

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



FEUP

Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Eléctricas com Recurso a Termografia

Tiago Miguel Alves Gonçalves

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e
de Computadores Major Automação

Orientador: Prof. Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa

Junho de 2011

Resumo

O trabalho desenvolvido permite conhecer o papel da termografia na análise de sistemas de energia e máquinas eléctricas, através da exploração dos conceitos científicos essenciais à sua compreensão.

Começa por descrever um conjunto de áreas de aplicação da termografia, desde a indústria à medicina, dando especial relevo a situações onde esta apresenta um papel relevante como técnica segura de manutenção de equipamentos e máquinas eléctricas, através da detecção de falhas ou avarias.

O principal objectivo é o desenvolvimento de uma aplicação informática para expandir outra já existente, através de novas funcionalidades que permitam efectuar a análise de imagens térmicas e a elaboração de material documentativo para os resultados obtidos. Nesse sentido, são apresentados de forma detalhada, os parâmetros seguidos na sua elaboração, desde a escolha da ferramenta utilizada, até ao estudo efectuado acerca de temas de termodinâmica e transferência de calor, essenciais à sua concepção.

Por fim, descreve um trabalho laboratorial que consistiu na captação de uma imagem térmica de uma determinada superfície, no sentido de avaliar as potencialidades da aplicação desenvolvida, quando submetida a um caso real.

O documento termina com uma conclusão acerca do trabalho realizado e a apresentação de um conjunto de propostas para trabalho futuro.

Palavras Chave: Termografia, Infravermelhos, Radiação, Corpo Negro, Máquinas Eléctricas, Transferência de Calor, Imagem Térmica, Aplicação Informática

Abstract

The developed work allows knowing the role of thermography in the analysis of energy systems and electrical machines, through the exploitation of scientific concepts essential to their understanding.

Begins by making a presentation of application areas of thermography, from industry to medicine, with special reference to situations where this has an important role as a safe technique for maintenance of equipment and electrical machines, by detecting failures or breakdowns.

The main objective is the development of software to expand an existing one, with new features that allow analysis of thermal imaging and creation of results reports. In this sense are presented in detail the followed parameters in its preparation, since the choice of tool until to the study of thermodynamics and heat transfer, critical to their design.

In a final phase, describes a laboratory work that consisted of capturing a thermal image of a surface, in order to evaluate the potential of the developed software in a real case.

The document ends with a conclusion about the work done and the presentation of a set of proposals for future work.

Keywords: Thermography, Infrared, Radiation, Black Body, Electrical Machines, Heat Transfer, Thermal Image, Software

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao professor Artur Costa pelo seu empenho, orientação e confiança depositada para a elaboração desta dissertação.

Um agradecimento ao professor Joaquim Gabriel e ao seu colaborador, do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP, pelos preciosos esclarecimentos prestados sobre a termografia.

Ao técnico José Pinheiro Jorge, do Laboratório de Máquinas Eléctricas da FEUP, que demonstrou grande disponibilidade e prontidão no auxílio à realização do ensaio laboratorial.

Mas acima de tudo agradeço aos meus pais, que através de um exemplo de vida que serviu, serve e servirá de referência, criaram as condições necessárias para que tudo isto fosse possível. Assim, não considero este documento apenas uma dissertação, mas sim, mais um ponto alto de uma caminhada, que se iniciou com a chegada de um rapaz de onze anos à cidade do Porto, trazendo consigo o único bem que possuía, um estômago vazio. Este rapaz fez do trabalho a sua arma e conheceu uma mulher capaz de converter lágrimas em esperança, permitindo que hoje tenha orgulho de lhes chamar, pai e mãe.

