



ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MARÍTIMA

Mestrado em Engenharia de Máquinas Marítimas

Diagnóstico Automático e à Distância, de Falhas em Equipamentos Marítimos, utilizando a Termografia

José de Nascimento Branco

(Licenciado em Engenharia de Máquinas Marítimas)

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia de Máquinas Marítimas

Orientador: Prof. Adjunto Pedro Daniel Dinis Teodoro

Coorientador: Prof. Adjunto Luís Manuel Mendonça

Júri:

Presidente: Prof. Adjunto Manuel Duarte Dias Mendes Nogueira

Vogal: Doutor Eng. Pedro Miguel Santos Pires

Vogal: Prof. Adjunto Pedro Daniel Dinis Teodoro

E.N.I.D.H. Abril, 2018



ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MARÍTIMA

Mestrado em Engenharia de Máquinas Marítimas

Diagnóstico Automático e à Distância, de Falhas em Equipamentos Marítimos, utilizando a Termografia

José de Nascimento Branco

(Licenciado em Engenharia de Máquinas Marítimas)

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre

em Engenharia de Máquinas Marítimas

Orientador: Prof. Adjunto Pedro Daniel Dinis Teodoro

Coorientador: Prof. Adjunto Luís Manuel Mendonça

Júri:

Presidente: Prof. Adjunto Manuel Duarte Dias Mendes Nogueira

Vogal: Doutor Eng. Pedro Miguel Santos Pires

Vogal: Prof. Adjunto Pedro Daniel Dinis Teodoro

E.N.I.D.H. Abril, 2018

AGRADECIMENTOS

Antes de mais agradeço a Deus pelo dom da vida. Endereço a minha profunda gratidão a todo o Corpo Diretivo e Docente da Escola Superior Náutica Infante D. Henrique que tive a felicidade de ter como instrutores. A vossa experiência, sabedoria, paciência ao longo de toda a formação, permitiram-me alcançar o objetivo.

Agradeço aos meus tutores em particular ao meu Orientador Professor Pedro Teodoro e ao coorientador Professor Luís Manuel Mendonça a quem devo a minha humilde e sincera consideração e reconhecimento pelo esforço e acompanhamento que me dedicaram ao longo do período de elaboração deste trabalho.

À minha família, pelo apoio incondicional e pela compreensão pela minha ausência durante o período da formação.

O meu infinito agradecimento aos meus colegas e a todos os acima mencionados pela colaboração na realização desta dissertação.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o diagnóstico de falhas em equipamentos marítimos utilizando a termografia, tendo como objetivo a elaboração de um mecanismo de diagnóstico automático de falhas de forma remota. Para tal, é proposto a instalação de uma câmara termográfica no local das inspeções. O mapeamento dos alvos deve ser feito de forma contínua durante o funcionamento dos equipamentos. Os dados termográficos são enviados para um computador ligado à câmara para posteriormente serem processados.

A detecção automática de falhas é um dos temas muito importante na área marítima que apresenta instalações complexas. A utilização de imagem é um sistema extremamente usado na indústria para a análise e manutenção dos componentes. Portanto, a aplicação da tecnologia de imagem térmica e automação para o diagnóstico de falhas em equipamentos marítimos a distância é importante e oportuna.

Para alcançar este propósito, o estudo faz uma breve abordagem dos diferentes tipos de manutenção e da sua aplicabilidade, bem como, dos princípios e aplicações de termografia. Foi criado a aplicação MATE¹, que permite fazer o processamento de imagens térmicas, tendo como resultado o diagnóstico de falhas e o armazenamento de imagens térmicas.

Pelas inúmeras vantagens que a termografia apresenta, é proposto neste trabalho, como a ferramenta a ser aplicada no diagnóstico automático de falhas durante o processo de aquisição de dados térmicos dos equipamentos. A particularidade que a inspeção termográfica tem de não interferir nas operações dos equipamentos, ganha um espaço incontornável em componentes marítimos, pois, reduz os custos de paralisação dos equipamentos.

Palavras-chave: Equipamentos Marítimos, Diagnóstico Automático, Manutenção, Termografia, Aplicação MATE.

¹ Aplicação de Monitorização e Análise Térmica de Equipamentos.

ABSTRACT

The present work presents the diagnosis of failures in marine equipment using the thermography, aiming at the elaboration of a mechanism of automatic diagnosis of faults remotely. To this end, it is proposed to install a thermographic camera at the site of the inspections. The mapping of the targets must be done continuously during the operation of the equipment. The thermographic data is sent to a computer connected to the camera for processing.

Automatic fault detection is one of the very important issues in the maritime area that features complex installations. The use of imaging is a system widely used in the industry for the analysis and maintenance of components. Therefore, the application of thermal imaging technology and automation for the diagnosis of faults in marine equipment at a distance is important and timely.

To achieve this, the study briefly discusses the different types of maintenance and their applicability, as well as the principles and applications of thermography. The application MATE was created, which allows the thermal imaging to be processed, resulting in fault diagnosis and the storage of thermal images.

Due to the numerous advantages that thermography presents, it is proposed in this work, as one of the tools to be applied in the automatic diagnosis of failures during the process of acquisition of thermal data of equipment. The particularity that thermographic inspection has of not interfering in the operations of the equipment, gains an unavoidable space in marine components, as it reduces the costs of equipment standstill.

Keywords: Marine Equipment, Automatic Diagnostics, Maintenance, Thermography, Application o MATE.

LISTA DE ABREVIATURAS

EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read Only Memory.</i>
FLIR	<i>Foward Looking Infra-Red</i> _(visão dianteira por infravermelhos).
FPA	<i>Focal Plane Array</i>
InSb	Antimoneto de índio
MATE	Monitorização e análise térmica de equipamentos
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Tempo Médio entre Falhas)
MTC	Mercúrio-Cádmio-Telúrio
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i> (tempo médio de reparação)
PCMCIA	<i>Personal Computer Memory Card International Association</i>
PtSi	Silicieto de platina,
<i>RCT</i>	Resistência ao choque térmico
SOLAS	Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar
SV	Sistema de varrimento

LISTA DE SÍMBOLOS

K – Kelvin.

°C – Celsius.

°F – Fahrenheit.

U – Sinal de saída da câmara termográfica.

C – Constante (depende da atmosfera, dos componentes óticos da câmara termográfica e das propriedades do detetor).

ε – Emissividade.

τ – Transmissão espectral.

ρ – Reflexão espectral.

α – Absorção espectral.

λ – Comprimento de onda (μm).

c – Calor específico ($\text{J}/(\text{kg K})$); Velocidade da luz ($\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

σ – Constante de Boltzman ($\approx 5,8 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$).

k_B – Constante de Boltzmann ($\approx 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

h – Constante de Planck ($\approx 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$).

h_f – Coeficiente convectivo de transferência de calor.

α_l – Coeficiente de dilatação linear.

ΔL – Variação do comprimento.

L_0 – Comprimento inicial.

I – Intensidade incidente (W/sr).

L – Espessura do material na direção do fluxo de calor.

I_o – Intensidade inicial.

λ_{max} – Comprimento de onda máximo.

b – Constante de proporcionalidade de Wien ($\approx 2898 \mu\text{m K}$).

ΔT – Variação de temperatura.

T – Temperatura absoluta (K).

T_s – Temperatura efetiva do ambiente.

T_T – Temperatura de material.

T_{refl} – Temperatura do meio ambiente.

T_{obj} – Temperatura do objecto.

Φ – Fluxo de calor ($\text{J/m}^2\text{s}$ ou W/m^2).

k – Condutividade térmica expresso ($\text{J}/(\text{m K s})$).

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ – Gradiente de temperatura expresso (K/m).

A – Secção transversal de área.

ΔQ – Quantidade de calor que passa em unidade de tempo através de uma secção de área unitária.

Q – Quantidade de calor adicionada ou removida (J ou cal).

m – Massa da substância (kg).

Y – Módulo de elasticidade.

σ_f – Tensões térmicas.

G – Gradiente térmico ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)

E – Quantidade de energia emitida por um corpo negro (λ constante) [W/m^2].

E' – Quantidade de energia emitida por um corpo qualquer (λ constante).

E_{atm} – Quantidade de calor transferido por radiação pela atmosfera (W/m^2).

E_{GB} – Potência emissiva do corpo cinzento.

E_{refl} – Quantidade de calor transferido por radiação, refletida a partir de uma fonte ambiental.

E_{tot} – Quantidade total de calor transferido por radiação, por unidade de tempo, na unidade de área.

$E_{(\lambda,T)}$ – Potência radiante espectral do corpo negro. ($\text{W}/\text{m}^2\eta\text{m}$)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do espectro de radiações eletromagnéticas [1].....	22
Tabela 2 – Capacidade emissiva, reflexiva e transmissiva de alguns materiais [30].....	32
Tabela 3 – Valores típicos para a emissividade de alguns materiais [1].....	34
Tabela 4 – Calor específico de alguns materiais [33].	46
Tabela 5 – Lista dos equipamentos compilados para a validação da aplicação MATE.....	69
Tabela 6 – Variáveis inseridos na câmara termográfica.....	89

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Descrição do funcionamento da aplicação.....	72
Fluxograma 2 – Etapas do processamento de imagem.	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de vida de um componente [6].	9
Figura 2 – Intervenções em equipamentos [7].	10
Figura 3 – Captação de radiação infravermelha e conversão em imagem térmica.	15
Figura 4 – Representação de uma onda eletromagnética [21].	19
Figura 5 – Decomposição da luz com um prisma [22].	19
Figura 6 – Decomposição da luz visível em função de comprimento de onda [23].	20
Figura 7 – Espectro eletromagnético [24].	20
Figura 8 – Radiação de um corpo humano [15].	23
Figura 9 – Radiação de um ferro de soldar [15].	24
Figura 10 – Radiação do sol [15].	24
Figura 11 – Representação esquemática da medição real de radiações termográficas: (1) ambiente, (2) objeto, (3) atmosfera, (4) câmara termográfica [18].	25
Figura 12 – Distribuição e picos de energia irradiada pelos objetos às várias temperaturas [32].	29
Figura 13 – Interação entre a energia radiante e o material alvo [34].	31
Figura 14 – Emissividade espectral dos corpos cinzentos e corpos não cinzentos [35].	33
Figura 15 – Emissividade e refletividade do vidro em função do ângulo de visão [33].	35
Figura 16 – Influência do ângulo de visão [37].	35
Figura 17 – Representação da variação da emissividade com a geometria [33].	36
Figura 18 – Representação da emissividade dependendo da geometria do alvo. (a) Parte superior de caixa de alumínio polido, (b) vista de cima da caixa com um lado removido, e (c) a mesma superfície vista através de um pequeno orifício [33].	37
Figura 19 – Variação de emissividade com a qualidade de superfície [30].	38
Figura 20 – Emissividade da superfície dos metais polidos e rugosos [33].	38
Figura 21 – Variação da emissividade dos materiais metálicos com o aumento da temperatura Níquel (1), Tungstênio (2) e Platina (3) [38].	39
Figura 22 – Variação da emissividade dos materiais não-metálicos com a temperatura. Borracha (1), Porcelana (2), Cortiça (3), Papel (4) e Argila refratária (5) [30].	39

Figura 23 – Variação da emissividade com o comprimento de onda do Cobre (1), Ferro (2), Alumínio (3) e Prata (4) [38].....	40
Figura 24 – Emissividade da Água (1), do Terra (2) e do Plástico (3) [38].....	40
Figura 25 – Transmissividade da atmosfera em diferentes bandas de comprimento de onda [18]....	41
Figura 26 – Medição da radiação emitida e a refletida [33].....	42
Figura 27 – Fluxo de calor que atravessa a placa [41].	45
Figura 28 – Modos de transferência de calor.	49
Figura 29 – Transferência de calor por condução [43].	50
Figura 30 – Transferência de calor por convecção [33].....	51
Figura 31 – Transferência de calor através da radiação do sol.	52
Figura 32 – Pirômetros de temperatura [44].	53
Figura 33 – Modelo de uma câmara da FLIR [46].....	54
Figura 34 – Comparação entre o germânio e o vidro na condução de energia infravermelha [15]. ..	55
Figura 35 – Materiais óticos e suas faixas de transmissão [37].	55
Figura 36 – Exemplo de funcionamento de uma câmara termográfica [15].....	57
Figura 37 – Imagem digital e Imagem térmica de uma máquina auxiliar de 900 kW [48].	58
Figura 38 – Estudo estrutural de um casco [49].....	59
Figura 39 – Imagem digital e Imagem térmica do escape de um motor de navio [18].....	60
Figura 40 – Detecção de falha na zona dos rolamentos do motor elétrico [49].....	60
Figura 41 – Imagem digital e Imagem térmica de uma ligação fraca no isolador de um interruptor [18].	61
Figura 42 – Imagem digital e Imagem térmica do arrefecedor de ar [18].....	61
Figura 43 – Imagem do painel da aplicação MATE.	65
Figura 44 – Imagem do primeiro Grupo, Área do Trabalho	66
Figura 45 – Imagem do segundo Grupo, Painel do comando.	67
Figura 46 – Área das Propriedades da aplicação MATE.	68
Figura 47 – Representação do estado térmico dos equipamentos.	71
Figura 48 – Representação matricial de uma região da imagem digital [50].....	74
Figura 49 – Processamento de imagem digital [51].	74
Figura 50 – Conversão de valores de pixéis em valores da temperatura.	75
Figura 51 – Perfil da imagem gravada pela aplicação MATE.	77

Figura 52 – Exibição e processamento da imagem térmica.	79
Figura 53 – Definição do recetor de imagem.	80
Figura 54 – Iniciar a aplicação.	80
Figura 55 – Processo para criar uma nova área de trabalho.	81
Figura 56 – Processo de adicionar os elementos.	82
Figura 57 – Ativação dos avisos.	82
Figura 58 – Processo de editar a região do alvo.	83
Figura 59 – Iniciar a aplicação.	84
Figura 60 – Janela com os ficheiros.	84
Figura 61 – Ficheiro com a listar das áreas de trabalhos.	85
Figura 62 – Disposição do setup experimental.	86
Figura 63 – Gráfico de evolução de temperatura e imagem gravada pela aplicação.	87
Figura 64 – Algumas mensagens enviadas pela aplicação na situação de falha localizada.	88
Figura 65 – Ensaio com os compressores.	90
Figura 66 – Imagem digital e Imagem térmica do grupo compressor da piscina da ENIDH.	91
Figura 67 – Gráficos de evolução de temperatura dos alvos.	92
Figura 68 – Imagem gravada devido ao gradiente máximo do compressor 1.	93
Figura 69 – Imagens gravadas no âmbito de gradiente máximo dos dois compressores.	94
Figura 70 – Tipo de mensagens que a aplicação envia.	94
Figura 71 – Imagem digital e Imagem térmica do motor elétrico da bomba de agua.	95
Figura 72 – Gráfico da evolução de temperatura do motor elétrico.	96
Figura 73 – Uma das imagens do motor elétrico da bomba gravada periodicamente.	96
Figura 74 – Imagem digital (a) e Imagem térmica (b) de uma caldeira da ENIDH.	97
Figura 75 – Ensaio com a caldeira de agua quente.	98
Figura 76 – Coleção de imagens de cada elemento gravadas periodicamente.	99
Figura 77 – Ensaio realizados no navio.	100
Figura 78 – Ensaio com a bomba.	101
Figura 79 – Ensaio com quadro elétrico.	102
Figura 80 – Controlo da vedação da válvula do óleo térmico.	103

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE ABREVIATURAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	v
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FLUXOGRAMAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 Nota introdutória.....	1
1.2 Exposição sobre o problema.....	1
1.3 Hipótese	2
1.4 Objetivos.....	3
1.5 Motivação e importância do trabalho	3
1.6 Resultados pretendidos	4
1.7 Contribuições.....	4
1.8 Descrição do trabalho	5
CAPÍTULO II – MANUTENÇÃO	7
2.1 Manutenção	7
2.2 Missão de manutenção.....	7
2.3 Objetivos de Manutenção	8
2.4 Tipos de Manutenção.....	8
2.5 Diagnóstico de falhas.....	11
CAPÍTULO III – TERMOGRAFIA	15
3.1 Termografia	15
3.2 Evolução histórica da termografia	16
3.3 Classificação da Termografia	17

3.4	Princípios da radiação.....	18
3.5	Medição da radiação infravermelha.....	25
3.6	Radiação do corpo negro e corpo real	27
3.7	Lei de Planck, Wien, Boltzmann e Kirchhoff	28
3.8	Transmissibilidade, absorvidade e refletividade	31
3.9	Fatores que podem influenciar a variação de radiação infravermelha	33
3.9.1	Variação de emissividade com o ângulo de visão	35
3.9.2	Variação da emissividade com a forma ou geometria do objeto.....	36
3.9.3	Variação de emissividade com a qualidade de superfície do alvo	37
3.9.4	Variação de emissividade com a temperatura e ou comprimento de onda (λ).....	38
3.9.5	Influência da atmosfera na variação de radiação infravermelha	40
3.9.6	Influência ambiente na variação de radiação infravermelha	41
3.10	Propriedades Térmicas	43
3.10.1	Dilatação ou expansão térmica.....	44
3.10.2	Condutibilidade térmica	44
3.10.3	Capacidade térmica ou calor específico	45
3.10.4	Resistência ao choque térmico	47
3.10.5	Transferência de Calor	48
3.11	Sistemas de medição de radiação térmica	52
3.12	Aplicações de Termografia.....	57
3.13	Vantagens e desvantagens da termografia.....	62
CAPÍTULO IV - METODOLOGIA E MATERIAL		64
4.1	Metodologia.....	64
4.2	Implementação da aplicação MATE	65
4.2.1	Material e princípio básico da aplicação	72
4.2.2	Procedimentos para operação da aplicação MATE.....	79
4.3	Teste para a validação da aplicação.....	85
CAPÍTULO V – RESULTADOS DOS ENSAIOS		89
5.1	Resultados e Discussão.....	89
5.2	Ensaio na ENIDH.....	90
5.2.1	Ensaio com os compressores de ar	90
5.2.2	Ensaio com o motor elétrico da bomba	95

5.2.3	Ensaio com caldeira 3	97
5.3	Ensaio realizado no Navio Corvo.....	100
5.3.1	Ensaio com a bomba	100
5.3.2	Ensaio com quadro elétrico	101
5.3.3	Ensaio com a válvula.....	103
5.3.4	Análise dos resultados	104
CONCLUSÕES.....		105
BIBLIOGRAFIA.....		108
ANEXOS.....		114

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 Nota introdutória

O transporte marítimo de mercadorias, em comparação com outros modos de transporte, apresenta-se como o mais acessível em termos do custo/frete, com a maior versatilidade de carga e segurança. Assim, o funcionamento deste meio de transporte sem que ocorram avarias é fundamental. Neste âmbito, o diagnóstico automático e inteligente de falhas nestes equipamentos poderá contribuir para melhorar os índices de desempenho nomeadamente no que diz respeito à disponibilidade e segurança dos equipamentos marítimos.

A utilização da termografia possibilita avaliar em tempo útil o estado operacional dos equipamentos marítimos e desenvolver um plano de manutenção preventiva.

Pretende-se que o estado do equipamento seja avaliado de forma permanente e automática. A análise automática dos dados de termografia deverá desencadear um alarme sempre que o equipamento esteja em processo de falha e a análise assim o indique. Pretende-se que a análise dos dados de termografia seja efetuada à distância do local de aquisição com recurso a uma metodologia de avaliação inteligente. Assim, a utilização da termografia no diagnóstico de falhas contribuirá para a melhoria do desempenho dos equipamentos marítimos.

1.2 Exposição sobre o problema

Os componentes ou sistemas mecânicos, durante o seu funcionamento, dissipam o calor sob a forma de radiação infravermelha. O aquecimento nos equipamentos pode ser por atrito, sobrecarga, arrefecimento deficiente e temperatura ambiente elevada. Este aquecimento é progressivo consoante as condições operacionais do equipamento, bem como das características do material. A emissão excessiva de calor pelos equipamentos poderá indicar um sinal de funcionamento anormal. Esse funcionamento anormal, com o passar do tempo, poderá desencadear uma avaria no equipamento,

causando danos de menor ou maior vulto, dependendo da sua importância e do instante da deteção da falha.

A gestão de manutenção condicionada tem sido largamente discutida nas últimas décadas. Tem sido usado uma variedade de técnicas para a monitorização da vibração, do aquecimento e do desgaste de equipamentos industriais [1].

Questões iniciais:

- Que tipo de ações podem ser tomadas para que as falhas, ainda na fase inicial, sejam identificadas de forma rápida, segura e com baixo custo?
- Que técnicas devem ser usadas com a finalidade de eliminar as falhas, ou acompanhar o seu desenvolvimento até ao ponto em que seja necessário a intervenção de manutenção?

1.3 Hipótese

A manutenção condicionada consiste no acompanhamento periódico do estado de funcionamento dos equipamentos, baseando-se na análise de dados obtidos através de inspeções no local de trabalho. Uma das metodologias de análise é a inspeção termográfica por infravermelhos. Este tipo de inspeção auxilia na deteção de falhas no período inicial, permitindo assim, a intervenção ou a planificação do período de atuação para prevenção de falhas. Em termos de custo/benefício, esta técnica é satisfatória devido à rapidez com que se realiza o procedimento, segurança, bem como pelo facto de as inspeções poderem ser feitas com as máquinas a funcionar, sem a necessidade de interrupção destas [2].

A termografia por infravermelho é baseada na medição da distribuição de temperatura na superfície de objeto. O instrumento térmico (câmara termográfica), capta a radiação térmica emitida naturalmente pelo alvo, e cria uma imagem térmica. A imagem térmica criada corresponde à quantidade de calor emitido pelo objeto sendo visualizada a temperatura respetiva. Esta medição da temperatura do alvo é feita em tempo real. Na imagem criada, é possível identificar regiões onde a temperatura varia em relação a um padrão estabelecido.

A implementação de uma aplicação que possa avaliar as imagens térmicas geradas pelas câmaras termográficas no momento das inspeções e enviar os resultados para um telemóvel em caso de ocorrência de falhas, seria interessante pelo facto de não necessitar da presença humana no local.

1.4 Objetivos

1.4.1 Gerais:

Elaboração do mecanismo de diagnóstico automático e remoto de falhas em equipamentos marítimos, utilizando a termografia.

1.4.2 Específicos:

No desenvolvimento deste trabalho, serão desenvolvidos os seguintes pontos:

- Medição termográfica dos equipamentos;
- Análise das imagens térmicas e dos resultados;
- Implementação de uma aplicação de monitorização dos dados termográficos;
- Conclusões das análises feitas.

1.5 Motivação e importância do trabalho

O presente trabalho, foi elaborado pela necessidade de consolidação da tecnologia de diagnóstico de falhas, através do fenómeno de aquecimento dos equipamentos e da tecnologia de automação. O objetivo é conseguir resultados em tempo útil sem ser necessária a presença de um operador no local. Essa necessidade surge numa altura em que a tecnologia está muito avançada e o mercado aposta na qualidade e acessibilidade. A mesma é oportuna no panorama atual das exigências crescentes de padrões aceitáveis de disponibilidade, qualidade e segurança na operação e manutenção dos equipamentos.

A aplicação da termografia como ferramenta para o diagnóstico de falhas de forma automática e remota, faz deste trabalho um tema importante, que merece uma boa exploração na indústria marítima bem como noutras áreas. Permite prescindir a presença humana constante nos locais de inspeção, e garante a segurança dos equipamentos.

1.6 Resultados pretendidos

Com este trabalho espera-se que as falhas nos equipamentos ainda na fase inicial sejam diagnosticadas atempadamente, permitindo a correção das mesmas no momento certo. Espera-se também que este trabalho, seja uma ferramenta estratégica de manutenção nas companhias marítimas, bem como nas indústrias, de forma a contribuir para o desenvolvimento sustentável das empresas, como uma fonte de vantagem na dinâmica atual das exigências empresariais.

Para tal, é proposto uma nova aplicação em Matlab que permite o diagnóstico de falhas em tempo real através da análise de imagens térmicas adquiridas por uma câmara termográfica. A esta aplicação, decidiu-se dar o nome de MATE que corresponde a Monitorização e Analise Térmica de Equipamentos marítimos.

Deste modo espera-se que a aplicação MATE como ferramenta para o diagnóstico de falhas em equipamentos marítimos, traga mais eficiência nas ações de manutenção condicionada, redução da taxa de falhas e aumento da disponibilidade dos equipamentos. Por fim espera-se que as empresas tirem maior ganho com este mecanismo de diagnóstico de falhas, na adoção de planos de manutenção mais adequados à realidade da situação no campo, garantindo que sejam evitados acidentes por falhas de equipamentos.

1.7 Contribuições

A elaboração deste trabalho teve como principais contributos: a compilação de uma lista de 43 equipamentos marítimos com os respetivos valores de temperaturas e gradientes mínimo e máximo,

admissíveis para o funcionamento dos equipamentos; e a implementação de uma aplicação informática para monitorização de análise térmica de equipamentos ao qual se deu o nome de MATE. Esta aplicação permite, através da análise das imagens de uma câmara termográfica, o diagnóstico de falhas em tempo real com as seguintes funcionalidades:

- Possibilidade de criação de várias áreas de trabalho;
- Para cada área de trabalho, possibilidade de monitorização e análise térmica de até 6 regiões² definidas pelo operador;
- Para cada região:
 - Possibilidade de escolha de um tipo de equipamento marítimo da lista de 43 equipamentos;
 - Análise gráfica em tempo real da temperatura da região;
 - Possibilidade de envio de diferentes mensagens de texto para telemóvel consoante o tipo de falha;
 - Diferentes alarmes sonoros para diferentes tipos de falhas;
 - Gravação de imagens com o tipo de falha em caso de ocorrência;
 - Gravação de imagens periódicas durante a monitorização.

1.8 Descrição do trabalho

O trabalho está estruturado em sete capítulos, representados da seguinte forma:

- O Capítulo I, consiste na introdução do trabalho. Aborda os objetivos do estudo, a motivação, a importância do tema, os resultados esperados e contribuições;
- Os Capítulos II e III, debruçam-se sobre o enquadramento teórico (revisão bibliográfica). Estes apresentam os conteúdos que respondem aos objetivos do trabalho. Abordam

² Área do alvo em que se faz a análise térmica através da Aplicação MATE

respetivamente a manutenção (necessidade do trabalho) e a termografia (solução, técnica do projeto).

A manutenção, aborda os tipos, a missão e os objetivos da mesma, bem como versa sobre as falhas, o erro, as avarias e os processos de diagnóstico. A termografia, apresenta os princípios de radiação, sistemas de medição de radiação térmica, propriedades térmicas das matérias, aplicações, vantagens e desvantagens da termografia;

- O Capítulo IV, apresenta a metodologia adotada neste trabalho. Descreve os materiais usados e a implementação da aplicação MATE;
- O Capítulo V, apresenta a súmula dos resultados obtidos e a análise dos mesmos;
- O Capítulo VI, conclui o trabalho descrevendo resumidamente o percurso do trabalho, explanando os pontos chave do tema, bem como recomendações para os próximos trabalhos;
- Capítulo VII, apresenta a lista de obras consultadas para a elaboração do trabalho.

CAPÍTULO II – MANUTENÇÃO

Neste capítulo, expõe-se os conceitos básicos sobre manutenção e a sua importância para o diagnóstico de falhas.

2.1 Manutenção

A Manutenção pode ser entendida como sendo uma combinação de todas as ações técnicas, administrativas bem como de gestão durante o ciclo de vida de um equipamento, com a finalidade de manter ou restaurar o componente para um estado em que este seja capaz de executar a função exigida [3].

De forma genérica, pode-se dizer que a manutenção de um equipamento tem o propósito de reparar ou repor a operacionalidade nas melhores condições com qualidade, custo e disponibilidade, de uma forma segura ao longo da vida útil do equipamento. A manutenção pode ser classificada em missão, objetivos e tipos.

2.2 Missão de manutenção

A missão da manutenção consiste em evitar as perdas que são causadas por equipamentos ou problemas relacionados com o sistema. De modo a atender a um processo de produção ou serviço, com fiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente bem como o custo adequado.

O departamento de manutenção numa organização tem a missão de conseguir e sustentar o seguinte [4]:

- Ótima disponibilidade;
- Ótimas condições de operação;
- Utilização máxima dos recursos de manutenção;
- Ótima vida útil do equipamento;

- Inventário mínimo de peças sobressalentes;
- Capacidade de reagir rapidamente.

2.3 Objetivos de Manutenção

A Manutenção é considerada como um conjunto de medidas técnicas necessárias e indispensáveis para o funcionamento regular e permanente das máquinas. Assim, os objetivos devem ser claramente definidos e coerentes seguindo os seguintes indicadores [5]:

- Segurança – deve ser uma referência onipresente e inegociável;
- Qualidade – deve conseguir os melhores rendimentos das máquinas, melhores condições de higiene, melhor tratamento do ambiente;
- Custo – minimizar os custos globais e maximizar os lucros;
- Disponibilidade – maximizar o tempo possível, e reduzir ao mínimo as imobilizações programadas bem como evitar as paragens não programadas.

2.4 Tipos de Manutenção

A forma pela qual é feita a intervenção nos equipamentos, sistemas ou instalações caracteriza os vários tipos de manutenção. Atualmente existem denominações diversas para qualificar a manutenção. Neste trabalho são abordados três principais tipos de manutenção. A saber:

- Manutenção Corretiva;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Condicionada.

O tipo de manutenção a estabelecer numa organização é uma decisão essencial. A escolha do tipo de manutenção baseia-se em vários fatores, entre os quais, destaca-se a importância do equipamento, os custos envolvidos, a oportunidade, assim como a capacidade de adequação do equipamento/instalação favorecer a aplicação de um ou outro tipo de manutenção.

2.4.1 Manutenção Corretiva

A Manutenção Corretiva consiste na correção de falhas e/ou avarias, tendo como a ação principal a reparação do equipamento ou da instalação [3].

A Manutenção Corretiva implica custos elevados, pois, causa perdas na produção e geralmente a extensão dos danos aos equipamentos é maior. A figura 1 representa a vida útil de um equipamento ilustrando o comportamento de uma manutenção corretiva.

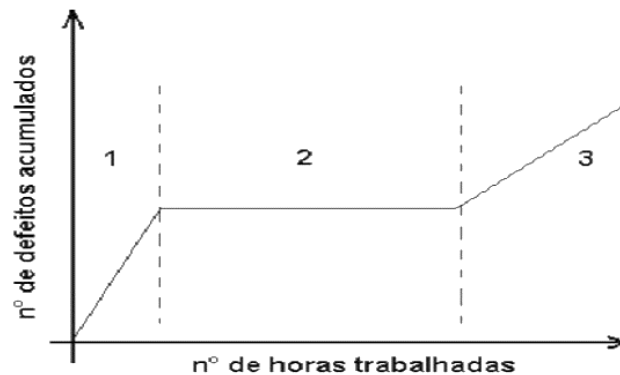


Figura 1 – Ciclo de vida de um componente [6].

Na região 1 (fase de amaciamento) regista-se um crescimento de número de defeitos a partir do início do ciclo de vida de um equipamento, decorrente da acomodação dos componentes recém-instalados, bem como da manifestação de possíveis falhas internas dos materiais utilizados.

Na região 2 (vida útil) o número de defeitos permanece inalterado. O equipamento apresenta o seu melhor desempenho nesta fase.

Na região 3 (envelhecimento) o número de defeitos do equipamento começa a aumentar, o custo da manutenção aumenta e o seu rendimento tende a piorar.

Quando o equipamento atinge a região 3 o rendimento tende a ser baixo. Nesta fase o equipamento apresenta um número crescente de defeitos e perde a capacidade de desempenhar as suas funções de forma satisfatória. Deste ponto em diante, as opções que existem, consistem em fazer a análise

completa, desmontagem, substituição e/ou recuperação dos componentes, limpeza, pintura, entre outras [6].

2.4.2 Manutenção Preventiva

Para prevenir ou diminuir a probabilidade de falhas bem como evitar a degradação dos equipamentos em níveis inaceitáveis, os componentes beneficiam da manutenção preventiva que é definida como sendo a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha, de acordo com um plano previamente elaborado, baseando em intervalos definidos de tempo [3].

O objetivo é reduzir ou impedir falhas no funcionamento dos equipamentos. Esta intervenção não aumenta a fiabilidade dos equipamentos, mas a operar próximo das condições para que foram projetados.

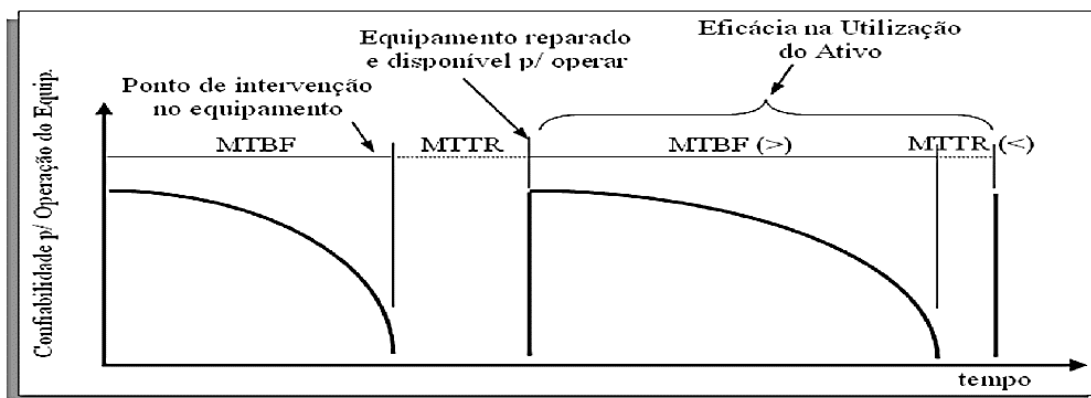


Figura 2 – Intervenções em equipamentos [7].

2.4.3 Manutenção condicionada

A manutenção condicionada é um tipo de manutenção também conhecida por Manutenção sob condição, ou manutenção com base no conhecimento do estado do equipamento. Efetua-se através do acompanhamento do desgaste das peças vitais do conjunto de máquinas e de equipamentos [6]. Este tipo de manutenção é também designado por manutenção inteligente, pois, faz intervenção

apenas com a manifestação da necessidade. É subordinada à informação dum sensor, de uma medida do desgaste, ou outro indicador que possa revelar o estado de degradação do equipamento.

As ferramentas ou metodologias que são usadas para efetuar os testes periódicos, de modo a determinar o momento adequado para substituições ou reparações de peças foram consideradas as seguintes:

- Análise de vibrações – é a técnica de monitorização utilizada na manutenção preventiva condicionada que utiliza equipamentos com sensores, portáteis ou fixos, capazes de medir a vibração, possibilitando estabelecer análises de tendências;
- Ultrassom – é uma tecnologia que consiste em detetar as descontinuidades internas em materiais. Baseia-se no fenómeno de reflexão de ondas acústicas quando encontram obstáculos à sua propagação dentro do material.
- Ferrografia – é a técnica de monitorização que se baseia na avaliação das condições do desgaste dos componentes de uma máquina por meio da quantificação e observação das partículas em suspensão no lubrificante.
- Análise de ruído – é a técnica de monitorização baseada na análise espectral do ruído, por forma a obter informação sobre a distribuição de energia acústica pelas diferentes frequências.
- Termografia – é a técnica de análise de imagem, que compreende o mapeamento das mudanças da temperatura na superfície de objetos.

É crucial a aplicação da manutenção condicionada às máquinas vitais para a produção, ou equipamentos cuja avaria compromete a segurança e a equipamentos críticos que tenham tendência a apresentar avarias caras e frequentes.

2.5 Diagnóstico de falhas

Todo o equipamento está sujeito a um processo de degradação, principalmente se estiver em funcionamento. A manutenção permite diagnosticar as falhas, localizar a sua origem, avaliar a sua

gravidade, prever a disponibilidade dos equipamentos antes da avaria e manter os equipamentos a funcionar. Para fazer um diagnóstico, foram consideradas neste trabalho algumas terminologias relacionadas com as falhas que são considerados erros e avarias assim como com os processos de diagnósticos.

