áreas de aplicação não elétricas.

Baseado nos dados adquiridos e conseqüente deteção de avarias podemos ficar bastante satisfeitos com os resultados obtidos.

As avarias detetadas são falhas que não existiam outra maneira de serem detetadas, apenas seriam detetadas no momento em que acontecesse a falha funcional do equipamento.

No caso dos equipamentos em estudo fazerem parte integrante de um equipamento ferroviário qualquer tipo de anomalia é preocupante, todas as avarias detetadas prematuramente são uma vantagem enorme para todos os dependentes do equipamento.

Uma deteção de um equipamento defeituoso durante uma inspeção periódica será o método que agradaria a todos os que trabalham e gerem equipamentos deste género, as avarias inesperadas são fruto de enormes problemas, por vezes não solucionáveis facilmente.

Com a integração de mais uma técnica de diagnóstico e deteção de algumas avarias que seriam impercetíveis sem recurso do equipamento termográfico podemos afirmar que existe um aumento da disponibilidade do equipamento ferroviário e conseqüentemente existe um aumento da fiabilidade.

A combinação das ferramentas existentes, Manutenção preventiva, RCM, Termografia são utilizadas na tentativa de minimizar falhas de equipamentos, no equipamento ferroviário em estudo as falhas de equipamentos por avaria são bastante problemáticas, podendo originar um inúmero de problemas.

Os problemas a serem evitados estão por norma relacionados com custos, podem existir problemas de menor impacto que no caso ferroviário não impliquem a inutilização da composição mas poderão causar atrasos ou queixas de clientes e os custos associados a esses problemas são imputados ao causador da falha.

Nos problemas de maior impacto poderemos ter indisponibilidade do equipamento, neste caso os custos associados são avultados sendo necessária a deslocação do equipamento para reparação sem esta estar programada, existe logo um tempo de indisponibilidade e um decréscimo da disponibilidade, estas são o tipo de falhas mais temidas e as falhas a evitar.

Recorrendo à integração da termografia nos planos de manutenção aumentamos o número de ferramentas de apoio à manutenção com base nos dados obtidos serão significativos os números de avarias detetadas, diminuindo o número de avarias não previstas conseguindo um aumento de fiabilidade do equipamento.

A termografia, no entanto, não pode substituir as inspeções existentes de instalações elétricas. Especialmente, ela não substitui as inspeções visuais necessários, testes de funcionamento, medições de corrente, etc., que devem ser realizados no decorrer do processo.

No entanto, representa um método de medição auxiliar, complementar e permite especialmente análises e avaliações do estado da instalação, que até hoje só eram possíveis com grande esforço e com custos elevados.

A principal aplicação da termografia consiste na localização de anomalias elétricas e mecânicas. Ao contrário do que muitos consideram, a temperatura de um dispositivo (incluindo a sua temperatura relativa) nem sempre é o melhor indicador da iminência de uma avaria. Devem ser tidos em conta outros fatores, como as alterações na temperatura ambiente e nas cargas mecânicas ou elétricas, indicações visuais, importância dos componentes, histórico das reparações e avarias em componentes similares, resultados de outros testes, entre outros. A termografia é mais útil se for utilizada como um elemento que participa num programa completo de monitorização e de manutenção preditiva.

4.2 - TRABALHO FUTURO

Continuação da implementação da termografia em áreas da manutenção industrial, com termografia várias áreas podem ser beneficiadas com a sua utilização.

Algumas das áreas importantes a implementar e com benefícios enormes seria nos sistemas de climatização e nos sistemas de refrigeração por ventilação.

Na aplicação em sistemas de climatização poderiam ser analisados os valores de saída das condutas verificando-se a eficácia do grupo de climatização, com a perda de eficácia seriam detetados problemas prematuramente. Uma câmara termográfica não faz apenas medições em quente faz também medições em frio.

Na aplicação da tecnologia a ventiladores seria possível detetar avarias mecânicas ou seja a gripagem de rolamentos, nesta área não existem grandes ferramentas de diagnóstico, apenas são detetadas avarias através de ruídos audíveis ou por gripagem total na qual existe uma atuação da proteção elétrica.

Nesta implementação seriam minimizados os desgastes elétricos com a deteção de sobreaquecimento nos rolamentos e procedendo à reparação não sendo necessária uma sobrecarga do motor.

Referências

- [1]. (s.d.). Obtido de <https://www.algosobre.com.br/fisica/radiacao-infravermelha.html>
- [2]. (s.d.). Obtido de <http://scienceeasylearning.wordpress.com/2015/01/11/dispersion-of-light>
- [3]. (s.d.). Obtido de https://www.youtube.com/watch?time_continue=21&v=9eEyTw4wylk
- [4]. (s.d.). Obtido de <http://www.termografia.com.pt/curso-termografia>
- [5]. (s.d.). Obtido de www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/download/3223/2690
- [6]. (s.d.). Obtido de http://www.aiminho.pt/imgAll/file/Sustentar/Guia_de_Orientacao_para_a_utilizacao_das_Energias_Renovaveis.pdf.
- [7]. (s.d.). Obtido de Incropera, Frank P.; DeWitt, David P.; Bergman, Theodore L.; Lavine, Adrienne S., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th edition)”, Wiley, October 2006.
- [8]. (s.d.). Obtido de SPECMAN, “Medição e Análise Termográfica Capítulo I, Conceitos Básicos de Termografia”, Portugal 2010.
- [9]. (s.d.). Obtido de AFONSO, J. Termografia: Teoria, Procedimentos e Vantagens. Setúbal: ITEAG. 2010.
- [10]. (s.d.). Obtido de EPRI. Infrared Thermography Field Application Guide. Palo Alto, CA: EPRI. 1999.
- [11]. (s.d.). Obtido de <http://www.mra.pt/industria/produtos/termografia-e-camaras-termograficas/camaras-termograficas-investigacao-e-desenvolvimento-id/camaras-refrigeradas/assinaturas-termicas/fotos/>
- [12]. (s.d.). Obtido de <http://www.sohlen.com.br/analise-termografica.html>

- [13]. (s.d.). Obtido de <https://www.clinica-de-termografia.eu>
- [14]. (s.d.). Obtido de <http://factorelevante.vetorpolaridade.pt/aero.html>
- [15]. (s.d.). Obtido de <http://www.peritagemdeedificios.com/termografia.html>
- [16]. (s.d.). Obtido de <http://www.mra.pt/industria/produtos/imagem-e-fotonica/termografia-e-camaras-termograficas/id-automovel/>
- [17]. (s.d.). Obtido de http://www.hz-ld.com/hz-ld_Article_134214.html
- [18]. (s.d.). Obtido de <https://www.dbtec.com.br/single-post/inspecao-termografica>
- [19]. (s.d.). Obtido de <https://www.oui.sncf/tgv>
- [20]. (s.d.). Obtido de <http://www.martechnicltd.com/ReliabilityCenteredMaintenance.php>
- [21]. (s.d.). Obtido de <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAg-IEAJ07-manutencao-ok>
- [22]. (s.d.). Obtido de <https://www.flir.com/>