Tiago Gonçalves

*“Procure ser um homem de valor,
em vez de ser um homem de sucesso.”*

Albert Einstein

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Objectivos	1
1.2	Metodologia	1
1.3	Estrutura do Documento	2
2	Termografia e Conceitos Inerentes	3
2.1	Generalidades	3
2.2	Radiação Térmica ou Infravermelha	4
2.2.1	Nota Histórica	4
2.2.2	Perspectiva Física	5
2.3	Corpo Negro	6
2.4	Emissividade	9
2.5	Variabilidade da Emissividade	9
2.5.1	Comprimento de Onda	9
2.5.2	Ângulo de Observação	10
2.5.3	Temperatura	12
2.6	Termogramas e Câmaras Térmicas	13
2.7	Resumo	14
3	Aplicações da Termografia	15
3.1	Manutenção Preditiva	15
3.1.1	Manutenção Preditiva em Sistemas Eléctricos	16
3.2	Aplicações em Instalações Eléctricas	16
3.3	Aplicações em Máquinas Eléctricas	19
3.3.1	Motores Eléctricos	20
3.3.2	Transformadores	24
3.4	Outras Aplicações	27
3.5	Resumo	32
4	Termodinâmica e Transferência de Calor	33
4.1	Termodinâmica	33
4.2	Transferência de Calor	36
4.3	Condução	36
4.4	Convecção	38
4.5	Radiação	42
4.5.1	Lei de Kirchhoff	45
4.5.2	Corpo Cinzento	46
4.5.3	Emissão, Absorção e Transmissão	46

4.5.4	Intensidade da Radiação	48
4.5.5	Troca de Radiação entre Superfícies	50
4.6	Resumo	52
5	Aplicação Informática Desenvolvida	53
5.1	Requisitos	53
5.2	Metodologia de Desenvolvimento	54
5.3	Modo de Funcionamento	56
5.3.1	Separador Gerar Gráfico	56
5.3.2	Separador Cálculos	61
5.3.3	Separador Relatório	64
5.4	Questões Relevantes de Processamento	65
5.5	Resumo	66
6	Resultados	67
6.1	Aplicação do Sistema	67
6.1.1	Critérios na Escolha da Superfície	67
6.1.2	Critérios na Recolha da Imagem Térmica	68
6.1.3	Procedimento Laboratorial	68
6.1.4	Procedimento na Aplicação Desenvolvida	69
6.2	Análise dos Resultados Obtidos	70
6.3	Resumo	74
7	Conclusão e Trabalho Futuro	75
7.1	Conclusão	75
7.2	Trabalho Futuro	76
A	Ajuda do Separador de Geração de Gráficos	77
B	Ajuda do Separador de Cálculos	81
C	Ajuda do Separador de Relatórios	87
D	Organograma da Aplicação Desenvolvida	89
E	Relatório de Análise Termográfica em HTML	91
	Referências	95

Lista de Figuras

2.1	Sir William Herschel[4]	4
2.2	Espectro Electromagnético[5]	5
2.3	O Infravermelho no Espectro Electromagnético[2]	5
2.4	Modelo do Corpo Negro[8]	7
2.5	Radiação do Corpo Negro em Função da Temperatura e Comprimento de Onda[10]	8
2.6	Emissividade do Cobre(1), Ferro(2), Alumínio(3) e Prata(4)[9]	10
2.7	Emissividade da Água(1), Terra(2), Plástico(3)[9]	10
2.8	Emissividade Segundo o Ângulo de Observação para Madeira(1), Papel(2) e Vidro(3)[9]	11
2.9	Emissividade Segundo o Ângulo de Observação para Níquel Polido(1), Níquel Baço(2), Crómio(3) e Alumínio(4)[9]	11
2.10	Variação da Emissividade com a Temperatura para Níquel(1), Tungsténio(2) e Platina(3)[9]	12
2.11	Variação da Emissividade com a Temperatura para Borracha(1), Porcelana(2), Cortiça(3), Papel(4), Argila Refractária[9]	12
2.12	Variação da Emissividade do Cobre por Oxidação sendo Bastante Oxidado(1), Levemente Oxidado(2), Polido(3)[9]	13
2.13	Influência da Atmosfera numa Medição[12]	14
3.1	Termogramas em Sistemas Eléctricos[2]	17
3.2	Quadro Eléctrico[20]	17
3.3	Rede Eléctrica em Calha Suspensa[21]	18
3.4	Conexões numa Subestação[21]	18
3.5	Linhas de Transporte e Distribuição de Energia[21]	19
3.6	Termograma de Motor Eléctrico[2]	20
3.7	Motor Eléctrico Funcionamento Normal[21]	21
3.8	Termograma de Motor - Falta de Lubrificação[2]	21
3.9	Motor em Sobreaquecimento por Excesso de Lubrificante[21]	22
3.10	Tipos de Desalinhamentos de Eixos[25]	22
3.11	Motor com Eixos Alinhados[25]	23
3.12	Motor com Eixos Desalinhados[25]	23
3.13	Desalinhamento de Roldanas[21]	24
3.14	Análise da Temperatura da Cuba do Transformador[27]	24
3.15	Análise da Temperatura dos Radiadores do Transformador[27]	25
3.16	Análise da Temperatura das Buchas do Transformador[27]	25
3.17	Análise da Temperatura das Pinças de Amarração do Transformador[27]	26
3.18	Situação de Falha num Banco de Radiadores[27]	26
3.19	Situação de Falha na Cuba do Óleo[27]	27
3.20	Termogramas de Edifícios[2]	28