2.5.1 Falha, Erro e Avaria

As instalações com falhas comportam-se de modo diferente do esperado. O processo de análise de falhas e avarias é vital no quotidiano da manutenção, pois, através dele é possível determinar as suas causas, trabalhar para a condição de mínimo erro possível e fornecer maior fiabilidade aos equipamentos. Nesta situação, torna-se importante conhecer a diferença das variáveis abaixo:

- Falha de equipamento – refere-se a qualquer evento em que um equipamento não pode realizar a sua finalidade ou tarefa [8]. A falha é considerada como sendo qualquer obstáculo num sistema ou circuito que permanece até que sejam tomadas providências corretivas [9].
- Erro – é a discrepância ou o desvio observado entre uma variável medida e uma faixa aceitável para o valor esperado desta variável, ou à diferença entre o valor real e o valor indicado pelo instrumento [10].
- Avaria – consiste na cessação da capacidade ou no mau funcionamento dos equipamentos, proporcionando baixo rendimento, ou produção defeituosa não realizando a sua função específica, ou não atingindo um determinado nível de desempenho. A importância de uma avaria é determinada pelas suas características assim como pelas suas consequências. A mesma avaria em equipamentos idênticos pode ter importâncias diferentes. Por exemplo, a ocorrência de uma avaria na bomba “A” essencial ao processo produtivo ou na bomba “B”, pertencente a um equipamento auxiliar. Uma avaria na bomba “A” terá uma maior importância que uma avaria ocorrida na bomba “B” [11].

2.5.2 Causas das falhas

Quando um equipamento é projetado, construído e instalado corretamente apresenta um desempenho excelente durante o período projetado para o seu serviço. Entretanto, se por alguma circunstância existirem erros no seu projeto ou construção bem como a instalação inadequada do mesmo, podem ocorrer falhas prematuras. As causas habituais da redução total ou parcial do desempenho dos equipamentos, ou instalações podem ser destacadas as seguintes [12, 13]:

- Uso indevido ou abuso;
- Erros de montagem;
- Defeitos de fabrico;
- Manutenção inadequada;
- Erros ou deficiências de projeto;
- Materiais ou seleção inadequados dos mesmos;
- Tratamentos térmicos incorretos;
- Condições de operação imprevistas;
- Garantia de qualidade inadequada;
- Proteção / controlo ambiental inadequado;
- Descontinuidades de fundição.

2.5.3 Processo de diagnóstico

Durante o funcionamento de um equipamento ou instalação, existe uma possibilidade de ocorrência de alguma falha, podendo esta ser perceptível ou imperceptível, seja ela sem importância, ou podendo colocar em risco o processo. Não é fácil prever a ocorrência de uma falha, tornando-se então importante estar preparado para minimizá-las e recuperar o sistema de produção quando elas ocorram.

O diagnóstico de falha consiste na identificação do mecanismo que a provocou. A identificação da causa é fundamental para a garantia do melhor desempenho, e o processo de diagnóstico pode ser dividido em três etapas a saber:

- Detecção;
- Isolamento;
- Determinação do tipo e extensão da falha.

A primeira determina se a falha de facto ocorreu no sistema, a segunda determina onde esta ocorreu, e finalmente, a terceira consiste em determinar o tipo e a extensão da falha no sistema. Para cumprir cada uma das etapas deve haver em primeiro lugar, o processo de recolha de informação. As informações acerca da natureza da falha podem ser obtidas através de observação de indicações, da realização de medições e pela utilização de testes de diagnóstico.

Uma vez obtidas as informações referentes às falhas, estas podem ser usadas para localizar um subconjunto de componentes ou módulos com defeitos. Se mais de um subconjunto ou módulo puder ser responsável pelo mau funcionamento, pode ser necessário obter informações adicionais através de novos testes ou de informação histórica. Se das situações anteriores não se chegar a solução, então pode ser utilizada a experiência de um ser especialista empregando um processo de tentativa e erro [10].

Neste capítulo foi abordado de forma sintética a manutenção, tendo sido considerada como sendo um conjunto das ações realizadas ao longo da vida útil dum equipamento, de forma a manter ou repor a sua operacionalidade nas melhores condições. O capítulo seguinte abordará os conceitos da técnica termográfica.

CAPÍTULO III – TERMOGRAFIA

Neste capítulo faz-se uma exposição teórica sobre a termografia. Esta tecnologia tem aplicação em varias áreas, existindo atualmente dispositivos termográficos concebidos para a utilização em qualquer ambiente e com boa precisão. Neste trabalho são abordados os princípios termográficos no âmbito do diagnóstico de falhas.

3.1 Termografia

A termografia é uma técnica que pode ser usada para a manutenção condicionada através da monitorização do estado térmico das máquinas, estruturas, instalações, equipamentos elétricos e mecânicos entre outros. Usa instrumentos concebidos para monitorizar a emissão da radiação infravermelha para determinar a condição operacional dum objeto, através da deteção de anomalias térmicas (isto é, áreas mais quentes ou menos quentes do que deveriam estar).

A termografia é baseada na medição de radiação eletromagnética emitida por corpos a uma temperatura acima de zero absoluto. Esta técnica deteta a temperatura dos equipamentos, através da radiação infravermelha. Esta, estende a visão humana e permite visualizar artificialmente a radiação dentro do espectro infravermelho. A aquisição e análise dos dados térmicos são realizadas sem contacto físico [1, 14].

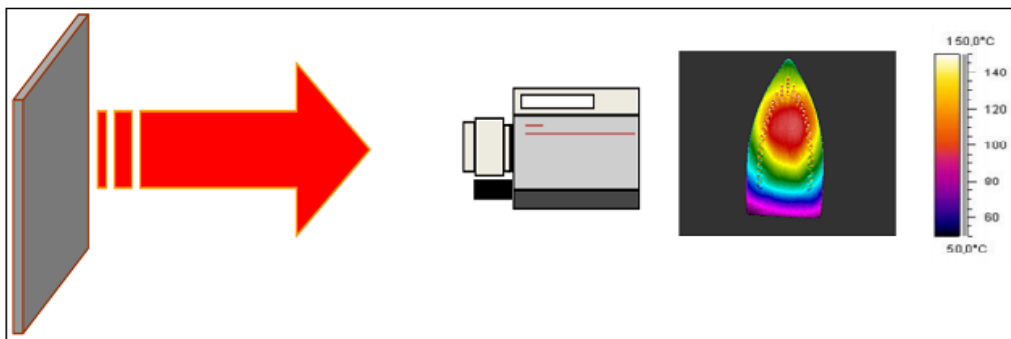


Figura 3 – Captação de radiação infravermelha e conversão em imagem térmica.

3.2 Evolução histórica da termografia

O início da termografia dá-se com a descoberta dos raios infravermelhos, quando o William Herschel (1800) tentava descobrir quais as cores do espectro eram responsáveis pelo aquecimento dos objetos. Ele concluiu que a temperatura aumentava à medida que se passava do violeta para o vermelho e que a maior temperatura ocorria para além do vermelho. Posteriormente o seu filho John Herschel (1840), realizou as primeiras imagens utilizando infravermelho por meio da técnica evaporográfica, ou seja, pela evaporação do álcool obtido de uma superfície pintada com carbono.

O Henri Becquerel (1843), descobriu que certas substâncias emitiam luminescência quando expostas à radiação infravermelha, além de que poderiam ser produzidas emulsões fotográficas sensíveis à radiação próxima do infravermelho.

Samuel Langley (1880), produziu o primeiro bolómetro, um aparelho capaz de medir diferenças de temperatura extremamente pequenas, por meio da variação da resistência elétrica de um metal com a variação da sua temperatura.

Já o Case (1917), desenvolveu o primeiro detetor baseado na interação direta entre fótons da radiação infravermelha e eletrões do material (sulfato de tálio).

A primeira imagem térmica foi elaborada por Czerny (1929). No período da segunda guerra mundial, foi utilizado o Sistema de Visão Noturna em carros de combate alemães para a invasão da Rússia. A resposta dos aliados foi a conceção e o desenvolvimento do FLIR – Forward Looking Infra Red (visão dianteira por infravermelhos), utilizada pelo exército americano para localização de inimigos. Em 1946, surge o *scanner* de infravermelhos de uso militar, com a característica da produção de uma imagem térmica em horas.

Posteriormente, em 1954, era possível o próprio sistema gerar uma imagem bidimensional em 45 minutos. Nas décadas sessenta e setenta do século XX, houve um avanço significativo com o desenvolvimento de *scanners* de infravermelhos e o lançamento de sistemas integrados de formação de imagens térmicas instantâneas.

Em 1975, foi desenvolvido um sistema que permitia a visão termográfica e a visão ótica simultaneamente. Este sistema foi denominado ENOUX e baseava-se num sistema eletro-ótico. Entre 1980 e 1990 a imagem em tempo real torna-se comum. A redução no tempo de produção da imagem acompanha o avanço nos equipamentos de captura e tratamento desta.

Com a substituição dos sistemas de arrefecimento de azoto líquido pelos termoeletrônicos, associada ao uso da computação, programas e equipamentos, foram lançadas câmaras termográficas mais compactas e versáteis. O salto tecnológico ocorre com o aparecimento do Charge Coupled Device (CCD) e logo a seguir com os Focal Plane Arrays (FPAs) [15, 16].

3.3 Classificação da Termografia

O ensaio termográfico, tem sido utilizado para observação remota do perfil de temperaturas nas superfícies dos alvos. Este ensaio é feito sem inserção deliberada de calor nos mesmos, sendo o contraste visual da imagem gerado pelo gradiente térmico existente. De acordo com a forma como são feitos os ensaios ou as abordagens de medição termográficas, a termografia é classificada como passiva ou ativa.

3.3.1 Técnica de termografia ativa

Geralmente, na termografia ativa é necessária a estimulação externa de calor para gerar os contrastes térmicos relevantes no alvo de estado estacionário térmico. Esta técnica utiliza vários processos de estimulação tais como pulso (rápido aquecimento da amostra por ondas térmicas de diversas amplitudes e frequências em regime transiente), modulação (estimulação térmica senoidal por ondas térmicas de única frequência em regime estacionário) e passo (associação das duas técnicas pulso e modulação), enquanto uma atenção especial é dada à análise de dados. Além disso, a vibro-termografia é uma técnica de termografia infravermelha ativa onde, sob o efeito de vibrações mecânicas induzidas externamente à estrutura em algumas frequências fixas, é libertado calor nas localizações com defeitos [17, 18, 19].

Na termografia ativa, a energia aplicada sobre uma superfície, pode ser executada através de uma fonte de calor ou de uma fonte de frio. Em qualquer dos casos o objetivo será a produção de um diferencial térmico no corpo. O frio é muito utilizado quando o corpo se apresenta com uma temperatura igual ou superior à temperatura do meio exterior [20].

3.3.2 Técnica de termografia passiva

Na técnica de termografia passiva, o estado térmico real da amostra, fornece informações suficientes para caracterizar as propriedades procuradas. O estímulo (excitação) ocorre por meio da carga solar ambiental atuante sobre o corpo. Neste caso, deve existir uma diferença natural de temperatura entre o alvo e o meio ambiente onde ele está inserido.

A termografia passiva tem o carácter qualitativo, uma vez que apresenta indicativos de anomalias, enquanto o processo de excitação térmica, ou seja, termografia ativa tende a ter um carácter quantitativo, pela possibilidade de medir e controlar os parâmetros (fonte, tempo, intensidade e distância) [20].

A termografia por infravermelhos é possível através da captação da radiação térmica, permitindo a formação de imagens térmicas, e a medição da temperatura no ponto em tempo real [1]. Assim um técnico de termografia deve conhecer os princípios fundamentais de radiação, bem como os processos de transferência de calor.

3.4 Princípios da radiação

As oscilações dos campos elétrico e magnético que se propagam no vazio à velocidade da luz de forma mutuamente sustentada, dão origem às ondas eletromagnéticas (figura 4). O conjunto dessas ondas de todas as frequências, formam o espectro eletromagnético [14].

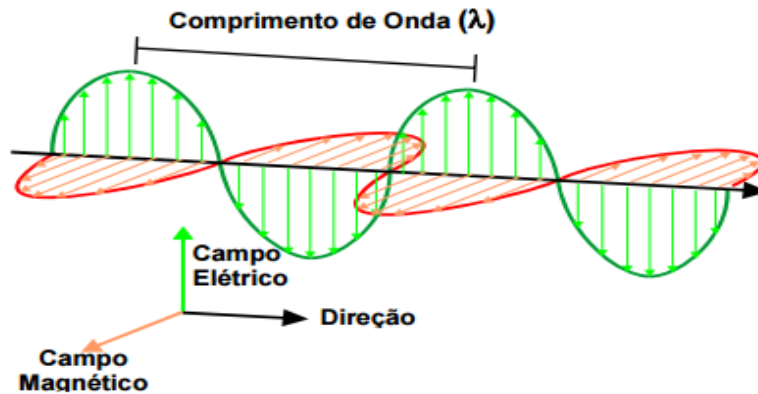


Figura 4 – Representação de uma onda eletromagnética [21].

O espectro é uma representação das amplitudes, o que geralmente se traduz por energia dos componentes ondulatórios de um sistema quando discriminadas umas das outras, em função de suas respectivas frequências. Foi descoberto por Newton em 1664, quando decompôs a luz solar por meio de um prisma, projetando-a numa tela, tendo demonstrado que a luz branca ao atravessar um prisma, pode ser decomposta nas diversas cores que a compõem (figura 5).

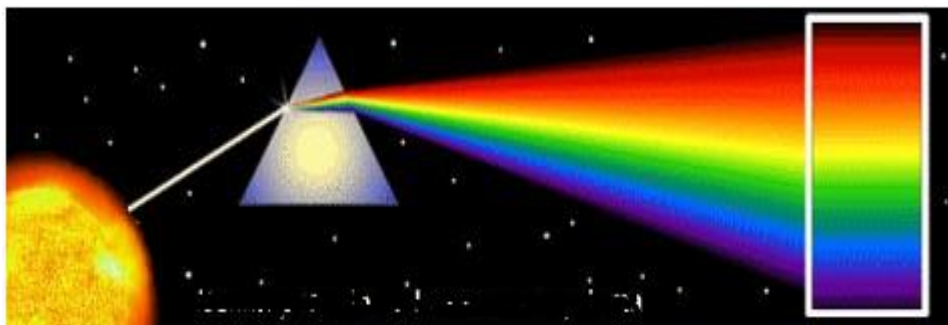


Figura 5 – Decomposição da luz com um prisma [22].

Cada cor do espectro, corresponde a um comprimento de onda ou frequência da radiação. A figura 6 representa a sensibilidade do olho humano às diversas cores emitidas pelo objeto.

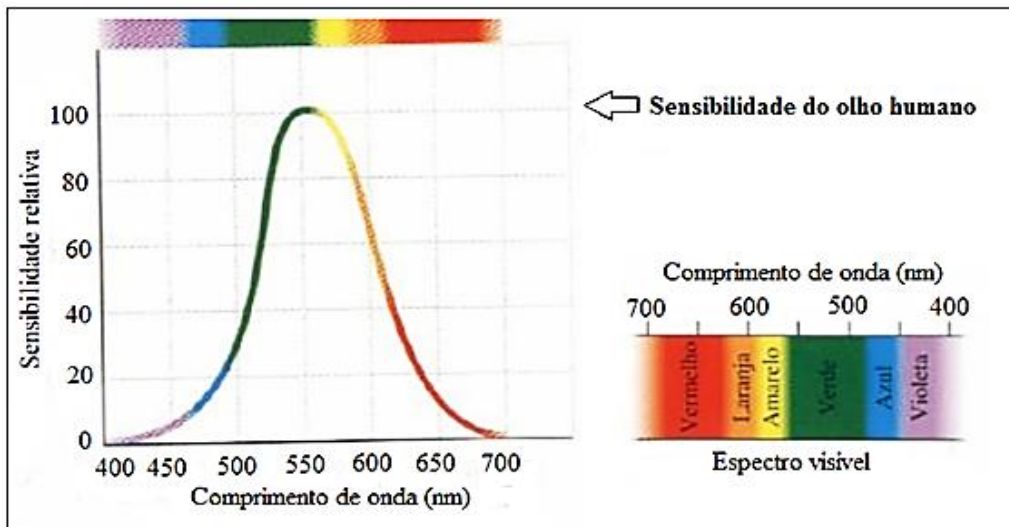


Figura 6 – Decomposição da luz visível em função de comprimento de onda [23].

O espectro eletromagnético representa o intervalo completo de todas as frequências da radiação eletromagnética (figura 7). Este, estende-se desde as ondas de baixa frequência (ondas de rádio) até de maior frequência (radiação gama).

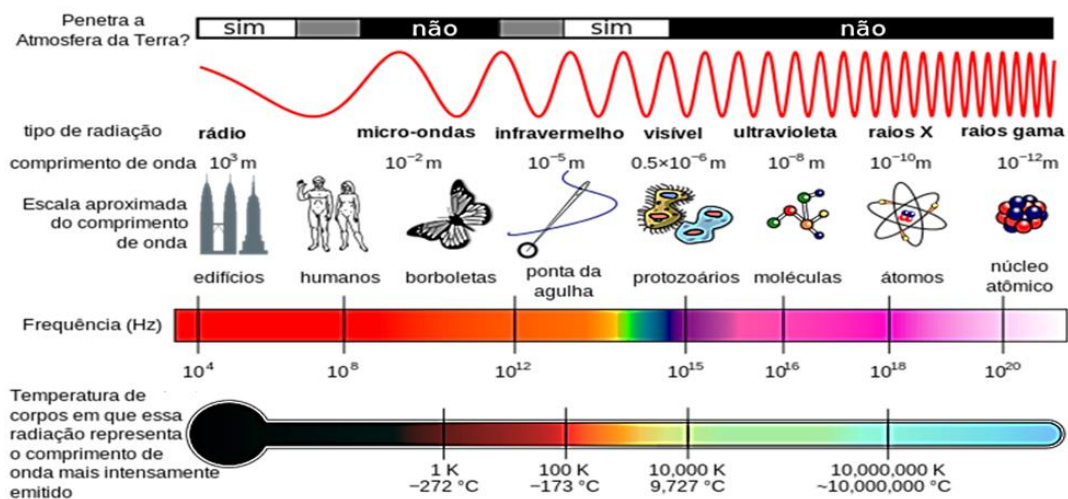


Figura 7 – Espectro eletromagnético [24].

A composição sumária dos diferentes tipos de radiação eletromagnética, em que cada uma tem um comprimento de onda e quantidade de energia associada, tem as seguintes características [25]:

- Radiação gama ou raios gama, (γ) – radiação eletromagnética de alta frequência, emitida por materiais radioativos, por ser muito penetrante (alta energia);
- Raios X – são produzidos pelas transições de elétrons nos átomos, ou da desaceleração de partículas energéticas carregadas;
- Ultravioleta (UV) – é produzida em grande quantidade pelo Sol, sendo emitida na faixa de 0,001 μm até mais ou menos 0,4 μm , de maior frequência e menor comprimento de onda que a luz visível.
- Luz Visível – é o conjunto de radiações eletromagnéticas que podem ser detetadas pelo sistema visual humano;
- Infravermelho (IV) – é gerada pelo movimento de partículas carregadas na matéria, capaz de atravessar e interagir com os distintos meios, dependendo do meio e do comprimento de onda. A energia cinética de átomos e moléculas converte-se em energia térmica, resultando na emissão da radiação eletromagnética. Esta banda de radiação é aquela que é utilizada na termografia;
- Micro-ondas – são radiações eletromagnéticas produzidas por sistemas elétricos e eletrônicos e se estendem pela região do espectro de 1 mm até cerca de 1 m, o que corresponde à banda de frequências de 300 GHz a 300 MHz. Os feixes de micro-ondas são emitidos e detetados pelos sistemas de radar (radio detection and ranging).
- Rádio – é a banda de frequências menor que 300 Ghz e tem comprimento de onda maior que 1 m. É a partir dessas ondas que é possível a transmissão de sinal de TV (analógico e digital) e telefonia celular.

A única diferença entre esses tipos de radiações são as suas frequências e ou seus comprimentos de onda (tabela 1). À medida que a frequência de onda aumenta, o comprimento de onda diminui. Quanto menor for o comprimento de onda, maior é a energia que lhe está associada [4].

Tabela 1 – Composição do espectro de radiações eletromagnéticas [1].

Tipos de radiação	Banda de frequência (Hz)	Banda de comprimento de onda (m)	Cor
Raios gama	$3,0 \times 10^{19}$ a 3×10^{23}	$1,0 \times 10^{-15}$ a $1,0 \times 10^{-11}$	Invisível
Raios X	$3,0 \times 10^{16}$ a 3×10^{18}	$1,0 \times 10^{-11}$ a $1,0 \times 10^{-8}$	Invisível
Ultravioleta	$7,5 \times 10^{14}$ a 3×10^{15}	$1,0 \times 10^{-8}$ a $1,0 \times 10^{-7}$	Invisível
Visível	$7,0 \times 10^{14}$ a $7,5 \times 10^{14}$	$4,0 \times 10^{-7}$ a $5,0 \times 10^{-7}$	Violeta
	$6,5 \times 10^{14}$ a $7,0 \times 10^{14}$	$5,0 \times 10^{-7}$ a $5,5 \times 10^{-7}$	Azul
	$6,0 \times 10^{14}$ a $6,5 \times 10^{14}$	$5,5 \times 10^{-7}$ a $5,8 \times 10^{-7}$	Anil
	$5,5 \times 10^{14}$ a $6,0 \times 10^{14}$	$5,8 \times 10^{-7}$ a $6,2 \times 10^{-7}$	Verde
	$5,0 \times 10^{14}$ a $5,5 \times 10^{14}$	$6,2 \times 10^{-7}$ a $6,5 \times 10^{-7}$	Amarelo
	$4,5 \times 10^{14}$ a $5,0 \times 10^{14}$	$6,5 \times 10^{-7}$ a $6,7 \times 10^{-7}$	Laranja
	$4,0 \times 10^{14}$ a $4,5 \times 10^{14}$	$6,7 \times 10^{-7}$ a $7,0 \times 10^{-7}$	Vermelho
Infravermelho	$3,0 \times 10^{11}$ a $4,0 \times 10^{14}$	$7,0 \times 10^{-7}$ a $1,0 \times 10^{-4}$	Invisível
Micro-ondas	$3,0 \times 10^8$ a $3,0 \times 10^{11}$	$1,0 \times 10^{-4}$ a $1,0 \times 10^0$	Invisível
Onda de radio	$3,0 \times 10^3$ a $3,0 \times 10^8$	$1,0 \times 10^0$ a $1,0 \times 10^5$	Invisível

3.4.1 Radiação infravermelha

A termografia por infravermelhos baseia-se no fato de que os objetos com uma temperatura acima do zero absoluto ($0 \text{ K} = -273,15 \text{ } ^\circ\text{C}$), de acordo com a lei de Stefan–Boltzmann emitem energia na sua superfície (radiação infravermelha). Esta energia deve-se ao movimento dos átomos e moléculas dos objetos e propaga-se através de ondas eletromagnéticas. As emissões de infravermelhos são invisíveis sem instrumentação especial [4, 26].

A radiação infravermelha ocorre em frequências fora da capacidade de visão humana. É libertada por todos os corpos que emitem calor e pode ser detetada pelas suas propriedades de aquecimento. A visão humana apenas consegue detetar uma pequena parte do espectro, cujos comprimentos de onda se situam entre $0,4 \text{ }\mu\text{m}$ e $0,7 \text{ }\mu\text{m}$ [23].

Este tipo de radiação, no vácuo, desloca-se à velocidade da luz, relativamente ao observador, situando-se no espectro, entre a luz visível e as micro-ondas. Por ser uma onda eletromagnética não necessita de um meio para propagar-se [20, 27]. Tem comprimentos de onda ligeiramente mais longos que a luz visível, estendendo-se de $0,7 \text{ }\mu\text{m}$ a $100 \text{ }\mu\text{m}$ sendo normalmente dividida em três sub-regiões:

- IV próximo: 0,7 μm a 1,5 μm ;
- IV médio: 1,5 μm a 10 μm ;
- IV distante: 10 μm a 100 μm .

O infravermelho próximo possui as mesmas propriedades da luz visível, com a diferença de que não é visivelmente detectado. Pode ser produzido por uma fonte luminosa e ser estudado com os mesmos detectores [28].

Todos os objetos emitem energia eletromagnética quando aquecidos, e a quantidade de energia está relacionada com a temperatura. Quanto maior for a temperatura, mais energia eletromagnética é emitida pelos objetos. A radiação infravermelha é sinónima de radiação de calor. As figuras 8, 9 e 10 mostram a relação entre a temperatura de um corpo e a quantidade de energia emitida.

A figura 8 refere as curvas da temperatura normal de um ser humano a 37 °C, a radiação máxima emitida seria de cerca de 9.3 μm , a única maneira de ver é com uma câmara termográfica [15].

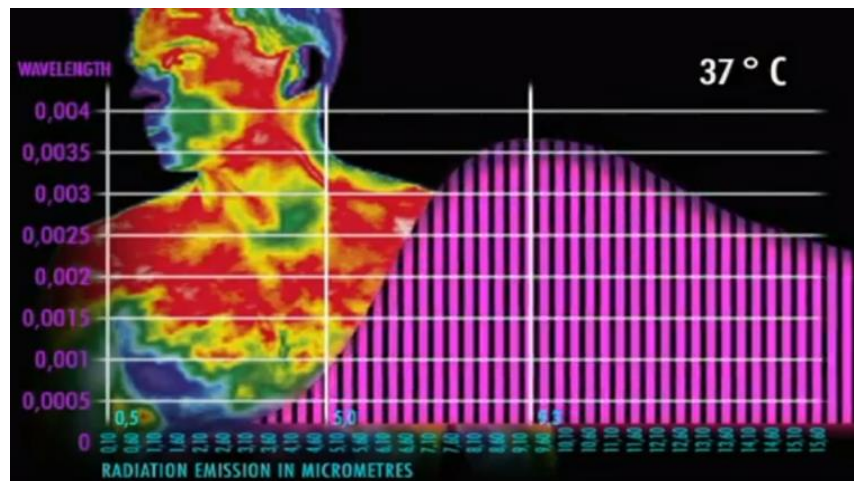


Figura 8 – Radiação de um corpo humano [15].

A figura 9 corresponde ao aumento da temperatura de 37 °C para 300 °C, que representa à temperatura de uma soldadura, o pico de radiação desloca-se para cerca de 5,0 μm . Para ser visualizado, seria necessária uma câmara de infravermelho [15].

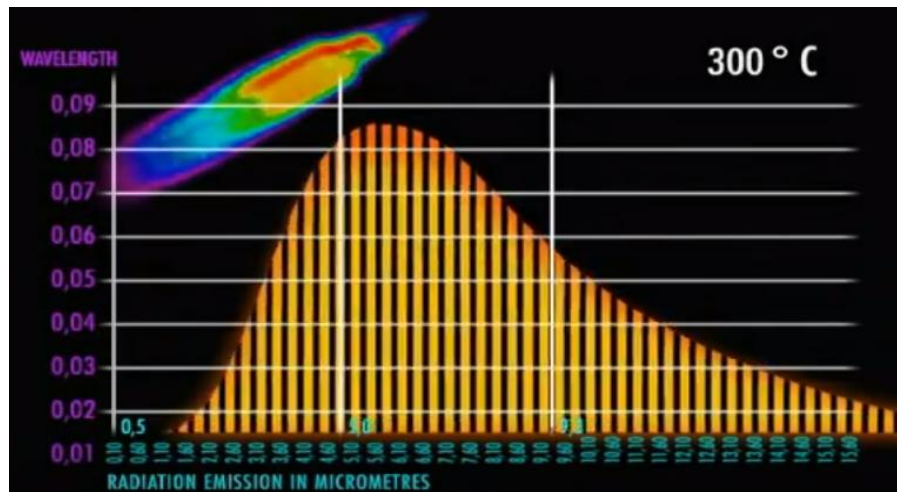


Figura 9 – Radiação de um ferro de soldar [15].

Se a temperatura aumentasse para 5500 °C que corresponde a temperatura do sol, o pico de radiação situar-se-ia em 0,5 μm na região do espectro que o olho humano pode detetar (figura 10).

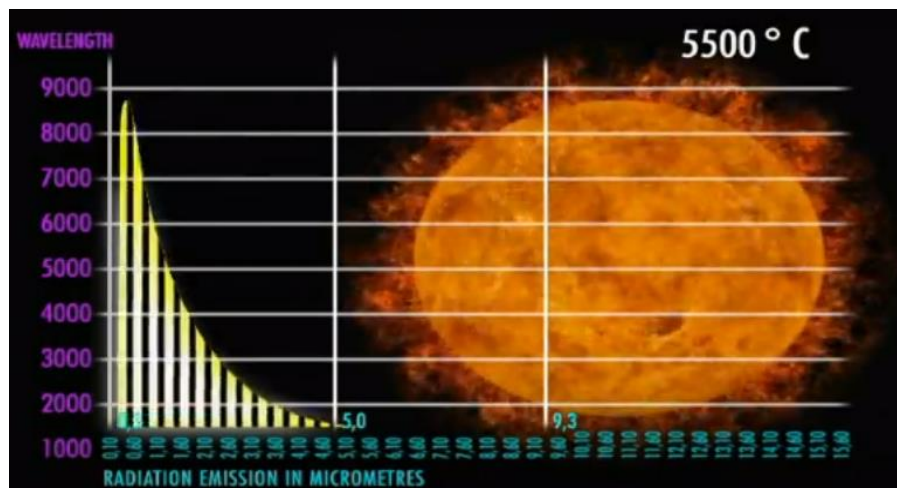


Figura 10 – Radiação do sol [15].

3.5 Medição da radiação infravermelha

A intensidade da radiação infravermelha de um objeto é função da sua temperatura de superfície. No entanto, a medição de temperatura usando métodos por infravermelhos não é fácil, pois, três fontes de energia térmica podem ser detectadas a partir de qualquer objeto. A energia emitida pelo próprio objeto, energia refletida do objeto e energia transmitida pelo objeto.

Somente a energia emitida é importante numa programação de manutenção condicionada por termografia. As energias refletidas e transmitidas distorcem os dados do infravermelho. Portanto, essas energias devem ser filtradas dos dados adquiridos antes que uma análise significativa possa ser concluída.

As variações na condição da superfície, pintura ou outros revestimentos protetores, e muitas outras variáveis podem afetar o fator de emissividade real para o equipamento da instalação. Além da energia refletida e transmitida, nas técnicas termográficas deve-se também considerar o meio entre o objeto e o instrumento de medição. (o vapor de água e outros gases absorvem a radiação infravermelha). A poeira contida no ar, alguma iluminação e outras variáveis na atmosfera circundante podem afetar a medição da radiação infravermelha. Como o ambiente atmosférico está em constante mudança, o uso de técnicas termográficas exige extremo cuidado cada vez que os dados por infravermelhos são obtidos [4]. Na medição de radiação infravermelha, a câmara termográfica, mede a radiação emitida pelo objeto, a radiação refletida pela superfície do objeto e a radiação atmosférica (figura 11).

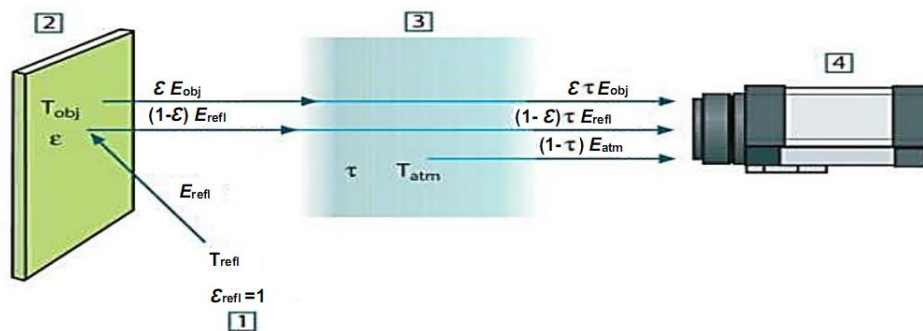


Figura 11 – Representação esquemática da medição real de radiações termográficas: (1) ambiente, (2) objeto, (3) atmosfera, (4) câmara termográfica [18].

Com base na figura 11, o sinal de saída da câmara termográfica pode ser descrito pela equação (1),

$$U = C \times E_{tot} \quad (1)$$

onde, C é uma constante (depende da atmosfera, dos componentes óticos da câmara termográfica e das propriedades do detetor) e E_{tot} a potência radiante total ou a quantidade de calor transferido por radiação, por unidade de área, na unidade de tempo, total.

A potência radiante total é composta por três termos, como mostra a figura 11.

- A energia emitida pelo objeto é dada por $\varepsilon \times \tau \times E_{obj}$, onde ε é a emissividade do objeto e τ é a transmitância;
- A quantidade de calor transferido por radiação, refletida a partir de uma fonte ambiental é dada por $(1 - \varepsilon) \times \tau \times E_{refl}$, onde $(1 - \varepsilon)$ é a reflexão do objeto;
- A quantidade de calor transferido por radiação pela atmosfera, por unidade de área, na unidade de tempo, é dada por $(1 - \tau) \times E_{atm}$, onde $(1 - \tau)$, é a emissividade da atmosfera.

Assim, a potência radiante total recebida, por unidade de área, na unidade de tempo, é dada pela equação (2) [18, 29, 30].

$$E_{tot} = \varepsilon \times \tau \times E_{obj} + (1 - \varepsilon) \times \tau \times E_{refl} + (1 - \tau) \times E_{atm} \quad (2)$$

De acordo com a lei de Stefan-Boltzmann, a partir dum valor medido da potência radiante (E) é possível obter a temperatura dum objeto. Os geradores de imagem têm configurações diferentes para atender às necessidades específicas. Alguns geradores de imagens são concebidos para fornecer a medida de temperatura real do alvo juntamente com uma representação de vídeo colorido. Estes tipos de geradores são designados de "Câmaras Termográficas" e são usados principalmente para aplicações industriais (manutenção condicionada, controlo de processo) e medicina (humana e veterinária). Outros geradores de imagens são projetados principalmente para ambientes de vigilância e ou aquisição de alvos [18].

3.6 Radiação do corpo negro e corpo real

Baseando no princípio de que todo corpo que recebe calor emite radiação, os corpos irradiam porque partículas microscópicas neles carregados estão em constante movimento aleatório. E sempre que cargas mudam o seu estado de movimento (aceleram), produzem radiação. E quanto maior for a energia térmica fornecida ao sistema, maior é a sua temperatura, isto é, maior é o estado de agitação das suas partículas.

A distribuição espectral da radiação em função da temperatura, depende não só da temperatura, mas também da constituição do material do qual o corpo é formado, o que torna o seu estudo difícil. Para superar essa dificuldade, foi concebido um irradiador ideal, designado como “corpo negro”, corpo capaz de absorver e emitir toda a energia que nele incide. Nenhuma luz o atravessa, nem é refletida. O conceito de um corpo negro é uma idealização. Nenhuma superfície real serve perfeitamente às propriedades de uma superfície do corpo negro ideal [31].

No equilíbrio térmico, as taxas de emissão e absorção de energia de um corpo são iguais, ou seja, se um corpo tem uma absorvibilidade de 100%, portanto, absorve toda a radiação incidente sobre ele, independentemente do comprimento de onda desta radiação, a sua emissividade também será de 100%. Assim, a emitância radiante (quantidade de energia que sai de uma superfície), E_{tot} , de um corpo negro é função só da temperatura, enquanto que, a emitância radiante de um corpo não-negro depende tanto da temperatura quanto da sua constituição [32].

As superfícies só são capazes de emitir uma determinada porção da energia que emitiria um corpo negro. O parâmetro que determina a capacidade de emissão é a emissividade.

3.6.1 Emissividade

A maioria dos objetos não emite toda a radiação descrita pela lei de Planck (mostrado mais em frente). Eles apenas emitem uma fração dele, sendo essa fração chamada emissividade. Portanto, emissividade de um material pode ser definida como sendo a capacidade do material emitir energia por radiação da sua superfície. A taxa de emissão é calculada através da razão entre a energia

irradiada por um determinado material e a energia irradiada por um corpo negro para um mesmo comprimento de onda. Qualquer corpo real tem emissividade menor que 1 e superior a zero. $0 \leq \varepsilon \leq 1$ [1, 31].

$$\varepsilon = \frac{E'}{E} \quad (3)$$

Onde:

ε – Emissividade;

E' – Quantidade de energia emitida por um corpo qualquer (λ constante);

E – Quantidade de energia emitida por um corpo negro (λ constante).

Quando calculada a média de quantidade de energia emitida em todos os comprimentos de onda, a potência radiante total é dada pela seguinte equação:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

onde σ é a constante de Stefan Boltzmann e T é a temperatura absoluta.

3.7 Lei de Planck, Wien, Boltzmann e Kirchhoff

3.7.1 Lei de Planck

A lei de Planck descreve a relação entre a emissividade espectral, a temperatura e a energia radiante de um corpo negro. Um corpo negro é um corpo que emite (ou absorve) radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda e em todas as direções, de forma que toda a radiação incidente é completamente absorvida. A radiação máxima possível é emitida para uma determinada temperatura do corpo [18, 32].

$$E_{(\lambda,T)} = \frac{2 \times h \times c^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{\left(e^{\frac{h \times c}{\lambda \times k_B \times T}} - 1 \right)} \quad (5)$$

Onde:

$E_{(\lambda,T)}$ – Emitância radiante espectral do corpo negro;

λ – Comprimento de onda;

c – Velocidade da luz no vazio;

h – Constante de Planck;

k_B – Constante de Boltzmann.