3.21	Termogramas na Electrónica[2]	28
3.22	Termogramas na Aeronáutica[2]	29
3.23	Termogramas na Medicina[2]	29
3.24	Termogramas na Segurança[2]	30
3.25	Termogramas na Indústria Automóvel[2]	31
3.26	Termogramas na Indústria Metalúrgica[2]	31
3.27	Termogramas na Indústria em Geral[2]	32
4.1	Sistema Isolado	34
4.2	Sistema Fechado	34
4.3	Volume de Controlo	35
4.4	Modos de Transferência de Calor[36]	36
4.5	Transferência de Calor num Meio Gasoso[35]	37
4.6	Parede Plana[35]	38
4.7	Transferência de Calor por Convecção[35]	39
4.8	Convecção Natural[35]	40
4.9	Convecção Forçada[35]	40
4.10	Ebulição[35]	41
4.11	Condensação[35]	41
4.12	Escoamento Laminar e Turbulento	42
4.13	Transferência de Calor por Radiação	43
4.14	Transferência de Calor por Radiação entre uma Superfície e a sua Vizinhança	44
4.15	Invólucro Isotérmico	45
4.16	Relação entre os Corpos: Negro, Cinzento e Real[40]	46
4.17	Meio semi-transparente exposto à irradiação[40]	47
4.18	Reflexão Difusa e Especular[35]	47
4.19	Emissão de radiação de dA_1 numa determinada direcção[35]	48
4.20	Projectção de dA_1 normal à direcção de propagação[35]	49
4.21	Radiosidade	50
4.22	Factores de Forma de Superfícies Tridimensionais[35]	52
5.1	Separador Gerar Gráfico	56
5.2	Área de Gráfico	57
5.3	Escolha Área de Gráfico	57
5.4	Menu Principal	57
5.5	Separador Análise do QuickReport da FLIR	58
5.6	Tipo de Gráfico	59
5.7	Sobrepor Gráfico	59
5.8	Estatística de Temperatura	60
5.9	Localizar Valor de Temperatura	60
5.10	Barra de Ferramentas	60
5.11	Botão de Ajuda	61
5.12	Separador Cálculos	63
5.13	Janela de Introdução de Dados	64
5.14	Separador Relatório	64
6.1	Superfície de Madeira para o Ensaio	68
6.2	Câmara Térmica – FLIR i60	69
6.3	Imagem Térmica da Superfície de Madeira	70

6.4	Imagem com Linha e Área Ajustada	71
6.5	Gráficos obtidos pela Aplicação Desenvolvida	71
6.6	Resultados Analíticos Obtidos	72
6.7	Exemplo de Relatório Final em HTML	73