3.7.2 Lei de deslocamento de Wien

Esta lei estabelece que o comprimento de onda para o qual a quantidade máxima de energia é emitida, diminui à medida que a temperatura aumenta [18]. A figura 24 mostra o pico da potência emitida que se desloca para menores valores de comprimentos de onda com o aumento de temperatura e encontra-se na região espectral da luz visível [32].

$$\lambda_{max} \times T = b \quad (6)$$

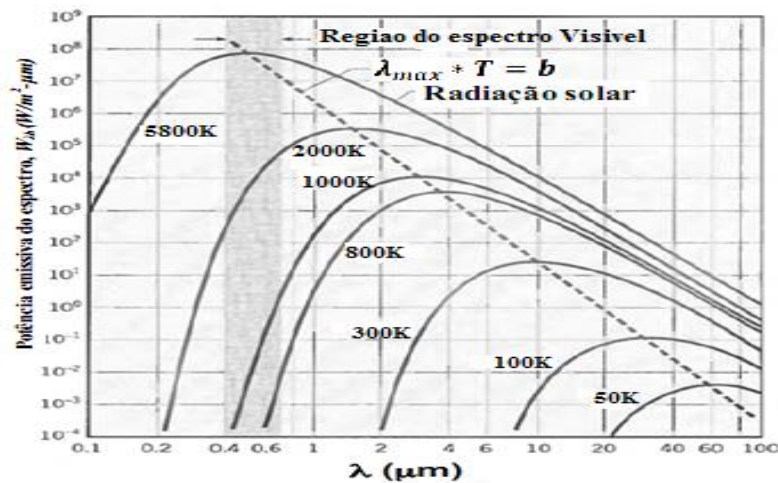


Figura 12 – Distribuição e picos de energia irradiada pelos objetos às várias temperaturas [32].

3.7.3 Lei Stefan-Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann descreve a radiação máxima total que pode ser libertada de uma superfície. Como os sistemas de imagens térmicas só respondem a uma pequena porção do espectro, é necessário introduzir a lei de corpo negro de Planck. A qualidade superficial dos materiais reais é descrita por suas emissividades [33].

Quanto mais quente um objeto se torna, mais energia infravermelha emite. A lei de Stefan-Boltzmann, afirma que a energia total irradiada por unidade de superfície de um corpo negro em unidade de tempo (conhecida como a irradiância do corpo negro, a densidade do fluxo de energia, o fluxo radiante ou potência emissiva), E , é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura do corpo negro, ($\epsilon=1$) [18].

$$E = \sigma T^4 \quad (7)$$

À medida que a energia é libertada, a temperatura diminui. Este processo continua até que o alvo alcance o equilíbrio térmico com seu ambiente [33].

3.7.4 Lei de Kirchhoff

Quando um objeto está em equilíbrio térmico, a quantidade de absorção será igual à quantidade de emissão. De acordo com a lei de Kirchhoff, para qualquer material, a emissividade e a absorção de um corpo são iguais a qualquer temperatura especificada e comprimento de onda, isto é [32]:

$$\epsilon = \alpha \quad (8)$$

Os materiais com boa capacidade de absorção, são bons na emissão. De modo semelhante, um absorvedor pobre é um emissor pobre. Um absorvedor pobre deve ser um bom refletor. A emissividade é maior para superfícies rugosas e menor para superfícies polidas lisas. A emissividade para os corpos negros é unidade e zero para superfícies perfeitamente reflexivas.

3.8 Transmissibilidade, absorvidade e refletividade

Os corpos reais têm um comportamento diferente dos corpos negros. Quando submetidos a radiação incidente sobre eles, não absorvem toda a energia eletromagnética. A radiação total incidente sobre um corpo qualquer pode assumir três comportamentos a saber:

- Uma fração (α) é absorvida, que é a mesma fração emitida;
- Uma fração (ρ) é refletida;
- Uma fração (τ) é transmitida.

O princípio de radiação eletromagnética, as frações, α , ρ e τ (absorção, refletância e transmitância, respetivamente) podem ter valor que varia entre zero e um, mas o somatório de todas as parcelas deve ser unidade.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (9)$$

A conservação de energia requer que o fluxo total seja constante, isto é, o somatório das três partes individuais deve sempre ser igual ao valor da radiação incidente [18].

$$\Phi_{transmitido} + \Phi_{absorvido} + \Phi_{reflectido} = \Phi_{incidente} \quad (10)$$

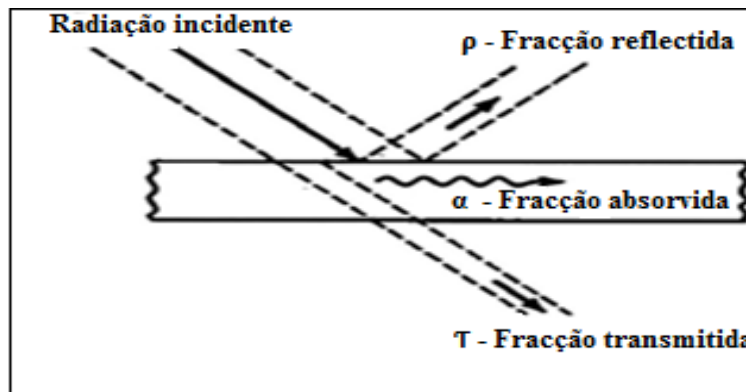


Figura 13 – Interação entre a energia radiante e o material alvo [34].

A energia irradiada ou recebida por um corpo não-reflexivo e opaco é absorvida na totalidade, sendo este tipo de corpo considerado como ideal. Um corpo real absorve menos energia do que um corpo negro nas mesmas condições e irradia menos energia infravermelha, mesmo que seja à mesma temperatura. A maioria dos materiais são opacos e a transmitância é zero ($\tau = 0$). A relação pode ser simplificada da seguinte maneira:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (11)$$

A tabela 3 mostra o comportamento de alguns materiais. Nas aplicações termográficas as superfícies são na maioria das vezes opacas ao infravermelho ($\tau = 0$) e a sua capacidade emissiva é constante (para T e λ considerados) e menor que unidade.

Tabela 2 – Capacidade emissiva, reflexiva e transmissiva de alguns materiais [30].

Corpo	Emissividade (ϵ)	Reflexão (ρ)	Transmissão (τ)
Negro	$\epsilon = 1$	$\rho = 0$	$\tau = 0$
Transparente	$\epsilon = 0$	$\rho = 0$	$\tau = 1$
Espelho perfeito	$\epsilon = 0$	$\rho = 1$	$\tau = 0$
Superfície opaca	$\epsilon + \rho = 1$		$\tau = 0$
Cinzentos	$\epsilon = \text{Constante}$	$\rho = \text{Constante}$	$\tau = \text{Constante}$

Um corpo cinzento tem emissividade (ϵ) menos do que unidade e um valor constante independente do comprimento da onda. Tendo em conta a emissividade (ϵ) para o radiador do corpo cinzento, a fórmula do Stefan-Boltzmann para calcular a potência emissiva torna-se:

$$E_{GB} = \epsilon \times \sigma \times T^4 \quad (12)$$

Um corpo real geralmente não tem um valor constante para a emissividade, mas usualmente um valor constante é tomado para uma banda espectral estreita. A Figura 26 mostra emissividade espectral, do corpo cinzento e material não cinzento.

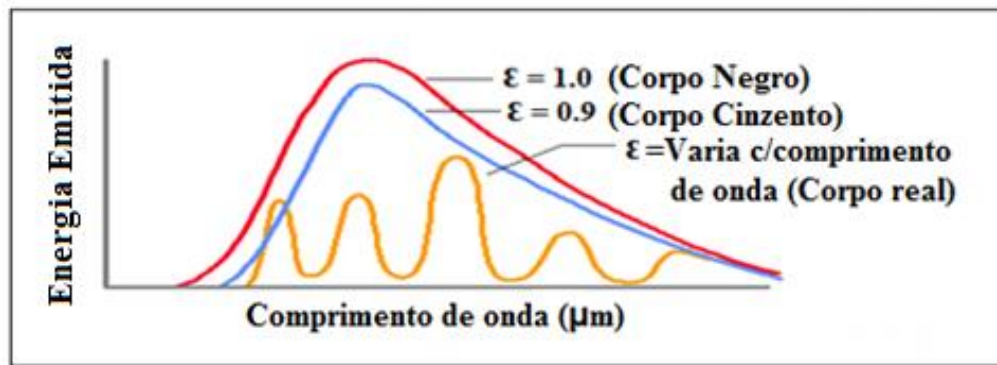


Figura 14 – Emissividade espectral dos corpos cinzentos e corpos não cinzentos [35].

3.9 Fatores que podem influenciar a variação de radiação infravermelha

Devido a facilidade de operação, também é relativamente simples interpretar mal os resultados termográficos obtidos. Conclusões erradas podem ter efeitos extremamente negativos no processo de medições. Uma sólida compreensão da base sobre a qual são feitas as medições termográficas é importante para garantir a precisão nas medições termográficas e minimizar o erro do operador [36].

Os três elementos de uma medida que podem levar a conclusões erradas, no processo de medições em condições reais, são os seguintes [30, 36]:

- Superfície do objeto (temperatura atmosférica, temperatura ambiente e da distância entre o objeto e a câmara);
- Meio transmissor entre o alvo e o instrumento de medição;
- Instrumento de medição.

A emissividade de um material está relacionada com a sua superfície e o seu acabamento. A Tabela 2 resume valores típicos de emissividade para alguns materiais em aplicações industriais. A emissividade de um objeto pode variar de acordo com a temperatura a que o objeto se encontra, do comprimento de onda, da forma do objeto, do ângulo de visão e da qualidade da superfície. Nas

medições termográficas deve ter-se em conta que a emissividade depende do alvo, do ambiente e da atmosfera [1, 33].

Corpos com emissividade constante e menor que 1 são denominados corpos cinzentos. A determinação da sua emissividade não depende do comprimento de onda como acontece com os corpos reais.

Tabela 3 – Valores típicos para a emissividade de alguns materiais [1].

Material	Temperatura (°C)	Emissividade (ε)
Alumínio (chapa comercial)	100	0,09
Alumínio (oxidado)	90 – 500	0,20 – 0,31
Latão (chapa laminada)	25	0,06
Latão (chapa oxidada a 600 °C)	200 – 600	0,61 – 0,69
Cobre (comercial)	25	0,07
Cobre (oxidado)	25	0,78
Cobre (aquecido a 600 °C)	200 – 600	0,57
Aço (inoxidável polido)	100	0,07
Ferro fundido (polido)	200	0,21
Aço inoxidável AISI 310 (altamente oxidado)	220 – 520	0,90 – 0,97
Aço carbono (tubo ou chapa novos)	25	0,66
Aço carbono ou baixa liga (oxidado a 600 °C)	200 – 600	0,80
Chapa de aço carbono (superfície áspera)	40 – 400	0,94 – 0,97
Tijolo refratário	1000	0,75
Tijolo refratário magnésio	1000	0,38
Vidro (placa polida)	25	0,94
Vidro pyrex	260 – 540	0,95 – 0,85
Madeiras (plana)	25	0,90
Tinta alumínio em bom estado	100	0,52
Tinta laca preta fosca	80 – 150	0,91
Tinta laca branca fosca (sobre ferro)	25	0,87
Tinta laca preta ou branca	40 – 100	0,96 – 0,98
Papel de parede	25	0,91
Borracha (dura e lisa)	25	0,94
Borracha (macia e áspera)	25	0,86
Areia	25	0,90
Pele humana	32	0,98
Solo seco	20	0,92
Solo saturado de água	20	0,95
Água destilada	20	0,96
Gelo	-10	0,96
Neve	-10	0,85

3.9.1 Variação de emissividade com o ângulo de visão

A emissividade de uma superfície depende do ângulo de visão. Esta, diminui à medida que o ângulo de incidência aumenta. Quando o ângulo é superior a 45° , a emissividade diminui e a refletividade aumenta (figura 12). No ângulo de inclinação a emissividade pode aproximar-se de zero (a refletividade aproxima-se da unidade) [33].

Um pequeno erro na configuração do teste em termos de ângulo pode levar a um erro de emissividade, o que sugere que as medidas de temperatura exatas só podem ser feitas quando o ângulo de incidência for menor que 30° [33]. A figura 13 mostra o valor da emissividade que muda quando o ângulo de incidência ultrapassa 45° . Este fenómeno acontece com a maioria dos materiais [37].

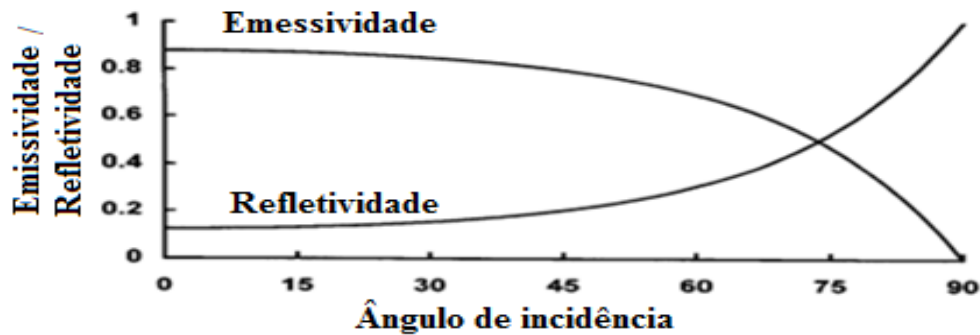


Figura 15 – Emissividade e refletividade do vidro em função do ângulo de visão [33].

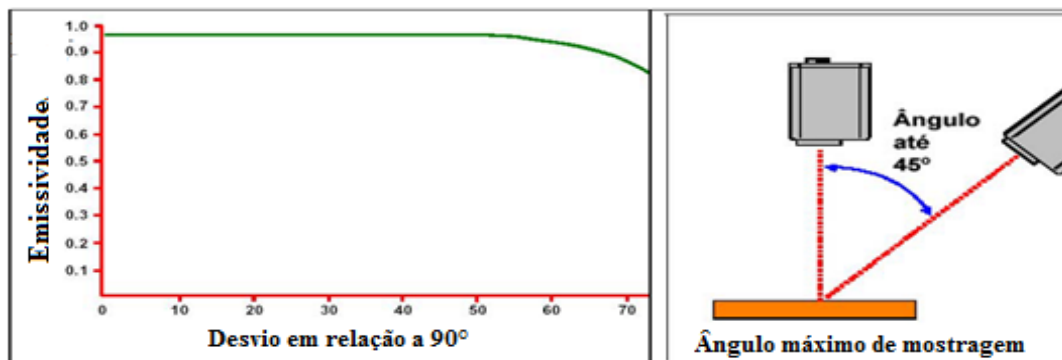


Figura 16 – Influência do ângulo de visão [37].

3.9.2 Variação da emissividade com a forma ou geometria do objeto

A emissividade depende da geometria do material, isto é, se o objeto tiver alterações de forma, a emissividade do mesmo vai sofrer variações. Cada vez que um feixe de luz é refletido, a sua intensidade é reduzida pela refletância de superfície. Se o feixe for refletido N vezes, a intensidade resultante é

$$I = I_o \times \rho^N \quad (13)$$

onde: I é a intensidade incidente, I_o é a intensidade incidente inicial e ρ é a refletância do alvo. As reflexões múltiplas têm influência sobre a intensidade refletida. Se $\rho = 0,9$ (uma superfície altamente reflexiva) e o feixe é refletido 10 vezes, a intensidade é reduzida e a emissividade aumenta. Quanto maior for o número de reflexões, a emissividade aproxima-se da unidade. Se for usada uma tinta altamente emissiva ($\mathcal{E} = 0,9$ ou equivalente $\rho = 0,1$), então após 10 reflexões, a potência refletida é reduzida a um infinitesimal 10^{-10} [33].

Esse fato é usado no projeto de fontes de calibração de corpo negro. Nos primeiros projetos, todos os corpos negros eram em forma de cone (figura 14). O ângulo do cone foi selecionado para aumentar o número de reflexões. Isso garante uma temperatura uniforme dentro do cone e este parece ter uma emissividade efetiva de unidade (corpo negro). atualmente, muitas fontes de calibração têm uma superfície plana [33].



Figura 17 – Representação da variação da emissividade com a geometria [33].

Para ilustrar o efeito de variação de emissividade com a geometria do objeto, considerou-se uma caixa de alumínio polido ($\mathcal{E} = 0,1$). Na superfície, verificou-se que, tanto o material quanto o ambiente contribuem para a radiação medida (figura 15a). Quando a emissividade é baixa, a

radiação refletida facilmente pode exceder a radiação emitida. Com um lado da caixa do alumínio removido, verificou-se que a temperatura da parede da caixa tornava-se parte da temperatura ambiente (figura 15b). Foi considerada a mesma caixa, mas com um orifício no lado como mostra a figura 15c, a temperatura ambiente local era idêntica à temperatura da parede e a radiação medida parecia como se fosse a de um corpo negro. Com estas constatações, a radiação equivalente recebida é [33]:

$$E = \varepsilon\sigma T_T^4 + (1 - \varepsilon)\sigma T_s^4 \quad (14)$$

onde T_s é a temperatura efetiva do ambiente e T_T é temperatura de material. À medida que o número de reflexões aumenta, a temperatura circundante tende a atingir lentamente a temperatura de material. Com $T_s \rightarrow T_T$

$$E = \varepsilon\sigma T_T^4 \quad (15)$$

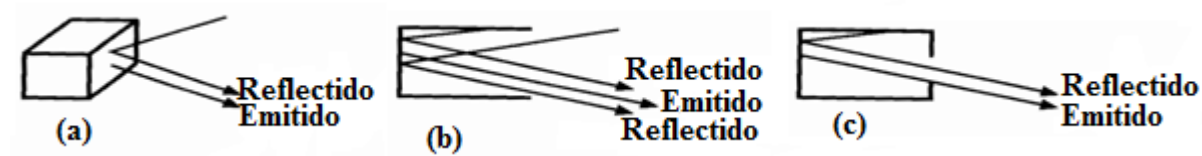


Figura 18 – Representação da emissividade dependendo da geometria do alvo. (a) Parte superior de caixa de alumínio polido, (b) vista de cima da caixa com um lado removido, e (c) a mesma superfície vista através de um pequeno orifício [33].

3.9.3 Variação de emissividade com a qualidade de superfície do alvo

Através da figura 16 é possível ver que a emissividade depende da qualidade de superfície do material. A emissividade de uma superfície polida e limpa é baixa em relação a superfície oxidada. Quanto maior for nível de oxidação, maior será a energia emitida pelo material. Por exemplo, a emissividade do cobre varia de 0,03 para uma superfície polida limpa a 0,80 para uma superfície fortemente oxidada. Variações semelhantes são observáveis com outros metais, tais como o ferro fundido, o alumínio e o aço [33].

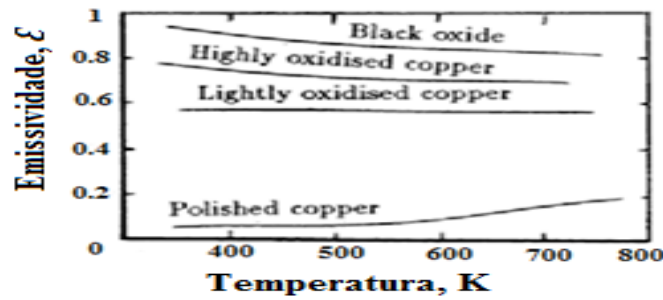


Figura 19 – Variação de emissividade com a qualidade de superfície [30].

A figura 17 mostra a variação da emissividade com a superfície do objeto. As superfícies lisas apresentam menor emissividade e fornecem reflexão alta em relação as superfícies rugosas que são menos reflexivas [33].

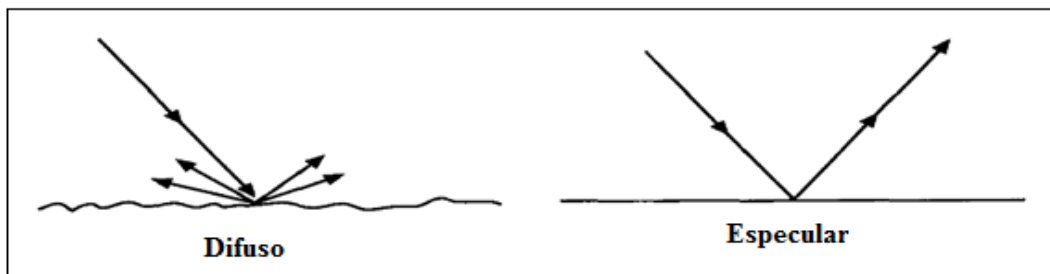


Figura 20 – Emissividade da superfície dos metais polidos e rugosos [33].

3.9.4 Variação de emissividade com a temperatura e ou comprimento de onda (λ)

A emissividade de um material, varia entre outros fatores com a temperatura e ou comprimento de onda. A potência emitida é máxima quanto maior for a temperatura do corpo, como pode ser determinado pela lei de Stefan-Boltzmann (equação 4). Por sua vez, o aumento da temperatura implica uma radiação de menores comprimentos de onda, como mostra a lei do deslocamento de Wien (equação 8) na qual o comprimento máximo de onda ($\lambda_{\text{máx}}$) é inversamente proporcional à sua temperatura, [34].

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{b}{T} \quad (16)$$

Onde, b é a constante de dispersão de Wien (μmK).

Os materiais pela sua natureza são diferentes na sua capacidade de emitir radiação para diferentes temperaturas. No caso dos metais (figura 18), a emissividade total aumenta ligeiramente com o aumento da temperatura do material enquanto que nos materiais não metálicos (figura 19), a emissividade total diminui com o aumento de temperatura [30, 38].

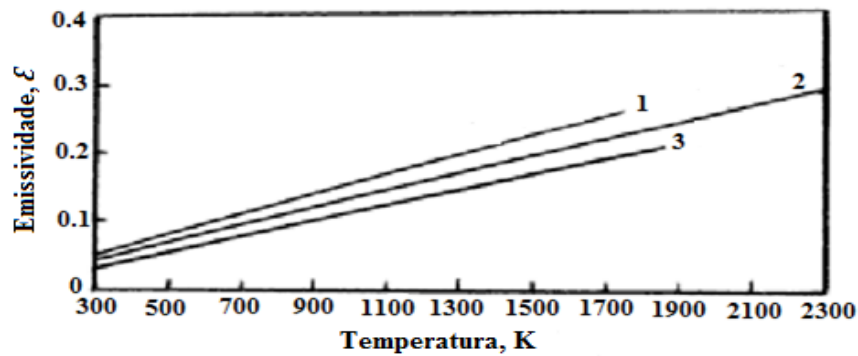


Figura 21 – Variação da emissividade dos materiais metálicos com o aumento da temperatura Níquel (1), Tungsténio (2) e Platina (3) [38].

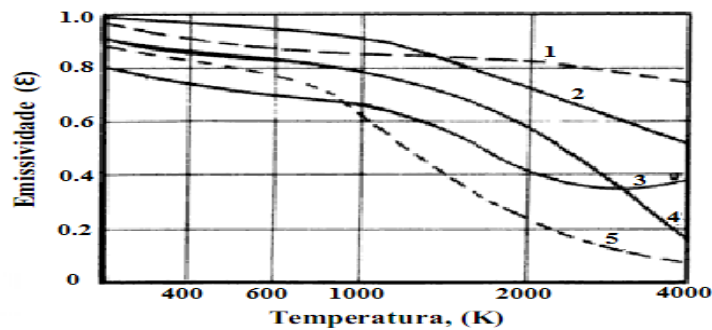


Figura 22 – Variação da emissividade dos materiais não-metálicos com a temperatura. Borracha (1), Porcelana (2), Cortiça (3), Papel (4) e Argila refratária (5) [30].

De igual modo, a emissividade dos corpos varia com o comprimento de onda. Esta, toma valores diferentes em função da região espectral (figura 20). Nos metais, a emissividade diminui

uniformemente com o aumento do comprimento de onda e no caso dos materiais não metálicos, a variação de emissividade não é uniforme. O pico da emissividade nos materiais não metálicos encontra-se no valor intermédio de comprimento de onda para o plástico e a terra, enquanto que a água, apresenta vários picos (figura 21).

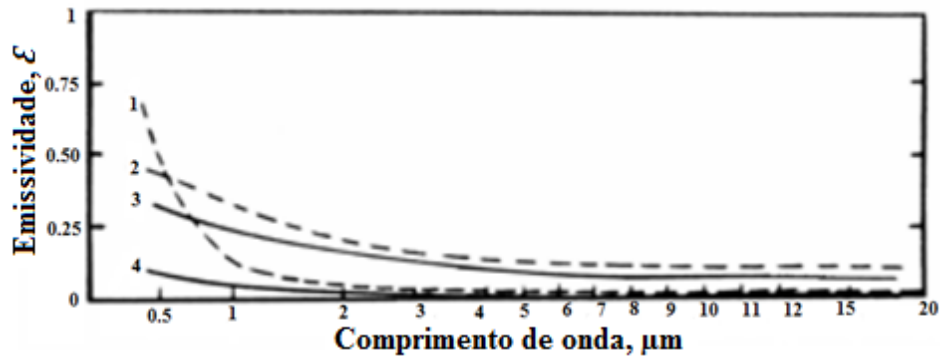


Figura 23 – Variação da emissividade com o comprimento de onda do Cobre (1), Ferro (2), Alumínio (3) e Prata (4) [38].

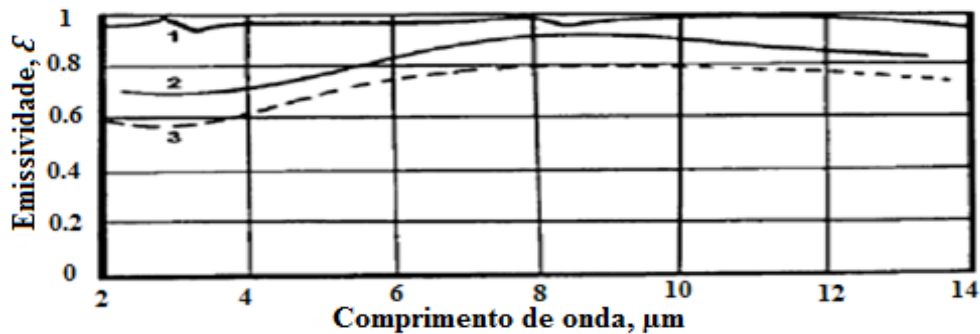


Figura 24 – Emissividade da Água (1), do Terra (2) e do Plástico (3) [38].

3.9.5 Influência da atmosfera na variação de radiação infravermelha

A atmosfera não é totalmente transparente para a radiação infravermelha, pois, atenua a radiação que passa através dela e também emite radiação. A influência da atmosfera nas medições da

radiação infravermelha depende principalmente da densidade do ar, da temperatura, da visibilidade e da humidade relativa (Figura 22). Na atmosfera existem algumas faixas espectrais estreitas denominadas janelas atmosféricas, que compreende a onda curta de 3 μm a 5 μm , e a onda longa de 8 μm a 14 μm [18].

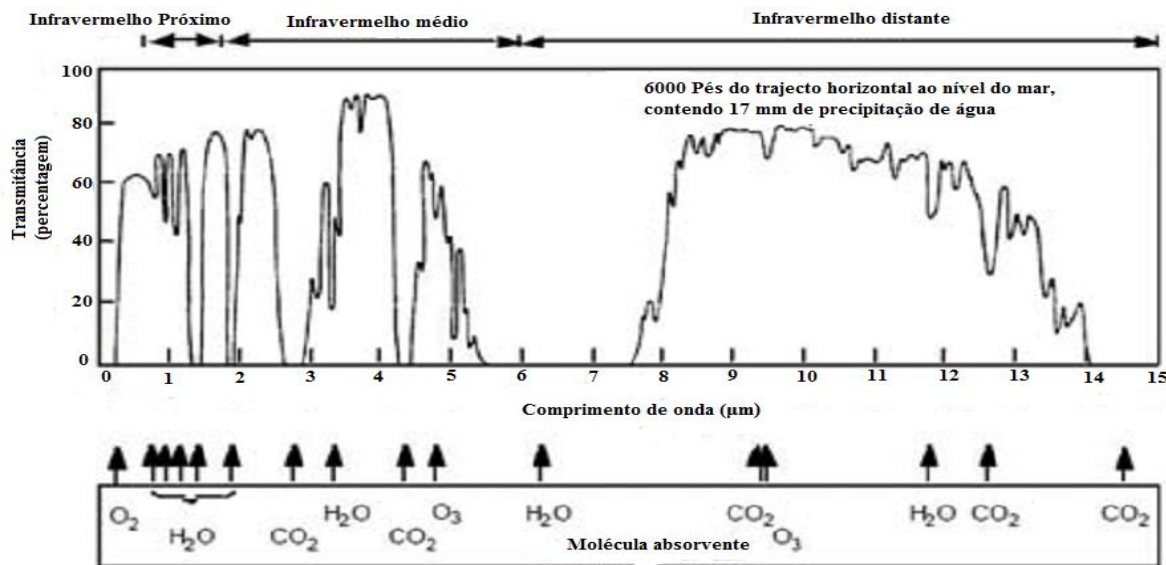


Figura 25 – Transmissividade da atmosfera em diferentes bandas de comprimento de onda [18].

Na maior parte das aplicações termográficas a radiação atravessa a atmosfera antes de chegar ao elemento de medição, sendo, portanto, importante o conhecimento das condições atmosféricas. A escolha da banda a fim de seleccionar o equipamento adequado pode ser simplificada considerando que quando se tem onda larga, são necessárias temperaturas baixas e quando se tem onda curta, são necessárias temperaturas altas, tendo em conta apenas a distribuição espectral da energia.

3.9.6 Influência ambiente na variação de radiação infravermelha

O sistema de imagem térmica não pode separar a radiação emitida da radiação refletida, a radiação que provem da superfície dos alvos, inclui a potência refletida do ambiente. De acordo com a lei de

Stefan-Boltzmann, a potência total que flui num objeto opaco, pode ser calculada através da equação 9. De acordo com a figura 23 é possível ver a medição de radiação emitida e a radiação refletida pelo objeto [33].

$$E = \varepsilon\sigma T_T^4 + \rho\sigma T_s^4 \quad (17)$$

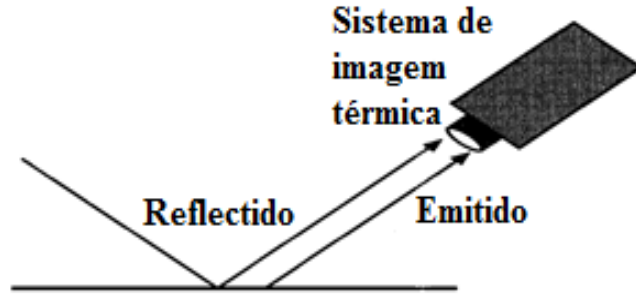


Figura 26 – Medição da radiação emitida e a refletida [33].

Com a temperatura efetiva do ambiente (T_s) conhecida, a potência total pode naturalmente ser escrita como segue a equação:

$$E = \varepsilon\sigma T_T^4 + (1 - \varepsilon)\rho\sigma T_s^4 \quad (18)$$

Na medição do infravermelho é impossível medir a radiação ambiente que vem de todos os objetos circundantes. Cada objeto é diferente em forma, distância, orientação, emissividade e temperatura. Em vez disso, toda a radiação é agrupada e considerada como uma radiação equivalente de um corpo negro à temperatura T_s . Na medição da radiação total, inclui-se a auto-emissão do alvo, a radiação ambiente refletida e a radiação do percurso. É possível calibrar um sistema de imagem térmica de modo que a sua saída seja proporcional à temperatura do objeto. Para isso, tem que se conhecer a emissividade e a temperatura ambiente do objeto. A radiação total pode ser igualada a uma temperatura aparente [33].

$$E = \sigma T_{Aparente}^4 = \varepsilon\sigma T_T^4 + \rho\sigma T_s^4 \quad (19)$$

$$T_{Aparente} = (\epsilon T_T^4 + \rho T_s^4)^{1/4} \quad (20)$$

A temperatura aparente existe quando a emissividade é inferior à unidade. A radiação real detetada depende da resposta espectral do sistema. Desprezando os efeitos atmosféricos, a quantidade de radiação do alvo opaco que atinge o detetor é determinada pela seguinte equação [33]:

$$E_{medido} = \sigma(\epsilon T_T^4 + \rho T_s^4) \quad (21)$$

3.10 Propriedades Térmicas

A termodinâmica está relacionada com a variação e transferência de calor entre diferentes materiais. As imagens térmicas estão baseadas nos princípios da termodinâmica básica [39, 40]. É imprescindível que na aplicação da termografia, se tenha conhecimento básico sobre as propriedades térmicas dos materiais.

Entende-se por propriedade térmica como sendo a resposta ou reação de um material à aplicação de calor. Do ponto de vista microscópico, os dois tipos principais de energia térmica na maioria dos sólidos são a energia vibracional dos átomos da rede ao redor das suas posições de equilíbrio e a energia cinética dos elétrons livres dos átomos. À medida que um sólido absorve calor, a sua temperatura eleva-se e a sua energia interna aumenta [40]. As propriedades térmicas consideradas neste trabalho são:

- Dilatação ou expansão térmica;
- Condutibilidade térmica;
- Calor específico;
- Resistência ao choque térmico;
- Transferência de calor.

3.10.1 Dilatação ou expansão térmica

A expressão dilatação térmica, (α_l) refere-se ao aumento das dimensões dos objetos quando aquecidos. Com poucas exceções, todos os materiais se expandem quando aquecidos e se contraem quando arrefecidos. Um aumento de temperatura está associado a um aumento na energia interna do sistema e da agitação térmica de seus constituintes microscópicos. No caso de sólidos ou líquidos, isso resulta num aumento da distância média entre os átomos ou as moléculas do material e por consequência, num aumento nas dimensões do sistema.

$$\alpha_l = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad (22)$$

onde

α_l – Coeficiente de dilatação linear;

ΔL – Variação do comprimento;

L_0 – Comprimento inicial;

ΔT – Variação de temperatura.

3.10.2 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica, (k) é uma propriedade intrínseca do material e representa a capacidade que um material tem de transportar calor. Considerando que as superfícies de uma placa de espessura Δx estão submetidas a uma diferença de temperatura ΔT que se mantém ao longo do tempo, haverá uma transferência de calor da superfície mais quente para a superfície mais fria (figura 27).

As estruturas feitas com materiais de alta condutibilidade térmica conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente que as estruturas análogas feitas, contudo, de materiais com baixa condutibilidade térmica. O fluxo de calor que atravessa uma secção transversal de área “A” é

definido como sendo a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa a seção dessa área [41].

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{A \Delta t} \quad (23)$$

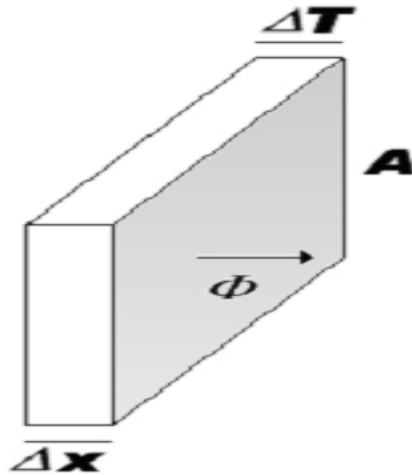


Figura 27 – Fluxo de calor que atravessa a placa [41].

O fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura na direção de propagação do calor [41].

$$\Phi = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (24)$$

Onde:

Φ – Fluxo de calor;

k – Condutibilidade térmica;

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ – Gradiente de temperatura.

3.10.3 Capacidade térmica ou calor específico

A quantidade de calor necessária para elevar de 1 K da sua temperatura é definida como calor específico, (c) de um material. O calor específico depende da quantidade da massa do corpo usado

para as medições. Quanto maior for a massa do corpo mais calor é necessário para aquecê-lo, e os materiais diferem-se na quantidade de calor necessária para produzir um aumento de temperatura [33, 41].

O valor de calor específico é exclusivo para cada material, como pode-se ver na Tabela 4. A quantidade de calor que deve ser fornecida para elevar a temperatura de T_1 para T_2 é definida pela seguinte equação:

$$Q = m * c * (T_2 - T_1) \quad (25)$$

Q – Quantidade de calor adicionada ou removida;

m – Massa da substância;

c – Calor específico da substância.