Abreviaturas e Símbolos

ADT	Análise de dados Termográficos
APPS	Servidor de Aplicações da FEUP
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GUI	Graphical User Interface
q''	Fluxo de Calor [W/m^2]
q	Taxa de Transferência de Calor [W]
E	Poder Emissivo [W/m^2]
E_b	Poder Emissivo do Corpo Negro [W/m^2]
G	Irradiação [W/m^2]
G_{abs}	Fracção da Irradiação Absorvida [W/m^2]
G_{ref}	Fracção da Irradiação Reflectida [W/m^2]
G_{trans}	Fracção da Irradiação Transmitida [W/m^2]
A	Área [m^2]
T_s	Temperatura da Superfície [K]
T_{viz}	Temperatura da Vizinhança [K]
T_∞	Temperatura do Meio Circundante [K]
k	Condutividade Térmica [$W/m.K$]; Constante de Boltzmann (1.380662×10^{-23}) [J/K]
h	Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção [$W/m^2.K$]; Constante de Planck (6.626176×10^{-34}) [$J.s$]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8}) [$W/m^2.K^4$]
$d\omega$	Ângulo Sólido Diferencial [sr]
dA_n	Superfície Diferencial [m^2]
r	Raio [m]
$I_{\lambda,e}$	Intensidade Espectral [$W/m^2.sr.\mu m$]
I	Intensidade de Radiação [$W/m^2.sr$]
J	Radiosidade [W/m^2]
F	Factor de Forma
B	Constante de Dispersão de Wien (2.898×10^{-3}) [$m.K$]
c	Velocidade da Luz (2.998×10^8) [m/s]
E_{in}	Energia que Entra [J]
E_{out}	Energia que Sai [J]
E_g	Energia Gerada [J]
ΔE_{st}	Varição da Energia Armazenada [J]
ΔU	Varição da Energia Interna [J]
ΔE_p	Varição da Energia Potencial [J]
ΔE_c	Varição da Energia Cinética [J]
Q	Calor [J]
W	Trabalho [J]

α	Coeficiente de Absorção
ε	Emissividade
ρ	Coeficiente de Reflexão
τ	Coeficiente de Transmissão

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Objectivos

Esta dissertação surge no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Major Automação, e tem como objectivos, o estudo do actual estado da arte no campo da termografia aplicada a sistemas eléctricos e máquinas eléctricas, bem como a concepção de uma aplicação informática que permita a análise de imagens térmicas e facilite o desenvolvimento de material documentativo, expandindo o potencial de outra já existente.

A motivação para a sua elaboração reside na curiosidade que o tema levantou e na intenção de expandir o horizonte de conhecimento na área, não desvalorizando um certo apreço pela programação.

1.2 Metodologia

Para a elaboração desta dissertação consideram-se duas fases.

A primeira assenta na pesquisa bibliográfica acerca do actual estado da arte em matéria de aplicação da termografia em sistemas eléctricos e máquinas eléctricas. Deste modo, pretende-se elevar o conhecimento na área, de forma a sustentar os desenvolvimentos posteriores.

A segunda consiste no estudo dos assuntos, técnicas e ferramentas envolvidas na análise de imagens térmicas, com vista à elaboração de uma aplicação informática para processamento dessas mesmas imagens, de acordo com os objectivos acima.

Ambas, envolvem a elaboração de texto documentativo acerca dos assuntos em questão, e que farão parte desta dissertação.

1.3 Estrutura do Documento

O documento encontra-se dividido em sete capítulos sendo este o primeiro.

No capítulo 2, apresentam-se as ideias gerais na área da termografia, complementando com alguns conceitos físicos acerca da radiação térmica, do corpo negro e da emissividade, que se consideram essenciais à compreensão do tema, colmatando com uma pequena nota histórica relevante para a sucessão de ideias.

No capítulo 3, são apresentadas algumas das áreas de aplicação da termografia, com especial incidência sobre os sistemas eléctricos e máquinas eléctricas, sem desvalorizar a inerente área da manutenção preditiva.