Tabela 4 – Calor específico de alguns materiais [33].

Material	Calor específico
	J/kgK
Água	4186
Gelo	2302
Madeira	1394
Tijolo	1005
Alumínio	908
Ferro	473
Latão	393
Cobre	389
Prata	234
Chumbo	130

3.10.4 Resistência ao choque térmico

As fraturas frágeis ocorrem pela não-ductilidade dos materiais, o exemplo é o caso dos polímeros e metais. O alívio das tensões térmicas induzidas, pode ser feito através da deformação plástica dos materiais. O arrefecimento rápido de um corpo frágil mais causará provavelmente o choque térmico do que o aquecimento, uma vez que as tensões superficiais induzidas são de tração. A formação e a propagação térmica a partir de defeitos na superfície do corpo são mais prováveis quando é imposta uma tensão de tração.

A resistência ao choque térmica, (RCT), é a capacidade de um material resistir a uma grande variação de temperatura com ciclos de frio – quente – frio, sem sofrer perda da sua integridade e mantendo as suas propriedades [42].

Para um corpo cerâmico que é arrefecido rapidamente, a resistência ao choque térmico depende não somente da magnitude da variação de temperatura, mas também das propriedades mecânicas e térmicas do material. A resistência ao choque térmico é maior no caso dos materiais cerâmicos que possuem elevadas resistências à fratura, elevadas condutividades térmicas, bem como reduzidos módulos de elasticidade e baixos coeficientes de expansão térmica.

$$RCT \equiv \frac{\sigma_f k}{Y \alpha_1} \quad (26)$$

$$\sigma_f = Y \alpha_1 \Delta T \quad (27)$$

σ_f – Tensões térmicas;

k – Condutividade térmica;

Y – Módulo de elasticidade;

α_1 – Coeficiente de dilatação linear;

ΔT – Variação de temperatura.

3.10.5 Transferência de Calor

A primeira lei da termodinâmica fala da transformação do trabalho em calor, ou do calor em trabalho. A quantidade de trabalho e de calor são sempre equivalentes. A técnica termográfica ganha espaço pelo facto de que em quase todas as conversões de energia (capacidade de produzir trabalho) se gera calor. A segunda lei da termodinâmica indica que se existe uma diferença de temperatura entre dois objetos, a transferência de energia térmica ocorre de áreas mais quentes para as áreas mais frias até ser alcançado o equilíbrio térmico [4, 32, 40, 42].

O calor é a transferência de energia (energia cinética total dos átomos e moléculas que compõem uma substância) de um objeto para outro. Esta energia provém da energia vibratória molecular interna do objeto quente e viaja para outro objeto frio [32].

A medida direta da energia vibratória interna de um corpo, designa-se por temperatura. Isto significa que a temperatura de um objeto pode ser definida como sendo a medida da energia cinética média das moléculas ou átomos individuais. Quanto maior for a energia interna, em geral, maior é a temperatura [33]. A temperatura é um nível de atividade térmica ou a força motriz para a transferência de calor, e as escalas que a medem são:

- °C escala Celsius;
- °F escala Fahrenheit;
- K escala Kelvin.

Sendo elas conversíveis umas para as outras, segundo as equações seguintes:

Da escala Fahrenheit para a escala Celsius

$$^{\circ}\text{F} = (1,8 \times ^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (28)$$

Da escala Celsius para a escala Fahrenheit

$$^{\circ}\text{C} = \frac{{}^{\circ}\text{F} - 32}{1,8} \quad (29)$$

Da escala Celsius, para a escala Kelvin.

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15 \quad (30)$$

Os objetos emitem energia térmica através de três métodos diferentes: condução, convecção e radiação [4]. A condução é a transferência de energia térmica de um objeto para outro através de contacto direto. A transferência de calor por convecção ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem a diferentes temperaturas. A radiação é o movimento do calor que se propaga através de ondas eletromagnéticas (figura 28) [39, 40].

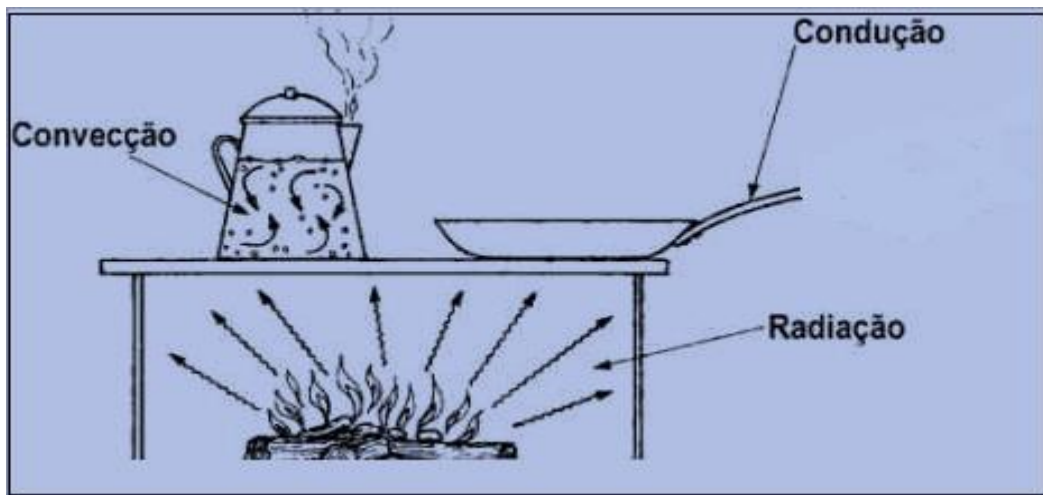


Figura 28 – Modos de transferência de calor.

3.10.5.1 Condução

O processo de condução é direto, a fonte de calor excita diretamente os átomos (aumenta suas vibrações internas), e estes átomos colidem com os seus vizinhos e transferem parte da energia para o vizinho. Os vizinhos então colidem com seus vizinhos e novamente passam alguma energia, portanto, a energia do movimento térmico é passada ao longo de um átomo para o próximo, e a sua velocidade depende da condutividade térmica do material. Os metais têm alta condutividade térmica e os isolantes têm baixa condutividade térmica, [33, 32].

A figura 29 mostra o processo de transferência por condução. Uma barra de metal aquecida numa extremidade, ao passar do tempo ficará quente na outra extremidade. A seta indica a direção do fluxo de calor. Um dos exemplos que acontece nas máquinas quando um rolamento do motor é defeituoso, o calor gerado pelo rolamento é transferido para a carcaça do motor [4].

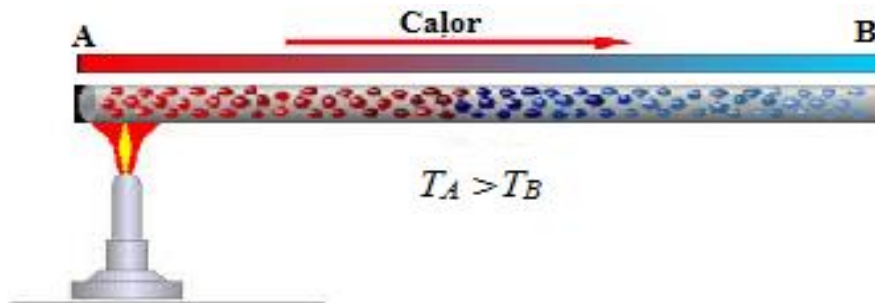


Figura 29 – Transferência de calor por condução [43].

3.10.5.2 Convecção

Convecção é a transferência de calor devida ao efeito combinado do movimento aleatório (microscópico) e do movimento macroscópico (advecção) do fluido sobre uma superfície. Exemplo, se tiver um rolamento do motor defeituoso, gerando calor e colocar um ventilador soprando diretamente sobre o rolamento quente, a temperatura da superfície vai ser diferente, isso é, arrefecimento por convecção [4, 33].

A transferência de calor por convecção pode ser separada em dois fenômenos físicos, sendo a convecção forçada e convecção natural. Convecção forçada é um fenômeno em que o movimento do fluido é gerado por uma fonte externa (ex Bomba, Ventilador).

Convecção natural é um fenômeno em que devido à diferença de temperatura dos dois meios que desenvolve um movimento dos elementos de fluido oriundo da diferença de temperaturas, resulta

numa diferença de densidade do fluido. Por exemplo, o ar quente é menos denso em relação ao frio, o movimento deste tem a tendência de subir enquanto que o ar fresco tem a tendência de descer (Figura 30). O ar aquecido é então substituído por ar frio e isso causa um movimento constante até que o objeto aquecido entre em equilíbrio com o ambiente [33].

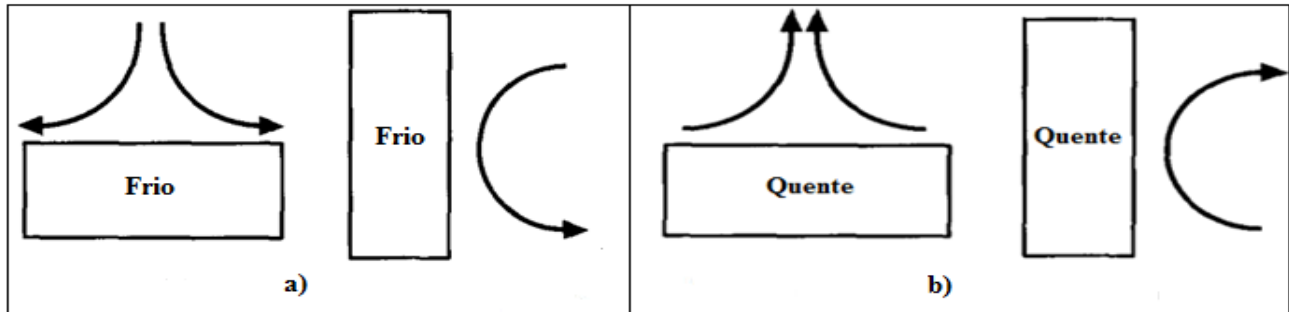


Figura 30 – Transferência de calor por convecção [33].

3.10.5.3 Radiação

Como referido nos pontos anteriores, todos os objetos irradiam calor acima de 0 K. A quantidade de calor depende da temperatura do objeto e da condição da superfície. À medida que a temperatura do objeto aumenta, a energia radiante máxima teórica também aumenta. Enquanto os termómetros de contacto dependem da condução, os dispositivos sem contacto (por exemplo, pirómetros óticos e sistemas de imagem térmica) medem a radiação que flui do objeto [33].

A radiação é a energia que é emitida pela matéria devido às mudanças das configurações eletrónicas dos seus átomos ou moléculas e que é transportada por ondas eletromagnéticas, que são emitidos e absorvidos pelas partículas de matéria à medida que passam por transições de estado de energia [32].

A transferência de calor por radiação pode ocorrer entre dois corpos espacialmente distantes de matéria a diferentes temperaturas. A emissão pode ocorrer nos sólidos, gases assim como nos líquidos [32].

Um exemplo mais comum de radiação é a energia solar (figura 31). A energia irradiada é detetada por equipamentos de imagem infravermelha [4].

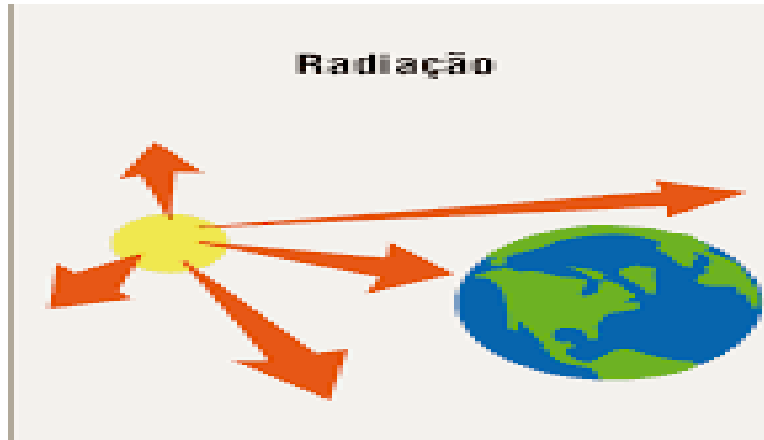


Figura 31 – Transferência de calor através da radiação do sol.

No entanto, o meio mais poderoso de transferência de energia térmica é a radiação, esta move-se à velocidade da luz. Estes três fenómenos (condução, convecção e radiação) não se excluem, e na maioria das situações ocorrem juntos.

3.11 Sistemas de medição de radiação térmica

A percepção da radiação electromagnética, seja qualitativa ou quantitativa, só pode ser realizada com a ajuda de materiais ou instrumentos capazes de captar e registrar sua presença. A deteção é realizada pelo resultado produzido pela interação entre a radiação e um meio sensível (detetor).

Num sistema detector, os elementos ou dispositivos sensíveis à radiação eletromagnética são designados por detetores de radiação. Estes, são utilizados para determinar a quantidade de radiação presente num determinado meio de interesse.

Para a medição da temperatura por infravermelhos, foram desenvolvidos nos últimos anos três tipos de sistemas, sendo eles os termómetros pontuais ou pirómetros por infravermelhos, os *scanners* de linha e as câmaras termográficas (varrimento bidimensional).

Para os pirómetros de radiação por infravermelhos, o valor de temperatura é de uma pequena área. Estes recolhem energia radiante a partir de um ponto ou área na superfície de um objeto a ser medido (o alvo) e fornecem uma indicação de saída da temperatura do alvo.

Quanto aos instrumentos de varrimento de linha, são caracterizados por apresentarem o perfil de temperatura ao longo de uma linha. As Câmaras termográficas, fornecem uma imagem da distribuição de energia numa área scannerizada da superfície do alvo, sendo apresentada sob a forma de uma imagem a preto e branco modulada por intensidade ou por uma imagem colorida, assim como apresenta distribuição de temperaturas da área mapeada [36].

3.11.1 Pirómetros de infravermelho

Os pirómetros por infravermelho são aparelhos que medem a temperatura de um objeto sem o contacto com o objeto/meio no qual se pretende verificar a temperatura. Esta medição é realizada através da radiação e apenas fornece a temperatura da superfície em medição. Um exemplo da utilização dos pirómetros por infravermelhos é na medição da temperatura de metais incandescentes em fundições.



Figura 32 – Pirómetros de temperatura [44].

Os pirômetros são usados para medição de temperaturas em matérias ou equipamentos onde a atmosfera é agressiva. Estes têm maior aplicação em técnicas não destrutivas e não visualizam imagem térmica. Medem qualquer sistema que emite radiação eletromagnética na forma de luz visível e ou radiação infravermelha.

3.11.2 Scanners de linha

Os *scanners* de linha captam a radiação infravermelha e fornecem um perfil da temperatura ao longo de uma linha através de um sistema de varrimento ótico linear. A imagem térmica é construída com a repetição sucessiva do processo de captação até atingir a imagem completa [45].

3.11.3 Câmaras termográficas

As câmaras termográficas são instrumentos concebidos para captar a radiação infravermelha emitida por superfície de objetos e convertem em imagens térmicas, em escalas de cores ou níveis de cinzento. Estas permitem efetuar medidas e análise sobre a própria imagem. As câmaras térmicas fornecem um sinal elétrico proporcional à energia radiante detetada. Em geral, uma câmara termográfica compõe-se de uma unidade de câmara e de uma unidade de vídeo (display) [26, 45].



Figura 33 – Modelo de uma câmara da FLIR [46].

3.11.3.1 Materiais óticos das câmaras termográficas

As câmaras termográficas não se assemelham às câmaras normais, pois o vidro não é um bom condutor de raios infravermelhos. As lentes das câmaras termográficas são na maioria das vezes feitas de germânio, pela sua qualidade na condução de raios infravermelhos (figura 34).

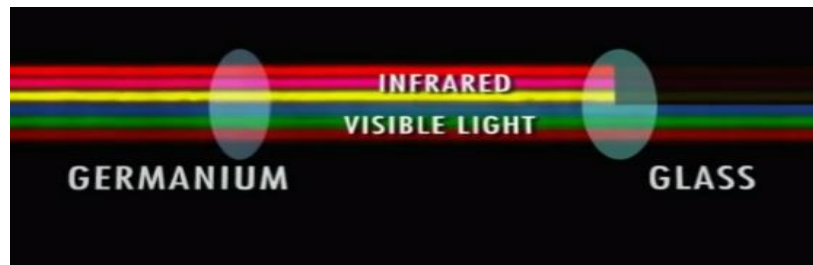


Figura 34 – Comparação entre o germânio e o vidro na condução de energia infravermelha [15].

O sistema ótico de uma câmara termográfica deve ser projetado para transmitir a faixa completa de comprimentos de onda, dentro da resposta espectral da câmara. A figura 35 ilustra diferentes tipos de materiais óticos e as suas faixas de transmissão. A escolha de um material depende da resposta espectral que se pretende na câmara. O germano apresenta uma faixa espectral de 1,8 μm a 20 μm , sendo esta, a maior faixa em relação a às faixas dos outros materiais, fazendo deste material o melhor condutor de radiação infravermelha para aplicação nas camaras termográficas [37].

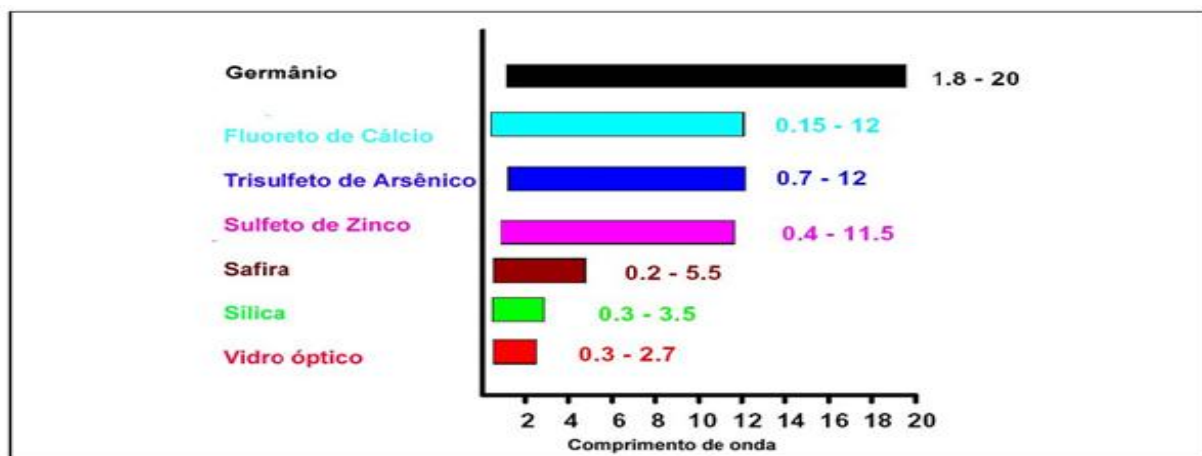


Figura 35 – Materiais óticos e suas faixas de transmissão [37].

3.11.3.2 Funcionamento de uma câmara termográfica

O sistema ótico foca num detetor de infravermelhos, o detetor envia dados (informação) para o sensor eletrónico para o processamento. Este sensor converte os dados provenientes do detetor em uma imagem compatível que pode ser visualizada numa tela termográfica LCD, ou num monitor de vídeo padrão (figura 36) [15, 46].

A imagem gerada é apresentada em tons de cinzento ou a cores, onde as tonalidades de cinzento ou a de cores são destinadas a representar um nível térmico na superfície do alvo [36]. Para a formação de imagem, existem dois sistemas distintos:

- **Sistema de varrimento** – é constituído por um sensor e por um sistema de varrimento ótico. A imagem é formada linha a linha por um conjunto de espelhos giratórios, o tempo de integração é bastante curto ($5\mu s$) e os sensores usados são do tipo MTC (Mercúrio-Cádmio-Telúrio).

O varrimento pode ser realizado opto-mecânica ou eletronicamente. O varrimento opto-mecânico pode ser feito deslizando o alvo com o instrumento fixado. O varrimento eletrónico, o padrão térmico da superfície é scanerizado eletronicamente, realizado por um feixe eletrónico de varrimento [36].

- **Sistema FPA (Focal Plane Array)** – o detetor é constituído por uma matriz bidimensional de sensores. Os pontos de imagens são captados por um elevado número de sensores composto tipicamente por PtSi (Siliciuro de platina,) e InSb (Antimoneto de índio).

Normalmente, o FPA pode ser encontrado em câmaras térmicas, instrumentos astronómicos, sistemas de inspeção, e outros tipos de unidades de medição usadas para visualizar fenómenos em várias faixas espectrais de ondas eletromagnéticas [47].

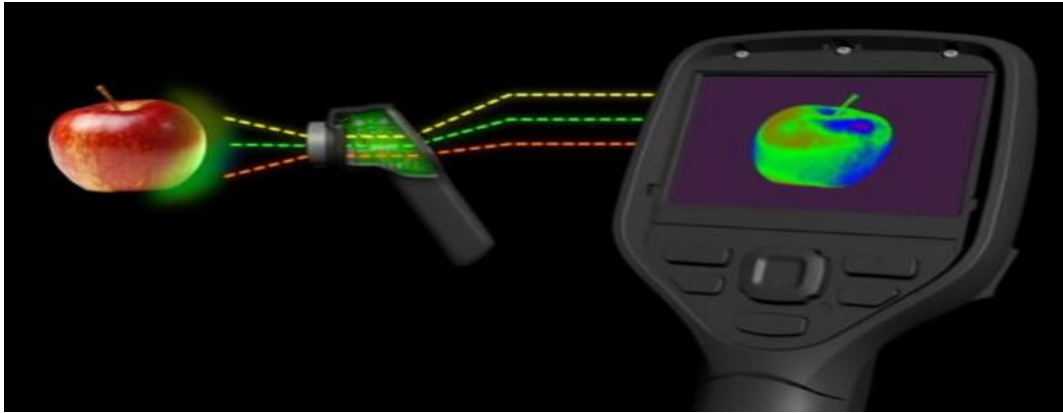


Figura 36 – Exemplo de funcionamento de uma câmara termográfica [15].

3.12 Aplicações de Termografia

A termografia apresenta-se como uma técnica de inspeção que permite realizar medições sem contacto físico com a instalação, verifica/monitoriza os equipamentos em pleno funcionamento e inspeciona grandes superfícies em pouco tempo, [2].

Originalmente desenvolvida para uso militar, as câmaras térmicas de infravermelhos migraram lentamente para outros campos de utilização de sensores à distância tão variados quanto a medicina e a arqueologia.

Atualmente, a termografia por infravermelhos é aplicada em numerosas atividades humanas, tais como: astronomia, segurança, aplicação militares, análise de eficiência térmica, medicina, testes não destrutivos, controlo de qualidade e de produção, entre outras [18].

3.12.1 Aplicação marítima de termografia por infravermelho

Com a termografia, a maquinaria a bordo beneficia de uma tecnologia de diagnóstico relevante para detetar anomalias muitas vezes invisíveis a olho nu, permitindo que sejam tomadas ações corretivas antes de ocorrerem as falhas, bem como eliminar o trabalho desnecessário.

A inspeção termográfica nos navios é importante, pois, estes dispõem de máquinas enormes, vastas instalações elétricas, sistemas eletrónicos estendidos que dificilmente as falhas podem ser vistas por inspeções visuais.

A prevenção de incêndios é uma questão importante, de acordo com a Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS), a temperatura máxima da superfície das máquinas, peças e componentes na casa da máquina de um navio não deve ultrapassar os 220 °C. Para evitar a inflamação e o desenvolvimento do fogo, todas as superfícies acima de 220 °C devem ser isoladas ou protegidas [18, 48]. A inspeção termográfica ajuda na deteção de variação de temperatura nas superfícies das máquinas, permitindo assim o controlo das mesmas.

A figura 37 mostra a região da superfície de uma máquina num processo de inspeção termográfica dum navio. Nesta inspeção, podem ver-se através do instrumento de medição, as zonas mais quentes e menos quentes.

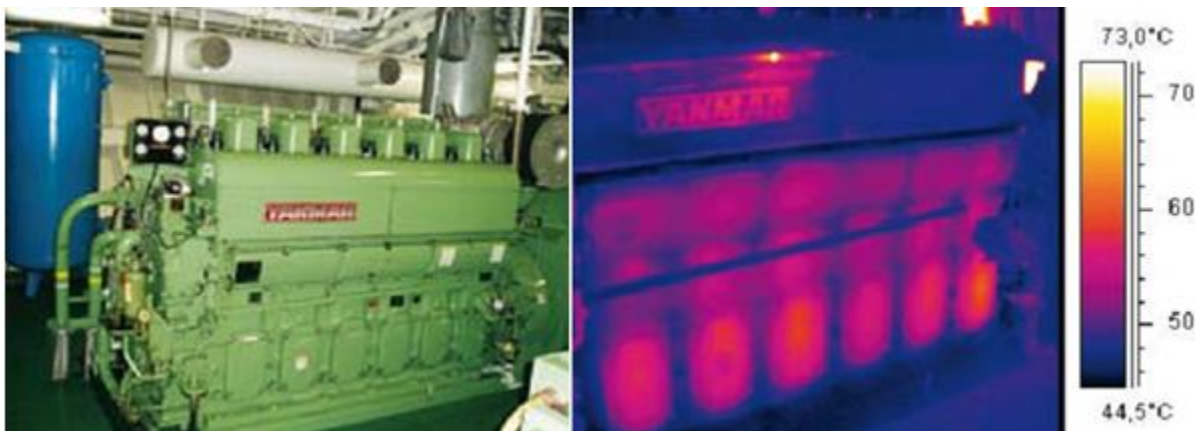


Figura 37 – Imagem digital e Imagem térmica de uma máquina auxiliar de 900 kW [48].

As inspeções termográficas em navios podem ser realizadas nos componentes como: máquina principal, geradores elétricos, quadros elétricos, compressores, caldeiras, bombas, sistema de encanamentos de vapor e combustível entre outros [48].

Por natureza as instalações elétricas e mecânicas durante o seu funcionamento desenvolvem falhas. Essas falhas podem ser atribuídas a vibrações e a manutenção de baixa qualidade por parte da tripulação e ou reparações em estaleiro, assim como podem ser atribuídas à instalação incorreta dos equipamentos.

Ao utilizar o processo de varrimento termográfico, essas possíveis causas para falha podem ser descobertas. Encontrados esses problemas permite um plano de manutenção pró-ativa que evite falhas catastróficas.

Na inspeção termográfica, através de imagens térmicas são visíveis algumas irregularidades nas superfícies dos equipamentos, sendo que a olho nu, não seria possível identificar essas irregularidades. Com o passar do tempo, essas irregularidades se não forem detetadas e corrigidas, podem desenvolver e criar situações de indisponibilidade do equipamento, insegurança, bem como potencial ameaça à vida (figuras 38 a 42) [18, 49].

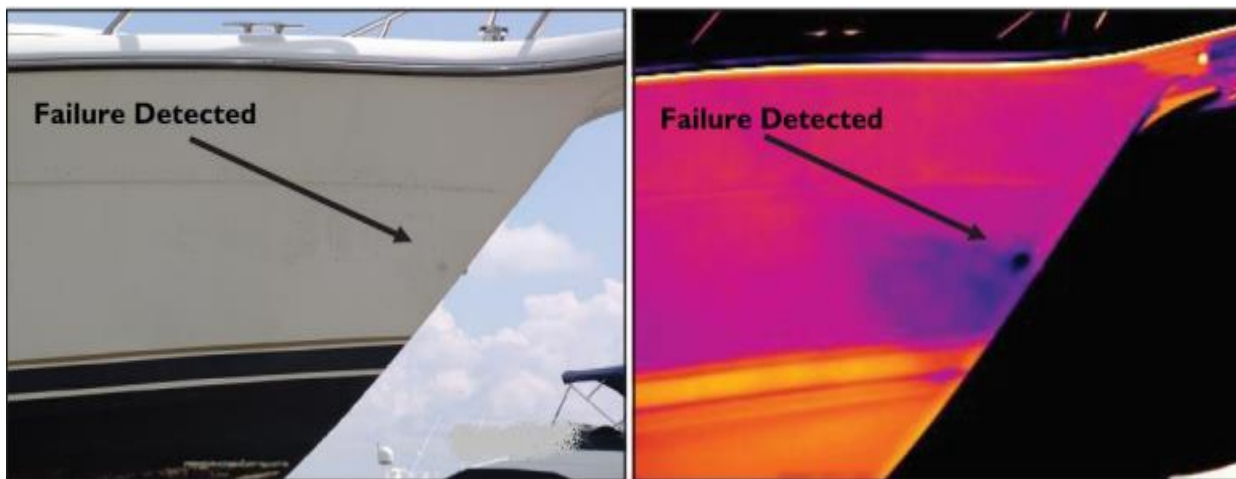


Figura 38 – Estudo estrutural de um casco [49].

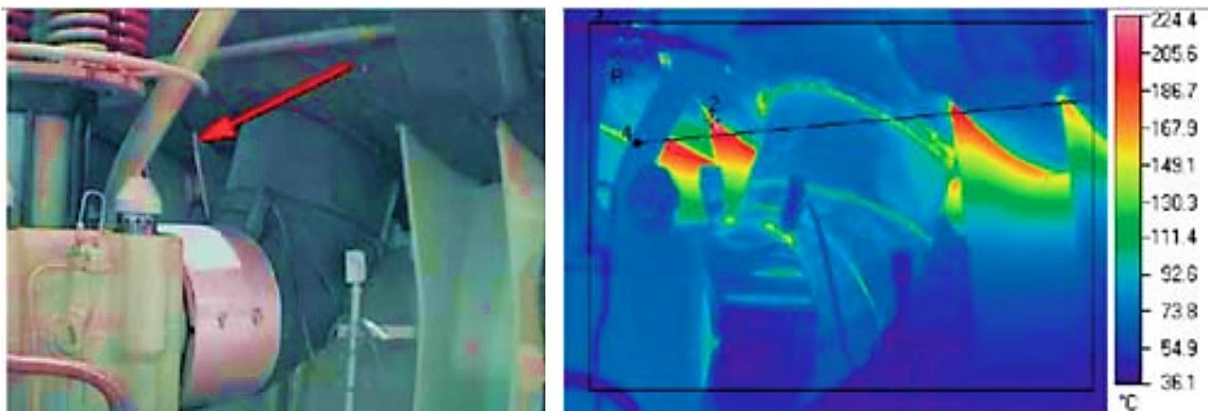


Figura 39 – Imagem digital e Imagem térmica do escape de um motor de navio [18].



Figura 40 – Detecção de falha na zona dos rolamentos do motor elétrico [49].

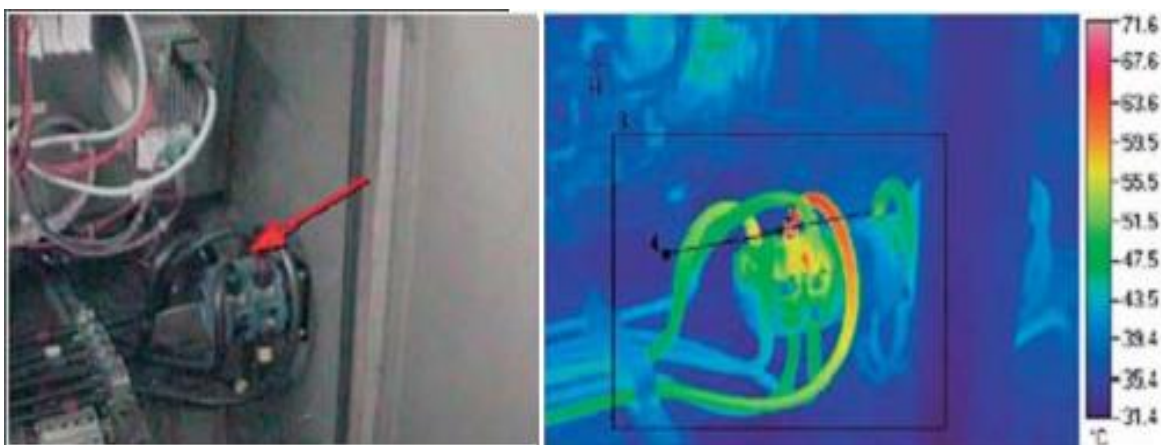


Figura 41 – Imagem digital e Imagem térmica de uma ligação fraca no isolador de um interruptor [18].

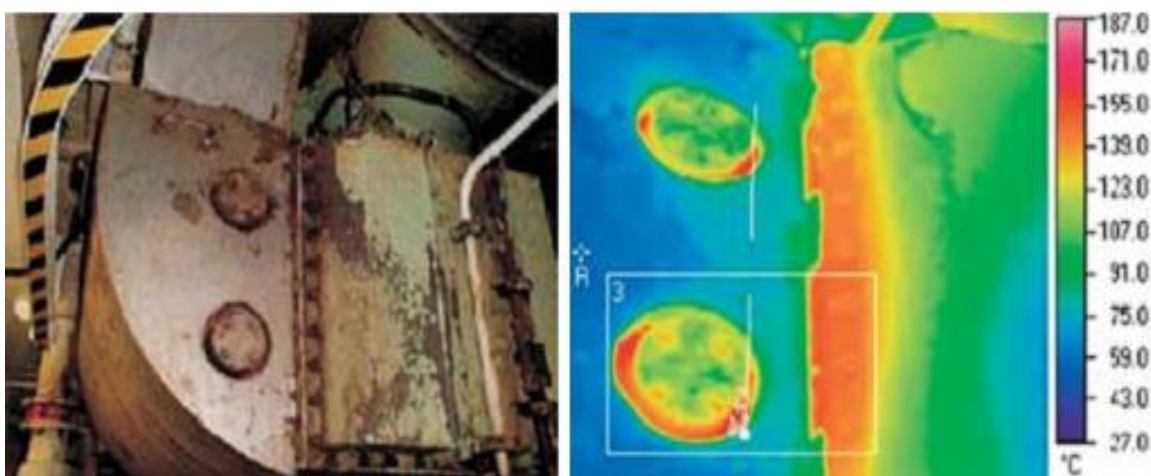


Figura 42 – Imagem digital e Imagem térmica do arrefecedor de ar [18].

As inspeções termográficas em navios podem ser realizadas durante a viagem ou em porto de acordo com as necessidades. A termografia fornece uma visão detalhada da condição dos equipamentos ou instalações e estabelece uma base sólida para decisões de reparações ou

investimentos, a fim de melhorar a condição das áreas estruturais, elétricas, eletrônicas e mecânicas [49].

3.13 Vantagens e desvantagens da termografia

À medida que os motores das embarcações se tornam mais complexos e controlados por um número crescente de componentes elétricos ou eletrônicos, a necessidade de inspeção e manutenção regulares aumenta. A termografia por infravermelhos tem a vantagem de ser uma ferramenta de inspeção e medição sem contacto capaz de exibir e armazenar valores de temperatura precisos, bem como evidências visuais. Além disso, economiza o tempo tornando-se num ativo importante no negócio de transporte [18, 48].

As principais vantagens da termografia por infravermelha são [18]:

- Permitir que ações corretivas sejam tomadas antes que os equipamentos falhem (prevenção);
- Obtenção fácil de uma imagem para análise e comparação de temperaturas numa grande área;
- Captura de alvos móveis em tempo real;
- Medição térmicas em áreas com difícil acesso para outros métodos de teste;
- Não interfere com a operação do equipamento;
- Segurança durante operação.

Desvantagens da termografia por infravermelha são:

- A interpretação das imagens térmicas carece de experiência e ferramentas especiais para ser correta;
- Medições de temperatura muito precisas são difíceis de fazer devido às alterações na emissividade do material;
- Treino e desenvolvimento demorado.

Para boas condições de inspeção termográficas, os navios devem funcionar nas suas cargas e temperaturas normais. "Uma viagem de três a quatro horas a toda a velocidade e carregada é ideal para obter uma imagem clara dos sistemas elétricos e de propulsão do navio" [48].

A termografia é uma técnica que permite fazer o mapeamento de um corpo ou uma região com o intento de distinguir as áreas de diferentes temperaturas. Neste capítulo, foram considerados os princípios da radiação infravermelha, as propriedades térmicas e os instrumentos usados para a detecção da radiação infravermelha. O capítulo seguinte abordará do mecanismo usado para o diagnóstico remoto de falhas usando termografia.

CAPÍTULO IV - METODOLOGIA E MATERIAL

4.1 Metodologia

Este trabalho engloba a elaboração de um mecanismo como ferramenta para o diagnóstico automático de falhas nos equipamentos marítimos. Para tal, foi desenvolvido uma aplicação de Monitorização e Análise Térmica dos Equipamentos (MATE) com a finalidade de controlar a variação da temperatura dos componentes. Durante o processo de ensaios, foram feitas medições das tensões térmicas de alguns equipamentos (compressores de ar, bomba de água do mar, quadros elétricos e caldeira). Para alcançar o objetivo, o estudo foi conduzido por um procedimento metodológico combinando as seguintes técnicas:

- Fundamentação teórica – pesquisa bibliográfica de artigos sobre o tema e medições térmicas e validação da aplicação MATE;
- Problema – diagnóstico de falhas ainda na fase inicial;
- Hipótese – implementação da aplicação MATE como uma ferramenta para a manutenção condicionada.

A aplicação MATE é uma plataforma desenvolvida para fazer diagnóstico de falhas através da variação da temperatura dos componentes. O funcionamento da aplicação baseia-se no processamento das imagens térmicas. Para tal, é necessário que uma câmara termográfica esteja ligada ao computador para fornecer as imagens térmicas.

A variação da temperatura dos alvos está diretamente relacionada com a variação dos níveis de intensidade da luz dos pixéis das imagens térmicas e o contraste visual gerado pelo gradiente térmico permite com que a variação da tonalidade dos pixéis seja analisada pela aplicação.

Quanto maior for a temperatura dos alvos, mais próximo da falha se encontra o equipamento. Assim sendo, torna interessante controlar o aquecimento dos equipamentos. O processamento de imagem térmica, permite com que o aquecimento dos alvos seja avaliado e comparado com os parâmetros pré-estabelecidos na aplicação. Em situação de aquecimento, arrefecimento excessivo

ou gradientes elevados dos alvos, desencadeia-se um sinal de falha localizada. O diagnóstico das falhas é feito em tempo útil, permitindo assim a intervenção no momento adequado.

4.2 Implementação da aplicação MATE

O objetivo principal desta aplicação é a monitorização permanente do estado térmico dos equipamentos, sendo a temperatura dos alvos a grandeza física de interesse. Para tal, são definidas as áreas dos equipamentos que se pretende controlar a sua temperatura. As áreas definidas na aplicação são designadas de regiões.

A aplicação, permite adicionar e editar os componentes, as suas áreas de trabalho, as propriedades dos equipamentos, as regiões de cada componente, bem como eliminar os componentes que não sejam necessários à sua monitorização. Para o seu funcionamento, a aplicação dispõe de um painel onde estão localizadas todas as funções (figura 43). O Painel está dividido em 5 grupos, (1G – Área de trabalhos, 2G – Painel de comando, 3G – Propriedades, 4G – Recetor de imagem e o 5G – Área de monitorização).



Figura 43 – Imagem do painel da aplicação MATE.

Primeiro Grupo – representado pela *Área de Trabalho*³. Através da área de trabalho, pode-se selecionar ou adicionar as áreas das quais se pretende realizar trabalhos. Os tipos ou classes dos componentes são atribuídos para cada área de trabalho (figura 44).

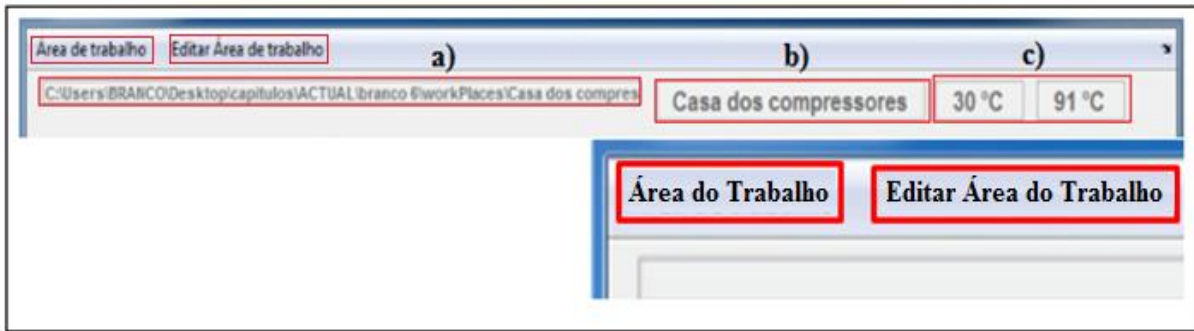


Figura 44 – Imagem do primeiro Grupo, Área do Trabalho

O ficheiro para o armazenamento das imagens é o mesmo para todas as áreas de trabalhos criadas. A função “Editar Área de Trabalho” inclui a edição do nome de uma Área de Trabalho já existente, as temperaturas limites pelas quais estarão definidas na câmara termográfica e o número do telemóvel do operador.

Este grupo visualiza o diretório onde os elementos são gravados e armazenados “a”, o nome da Área de Trabalho “b” e as temperaturas mínima e máxima definidas para a câmara termográfica “c” (essas temperaturas são as mesmas definidas manualmente na câmara).

Segundo Grupo – representado pelo *Painel de comando (panel)*, é o grupo em que estão localizados os botões de “Definir Região da Câmara, Start/Stop, Adicionar, Editar, Apagar e a Caixa dos Equipamentos/Elemento” (figura 45).

³ Compartimento ou casa onde a câmara termográfica pode ser instalada para se realizam os trabalhos.

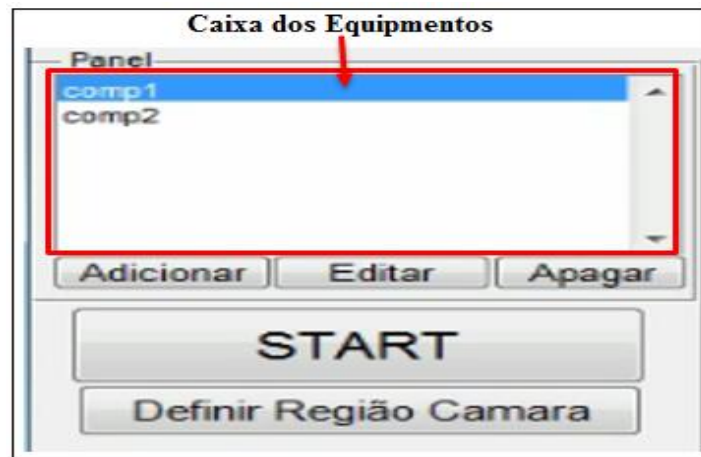


Figura 45 – Imagem do segundo Grupo, Painei do comando.

O botão “Definir Região Câmara” define o *Recetor de imagem* para exibir a informação exibida pelo *software FLIR tools*. Através do botão “Adicionar”, consegue-se inserir os elementos que se pretende monitorizar. Caso seja necessário editar os elementos inseridos na Caixa dos Equipamentos, deve carregar-se no botão “Editar”. Este botão permite mudar o nome do elemento, as suas condições térmicas, os tipos de aviso, bem como a região dos alvos no recetor da imagem.

Se for necessário eliminar alguns elementos na Caixa dos Equipamentos, utiliza-se o botão “Apagar”. Pretendendo-se correr a MATE, deve-se ter no mínimo um equipamento para monitorizar, com todas as condições criadas para o funcionamento da aplicação, carrega-se no botão “Start/Stop”. O mesmo botão Start/Stop serve para cessar o funcionamento desta.

Terceiro Grupo – representado pelas *Propriedades*. Este grupo, permite inserir os nomes ou códigos dos equipamentos que se pretende adicionar ou editar. Permite também seleccionar o tipo de equipamentos a adicionar ou editar com as suas temperaturas mínima e máxima admissíveis ($T_{mín}$ e $T_{máx}$), assim como os gradientes mínimo e máximo admissíveis ($G_{mín}$ e $G_{máx}$). Este grupo possibilita seleccionar os tipos de avisos que se pretende receber em caso de ocorrência de falha.

Os botões “Definir Região” e “Salvar” têm a função de: o primeiro define a região dos equipamentos no Recetor de Imagem e o segundo serve para guardar as atividades executadas antes de correr a aplicação (figura 46).

Figura 46 – Área das Propriedades da aplicação MATE.

No campo (tipo de equipamentos), foi compilada uma lista de 43 equipamentos que são apresentados na tabela 5. Nesta lista são apresentados valores de temperaturas mínimos e máximos ($T_{mín}$, $T_{máx}$) assim como as variações mínimas e máximas ($G_{mín}$, $G_{máx}$). Esses valores podem ser alterados nas propriedades da aplicação, permitindo assim acomodar os valores realísticos de cada equipamento para cada situação de operação. Os valores $T_{mín}$ e $T_{máx}$ com asterisco (*) significam valores adquiridos da bibliografia ou dos alarmes dos equipamentos definidos no simulador do navio petroleiro VLCC 9 instalado na sala de simulador da ENIDH, [Anexos A4], manual do motor ISOTTA FRASCHINI V1716T2MSD [Anexo A1] e artigos da UNICEUB [Anexo A3]. Os valores $T_{mín}$ e $T_{máx}$ que não apresentam asterisco foram obtidos com base numa análise dos equipamentos em condições normais de funcionamento em contexto de simulação no simulador da ENIDH. Com base nestes valores normais de funcionamento, os valores $T_{mín}$ e $T_{máx}$ foram estimados através de uma margem de segurança. Os valores de variação máxima e mínima

G_{máx} e G_{mín} foram obtidos empiricamente tendo como base o comportamento dos equipamentos em simulação.

Tabela 5 – Lista dos equipamentos compilados para a validação da aplicação MATE

Equipamento	T_{máx} (°C)	T_{mín} (°C)	G_{máx} (°C/min)	G_{mín} (°C/min)
Arrefecimento da Maquina PP	88*	60*	1	-1
Bomba LTFW	55	25	1	-1
Bomba HTFW	80	74	1	-1
Compressor do ar de arranque	75	45	1	-1
Compressor de ar de serviço	75	45	1	-1
Condensador de Vapor	45	20	1.5	-1.5
Caldeira com queimador	110	80	1.5	-1.5
Caldeira recuperativa	85	65	1	-1
Caixa redutora	90	70	1	-1
Chumaceira principais do veio de manivelas	70*	60	1	-1
Chumaceira de impulso	75*	65	1	-1
Camisa do MPP	200*	180	1.5	-1.5
Cabeça do MPP	250*	200	1.5	-1.5
Depuradora Diesel	70*	45*	1	-1
Depuradora HFO	105*	90*	1	-1
Depuradora Óleo Lubrificante	95*	80*	1	-1
Dosearficador	75	60	1.5	-1.5
Destilador de água salgada	45	20	1	-1
Gerador diesel	85	60	1	-1
Gerador de veio	75	60	1	-1
Gerador de vapor secundário	60	45	1	-1
Motor elétrico da bomba de combustível	140*	80	1	-1
Permutador de calor	40	20	1	-1
Quadro Elétrico	100*	70*	1	-1
Refrigeradores de ar	90	40	1.5	-1.5
Refrigeradores de óleo de lubrificação	40	30	1	-1
Refrigeradores do óleo de lubrificação da manga	50	30	1	-1
Refrigerador de água doce de baixa temperatura LTFW	55	35	1	-1
Refrigerador de água doce de alta temperatura HTFW	95*	75*	1	-1
Refrigerador de óleo lubrificante do veio de ressalto	70	56*	1	-1
Sistema de Servomotor de Hélice	50	40	1	-1
Separador de água oleosa	95	65	1	-1
Tanque de decantação de combustível HFO	90	60	1	-1
Tanque de serviço diário de combustível HFO	90*	60*	1	-1
Tanque de serviço diário de combustível Diesel	70*	30*	1	-1
Tanque de armazenamento de combustível HFO	90*	60*	1	-1
Transformador elétrico a Óleo	65*	140*	1	-1
Turbina de vapor à entrada	90	75	1	-1
Turbina de vapor à saída	85	60	1	-1
Turbina de potencia à entrada	110	90	1	-1
Turbina de potencia à saída	90	75	1	-1
Turbo-bomba de carga à entrada	85	70	1	-1
Turbo-bomba de carga à saída	70	60	1	-1

Normalmente, a maior parte dos fabricantes contemplam as temperaturas máximas admissíveis para o funcionamento dos equipamentos. Na elaboração da aplicação MATE, achou-se importante controlar as temperaturas mínimas dos componentes, pois, temperaturas inferiores do ideal durante o funcionamento do equipamento, podem significar uma avaria ou a não operacionalidade do mesmo.

Nesta aplicação foram também consideradas as variações bruscas de temperatura ($G_{mín}$ e $G_{máx}$) como indicação de falha. Esta variável foi considerada como importante controlar, para avaliar a variação de temperatura do alvo. Isto é interessante principalmente quando o equipamento tiver alcançado a estabilidade térmica durante o funcionamento. Assim qualquer variação brusca pode chamar atenção para uma observação do equipamento ou alvo, dependendo da importância do mesmo ao sistema produtivo.

Quarto Grupo – representado pelo *Recetor de Imagem*, este tem a função exclusiva de exibir a imagem da câmara termográfica, e as regiões dos equipamentos, bem como permitir que se defina as regiões dos alvos.

Quinto Grupo – representa a *Área de Monitorização* dos equipamentos. Este, apresenta a informação das condições térmicas dos alvos que estiverem no processo de análise. Os gráficos de evolução de temperaturas são exibidos neste grupo (figura 48).

Por forma a facilitar a leitura de temperatura dos alvos, cada gráfico está disposto de forma que mostrem os valores de temperatura e caixa de sinalização de cores.

No gráfico é possível ver as linhas que definem os intervalos de temperaturas em que os equipamentos em processo de monitorização devem funcionar sem representar perigo de ocorrência de falha. Estas linhas representam as temperaturas mínima e máxima admissíveis para o funcionamento dos equipamentos. Estes valores são os mesmos apresentados na tabela 5. A caixa de cores define as zonas de funcionamento dos equipamentos, sendo:

A zona ótima (zona a qual, o equipamento encontra-se a operar normalmente) é representada pela cor verde. No gráfico, a reta de evolução de temperatura deve encontrar-se entre as temperaturas mínima e máxima admissíveis (figura 47a).

A zona de risco (zona a qual, o equipamento encontra-se a operar anormalmente), esta zona está dividida em duas partes:

- Arrefecimento excessivo – corresponde a temperatura do alvo abaixo da temperatura mínima admissível. No Painel é representado pela cor azul (figura 47b).
- Aquecimento excessivo – corresponde a temperatura do alvo acima da temperatura máxima admissível. No Painel é representada por cor vermelha (figura 47c). Esta zona, é a mais comum para indicação de falhas nas máquinas, ou órgãos móveis, equipamentos elétricos, dado que durante o funcionamento, por causa do atrito, arrefecimento defeituoso das máquinas, desgaste dos disjuntores, entre outros, há tendência do aquecimento excessivo dos componentes.

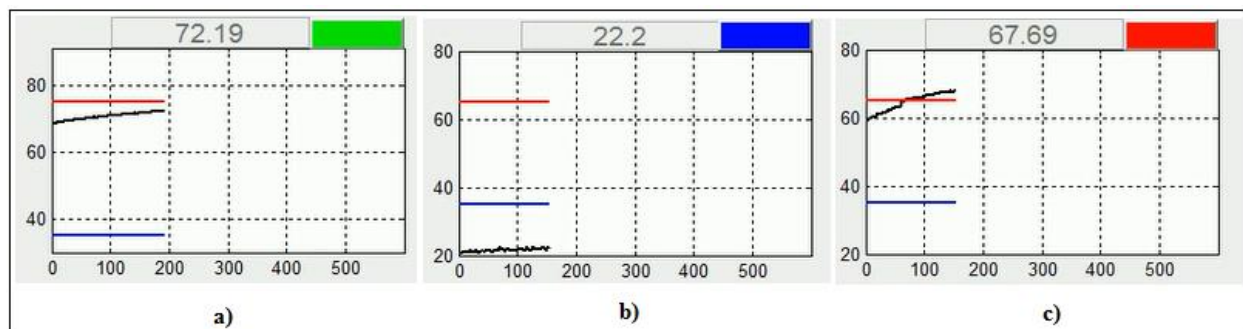


Figura 47 – Representação do estado térmico dos equipamentos.

As abcissas dos gráficos representam o tempo em segundos e as ordenadas representam os valores das temperaturas em graus Celsius. As linhas azuis e vermelhas representam respetivamente as temperaturas mínima e máxima admissíveis, enquanto a linha preta, representa a reta da temperatura dos alvos registado no momento das medições termográficas.

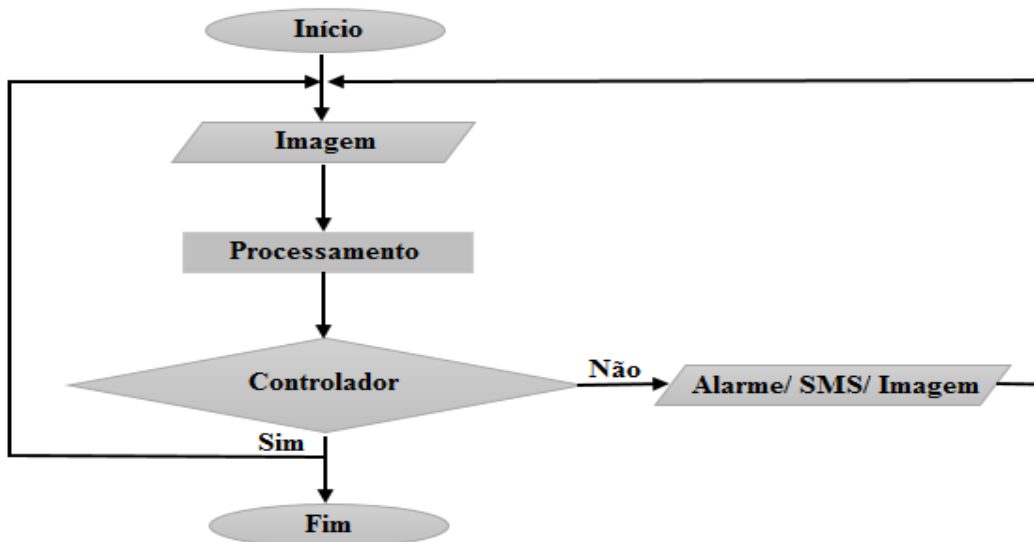
4.2.1 Material e princípio básico da aplicação

A câmara termográfica e o Matlab® são o material e a ferramenta usados para elaboração deste trabalho. Através da ferramenta Matlab, foi desenvolvida a aplicação MATE.

A câmara termográfica faz o mapeamento da superfície dos alvos e exibe a imagem no computador através do *software* “*FLIR Tools+ Reporting Software*”. A aplicação MATE recebe a imagem através deste aplicativo e faz o processamento da mesma.

O fluxograma 1 descreve o princípio do funcionamento da aplicação MATE, onde durante o processo de análise de imagens os resultados (valores de saída) podem seguir os sinais “Sim” ou “Não”.

- Se Sim – significa que o valor da temperatura medida está dentro da gama de admissíveis e não existe variação de temperaturas acima ou abaixo dos valores pré-estabelecidos para esse equipamento.
- Se Não – significa que o valor da temperatura medida não está dentro da gama de admissíveis, ou existe variação de temperaturas acima ou abaixo dos valores pré-estabelecidos para esse equipamento, assim o sinal passa para um processo de falha localizada (Alarme, SMS e Imagem).



Fluxograma 1 – Descrição do funcionamento da aplicação.

4.2.1.1 Início

A imagem térmica representa os níveis de emissão de energia em forma de calor dos corpos. A câmara termográfica capta a radiação infravermelha e converte-a em sinais elétricos. Estes sinais elétricos são convertidos em imagem visível, que pode ser visualizada em forma de imagem digital.

O início representa a captação do calor para gerar imagem térmica. No âmbito deste trabalho, a câmara termográfica deve ser instalada num lugar fixo. Deve estar também a funcionar permanentemente, salvo em situações em que não seja necessário a monitorização dos equipamentos ou outros fatores que o justifique.

4.2.1.2 Imagem – Entrada e saída de dados

A imagem corresponde a visualização de imagem térmica no computador através do software “*FLIR Tools + Reporting Software*”. Neste software, foi definido para fornecer a imagem na escala de cinzento ou monocromática e de forma manual é definida a faixa de temperaturas em que a câmara estará a operar no local.

4.2.1.3 Processamento

Uma imagem pode ser considerada como sendo uma representação visual de um objeto. A imagem digital é formada por um conjunto finito de pequenos pontos (elementos de imagem designados por *pixéis*) definidos por valores numéricos inteiros positivos na forma de um matriz $n \times m$, onde cada *pixel* $p(x, y)$, indica a intensidade de cor z em cada posição (x, y) da imagem [50].

Neste trabalho, foram usadas imagens em níveis de cinzento, onde cada *pixel* é associado a um valor numérico entre 0 a 255 numa escala de tons. A figura 48 mostra uma imagem digital com diferentes níveis de cinzento com escala que varia de 47 a 213.



Figura 48 – Representação matricial de uma região da imagem digital [50].

O processamento de imagem digital permite melhorar a sua interpretação em aspetos distintos em função da finalidade, por exemplo, na transmissão de vídeo, diagnóstico médico, controlo de qualidade de processos industriais, vigilância, entre outros. Portanto, o processamento de imagem digital resume-se em tirar informação que se pretende numa imagem (figura 49) [51].

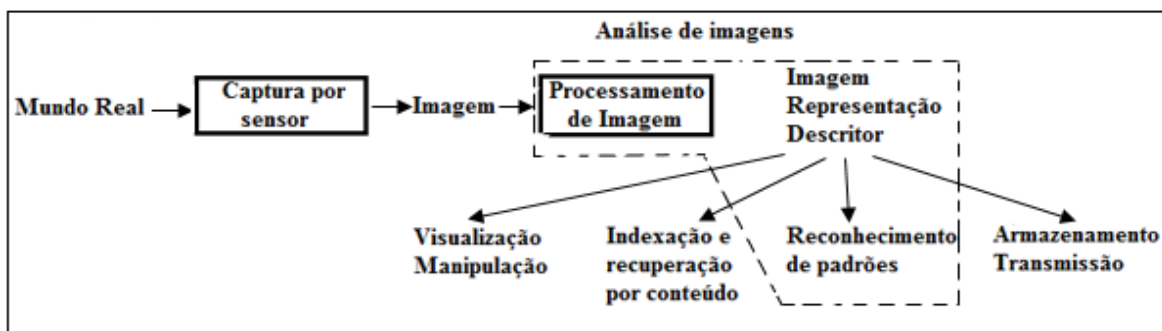


Figura 49 – Processamento de imagem digital [51].

No âmbito deste trabalho, o processamento consiste em fazer análise de imagem térmica dos alvos. A aplicação lê os valores dos *pixéis* das regiões específicas na imagem, calcula a intensidade média desses valores e converte em valores de temperatura, assim como apresenta também como informações finais:

- Gráficos de evolução de temperatura;
- Sinalização de cores para cada situação operacional do equipamento;

- Imagens gravadas num ficheiro apropriado periodicamente e em situação de ocorrência de falha;
- Mensagem de texto para cada tipo de falha;
- Alarme sonoro para cada situação de falha.

As regiões representam os equipamentos ou as áreas dos equipamentos que se pretende analisar. Estas regiões, são delimitadas pelo operador e a aplicação MATE permite monitorizar até seis regiões por área de trabalho.

O valor médio dos *pixéis* (Px_{med}) das imagens térmicas é calculado pelo somatório dos valores de níveis de cinza, c , de todos os n ($n=nlinha \times ncoluna$) pixels da imagem dividido pelo número total de pixels, n . A equação 31 mostra fórmula como a aplicação MATE calcula os valores médios da intensidade dos pixéis.

$$Px_{med} = \frac{\sum_{k=1}^n (c_{ki})}{n} \quad (31)$$

A figura 50 mostra um gráfico do processo de conversão de valores de intensidade dos *pixéis* para valores de temperatura. As variáveis $Px_{mín}$, Px_{int} e $Px_{máx}$ correspondem os valores dos pixéis mínimos, intermédios e máximos, assim como as variáveis $T_{mín}$, T_{int} e $T_{máx}$, correspondem os valores das temperaturas mínimas, intermedias e máxima respetivamente.

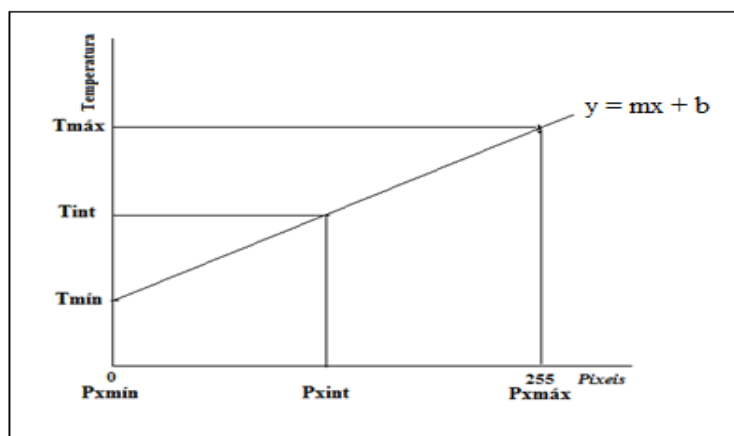


Figura 50 – Conversão de valores de pixéis em valores da temperatura.

Os valores médios da intensidade dos *pixéis* (P_{xmed}) calculados pela aplicação são representados pelos valores dos *pixéis* intermédios (P_{xint}) no gráfico da figura 50. A conversão de (P_{xint}) resulta em temperatura intermedia (T_{int}). De acordo com a equação da reta do gráfico, o “y” corresponde a temperatura intermedia, “m” o declive da reta, “x” o valor de *pixéis* intermédios e o “b” a ordenada na origem. A partir da equação 32, obtém-se a conversão de *pixéis* para valores de temperatura.

$$T_{int} = m \times P_{xint} + T_{mín} \quad (32)$$

Onde:

$$m = \frac{T_{máx} - T_{mín}}{P_{xmáx} - P_{xmín}} \quad (33)$$

O valor da temperatura intermédia é o valor apresentado no gráfico. A T_{int} é a variável de interesse para o controlo da variação térmica dos alvos. A partir da T_{int} são determinadas as condições operacionais do equipamento.

As variações bruscas de temperatura dos equipamentos são controladas. Essas variações foram consideradas de gradiente térmico e foram determinadas a partir da equação 33.

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (33)$$

Onde, ΔT variação da temperatura em graus Celsius e Δt variação do tempo em minutos.

A aplicação grava imagens numa pasta criada de 5 em 5 minutos, onde cada imagem é composta por um gráfico da evolução de temperatura e uma imagem térmica (figura 51). O ponto no gráfico (a), indica o momento e a posição em que a imagem foi gravada e o retângulo na imagem térmica (b) indica a região do equipamento em processo de análise.

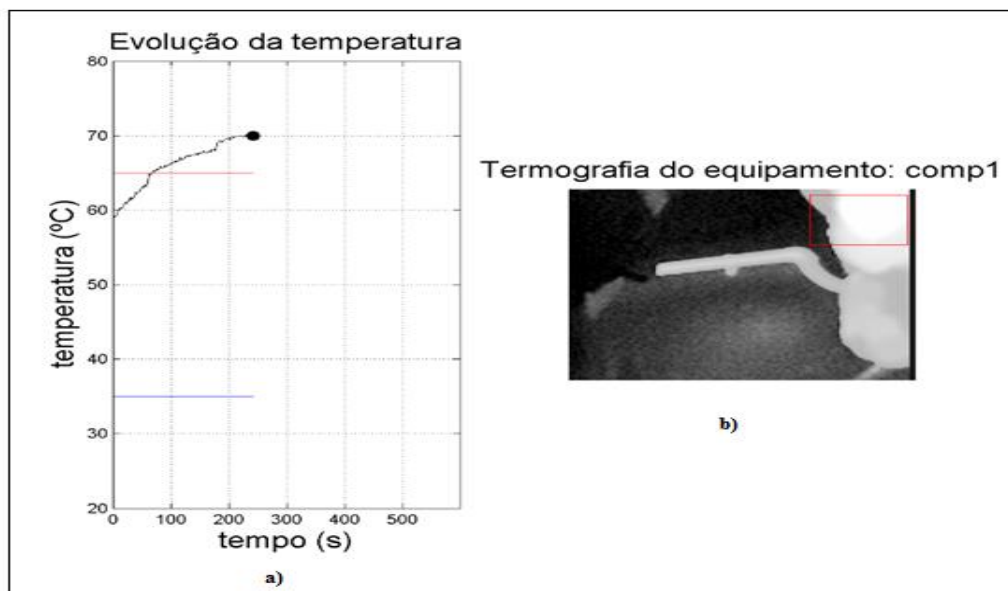


Figura 51 – Perfil da imagem gravada pela aplicação MATE.

A imagem é armazenada em formato png, e o nome da mesma vem definida com nome da área de trabalho, nome do equipamento, data e hora, png. Além do tempo pré-estabelecido, as imagens são também gravadas em caso de ocorrência de falhas. O nome das imagens em caso de falhas é o mesmo das imagens gravadas periodicamente, acrescentado da indicação da causa da falha (Gmáx, Gmín, Tmáx ou Tmín), onde:

- Gmáx – indica que a falha foi causada por variação excessiva de temperatura, onde o valor do gradiente máximo é superior do pré-estabelecido;
- Gmín – indica que a falha foi causada por variação excessiva de temperatura onde o valor do gradiente mínimo é inferior do pré-estabelecido;
- Tmáx – indica que a falha foi causada pelo aquecimento excessivo, onde a temperatura do alvo é superior da temperatura máxima admissível;
- Tmín – indica que a falha foi causada pelo arrefecimento excessivo, onde a temperatura do alvo é inferior da temperatura mínima admissível.

O fluxograma 2 mostra as etapas do processamento da imagem térmica.



Fluxograma 2 – Etapas do processamento de imagem.

- Início – esta etapa representa a imagem exibida pelo software FLIR Tools+ Reporting Software, para posterior ser processada;
- Detetor – o algoritmo identifica as intensidades dos *pixéis* na região selecionada e faz a média do valor das mesmas;
- Conversor – neste algoritmo o valor da intensidade é convertido num valor de temperatura que pode ser lido na área de monitorização dos equipamentos na aplicação.
- Gráficos – o algoritmo, esboça os gráficos que permitem mostrar a variação de temperatura dos componentes através da reta de evolução e mostra em valores a temperatura lida nos gráficos;
- Cores – o algoritmo mostra as cores que permitem facilmente identificar a zona de operação do equipamento.

A figura 52 ilustra o processamento da imagem térmica. O *software FLIR Tools* apresenta a imagem térmica e a aplicação MATE faz a monitorização de 2 alvos, tendo como saída os gráficos com temperaturas e codificação de cores.

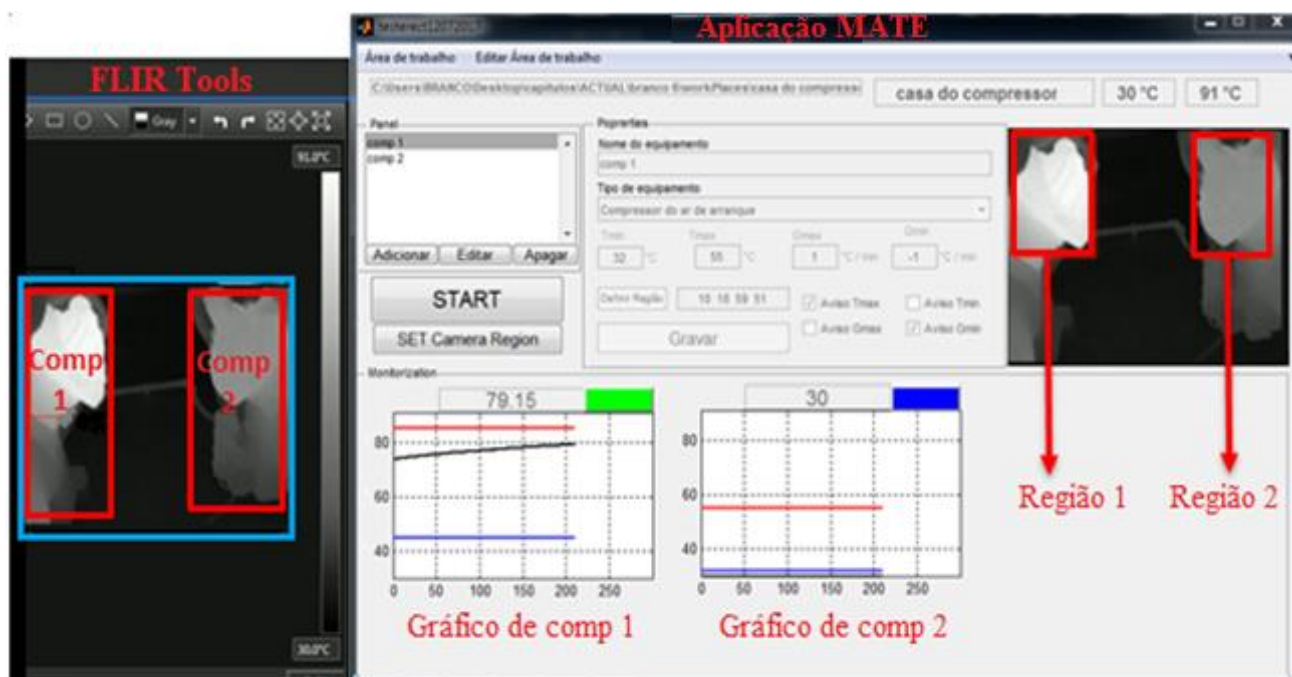


Figura 52 – Exibição e processamento da imagem térmica.

4.2.1.4 Controlador – Limites e severidade

O algoritmo foi concebido para controlar a variação de temperatura de cada equipamento ou área da superfície do equipamento. Quando o valor da temperatura se encontrar fora da zona ótima ou variações bruscas de temperaturas do alvo, o algoritmo grava imagem. No mesmo instante, aciona o alarme sonoro que deverá tocar repetidas vezes, até que alguém o pare, assim como envia uma mensagem. O envio de mensagem neste trabalho foi definido para ser feito de 10 em 10 minutos até alguém reparar a causa do alarme ou se o equipamento por si só voltar a funcionar na zona ótima.

4.2.2 Procedimentos para operação da aplicação MATE

As condições iniciais para o funcionamento da aplicação consistem em ter a ferramenta *FLIR Tools Reporting Software* posicionada num canto do ecrã do computador onde a aplicação esteja definida para adquirir a imagem. A *FLIR Tools* deve estar conectada à câmara termográfica, exibindo a

imagem gerada pela câmara. A aplicação MATE deve estar ao lado da ferramenta FLIR Tools, para melhor controlar o processo.

Ao iniciar, todos os botões na aplicação estão inativos com exceção do botão “Definir Região Camara”, deve-se carregar neste botão (figura 53) para a imagem visualizada pela ferramenta FLIR Tools ser exibida no Recetor de Imagem.



Figura 53 – Definição do recetor de imagem.

4.2.2.1 Criar uma nova Área de Trabalho

Depois de definir o recetor da imagem, deve carregar no campo (Área do trabalho), duas opções vão aparecer: criar uma nova Área de Trabalho (Novo) e abrir uma Área de Trabalho já existente (Abrir) (figura 54).

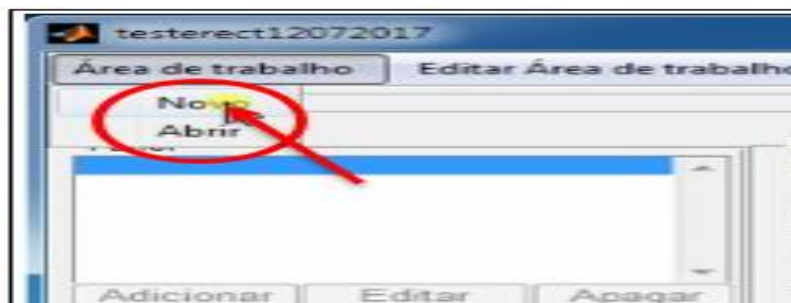


Figura 54 – Iniciar a aplicação.

Ao carregar na opção “Novo”, uma janela vai aparecer (figura 55a). Nesta janela, dois ficheiros aparecerão (Matlab e WorkPlaces). Deve-se seleccionar o ficheiro *workPlaces* (onde serão guardadas

todas as operações) e em seguida deve-se carregar no *select folder*. Uma janela vai aparecer (figura 55b), deve-se inserir os seguintes dados: o nome da área de trabalho, as temperaturas mínima e máxima para a qual a câmara termográfica estará definida para operar, e o número do telemóvel do operador para o qual a mensagem deve ser enviada. Depois de inserir os dados, carregue no “Ok” e o botão “Adicionar” aparecerá ativo no Painel da aplicação.