O capítulo 4, apresenta um conjunto de conceitos físicos sobre de termodinâmica e transferência de calor, essenciais à elaboração da aplicação informática.

No capítulo 5, demonstram-se as técnicas, ferramentas e metodologias utilizadas para o desenvolvimento da aplicação informática, fazendo também uma breve abordagem ao seu modo de funcionamento e potencialidades.

No capítulo 6, realiza-se uma pequena simulação de um caso real, de forma a avaliar o potencial da aplicação desenvolvida.

Por fim, o capítulo 7, apresenta as conclusões acerca do trabalho realizado, bem como, um conjunto de propostas para trabalho futuro.

Capítulo 2

Termografia e Conceitos Inerentes

Neste capítulo é ilustrada a termografia de uma forma generalizada, procedendo, posteriormente, a uma análise, mais minuciosa, de alguns conceitos importantes para a sua compreensão.

2.1 Generalidades

A termografia é uma técnica que permite reproduzir graficamente um determinado perfil térmico que pode ser obtido de duas formas: por contacto ou sem contacto.

A termografia por contacto implica uma série de reacções químicas na superfície de um corpo através do uso de papéis, cristais líquidos, tintas e outras substâncias sensíveis á temperatura, enquanto a termografia sem contacto, através de câmaras termográficas, permite captar a radiação térmica emitida por um dado corpo, constituindo uma imagem térmica ou termograma. Assim, é possível afirmar que, esta última, consiste numa medição da temperatura superficial de um corpo, realizada através da detecção da radiação térmica, ou infravermelha, emitida por esse mesmo corpo, permitindo, deste modo, estender a visão humana até ao nível do infravermelho[1].

Importa referir que, sendo a termografia sem contacto o alvo deste estudo, e de forma a simplificar tanto a escrita como a leitura do documento, na busca de evitar qualquer ambiguidade, daqui em diante identificar-se-á a termografia sem contacto apenas por termografia.

Actualmente, a termografia é bastante explorada em diversas áreas, mas apresenta especial incidência no campo da manutenção preditiva, tornando-se numa das técnicas de eleição no que se refere a inspecções[1], como se verificará em pormenor mais adiante. Esta particularidade levou à sua subdivisão em activa e passiva. A termografia activa consiste na aplicação de uma tensão térmica na superfície de um dado objecto a analisar, sendo que a recolha de dados é efectuada posteriormente durante o aquecimento e/ou arrefecimento. No caso passivo não se faz qualquer intervenção, pois os dados são recolhidos de acordo com a temperatura normal de funcionamento do objecto[2].

Deste modo, um aumento de temperatura pode ter origem no próprio objecto, consequência do seu funcionamento, ou ser aplicado propositadamente através de técnicas como o aquecimento por radiação ou condução para a detecção de descontinuidades. Nas duas situações, é fundamental ter ideia da distribuição da temperatura do objecto a analisar, de forma a estabelecer um referencial de comparação[3].

2.2 Radiação Térmica ou Infravermelha

A radiação térmica ou radiação infravermelha é uma característica comum a qualquer corpo com temperatura não nula. Embora esta não seja visível a olho nu, existem aparelhos que permitem a sua visualização, isto é as câmaras termográficas[1].

2.2.1 Nota Histórica

O infravermelho foi descoberto, em 1801, pelo astrónomo inglês Sir William Herschel, Figura 2.1. Sabendo que a luz do Sol era uma fonte de calor e que, segundo Newton, continha todas as cores do espectro visível, decidiu tentar determinar quais ou qual era a responsável pelo aquecimento dos corpos.



Figura 2.1: Sir William Herschel[4]

Herschel realizou então um conjunto de experiências usando, basicamente, um termómetro e um prisma para a decomposição das cores do espectro visível. Com isto pretendia medir a temperatura de cada cor fazendo-as incidir individualmente sobre o termómetro. Durante este processo notou que abaixo do vermelho o termómetro registava maiores temperaturas. Num olhar mais atento, descobriu que, de facto, a temperatura mais elevada ocorria exactamente para além do

vermelho, numa zona em que a radiação não era visível. Assim apelidou essa radiação invisível de raios caloríferos, que actualmente é conhecida como radiação infravermelha e que é parte integrante do espectro electromagnético [4], como se observa na Figura 2.2.



Figura 2.2: Espectro Electromagnético[5]

2.2.2 Perspectiva Física

Qualquer corpo quente emite radiações infravermelhas, desde simples lareiras até aos animais de sangue quente, incluindo o Homem. Como se verificou pela nota histórica, apenas a partir de 1801, se começou a verificar a importância e a utilidade desta característica. No entanto, só mais tarde se descobriu que esta característica já era explorada por alguns animais com a capacidade de detectar radiações infravermelhas, e que estas eram cruciais à sua orientação, caso de algumas serpentes e mosquitos[6]. Assim sendo, poder-se-á referir que os infravermelhos são fruto do calor libertado como radiação electromagnética, que podem ser detectados por dispositivos ou seres que a eles reagem. No espectro electromagnético, onde se encontram reunidas todas as frequências observadas em fenómenos electromagnéticos, o infravermelho surge como demonstra a Figura 2.3.

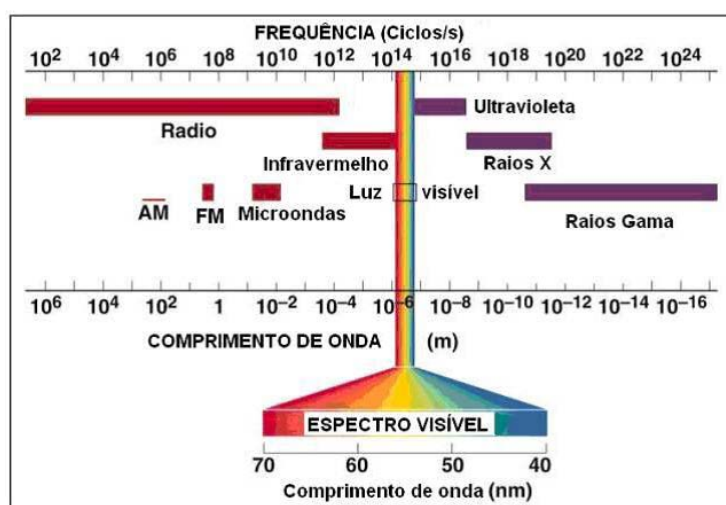


Figura 2.3: O Infravermelho no Espectro Electromagnético[2]

A radiação infravermelha é constituída por fótons cuja frequência se encontra aproximadamente entre os 8×10^{11} Hz e os 3×10^{14} Hz e encontra-se subdividido em três regiões, de acordo com o comprimento de onda: o próximo do visível (780-2500 nm), o intermédio (2500-50000 nm) e o longínquo (50000 nm – 1 mm)[7]. Situa-se na região do espectro aproximadamente entre o vermelho e as microondas, e apresenta um comprimento de onda entre o 1 e os 1000 micrómetros. Como onda electromagnética que é, não necessita de um meio para se propagar e, portanto, transmite-se no vácuo à velocidade da luz ($\simeq 3 \times 10^8$ m/s), tal como o calor solar na sua viagem até à Terra. É portanto o factor responsável pela troca de energia térmica no vazio.

Fisicamente, todos os materiais irradiam calor, desde que a sua temperatura seja superior à do zero absoluto -273°C , surgindo assim a lei da radiação[2]. Um aumento de temperatura de um dado corpo corresponde à vibração dos seus átomos em torno do ponto de equilíbrio, gerando a emissão de ondas electromagnéticas. A frequência destas vibrações, ou dos movimentos rotacionais no caso de algumas moléculas gasosas, situam-se na região do infravermelho[7].