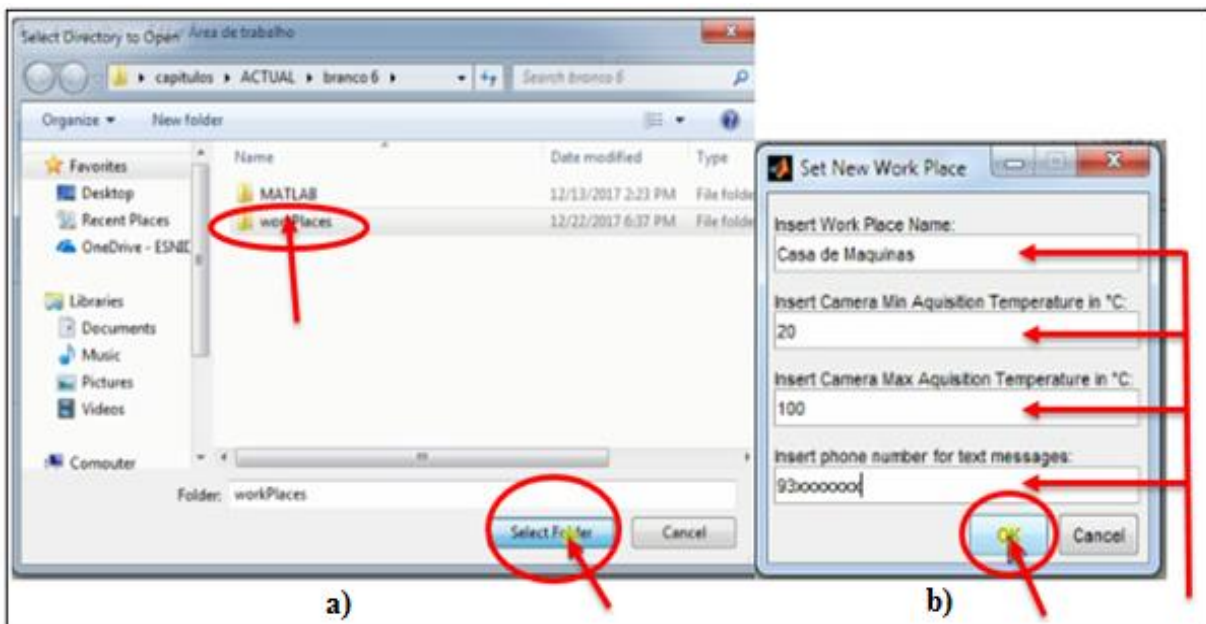


Figura 55 – Processo para criar uma nova área de trabalho.

Para adicionar, deve carregar-se no botão “Adicionar” e automaticamente as aplicações do grupo “*Propriedades*” aparecerão ativos. No espaço do “nome do equipamento”, deve-se inserir o nome ou código do equipamento que se pretende monitorizar, no espaço “tipo de equipamento” deve-se escolher o tipo do equipamento de que se pretende monitorizar. Selecionado o tipo de equipamento, aparecerá o nome do mesmo com os valores de $T_{mín}$ e $T_{máx}$ bem como os valores dos $G_{mín}$ e $G_{máx}$.

A figura 56 mostra um compressor de ar de serviço como o equipamento selecionado exibindo os valores de temperaturas e dos gradientes térmicos. Neste equipamento, as $T_{mín}$ e $T_{máx}$ são 45 °C e 70 °C e os gradientes mínimo e máximo são -1 °C/min e 1 °C/min respetivamente.

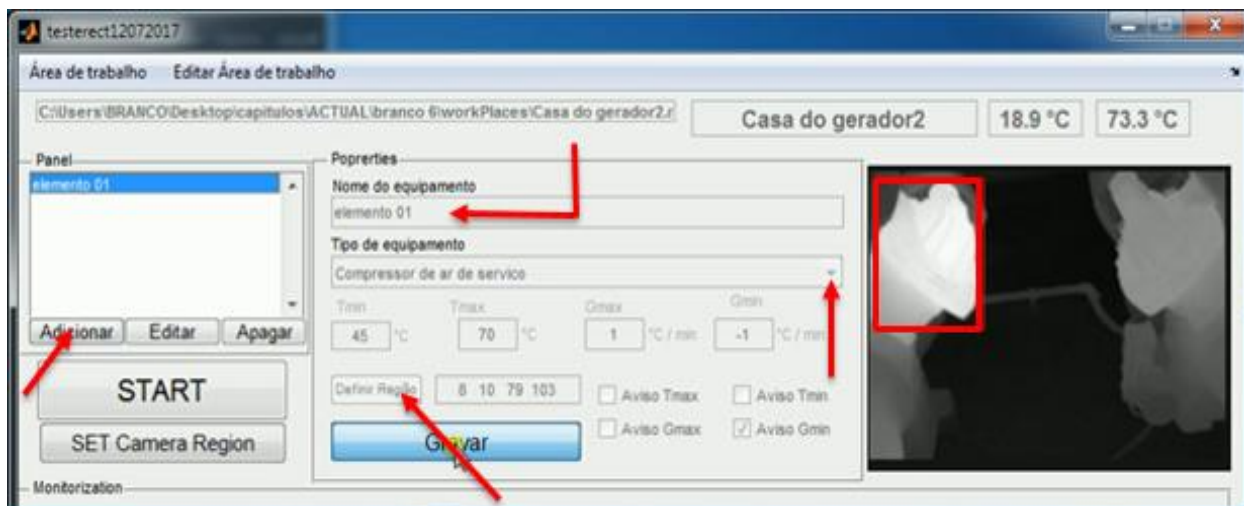


Figura 56 – Processo de adicionar os elementos.

A região no recetor de imagem é definida com um clique no botão “Definir Região” como mostra a seta na figura 56 e delimitar a área do equipamento que se pretende monitorizar.

Para receber as mensagens no telemóvel, deve seleccionar os avisos. Dependendo do tipo de equipamento ou importância, pode-se ativar todos os avisos ou alguns deles. Ao clicar no botão “Gravar”, todas as atividades realizadas são guardadas e o nome ou código do equipamento inserido vai aparecer na caixa dos elementos (figura 57).

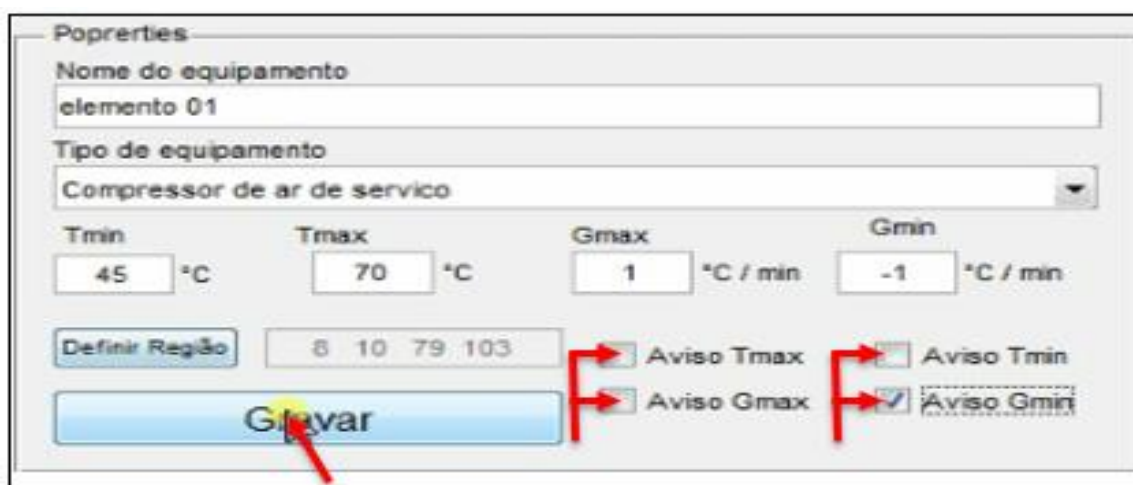


Figura 57 – Ativação dos avisos.

Pretendendo-se adicionar mais equipamentos, deve-se carregar no botão “Adicionar” e seguir os mesmos procedimentos, bem como se se pretender editar, deve-se carregar no botão “Editar” e alterar os dados pretendidos.

A figura 58 mostra a região do alvo sendo editada, para tal deve-se carregar nos botões “Editar” e “Definir Região”, seleccionar a nova região do alvo no Recetor de Imagem e gravar. Para correr a aplicação deve carregar no botão “Start/Stop”.

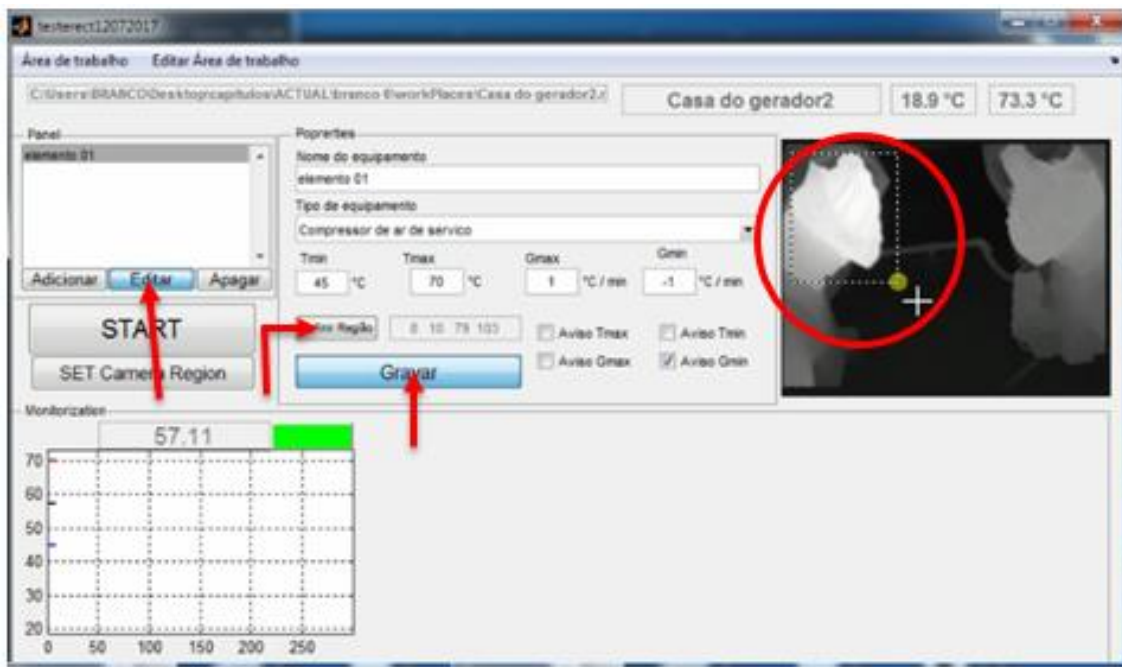


Figura 58 – Processo de editar a região do alvo.

4.2.2.2 Abrir uma área de trabalho já existente.

Depois de ter o recetor da imagem definida, deve-se carregar no campo (Área do trabalho) e duas opções vão aparecer: criar uma nova área de trabalho (Novo) e abrir uma área de trabalho existente (Abrir) (figura 59).

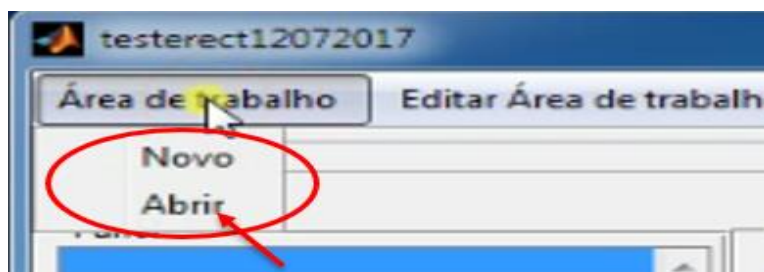


Figura 59 – Iniciar a aplicação.

Ao carregar na opção “Abrir”, vai aparecer uma janela (figura 60). Nesta janela, deve-se seleccionar o ficheiro *workPlaces* e carregar no *open*. Um ficheiro vai aparecer com a lista das áreas de trabalhos já criadas e uma pasta de imagens onde todas as imagens gravadas durante o funcionamento da aplicação MATE são arquivadas.

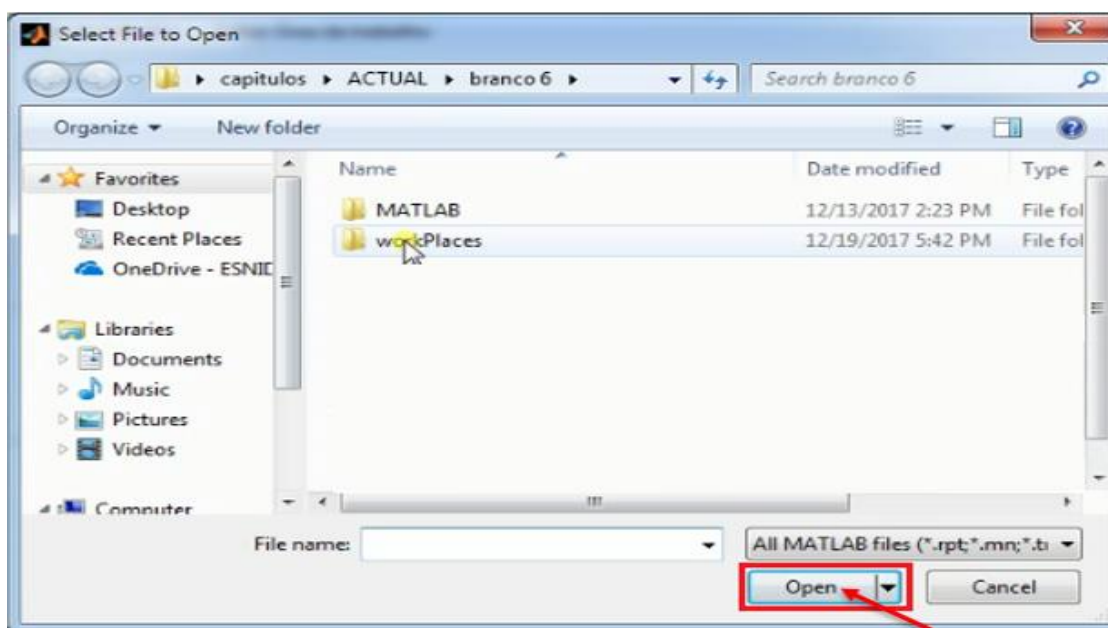


Figura 60 – Janela com os ficheiros.

A figura 61 ilustra o ficheiro com a lista de 4 áreas de trabalhos e uma pasta de imagens gravadas. Ao seleccionar uma das áreas de trabalho e carregar no open e aparecerá no painel da aplicação a lista dos equipamentos inseridos com todas as condições térmicas de cada equipamento.



Figura 61 – Ficheiro com a listar das áreas de trabalhos.

Nota: sempre que se efetuar qualquer alteração ou adicionar um novo elemento, deve-se guardar para validar as operações realizadas.

4.3 Teste para a validação da aplicação

Para a validação da aplicação MATE, foi feito um teste antes dos ensaios que são descritos no capítulo V. Para a obtenção das imagens térmicas durante o teste, foi utilizado uma câmara termográfica (*FLIR Exx series*). Como amostra, foi usado um dos compressores que se encontram instalados na piscina da Escola Superior Náutica Infante D. Henrique.

O teste consistiu em colocar a câmara termográfica (figura 62d) a uma distância de 150 cm da amostra (figura 62b). A câmara captava a radiação infravermelha (figura 62c) e convertia numa imagem térmica. Esta imagem, foi exibida num computador (figura 62e) através do *software FLIR Tools+ Reporting Software* para posteriormente ser processada pela aplicação MATE.

Foram definidos como parâmetros para o funcionamento normal da amostra (compressor) os seguintes valores de temperatura e gradientes térmicos: temperaturas mínima 35 °C e a máxima 65 °C, assim como gradiente térmico mínimo- 1 °C/min e máximo 1 °C/min. Durante o teste, observou-se variação progressiva da temperatura e o gradiente térmico do compressor.

O teste começou com o compressor desligado. Na aplicação a temperatura da amostra encontrava se abaixo da temperatura limite mínima, e a aplicação deu sinal de falha localizada. Em seguida arrancou-se o compressor, a temperatura subiu progressivamente até estar dentro dos parâmetros definidos e a aplicação deu sinal de funcionamento normal. Passados cerca de 4min, a temperatura ultrapassou a temperatura máxima admissível, e a aplicação deu sinal de falha localizada.

O compressor foi desligado e a temperatura ficou estabilizada durante 80 segundos, retornando de seguida para o estado inicial. Durante este ensaio, a aplicação ativou sempre o sinal de falha localizada quando o valor da temperatura se encontrava fora dos parâmetros ou quando houvesse variações bruscas de temperatura.

Quando a aplicação ativou o sinal de falha localizada, este gravou as imagens, ligou o alarme sonoro (figura 62f) e enviou um sinal sob a forma de mensagem de texto para um telemóvel (figura 62g) que estava emparelhado com a aplicação MATE.

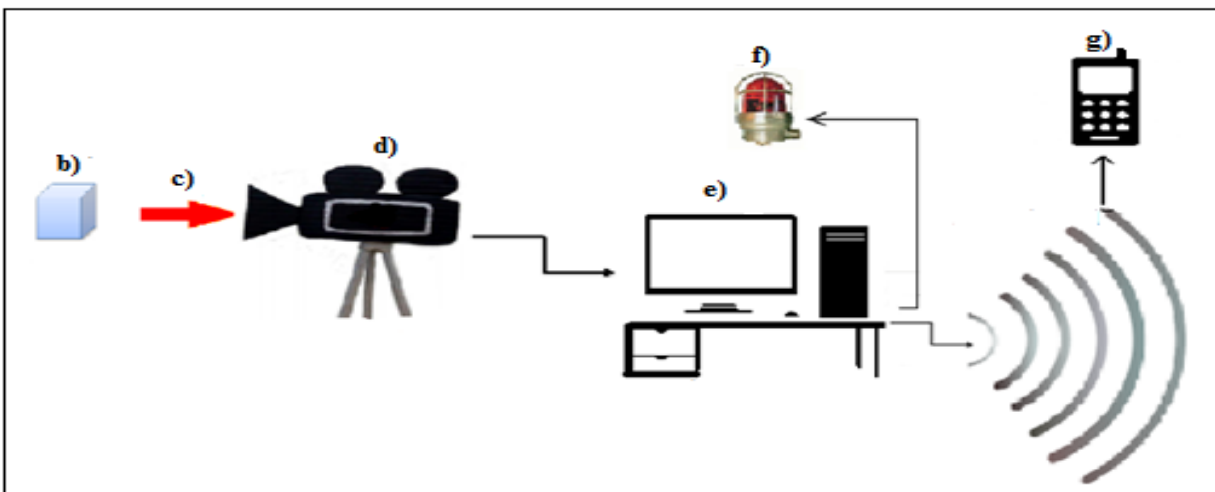


Figura 62 – Disposição do setup experimental.

A figura 63a mostra o gráfico de evolução de temperatura e 63b mostra uma das imagens gravadas numa das situações de falha localizada.

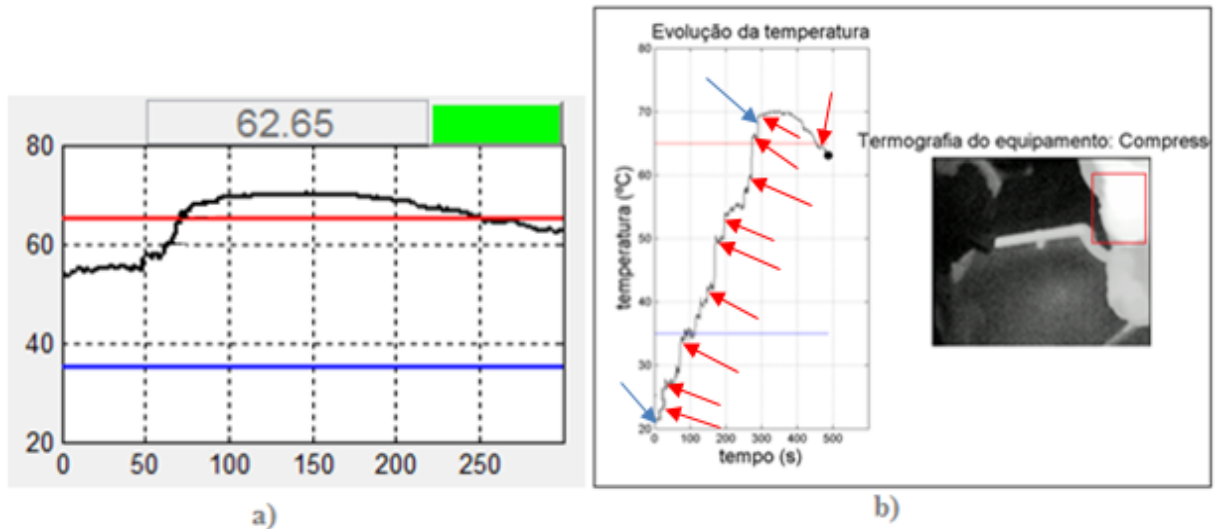


Figura 63 – Gráfico de evolução de temperatura e imagem gravada pela aplicação.

No princípio do teste, com a temperatura do alvo cerca de 23 °C, a aplicação registou a primeira falha de temperatura do alvo abaixo da temperatura mínima admissível. Quando se arrancou o compressor, houve uma variação brusca da temperatura, tendo-se registado a segunda falha de gradiente máxima de 27 °C.

As setas vermelhas na figura 63b) indicam os momentos em que a aplicação registou falhas pelo gradiente térmico. Isto aconteceu muitas vezes, pois, a cabeça do compressor aquecia progressivamente a cada compressão do ar. As setas de cor azul mostram as falhas originadas pela temperatura mínima abaixo do valor da temperatura mínima admissível e temperatura máxima acima da temperatura máxima admissível.

A temperatura mínima foi registada como falha, pois, na aplicação foram definidos todos os tipos avisos de falhas. Portanto, a aplicação foi concebida para ativar o sinal de falha quando encontra

valores de temperatura fora dos valores pré-definido. Este aviso foi propositadamente ativado para ver a resposta da aplicação.

Quando a temperatura ultrapassou o valor máximo admissível de temperatura, com 68 °C a aplicação diagnosticou a falha localizada. Aos 68 °C, o compressor foi desligado e houve tendência de estabilização de temperatura por cerca de 2 mim e antes de começar a descer. A figura 64 mostra 6 mensagens de falhas diagnosticadas enviadas para o telemóvel.

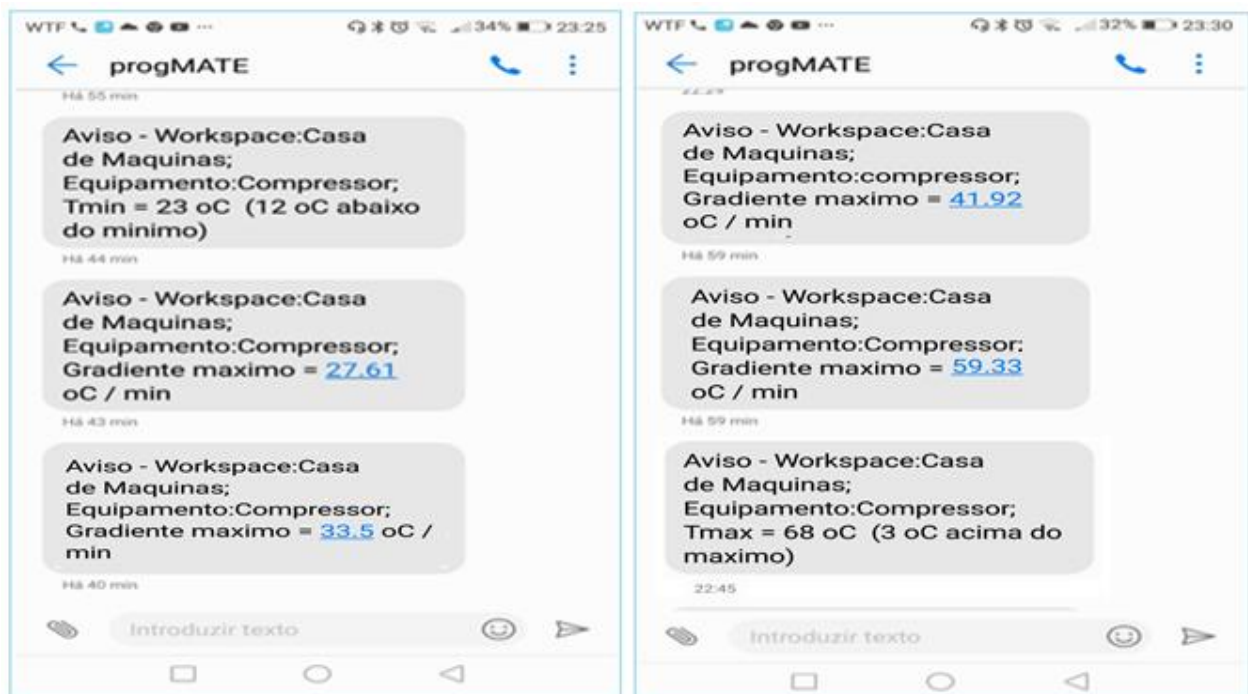


Figura 64 – Algumas mensagens enviadas pela aplicação na situação de falha localizada.

CAPÍTULO V – RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.1 Resultados e Discussão

O presente capítulo apresenta os testes realizados e com base nos gráficos serão interpretados os resultados alcançados durante a execução da dissertação.

Durante os ensaios não foram considerados os fatores que afetam a medição. O objetivo fundamental foi o de analisar a aplicabilidade da aplicação MATE com a técnica de inspeções por termografia e a resposta do mesmo em situações de ocorrência de falhas através da variação das tensões térmicas nos equipamentos. Foram realizados os seguintes ensaios:

- Na Escola Superior Náutica Infante D. Henrique:
 - 1 – Ensaio com dois compressores de ar;
 - 2 – Ensaio com bomba de circulação de água de piscina;
 - 3 – Ensaio com caldeira de água quente.
- No Navio Corvo:
 - 1 – Ensaio com a bomba de água do mar;
 - 2 – Ensaio com quadro elétrico;
 - 3 – Ensaio de válvula de caldeira de óleo térmico.

A câmara termográfica usada nos ensaios foi da marca *FLIR Exx series* e os valores constantes introduzidos na câmara estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Variáveis inseridos na câmara termográfica

Emissividade	0,95
Temperatura aparente reflexiva	20 °C
Humidade relativa	50%
Temperatura atmosférica	20 °C
Temperatura ótica externa	20 °C
Transmissividade ótica externa	1,00

5.2 Ensaios na ENIDH

O primeiro ensaio foi realizado com os compressores de ar de serviço, o segundo com o motor elétrico da bomba de circulação da água da piscina e o terceiro ensaio foi com a caldeira de água quente para o aquecimento da água da piscina. Estes ensaios, basearam-se na colocação da câmara termográfica (CT) num lugar fixo. A captação de imagem foi feita de forma contínua num período que variava de 10 minutos a 30 minutos para cada equipamento.

5.2.1 Ensaio com os compressores de ar

Neste ensaio, a câmara foi colocada à uma distância de 150 cm do alvo, com o ângulo de incidência de 30° (figura 65).



Figura 65 – Ensaio com os compressores.

O ensaio foi feito com os dois compressores volumétricos, o primeiro (C1) estava em funcionamento e o segundo (C2) estava desligado. O ensaio começou 2 minutos depois do arranque do primeiro compressor (C1). Olhando para a imagem térmica da figura 66b é notória a diferença da intensidade dos *pixéis* nas regiões selecionadas dos compressores. O primeiro compressor apresenta o nível de intensidade elevado em relação ao segundo. Isto significa que o C1 liberta mais calor que o C2.

O aumento progressivo de emissão do calor é diretamente proporcional ao aumento do valor da temperatura, podendo este último, ultrapassar o valor máximo admissível das condições térmicas definidas na aplicação, gerando-se assim um sinal de processo de falha.

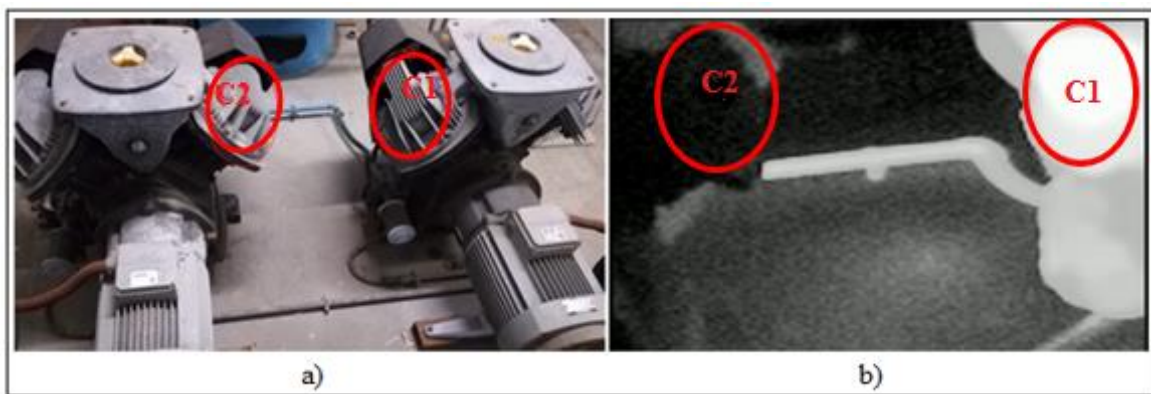


Figura 66 – Imagem digital e Imagem térmica do grupo compressor da piscina da ENIDH.

Nas propriedades da aplicação foram definidos os valores das temperaturas mínima e máxima admissíveis assim como os valores dos gradientes sob os quais os compressores não devem ultrapassar, sendo $T_{\min}$ 35 °C e $T_{\max}$ 65 °C, e -1 °C/min e 1 °C/min como gradientes mínimo e máximo respetivamente.

Na área do trabalho, as temperaturas mínima e máxima definidas para a câmara termográfica foram 20 °C e 80 °C respetivamente. Essas condições térmicas foram escolhidas aleatoriamente, com a intenção de avaliar a resposta da aplicação no processo de diagnóstico de falhas.

As cabeças dos compressores foram definidas como as regiões a serem monitorizadas pela aplicação, pois, o aquecimento destas áreas é momentâneo e progressivo até atingir o equilíbrio térmico durante o funcionamento dos mesmos. Este aquecimento permite criar um sinal que é interpretado pela aplicação MATE como falha localizada. Os tipos de avisos ativados para cada compressor foram o controlo da temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) e o gradiente máximo ($G_{\text{máx}}$).

5.2.1.1 Análise dos resultados

Através dos gráficos pode-se ver que a reta de evolução de temperatura do primeiro compressor no princípio encontrava-se na zona ótima e ao passar dos 82 segundos com o crescimento progressivo, ultrapassou o limite da temperatura máxima admissível (figura 67a).

A reta do segundo compressor (C2) encontrava-se sempre na zona de risco, abaixo do limite mínimo, mas isto não significa que este estava em processo de falha. Portanto, o C2 não estava em funcionamento, apenas emitia o calor residual. Mas é interessante reparar que ao passar do tempo, houve variação de temperatura do C2, este fenómeno deveu-se a radiação emitida pelo compressor 1 (figura 67b).

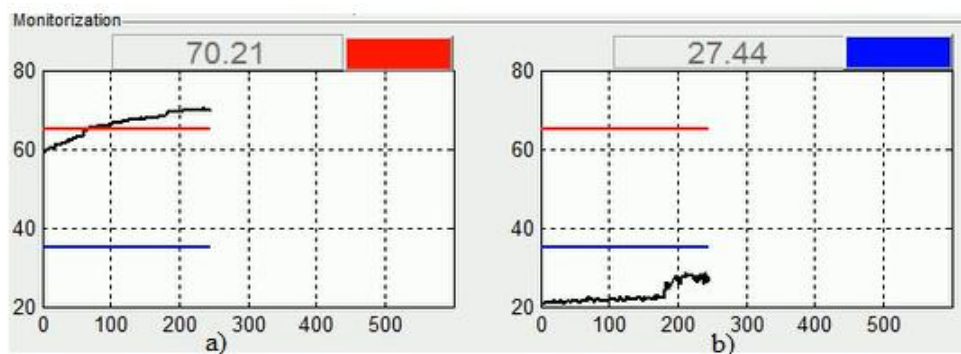


Figura 67 – Gráficos de evolução de temperatura dos alvos.

A temperatura do C1 estava em ordem dos 59 °C no princípio e passados 73 segundos, houve a variação excessiva da temperatura (figura 68). A aplicação ativou sinal de falha localizada. O tipo de falha identificada foi o gradiente máximo.

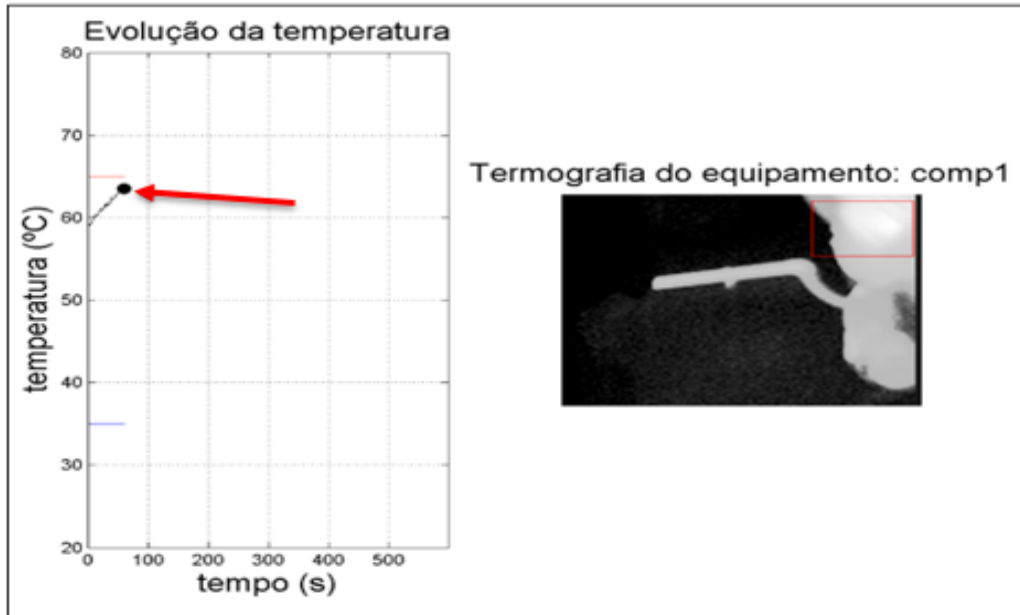


Figura 68 – Imagem gravada devido ao gradiente máximo do compressor 1.

Aos 82 segundos houve o primeiro *threshold* e a temperatura do C1 atingiu o limite da temperatura máxima admissível, automaticamente a aplicação ativou sinal de falha localizada. Os tipos de falhas identificadas foram o gradiente térmico máximo e a temperatura máxima admissível alcançada.

Aos 183 segundos houve o segundo *threshold*. Este último fenómeno ocorreu nos dois compressores ao mesmo tempo. A aplicação ativou o sinal de falha localizada para os dois compressores e o tipo de falha identificada foi o gradiente máximo excessivo (figura 69). Depois desse instante, os gráficos dos dois compressores mostraram a tendência de estabilizar. Antes dos 183 segundos, o valor de temperatura do C2, aumentava progressivamente, mas não de forma significativa (figura 69b).

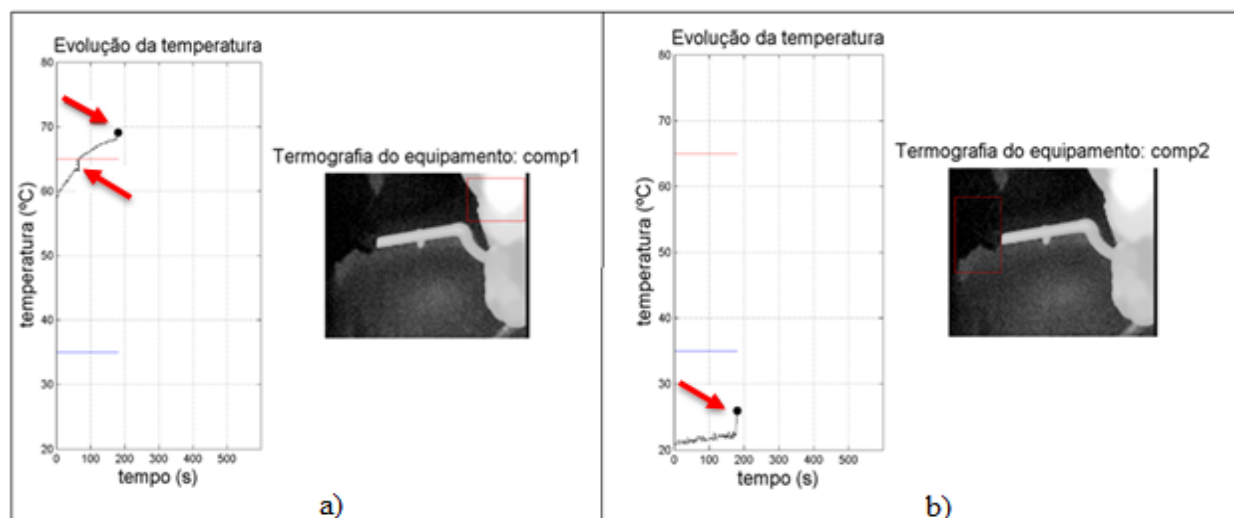


Figura 69 – Imagens gravadas no âmbito de gradiente máximo dos dois compressores.

A figura 70 mostra o tipo de mensagens que a aplicação enviou quando ocorreu o fenómeno que é interpretado como falha.

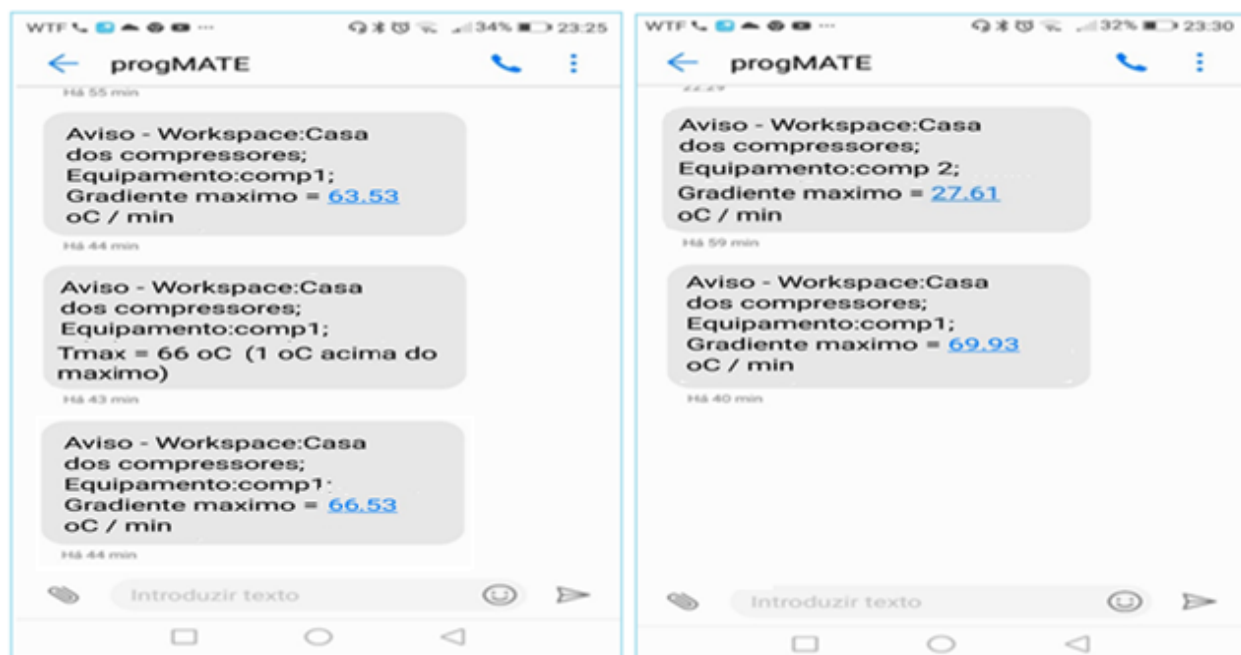


Figura 70 – Tipo de mensagens que a aplicação envia.

5.2.2 Ensaio com o motor elétrico da bomba

No ensaio com o motor elétrico da bomba, a câmara foi colocada a uma distância de 130 cm do alvo. A captação da imagem térmica ilustrava a existência de zonas mais quentes em relação a outras, por exemplo, a parte superior do motor e junto da caixa de ligação do motor, (figura 71b). Esta zona apresentou uma temperatura de cerca de 70 °C.

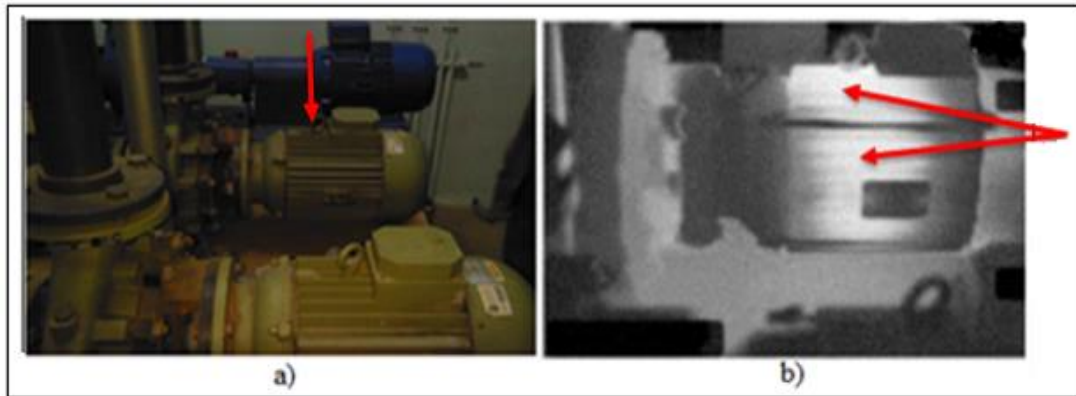


Figura 71 – Imagem digital e Imagem térmica do motor elétrico da bomba de água.

Neste ensaio, pretendia-se avaliar o nível do aquecimento do isolamento do motor elétrico durante o funcionamento da bomba. Nas propriedades da aplicação foram definidas as temperaturas mínima e máxima que o equipamento não dever ultrapassar, com base na norma NBR 5116 que determina os limites de temperatura das diferentes classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas (Anexo A2.1).

Foi assumida classe a “A” como o tipo de isolamento do motor. As temperaturas mínima e máxima consideradas foram 40 °C e 105 °C, e os gradientes mínimo e máximo- 1 °C/min e 1 °C/min respetivamente. Na área de trabalho, as temperaturas mínima e máxima definidas para a câmara termográfica foram 20 °C e 120 °C respetivamente.

5.2.2.1 Análise dos resultados

Os tipos de avisos seleccionados foram, a temperatura máxima admissível ($T_{\text{máx}}$), gradiente mínimo ($G_{\text{mín}}$) gradiente máximo ($G_{\text{máx}}$). Através do gráfico (figura 72), pode-se ver que a temperatura teve variação pouco significativa. Esta iniciou com a temperatura em ordem dos 66 °C e até ao fim dos 30 minutos, a temperatura tinha variado cerca de 4 °C. Ao fim desse tempo, a tendência da temperatura era de estabilizar.

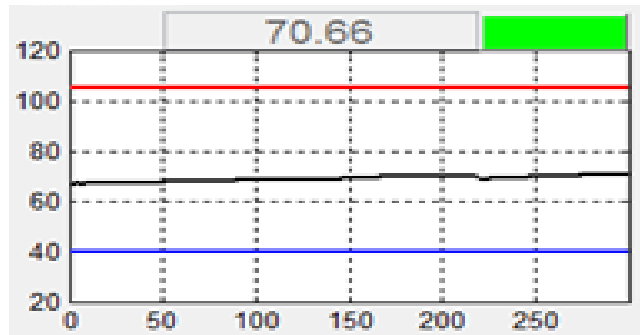


Figura 72 – Gráfico da evolução de temperatura do motor elétrico.

Durante o ensaio não houve nenhum sinal de alarme, o que foi traduzido como funcionamento ótimo do equipamento. A figura 73 ilustra uma das imagens que foram gravadas periodicamente durante o ensaio.

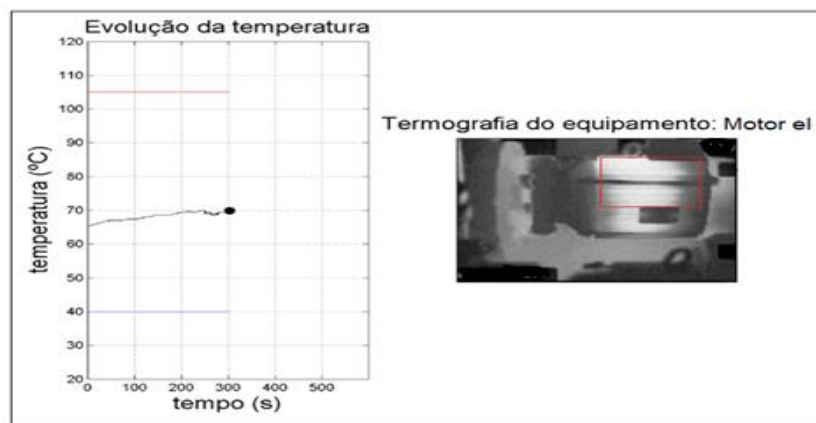


Figura 73 – Uma das imagens do motor elétrico da bomba gravada periodicamente.

5.2.3 Ensaio com caldeira 3

O ensaio foi feito com o objetivo de descobrir a possibilidade de haver fuga do calor através da área da caixa frontal dos gases de combustão da caldeira e analisar a sua intensidade. Primeiro fez-se a captação da imagem térmica para ver a distribuição de temperatura superficial. A câmara termográfica foi colocada frontalmente do alvo à uma distância de 300 cm.

Identificadas as zonas com níveis de emissão de calor mais elevado, foram delimitados individualmente as regiões dessas zonas como se fossem equipamentos diferentes, de forma que se consiga avaliar a variação de temperatura de cada ponto (figura 74b).

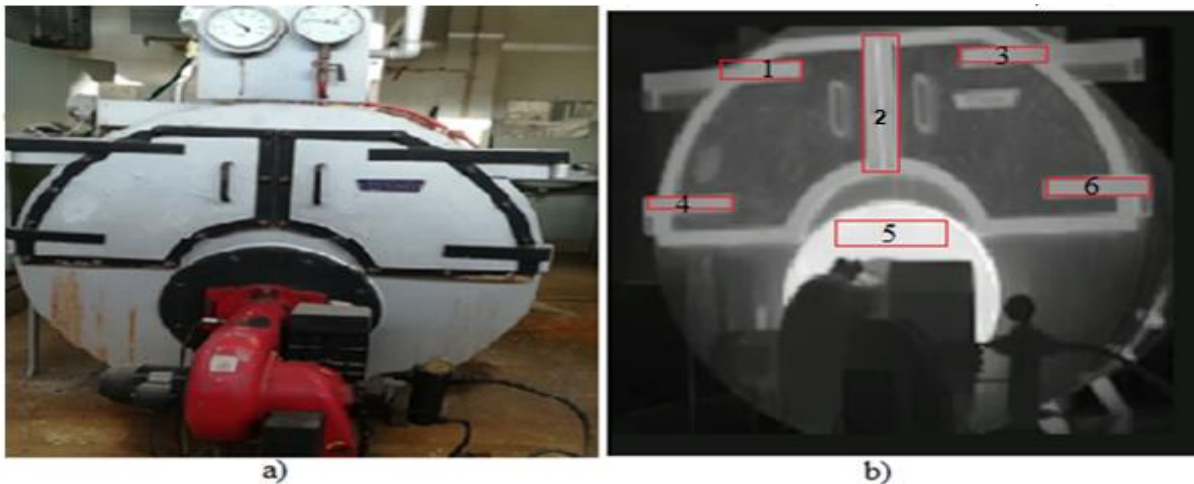


Figura 74 – Imagem digital (a) e Imagem térmica (b) de uma caldeira da ENIDH.

O ensaio foi feito com a caldeira em funcionamento, com a temperatura de água na ordem dos 80 °C. A escolha dos pontos selecionados para monitorização, baseou-se no fato de que estes apresentavam maior emissão de calor em relação aos outros pontos.

As temperaturas mínima e máxima consideradas para as regiões selecionadas na caldeira foram 80 °C e 130 °C, com a exceção da região 5 que foi considerado como (temperatura) máximo 140 °C. Os gradientes mínimo e máximo para todas as regiões foram - 1 °C/min e 1 °C/min respetivamente.

As temperaturas mínima e máxima definidas para a câmara termográfica foram 25 °C e 150 °C respetivamente. Os avisos selecionados para cada região foram: a temperatura máxima admissível ($T_{\text{máx}}$) e o gradiente máximo ($G_{\text{máx}}$).

5.2.3.1 Análise dos resultados

A figura 75 mostra a relação dos gráficos de cada região. A temperatura de cada gráfico manteve-se quase constante e operavam dentro das condições definidas. O gráfico da região 4 teve pequenas variações de temperatura, enquanto as outras regiões tiveram praticamente temperaturas constantes durante 30 minutos do ensaio. O gráfico da região 6 que teve temperatura de funcionamento na linha do limite inferior.

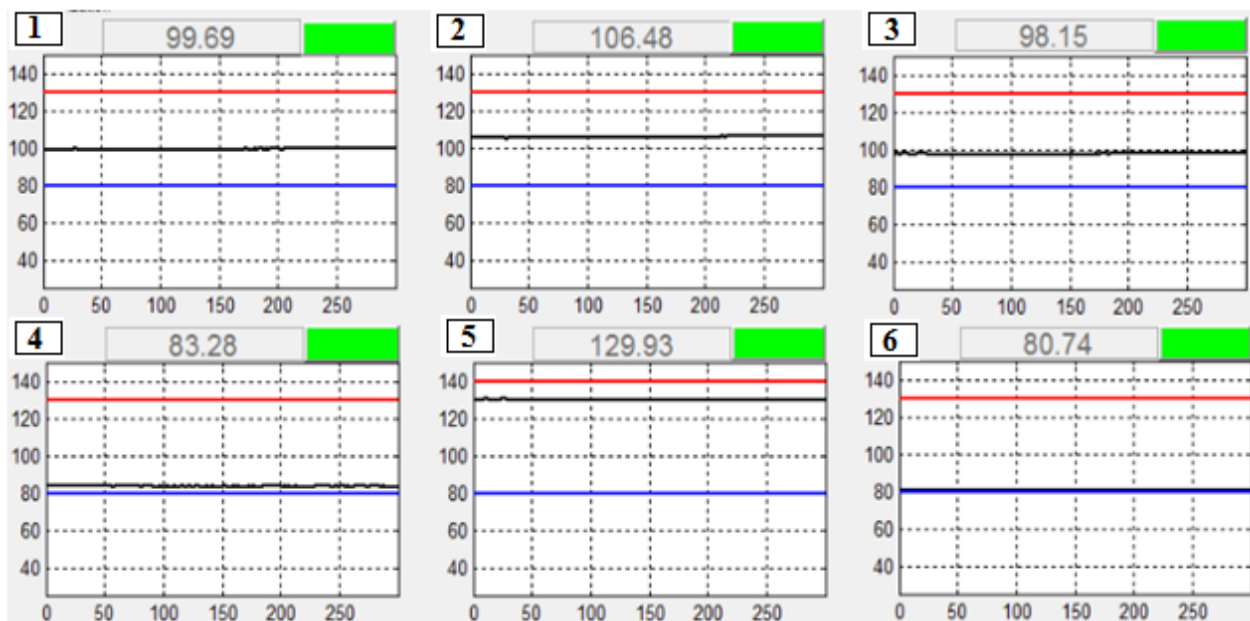


Figura 75 – Ensaio com a caldeira de agua quente.

Na caldeira, as regiões selecionadas estão pintadas a preto, esta cor, influencia na emissão de radiação infravermelha. A potência emissiva dessas regiões é maior em relação às áreas pintadas a cinzento.

Cada gráfico apresenta valor da temperatura diferente. A região 2, representado por duas chapas juntas, apresenta a intensidade dos pixéis relativamente maior em relação às regiões 1, 3, 4 e 6. Isto leva a crer que há tendência de fuga de calor nessa região, o que pode levar a pensar que a junta deve estar defeituosa ou mal apertada pelo que se recomenda uma inspeção.

A região 5 representa a área da fornalha da caldeira, o gráfico desta região apresenta temperatura elevada em comparação com as outras regiões, mas sem variações significativas. As imagens da figura 76 foram gravadas periodicamente, pois, durante o ensaio, não houve variação excessiva de temperatura.

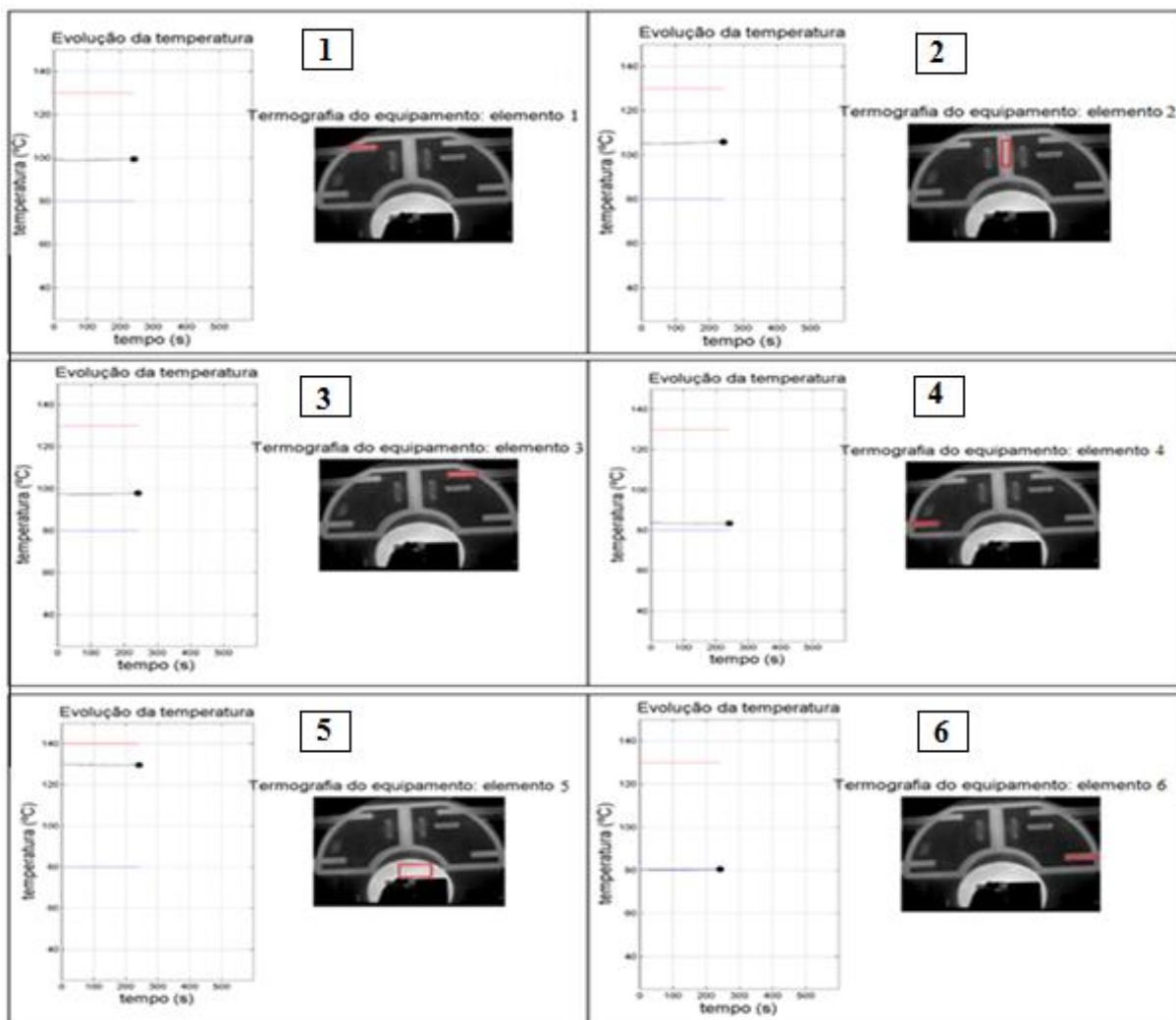


Figura 76 – Coleção de imagens de cada elemento gravadas periodicamente.

5.3 Ensaio realizado no Navio Corvo

Três ensaios foram realizados na casa da máquina do navio. O primeiro foi feito com uma bomba de água do mar do porto, a câmara foi posicionada num lugar fixo frontalmente ao motor elétrico da bomba, a uma distância de 100 cm (figura 77a). O segundo ensaio foi realizado com o quadro elétrico para avaliar o balanceamento de carga, a câmara foi colocada a uma distância de 150 cm frontalmente do alvo (figura 77b). Por fim o terceiro ensaio foi realizado com a válvula da caldeira de óleo térmico. A câmara foi colocada a uma distância de 150 cm do alvo (figura 77c).

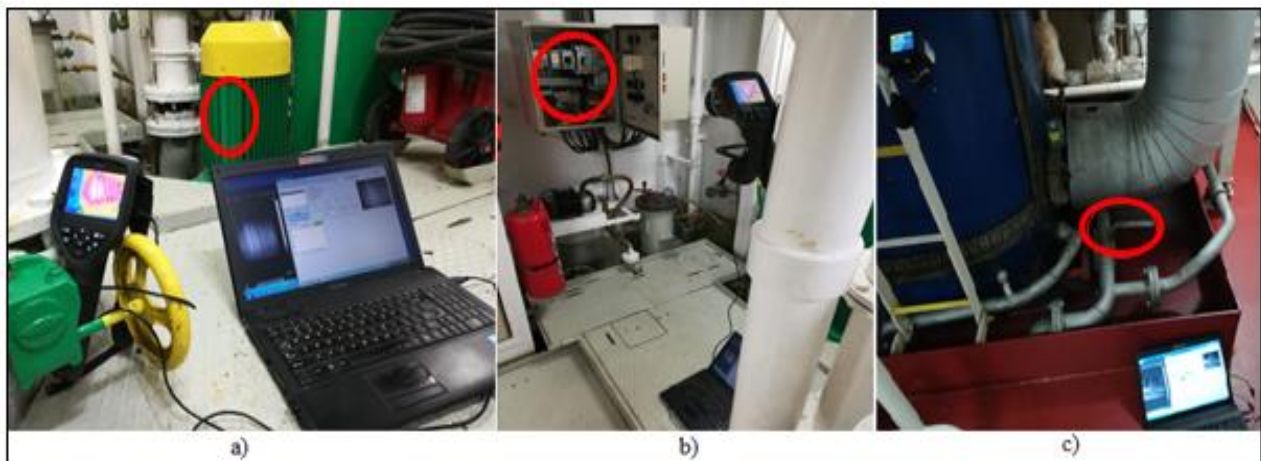


Figura 77 – Ensaio realizado no navio.

5.3.1 Ensaio com a bomba

O gráfico e a imagem térmica da figura 78 mostram que o alvo está a funcionar normalmente. Na imagem térmica não há grandes diferenças de temperatura em toda a sua área, e a variação de temperatura mostrada no gráfico não é significativo. Portanto, durante o ensaio, não houve sinal de falha.

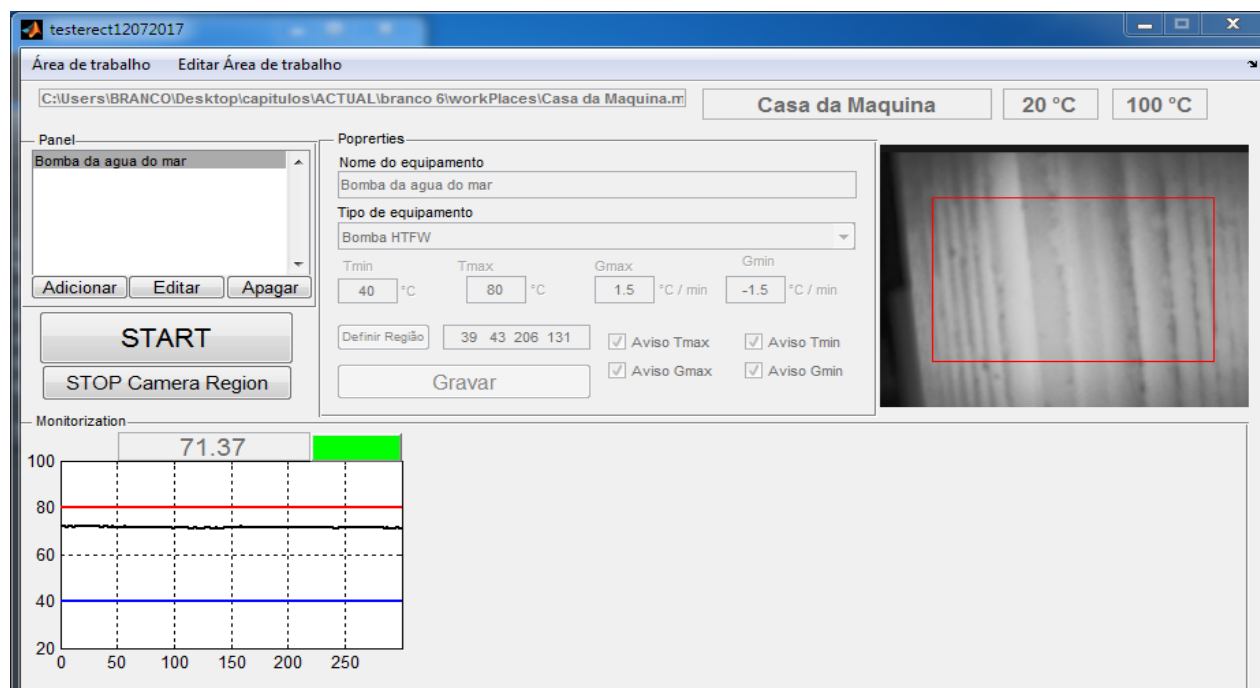


Figura 78 – Ensaio com a bomba.

5.3.2 Ensaio com quadro elétrico

Com o objetivo de analisar o balanceamento de carga dos cabos e o nível de aquecimento dos disjuntores foi realizado o ensaio com quadro elétrico. Sabendo que os cabos, o barramento e conexões de baixa tensão tem temperatura máxima admissível 90 °C [Anexo A3.1], foi definido na aplicação como parâmetros T_{mín} 40 °C e T_{máx} 80 °C, os gradientes mínimo e máximo -1,5 °C/min e 1,5 °C/min. Sendo a temperatura mínima e máxima para o funcionamento da câmara termográfica, 20 °C e 100 °C. Todos os avisos foram ativados (figura 79).

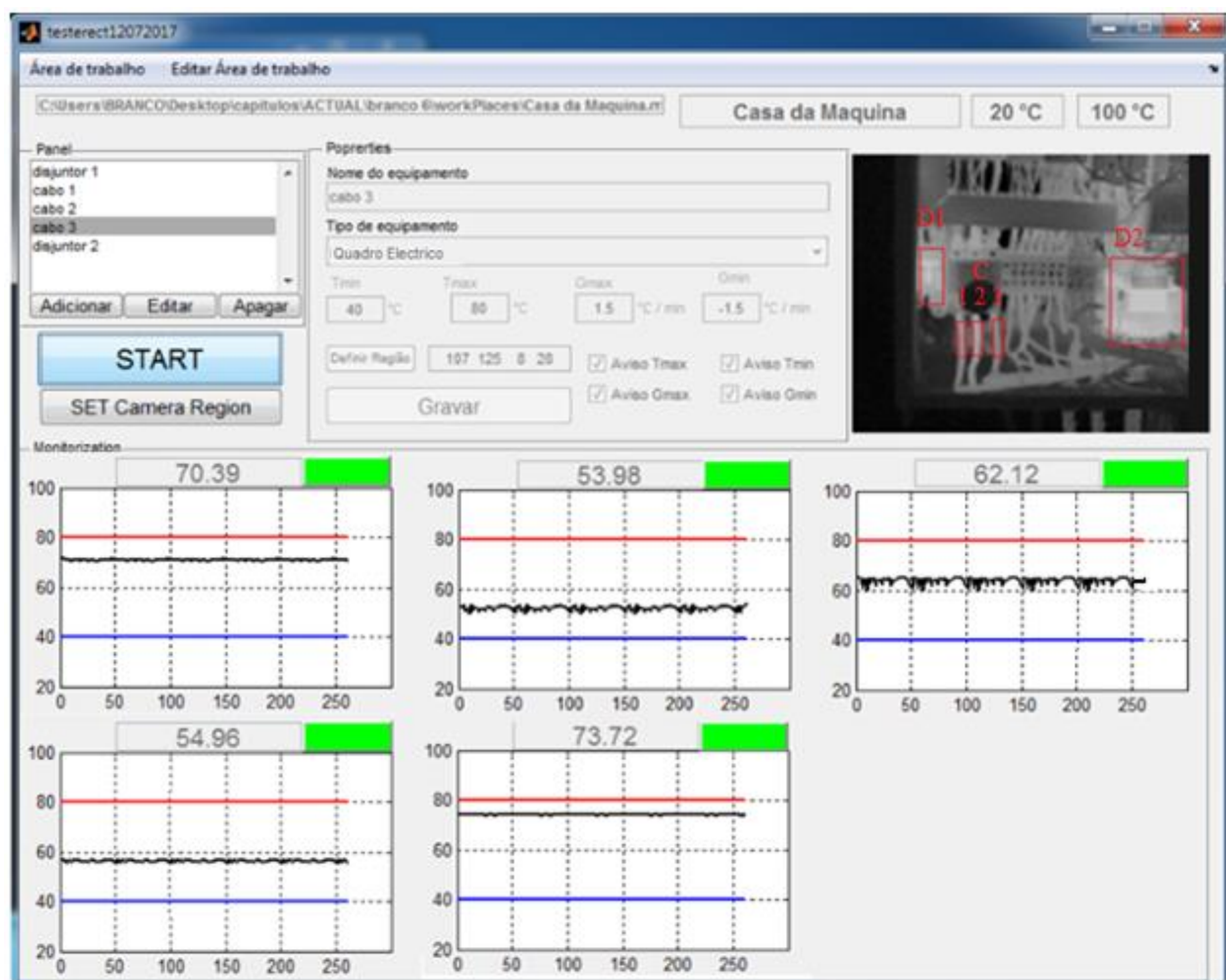


Figura 79 – Ensaio com quadro elétrico.

Analisando os gráficos, todas as regiões selecionadas, apresentam temperatura de funcionamento dentro da zona ótima, mas os valores de cada região são diferentes. O disjuntor 2 dissipa mais calor em relação ao disjuntor 1, apresentando uma diferença de temperatura um pouco mais de 3 °C.

Dos três cabos, o segundo apresenta maior valor de temperatura em relação aos outros, este tem diferença de cerca de 8 °C em relação ao primeiro e 7 °C em relação ao terceiro cabo. Neste caso é importante medir a corrente nas três fases, para ver se o problema é o balanceamento de cargas ou é o ajuste de parafusos na conexão.

5.3.3 Ensaio com a válvula

O terceiro ensaio foi feito com objetivo de avaliar a vedação da válvula. Neste, foi controlada a temperatura da parte da entrada e da saída da válvula. Estando a válvula na posição fechada, nenhum fluido deve passar para outro lado, isto significa que a temperatura na parte da entrada seria diferente da saída.

Neste ensaio, foi interessante controlar principalmente a temperatura máxima e o gradiente térmico máximo admissível da parte de saída, pois, uma pequena abertura da válvula representaria num aumento significativo da temperatura (figura 80).

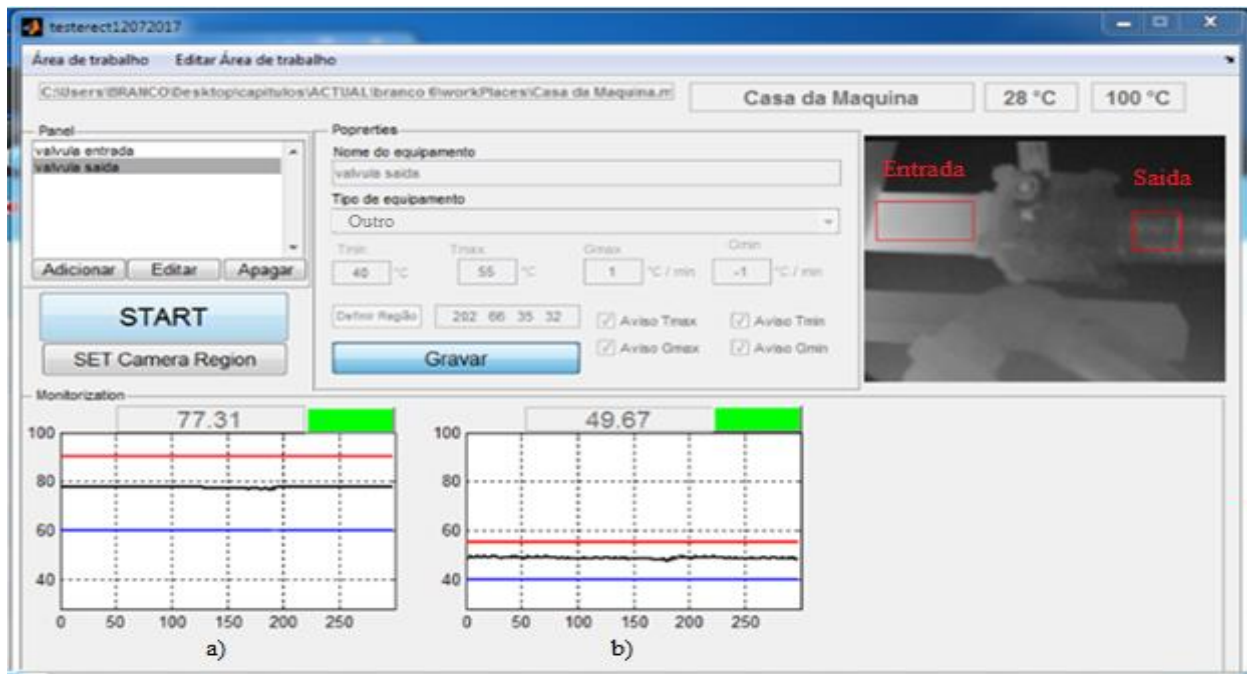


Figura 80 – Controlo da vedação da válvula do óleo térmico.

Analisando a imagem térmica, é visível que a parte da entrada da válvula é mais clara em relação à da saída. A parte da entrada representada pelo gráfico 80a é a mais quente e com temperatura cerca de 20 °C mais elevada que a parte de saída. Durante o ensaio houve pequenas variações, nos instantes 126 segundos e 196 segundos. O gráfico 80b mostra que a temperatura da parte da saída,

também houve variações insignificantes de temperatura. Portanto durante o ensaio, não houve sinal de falha, visto que a vedação da válvula é eficiente.

O calor transferido por condução da parte de entrada para a de saída através corpo da válvula, foi dissipado por arrefecimento natural, tendo mantido o equilíbrio térmico nas duas partes.

5.3.4 Análise dos resultados

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, pode-se aferir relativamente ao motor elétrico da bomba de circulação da água do mar, o quadro elétrico e a válvula da caldeira do óleo térmico.

O primeiro apresentava-se num bom estado de funcionamento, não tendo registado aquecimento excessivo durante o ensaio, o que significa que o seu arrefecimento é eficiente. As regiões do segundo alvo apresentavam-se com diferentes valores de temperatura, mas esses valores estavam dentro dos parâmetros estabelecidos como pode-se ver na figura 79. Portanto, não houve sinal de falha localizada, porém, uma inspeção seria recomendável. O terceiro ensaio apresentou valores de temperatura quase constantes e dentro dos parâmetros, pelo que a sua vedação foi considerada eficiente. Os ensaios no navio corvo foram feitos em regime constante, pelo que os equipamentos estavam a funcionar dentro da normalidade.

Os ensaios com aplicação MATE foram feitos em duas situações, o primeiro foi feito na condição do equipamento funcionar em situação de falha e os outros foram realizados com o funcionamento normal dos equipamentos.

De acordo com os resultados obtidos, a aplicação respondeu os objetivos, tendo desencadeado nos alarmes sonoros, envio de mensagens e gravação de imagens quando ocorressem falhas. No funcionamento normal dos equipamentos, a aplicação apenas gravava as imagens periodicamente como foi concebido.

CONCLUSÕES

O presente trabalho tinha em vista a elaboração de um mecanismo de diagnóstico automático de falhas de forma remota usando termografia para a aplicação marítima, mas também com espaço para exploração em diversas áreas. Para este fim foi elaborado e implementado uma aplicação de monitorização e análise térmica de equipamentos marítimos.

A obtenção das imagens térmicas foi possível com o recurso a câmara termográfica de marca FLIR e a sua visualização no computador através do *software FLIR Tools+ Reporting Software*. O processamento das imagens térmicas (identificação dos *pixéis* de cada região selecionada na imagem térmica, conversão de intensidade dos *pixéis* em valores de temperaturas, geração de gráficos, gravação de imagens, excitação de alarme sonoro e envio de mensagem) foi realizado recorrendo à ferramenta Matlab.

Para a monitorização dos equipamentos através das imagens térmicas, três abordagens distintas foram estabelecidas: a primeira, onde a imagem é adquirida pela aplicação MATE e o seu processamento; a segunda onde na imagem adquirida, faz-se deteção dos *pixéis* apenas das regiões selecionadas e convertido em valor de temperatura; a terceira onde os valores da temperatura são analisados de modo a encontrar variações excessivas de temperatura dos alvos bem como o controlo do limite de temperaturas admissíveis durante o funcionamentos dos equipamentos.

A aplicação MATE permitiu com que durante os ensaios realizados na Escola Superior Náutica Infante D. Henrique bem como no Navio Corvo se alcançassem os resultados esperados. O primeiro ensaio foi feito com intuito de registar falhas pelo que a aplicação respondeu ao sinal de falha e nos restantes ensaios foram feitos com os equipamentos a funcionarem normalmente, consequentemente a aplicação respondeu ao sinal pelo qual os equipamentos estavam a funcionar normalmente.

O objetivo do trabalho foi alcançado com sucesso. Este projeto é importante, na medida em que constitui uma ferramenta forte para a manutenção condicionada. Atualmente as empresas primam pela qualidade dos serviços, tempo de resposta e maior produtividade, entre outras. Esta ferramenta responde a esses desafios, com uma vantagem especial de não interferir no funcionamento dos

equipamentos e permitindo criar um histórico através das imagens gravadas periodicamente assim como as imagens gravadas em situação de falhas.

Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, seria interessante para continuação deste trabalho os seguintes pontos:

- Implementação da aplicação MATE com atuadores ou controladores na área marítima bem como na indústria, sendo assim possível o diagnóstico e correção de falhas de forma autónoma;
- Segmentação de imagem, permitindo assim a definição automática das regiões que se pretende monitorizar;
- Eliminação de possíveis alarmes falsos em regime transiente;
- Introdução dos regimes transientes no equipamento;
- Possibilidade de calcular eficiência do equipamento, calculando a energia dissipada em forma de calor.

BIBLIOGRAFIA

- [1] NETO, A. Pertence. - Noções sobre termografia, cooperativa dos profissionais de engenharia em integridade de equipamentos LTDA. INTEGRA. 2004.
- [2] LOUVAIN' Lélis C. *et al*, - Aplicação da Termografia na Manutenção preditiva. [Consultado em 26 Julho 2017]. Disponível em www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/viewFile/1801/979.
- [3] GURSKI, C. Alberto. - Noções de Confiabilidade e Manutenção Industrial, Curitiba. “Curso de formação de operadores de refinaria”. Curitiba, 2002. PETROBRAS.
- [4] MOBLEY R. Keith - An Introduction to Predictive maintenance, Second Edition 2002. ISBN 0-7506-7531-4.
- [5] FILIPE, M. Correia Filipe - Gestão e organização da manutenção, de equipamento de conservação e manutenção de infra-estruturas ferroviárias. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2006. Dissertação de Mestrado.
- [6] MORO, Norberto e Auras, A. Paegle - Introdução à gestão de manutenção. Brasil. 2007.
- [7] MOURA, Cícero - Gestão da Manutenção, Instituto Federal de Educação. Ceará. 2009.
- [8] SAFEOPEDIA - Equipment Failure. [Consultado em 24 Outubro 2017]. Disponível em <https://www.safeopedia.com/definition/184/equipment-failure>.
- [9] NEPOMUCENO, L. Xavier - Técnicas De Manutenção Preditiva, 1ª Edição: São Paulo, 1989.
- [10] Técnicas inteligentes aplicadas à detecção e diagnostico de falhas. [Consultado em 09 Agosto 2017]. Disponível em https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/8236/8236_3.PDF.

- [11] DIDELET, F. e Viegas, C - Planeamento da manutenção, 2ª Edição: Escola Superior de tecnologia de Setúbal, Engenharia eletromecânica. 2003. [consultado em 22 Maio 2017]. Disponível em http://ltodi.est.ips.pt/jviegas/_private/FplanManut1.pdf.
- [12] BO, Bergman, *et al* - Robust Design Methodology for Reliability: Exploring the Effects of Variation and Uncertainty. Chichester, U.K. : Wiley, 2009. ISBN: 978-0-470-71394-5.
- [13] MALEQUE, M. Abdul. and M. S. Salit - Materials Selection and Design, Springer Briefsin Materials, 2013. ISBN: 978-981-4560-37-5.
- [14] ANDRADE, D. R. Ribeiro, *et al* - Termografia aplicada na manutenção preditiva de sistemas eléctricos. Revista Inovação Tecnológica ANPAD, ISSN: 2179-2895. Vol. 5, n.º 1 (2015), p. 86-106.
- [15] GROUP, Analist - FLIR - Guida alla Termografia, Youtube. Publicado em 2012, [Consultado em 24 Novembro 2017]. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=SEnRCvjDVi8>.
- [16] MENDONÇA, Luís Viegas. Termografia por Infravermelhos Inspeção de Betão. SPY BUILDING, 2005, [Consultado em 07 Janeiro 2018]. Disponível em <http://www.spybuilding.com/private/admin/ficheiros/uploads/0b94a72a7148922d47af9326f7f729d5.pdf>.
- [17] MALDAGUE, X. e MARINETTI, S. Pulse phase infrared thermography. Journal Applied Physics., Nova Iorque, v. 79, p. 2694-2698, 1996. [Consultado em 03 Janeiro 2018] Disponível em <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.33.1132&rep=rep1&type=pdf>.
- [18] PAŠAGIĆ, Vladimir, *et al* - Infrared Thermography in Marine Applications. Brodarski Institute, Zagreb, Croatia. (2009), p. 123-130.
- [19] TAVARES, S. Gonçalves - Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de artes. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. Tese de Doutorado.

[20] MENDONÇA, L. Viegas, *et al* - A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios, SPY BUILDING.

[21] UNIVATES, Física para a Engenharia IV Resumo de aula: Ondas Eletromagnéticas (Baseado em Física HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física v.4: Óptica e Moderna. - 6a. ed., LTC Rio de Janeiro, 2002. [consultado em 07 Setembro 2017]. Disponível em www.ebah.pt/content/ABAAAawycAA/ondas.

[22] SANTOS, Marco Aurélio da Silva - A Dispersão da Luz Branca."; *Brasil Escola*. [consultado em 22 Junho 2017]. Disponível em <https://brasilestola.uol.com.br/fisica/a-dispersao-luz-branca.htm>.

[23] HOLLIDAY, W. Ryan – Ondas eletromagnéticas. “Física Geral F-408. [Consultado em 24 Abril 2017]. Disponível em <http://midia.cmais.com.br/assets/file/original/e4ab79cf4cfa5e18283eb5b1146e3740abf19bbe.pdf>.

[24] WIEAKPEDIA – Figura do Espectro eletromagnético, [Consultado em 24 Dezembro 2017]. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_eletromagn%C3%A9tico.

[25] CEP SRM – Radiação Eletromagnética, [Consultado em 07 Novembro 2017]. Disponível em <http://www.ufrgs.br/engcart/PDASR/rem.html>.

[26] SOROKO, Maria, Howell. - Infrared Thermography: Current Applications in Equine Medicine, London, 2016.

[27] FRAGA, S. Anderson, *et al* - ENSAIOS NÃO DESTRUTÍVEIS – TERMOGRAFIA, 2009. [consultado em 12 Junho 2017]. Disponível em www.sbout.yolasite.com/resources/Ensaio-ao-nao-destrutivos-termografia.pdf.

[28] PORTAL SÃO FRANCISCO - Física/Radiação Infravermelha [Consultado em 02 Outubro 2017]. Disponível em <http://www.portalsaofrancisco.com.br/fisica/radiacao-infravermelha>.

- [29] CORREIA, Paulo Roberto - Desenvolvimento de uma interface de comunicação para determinação da difusividade térmica em função da temperatura, por termografia no infravermelho. Sal Paulo: Universidade de São Paulo 2013. Dissertação de Mestrado.
- [30] OLIVEIRA, Tiago Miguel Dias - Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a termografia. Porto: Faculdade de Engenharia de Universidade de Porto, 2012. Dissertação de Mestrado.
- [31] BREWSTER, M. Quinn - Thermal Radiative transfer and properties. Department of Mechanical and industries Engineering university of Illinois. Illinois. ISBN 0-471-53982-1
- [32] INCROPERA, Frank P., et all - Fundamentals of heat and mass transfer, sixth edition LTC. United States of America, 2007. ISBN 13 979-0470-50197-9.
- [33] HOLST, Gerald C. - COMMON SENSE APPROACH TO THERMAL IMAGING, Winter Park and The International Society for Optical Engineering, Winter Park, Florida USA, 2000. ISBN 0-8194-3722-0 – ISBN 0-9640000-7-5.
- [34] M. M. M. Novo, C. S. Bitencourt, P. R. T. Tiba, D. G. M. Silva, V. C. Pandolfelli. Cerâmica 60 22-33. SP, 2014.
- [35] AFONSO, João - Enquadramento teórico de termografia infravermelho, vantagens da manutenção preditiva, procedimentos, e Vantagem Competitiva. ITEAG, 2010. [consultado em 09 Setembro 2017] Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAe2-YAL/termografia>.
- [36] ZAYICEK, P. - EPRI Project Manager, “Infrared Thermography Guide”, (Revision 3), Palo Alto, California. 2002. [Consultado em 06 Junho 2017]. Disponível em <https://www.scribd.com/doc/38179874/Infrared-Thermography-Guide-Revision-3>.
- [37] INFRATEMP - Termometria Infravermelha Teoria Básica. 2010, [Consultado em 11 Novembro 2017] Disponível em: www.infratemp.com.br/assets/uploads/downloads/infratemp-downloads-20131217101142-termometria-infraver.pdf.

- [38] BARREIRA, E. S. Botelho Machado - Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2004. Dissertação de Mestrado.
- [39] FLUKE, “Introduction to Thermography Principles”, American Technical Publishers, Inc. Fluke Corporation and The Snell Group, 2009. [Consultado em 12 Setembro 2017] Disponível em: <https://www.scribd.com/doc/62002382/Introduction-to-Thermography-Principles>.
- [40] MORAN, M. J., *et al* - Princípios de termodinâmica para engenharia”. 7a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [41] ANGELUS G. P. da Silva - Estrutura e Propriedades de Materiais Propriedades Térmicas, p. 183-193. [Consultado em 18 Junho 2017]. Disponível em: <http://aulas.e-agps.info/ceramicos1/CAPITULO%20VIII%20VF.pdf>.
- [42] CLARO, Daniel Proença Goulão - Avaliação do comportamento ao choque térmico de refractários de 100% alumina Técnica de ultra-sons e resistência mecânica. 2013.
- [43] OLIVEIRA, Arthur Carlos – Transmissao de calor. 2011. [Consultado em 22 Dezembro 2017]. Disponível em <https://pt.slideshare.net/ArthurCarlosdeOliveira/transmisso-de-calor-7674422>.
- [44] PIRÓMETRO - Imagem de um equipamento que mede irradiação térmica da superfície de um objeto e informa a temperatura [Consultado em 12 Janeiro 2018]. Disponível em https://www.google.pt/search?q=pirometros&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjLxYmzgfhYAhXEvRQKHct7AP8Q_AUICigB&biw=1366&bih=598.
- [45] SOUSA, Luís F. Rodrigues - Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2010. Dissertação de Mestrado.
- [46] FLIR - Thermal imaging cameras for electrical and mechanical applications. [Consultado em 12 Setembro 2017]. Disponível em http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/00000-24999/001008456-da-01-en-FLIR_E50_INCL_WI_FI_WAERMEBILDKAMERA.pdf.

- [47] LOHSE, Sascha - Focal Plane Array / IR Sensor Bonding, Finetech. [Consultado em 16 Dezembro 2017]. Disponível em <http://www.finetechusa.com/bonders/applications/focal-plane-arrays-ir-sensor-assembly.html>.
- [48] FLIR – Application Stories, “From the galley to the engine room : infrared thermography inspection of ships is gaining momentum”. [Consultado em 12 Agosto 2017]. Disponível em <http://support.flir.com/Answers/A415T/A415-Appl%20Story%20Thermowind%20ship.pdf>.
- [49] IRCLASS - -Infrared Thermography, “See Beyond Visual Surveys”. [Consultado em 13 Outubro 2017]. Disponível em <http://www.irclass.org/media/1398/thermography-analysis.pdf>.
- [50] CONCI, Aura - Análise de Imagens, Universidade federal Fluminense, 2015. [Consultado em 25 Julho 2017]. Disponível em <http://www2.ic.uff.br/~aconci/aula-2-2015-AI.pdf>.
- [51] FALCÃO, Alexandre Xavier - Fundamentos de Imagem Digital. [Consultado em 18 Julho 2017]. Disponível em <http://www.ic.unicamp.br/~afalcao/mo443/aula1.pdf>.
- [52] UNICEUB - A-198 Aquecimento elétrico como avaliar a imagem termográfica, [Consultado em 05 Janeiro 2018]. disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=QSnNO30dZ6I>.

ANEXOS

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – parâmetros base de funcionamento do motor ISOTTA FRASCHINI, V1716T2MSD.

Anexo 2 – Tabela de classes de isolamentos dos motores elétricos.

Anexo 3 – Tabela de temperaturas máximas admissíveis dos componentes elétricos.

Anexo 4 – Parâmetros de funcionamento de equipamentos do simulador do navio petroleiro VLCC.

ANEXO 1 – PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR ISOTTA FRASCHINI, V1716T2MSD.

Tabela A1.1 – Faixas de temperatura de funcionamento do motor ISSOTA.

<i>Isotta Fraschini</i> 1700	<u>Impiego del Motore</u> Dati di conduzione	Capitolo 2 Sezione 4
--	--	---------------------------------------

Parametri base di funzionamento

Nella tabella seguente sono riportati i valori strettamente indispensabili per controllare il normale funzionamento del motore. Ulteriori dati tecnici, all'occorrenza, sono riportati sui "fogli di collaudo" del motore.

SISTEMA	FUNZIONE - ORGANO	Temperatura (°C)		Pressione (bar)		
		Normale	Max	Normale	Min	Max
ACQUA DOLCE	Raffreddamento del motore (uscita teste)	75-80	95	1,4		
	Inserzione	≤45				
	Disinserzione	>48				
OLIO	Lubrificazione del motore	80-100	110	4,0-5,5		
	Prelubrificazione (*)			0,5-1,5		
	Inserzione	≤45				
	Disinserzione	>48				
COMBUSTIBILE	Alimentazione (pompa)			3		
GAS DI SCARICO	Ingresso turbocompressore Differenza tra le due file di cilindri		700±30			
	Differenza tra le due file di cilindri		30			

ANEXO 2 – TABELA DE CLASSES DE ISOLAMENTOS DOS MOTORES ELÉTRICOS

Tabela A2.1 – Classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme NBR 5116 [27].

Limites de Temperatura (°C)					
Classes de isolamento	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	40	40	40	40	40
Elevação de temperatura	60	75	80	100	100
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	5	5	10	15	15
Temperatura do ponto mais quente	105	120	130	155	180

ANEXO 3 – TABELA DE TEMPERATURAS MÁXIMAS ADMISSÍVEIS DOS COMPONENTES ELÉTRICOS.

Tabela A3.1 – lista dos equipamentos elétricos com as suas temperaturas máximas admissíveis [52]

TMA		 Uniceub Centro Universitário de Brasília	
COMPONENTE	TMA (°C)		
Cabo condutor com isolamento em PVC (cloreto de polivinil)	70	Transformadores a óleo, ponto mais quente (núcleo)	80
Cabo com isolamento em EPR (borracha etileno propileno)	90		
Cabo condutor com isolamento em XLPE (polietileno reticulado)	90	Transformadores a óleo (óleo)	65
Ligações com parafusos	70	Transformadores Secos classe de isolamento 105	65
Ligações e barramentos de baixa tensão (BT)	90	Transformadores Secos classe de isolamento 130	90
Ligações recobertas de prata ou níquel	90	Transformadores Secos classe de isolamento 155	115
Régua de Bornes	70	Transformadores Secos classe de isolamento 180	140
Fusível (corpo)	100		
Alta e média tensão	TMA (°C)		
Cabo condutor isolado até 15 KV	70		
Cabo condutor isolado para alta tensão	60		
Ligações em linhas aéreas de transporte e distribuição de energia	50		
Disjuntores – conexões disjuntor/cabo	70		
Disjuntores – conexões disjuntor/barramento	100		

ANEXO 4 – PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS DO SIMULADOR DO NAVIO PETROLEIRO VLCC.

1.6 - SISTEMA DA DEPURADORA DE DIESEL-ÓLEO (ESQUEMA DS-07).

Esta depuradora purifica o diesel-óleo que provém normalmente do tanque de armazenagem e o descarrega para o tanque de serviço diário de diesel-óleo.

O caudal de alimentação à depuradora é regulado por uma bomba eléctrica de velocidade variável, Fig. 11. No caso da depuradora avariar-se, esta pode ser isolada e a bomba de alimentação pode ser utilizada como bomba de trasfega. Em condições normais de funcionamento, a bomba faz com que o combustível passe pelo aquecedor e depois vá à depuradora.

Se a temperatura do diesel-óleo utilizado é a correcta para a depuração (65° C, nesta instalação) e a depuradora alcança a sua velocidade adequada, esta pode-se pôr em serviço seguindo a sequência de disparo, quer em automático ou em manual.

A pressão de combustível na descarga da depuradora passará a um valor normal quando o processo de separação começa a funcionar adequadamente.

Se a temperatura de entrada do combustível na depuradora cai abaixo de um dado limite, ou aumenta acima de outro limite superior, o processo de separação normal é perturbado, produzindo-se a perda do selo, (a temperatura ideal de depuração do diesel-óleo é de 65° C). Também se pode produzir a desferra da depuradora por resistência elevada ao fluxo na descarga de combustível.

A eficiência da depuração depende especialmente do disco de gravidade e do caudal de alimentação de combustível (disco de gravidade 70% e velocidade da bomba 50%).

O sistema dispõe dos seguintes alarmes:

- Temperatura alta/baixa à saída do aquecedor (70 - 45° C);
- Nível alto/baixo do tanque de água de operação (0,90 - 0,30 m);
- Alto teor de diesel-óleo para o tanque de lamas (90%);
- Perda de selo da depuradora.

Figura A4.1 – Temperaturas de alarme da depuradora de óleo diesel.

1.5 - SISTEMA DE DEPURAÇÃO DE FUEL-ÓLEO (ESQUEMA DS-06).

Os modelos das depuradoras, que equipam o presente navio simulado, são todas baseadas no princípio de funcionamento das conhecidas depuradoras ALFA-LAVAL, de funcionamento automático para instalações de condução desatendida "UMS" (Unattended Machinery Spaces).

A depuradora de fuel-óleo, figura 10, purifica o combustível pesado, e normalmente aspira dos tanques de decantação e descarrega para o tanque de serviço diário de fuel-óleo.

O caudal de alimentação à depuradora é regulado por uma bomba independente de velocidade variável. No caso de avaria da depuradora, esta pode ser isolada e a bomba de alimentação funcionará como bomba de trasfega. Em condições normais, a bomba de alimentação obriga o fuel-óleo a passar por um aquecedor enviando-o depois para a depuradora.

Após a depuradora atingir a sua velocidade e se a temperatura do combustível é a correcta, a mesma pode ser posta em serviço seguindo o procedimento do disparo de limpeza ("shooting"), quer no modo automático quer no modo manual.

A pressão de descarga deverá subir a valores normais após o processo de ferra da depuradora tenha sido finalizado.

As lamas e a drenagem dos disparos vão a um tanque de lamas ou borras comum para todas as depuradoras. Quando se perde o selo hidráulico, a mistura de combustível e água é descarregada para o tanque de lamas. Nestas circunstâncias, a pressão de descarga de combustível baixará e o sistema central de alarmes deverá activar-se fazendo com que a válvula de três vias mude de posição e corte o fornecimento de combustível à depuradora, obrigando-o a recircular.

Os alarmes disponíveis são:

- Temperatura alta/baixa à saída do aquecedor (105 - 90° C);
- Nível alto/baixo do tanque de água de operação (0,90 - 0,30 m);
- Alto teor de fuel-óleo para o tanque de lamas (90%);
- Perda de selo da depuradora.

Figura A4.2 – Temperaturas de alarme da depuradora de fuel óleo.

1.3 - TANQUES DE DECANTAÇÃO DE FUEL-ÓLEO (ESQUEMA DS-04).

Uma bomba de trasfega de fuel-óleo faz o envio deste combustível pesado desde os tanques de armazenagem e do tanque de despejo de óleos a um dos tanques de decantação, Fig. 8. A bomba de trasfega deverá arrancar (arranque local, não existe comando remoto) sempre que exista um tanque de decantação com nível baixo ou quando o tanque de despejo de óleos se encontra cheio.

Os tanques de decantação possuem ligações para que a depuradora de fuel-óleo possa aspirar combustível de um ou de ambos os tanques, depurá-lo e descarregá-lo em qualquer deles, ou para o tanque de serviço diário de fuel-óleo.

O aquecimento com vapor dos tanques de decantação é realizado através de válvulas de controlo termostáticas, às quais se podem ajustar a banda proporcional (ganho) e o valor desejado de temperatura ("set point").

Se a temperatura do fuel-óleo nos tanques de decantação é demasiado baixa não se fará uma boa separação do fuel-óleo nos tanques, bem como, a bomba de alimentação da depuradora terá dificuldades de aspiração.

Nos tanques de decantação a água que possa estar presente no fuel-óleo trasfegado dos tanques de armazenagem separa-se do combustível devido à força de gravidade actuando sobre os líquidos de diferentes densidades, ocupando a água a parte mais baixa nos tanques devido à sua maior densidade em relação ao fuel-óleo. Esta água na parte inferior dos tanques pode ser eliminada mediante as válvulas de purga, enviando-a ao tanque de borras ou lamas.

Os alarmes que equipam o sistema são:

- Nível alto/baixo nos tanques de combustível (5,80 - 2,00 m);
- Temperatura nos tanques alta/baixa (90 - 60° C);
- Transbordo dos tanques (0,10 t/h);
- Nível alto de água nos tanques (0,80 m).

Figura A4.3 – Temperaturas de alarme no tanque de decantação de fuel óleo.

1.2 - TANQUES DE SERVIÇO DIÁRIO DE COMBUSTÍVEL (ESQUEMA DS-03).

O tanque de serviço diário de fuel-óleo alimenta de combustível pesado e limpo a máquina principal e a caldeira. O seu enchimento faz-se através da depuradora de fuel-óleo, a qual aspira, normalmente dos tanques de decantação. A depuradora pode também aspirar do tanque de serviço diário para "repurificar", figura 7.

O tanque de serviço diário de diesel-óleo alimenta a máquina principal, a caldeira e os diesel-geradores. Este combustível ligeiro é trasfegado do tanque de armazenagem de diesel-óleo para o tanque de serviço diário de diesel-óleo mediante a depuradora de diesel-óleo.

Os dois tanques de serviço diário, de diesel-óleo e de fuel-óleo, estão equipados com aquecedores de vapor. O efeito de aquecimento é proporcional ao fluxo de vapor, o qual depende da posição da válvula de controle e da pressão do vapor.

A temperatura do combustível nos tanques de serviço diário depende do vapor de aquecimento, da perda de calor para o meio ambiente e da temperatura dos fluidos combustíveis enviados para as depuradoras, ou dos respectivos retornos para os ditos tanques. Esta temperatura é regulada por controladores **P** (um para cada tanque de serviço diário), que posicionam a abertura das válvulas de controle do vapor de acordo com a temperatura dos tanques e os valores de referência respectivos ("set point").

As purgas e as descargas acidentais por transbordo dos tanques de serviço diário vão para o tanque de despejo de óleos (spill oil tank).

O tanque de serviço diário de fuel-óleo tem linhas de retorno desde a caldeira e desde o sistema de alimentação de combustível da máquina principal, por outro lado ao tanque de serviço diário de diesel-óleo retorna o combustível dos diesel-geradores.

O sistema possui os seguintes alarmes:

- Nível alto/baixo no tanque de fuel-óleo (5,80 - 1,80 m);
- Nível alto/baixo no tanque de diesel-óleo (5,80 - 1,50 m);
- Temperatura alta/baixa no tanque de fuel-óleo (90 - 60° C);
- Temperatura alta/baixa no tanque de diesel-óleo (70 - 30° C);
- Transbordo dos tanques (0,10 t/h).

Figura A4.4 – Temperaturas de alarme no tanque diário de fuel óleo.

1.7 - SISTEMA DA DEPURADORA DE ÓLEO DE LUBRIFICAÇÃO DA MÁQUINA PRINCIPAL (ESQUEMA DS-08).

Esta depuradora purifica o óleo de lubrificação da máquina principal que provém do tanque de serviço e o descarrega no mesmo.

O caudal de alimentação da depuradora é controlado por uma bomba de velocidade variável, Fig. 12.

Após a depuradora alcançar a sua velocidade adequada e se a temperatura de depuração do óleo foi atingida (88° C, nesta instalação), esta pode ser posta em serviço seguindo a sequência de disparo, quer em manual ou em automático.

A pressão do óleo na descarga da depuradora passará a um valor normal quando o processo de separação comece a funcionar adequadamente.

A eficiência da depuradora depende especialmente do disco de gravidade colocado e do caudal de alimentação fornecido, (disco de gravidade 50% e velocidade da bomba 50%).

Os alarmes disponíveis são:

- Temperatura alta/baixa à saída do aquecedor (95 - 80° C);
- Nível alto/baixo do tanque de água de operação (0,90 - 0,30 m);
- Alto teor de óleo de lubrificação para o tanque de lamas (90%);
- Perda de selo da depuradora.

Figura A4.5 – Temperaturas de alarme da depuradora de óleo de lubrificação.

INSTALAÇÃO PROPULSORA DE UM NAVIO PETROLEIRO TIPO VLCC

A bomba auxiliar do sistema LTFW usa-se principalmente em porto ou durante uma queda da instalação, já que é alimentada a partir do quadro eléctrico de emergência.

A temperatura da água doce no sistema de LTFW é regulada por um controlador **PID**, que posiciona uma válvula misturadora de três vias colocada à saída dos refrigeradores de água doce. Este controlador pode operar-se de forma manual ou em modo automático. A entrada de referência ou "set point" deve ser 35° C, controlando-se a temperatura da água doce à entrada das bombas.

Desde a união LT/HT (baixa temperatura/alta temperatura), parte da água do sistema LTFW é conduzida directamente aos refrigeradores de água doce, sendo a outra parte conduzida ao circuito de água doce de alta temperatura (HTFW).

A água doce de alta temperatura refrigera as camisas e as cabeças da máquina principal. Parte do calor retirado da máquina principal utiliza-se para aquecimento do gerador de água doce. A água doce que circula pela máquina principal é impulsionada por uma das duas bombas principais do sistema de HTFW. Se num dado momento as bombas do sistema de HTFW deixarem de funcionar, todavia permanecerá um pequeno caudal refrigerador desde que funcione uma das bombas do sistema de LTFW.

Se a máquina principal estiver muito tempo parada, é necessário fazer passar a água do sistema de HTFW através de um pré-aquecedor que funciona com vapor.

O efeito de cavitação está modelado nas bombas de HTFW. A bomba auxiliar do sistema de HTFW emprega-se principalmente para aquecimento ou durante uma queda da instalação, já que é alimentada a partir do quadro eléctrico de emergência.

A temperatura no sistema de HTFW é regulada por um controlador **PID** que posiciona uma válvula de três vias que mistura a água quente proveniente da saída da máquina principal com a água fria proveniente da união LT/HT. O sensor de temperatura pode-se colocar à saída ou à entrada da máquina principal. O valor desejado "set-point" à saída do motor deve ser de 80° C, e à entrada de 74° C.

A pressão estática no sistema de água doce é dada pelo nível da água no tanque de expansão. Se o nível de água neste tanque cai abaixo "do nível das cabeças" da MPP, o calor transferido das camisas e cabeças dos cilindros vai gradualmente caindo para zero, elevando perigosamente a temperatura das camisas e dos gases de evacuação para valores elevados.

O sistema encontra-se equipado com os seguintes alarmes:

- Nível alto/baixo do tanque de expansão (1,70 - 0,40 m);
- Transbordo do tanque de expansão (0,10 t/h);
- Pressão baixa da água doce de refrigeração à entrada da máquina principal (1,40 bar);
- Temperatura baixa da água doce à entrada da máquina principal (60° C);
- Temperatura alta da água doce à saída da máquina principal (88° C);
- Alto teor de gases na água de refrigeração (5%);
- Alta salinidade da água doce de refrigeração da máquina principal (50 ppm);
- Alto teor de óleo na água doce de refrigeração (50 ppm);
- Pressão baixa na descarga da bomba de água doce do sistema de LTFW (2,2 bar);

Figura A4.6 – Condições de funcionamento da Máquina Principal.

INSTALAÇÃO PROPULSORA DE UM NAVIO PETROLEIRO TIPO VLCC

Se a temperatura do combustível depois dos aquecedores aumenta acima do ponto de ebulição, este gasifica-se por destilação. Há que ter em conta que, normalmente, quando a viscosidade de um combustível baixa de 2 cSt inicia-se gradualmente a gaseificação, dando lugar a:

- Perturbações no funcionamento do motor;
- Anormalidade no funcionamento do controlador de viscosidade (sinal ruidoso).

Normalmente, os gases no fuel-óleo aparecem acima dos 135° C, e no diesel-óleo acima dos 80° C, dependendo do tipo de fuel-óleo e do diesel-óleo.

O sistema de regulação da viscosidade do combustível à entrada da máquina principal tem dois controladores **PI**, um principal e outro auxiliar. A regulação pode-se realizar, de uma forma bem precisa, utilizando somente o controlador principal e sendo a saída deste quem posiciona a válvula de controle de vapor aos aquecedores, ou ainda utilizando os dois controladores em cascata, em cujo caso o sinal de saída do principal entra como sinal de referência ("set point") no auxiliar e sendo a saída deste último a que posiciona a válvula de controle de vapor.

Geralmente quando a retroalimentação no controlador principal é a viscosidade real do combustível à entrada da máquina principal, a retroalimentação do controlador auxiliar é a temperatura do metal dos tubos do aquecedor de serviço.

A entrada de referência ou o valor desejado ("set point") do controlador principal é 14 cSt.

Para fornecer pressão de vapor o controlo em cascata é mais estável e menos sensível que um controlador **PI** directo.

No sistema encontram-se instalados os seguintes alarmes:

- Pressão alta/baixa do combustível à entrada da máquina principal (9 - 6 bar);
- Temperatura alta/baixa do combustível à entrada da máquina principal (150 - 20 °C);
- Viscosidade alta/baixa do combustível à entrada da máquina principal (17 - 10 cSt);
- Pressão diferencial alta nos filtros de combustível (1,5 bar);
- Pressão alta/baixa de descarga das bombas de fornecimento de combustível (6 - 3 bar);
- Temperatura alta do motor eléctrico da bomba de fornecimento de combustível (140° C);
- Perda de combustível nos tubos de injeção de combustível.

1.10 - SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO DA MÁQUINA PRINCIPAL (ESQUEMA DS-12).

A máquina principal é de cárter seco, recolhendo-se o óleo num tanque de serviço situado abaixo deste, Fig. 15.

As duas bombas principais de lubrificação estão protegidas com uma válvula de segurança de pressão que se abre quando esta supera determinado valor.

Figura A4.7 – Condições de funcionamento do motor eléctrico da bomba de combustível

Os cilindros do motor possuem os seguintes alarmes:

- Temperatura alta dos gases de evacuação (450° C);
- Desvio de temperatura alto/baixo dos gases de evacuação de cada cilindro relativo à temperatura média ($\pm 30^\circ$ C);
- Temperatura alta da água doce à saída de cada cilindro (90° C);
- Caudal baixo de água doce à saída de cada cilindro (5 t/h);
- Caudal baixo do óleo dos cilindros (0,30 kg/h);
- Temperatura alta do óleo de refrigeração dos êmbolos à saída destes (65° C);
- Caudal baixo do óleo de refrigeração dos êmbolos à saída destes (10 t/h);
- Temperatura alta do ar de lavagem (75° C);
- Temperatura alta do metal da cabeça (250° C);
- Temperatura alta do metal da camisa (200° C).

1.15 - SISTEMA DE CHUMACEIRAS DA MÁQUINA PRINCIPAL (ESQUEMA DS-29).

O sistema de chumaceiras, Fig. 21, compreende:

- 6 chumaceiras de apoio do veio de manivelas;
- 5 chumaceiras das cabeças dos tirantes;
- 5 chumaceiras das cruzetas;
- 1 chumaceira de impulso.

A temperatura nas chumaceiras depende da potência de cada cilindro, do caudal e temperatura do óleo de lubrificação e da temperatura do meio ambiente.

O sistema possui os seguintes alarmes:

- Temperatura alta nas chumaceiras das cruzetas (70° C);
- Temperatura alta nas chumaceiras das cabeças dos tirantes (70° C);
- Temperatura alta nas chumaceiras principais do veio de manivelas (70° C);
- Temperatura alta na chumaceira de impulso (75° C).

1.16 - SISTEMA DE ÓLEO HIDRÁULICO DO SERVOMOTOR DO HÉLICE (ESQUEMA DS-53).

Como já dissemos anteriormente, neste simulador tem-se a opção de trabalhar com hélice de passo fixo ou com hélice de passo variável.

Neste último caso, Fig. 22, o servomecanismo de controle do passo do hélice funciona mediante um sistema hidráulico de alta pressão com óleo fornecido por uma das duas bombas de accionamento eléctrico que equipam o sistema.

Figura A4.8 – Condições de funcionamento das chumaceiras, cabeça e camisa do motor.

O óleo do tanque de serviço pode ser purificado utilizando a depuradora de óleo. O tanque de serviço pode-se encher com óleo novo através de uma bomba que aspira do tanque de armazenagem.

O óleo de lubrificação é arrefecido num dos dois refrigeradores circulados com água doce do sistema de LTFW e passa de seguida por um de dois filtros existentes antes de entrar na máquina principal.

A temperatura do óleo é regulada mediante um controlador PI ("set point" 45° C), o qual posiciona uma válvula de três vias fazendo com que mais ou menos óleo passe pelo refrigerador em serviço ou seja derivado pelo "by-pass".

Para diminuir o desgaste entre os aros dos êmbolos e as camisas, a máquina principal possui um sistema de óleo de lubrificação dos cilindros, Fig. 16.

O tanque deste óleo deve encher-se periodicamente mediante uma bomba que pode funcionar de modo manual ou automático; em modo automático a bomba arranca quando o nível do tanque baixa até aos 0,40 m e quando alcança os 0,80 m. Se o nível deste tanque é muito baixo produz-se uma diminuição do caudal de óleo de lubrificação aos cilindros, o que pode provocar a queda de velocidade da máquina principal, para o regime de marcha lenta ("slow down") e, se continua a baixar, pode vir a parar a máquina ("shut down").

Para a lubrificação do veio de ressaltos o óleo é aspirado do tanque correspondente. A pressão deste óleo regula-se na descarga das duas bombas deste circuito (uma em funcionamento normal) mediante uma válvula de pressurização com fluxo de retorno ao tanque.

O enchimento do tanque do óleo de lubrificação do veio de ressaltos é feito com uma toma na linha de óleo de lubrificação à entrada para a máquina principal.

O óleo de lubrificação do veio de ressaltos é arrefecido num refrigerador circulado por água doce do sistema de LTFW, passando depois por um dos dois filtros antes de entrar para lubrificar o veio de ressaltos da máquina principal. Para regular a temperatura do óleo neste sistema existe um controlador P ("set point" 50° C), o qual posiciona uma válvula de três vias que regula a passagem do óleo pelo refrigerador ou pelo "by-pass".

O sistema dispõe dos seguintes alarmes:

- Pressão baixa do óleo à entrada das chumaceiras (1,5 bar);
- Temperatura alta/baixa do óleo à entrada da máquina principal (54 - 35° C);
- Pressão diferencial nos filtros de óleo de lubrificação da máquina principal (1 bar);
- Nível alto/baixo de óleo no tanque de serviço (1,80 - 0,80 m);
- Transbordo do tanque de serviço de óleo (0,10 t/h);
- Alto índice de contaminação do óleo lubrificante (40%);
- Pressão baixa do óleo de lubrificação do veio de ressaltos à entrada da máquina principal (2 bar);
- Temperatura alta do óleo do veio de ressaltos à entrada da máquina principal (56° C);

Figura A4.9 – Condições de funcionamento do veio de ressalto.