A radiação térmica desempenhou um papel fundamental na Física, pois foi através do seu estudo que Max Planck introduziu a sua famosa constante, abrindo horizontes para aquilo que viria a chamar-se de física quântica. Além disso, é facilmente detectável através de uma qualquer fonte de calor como por exemplo uma braseira, pois é perceptível um substancial aumento de temperatura aquando de uma aproximação à mesma[2].

2.3 Corpo Negro

Nos primórdios do século XX, aquando de estudos acerca da influência da temperatura na radiação térmica, surgiu uma enorme dificuldade pelo facto da radiação emitida em função da temperatura depender, não só da própria temperatura, como do material de que é constituído o corpo a analisar, não existindo assim nenhum referencial de comparação[2].

Para resolver este problema nasceu o conceito de corpo negro. O corpo negro, consiste num corpo ideal, capaz de absorver toda a radiação incidente sobre ele, acrescido de que, no equilíbrio térmico, as suas taxas de emissão e absorção de energia são exactamente iguais, tal como refere a Lei de Kirchhoff da radiação térmica[2].

Assim, se este corpo for capaz de absorver 100% da radiação incidente, então emitirá também 100% dessa mesma radiação. Logo, conclui-se que a radiação emitida por um corpo negro dependerá apenas da temperatura, enquanto que, num outro corpo qualquer, dependerá não só da temperatura como do material que o constitui[2].

O modelo prático de um corpo negro reside na aproximação a um pequeno orifício num objecto oco cujas paredes são mantidas a uma temperatura uniforme. Na Figura 2.4, pode-se observar um esboço do dito modelo, onde as setas representam a entrada da radiação no corpo através de um pequeno orifício. Uma vez no seu interior as radiações são absorvidas e reflectidas inúmeras vezes pelas paredes do objecto. Desta forma, qualquer radiação que possa tornar a sair para o meio, pela única ligação possível que é o orifício, representa apenas uma pequena porção quando comparada com a quantidade que foi absorvida.

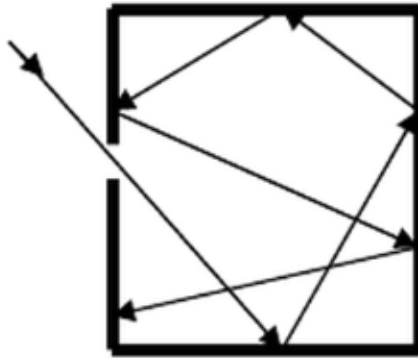


Figura 2.4: Modelo do Corpo Negro[8]

Para ser um absorvedor ideal, também tem de ser um emissor ideal, logo, se o objecto for aquecido, de modo a que a temperatura das suas paredes permaneça uniforme, haverá emissão de radiação térmica pelo orifício, que apenas dependerá dessa mesma temperatura. No entanto, esta é uma característica apenas pertencente as suas paredes internas, uma vez que a radiação emitida externamente continua a depender tanto da temperatura como do material constituinte[2]. A radiância espectral ou poder emissivo por unidade de superfície e comprimento de onda de um corpo negro é traduzido matematicamente pela Lei de Planck, Equação 2.1:

$$\frac{dE(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5}}{\exp \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T} - 1} \quad [W/m^3] \quad (2.1)$$

Em que:

$h = 6,626176 \times 10^{-34}$ [J.s] - Constante de Planck

$k = 1,380662 \times 10^{-23}$ [J/K] - Constante de Boltzmann

$c = 2,998 \times 10^8$ [m/s] - Velocidade da Luz

T [K] - Temperatura do Corpo Negro

Pelas equações acima, é bastante perceptível que a radiância espectral é dependente não só da temperatura como do comprimento de onda. Estas duas dependências de que se fala, podem ser observadas graficamente na Figura 2.5, onde se verifica que, à medida que a temperatura vai diminuindo, o pico da curva vai-se deslocando, aumentando o comprimento de onda e diminuindo a radiância espectral[9].

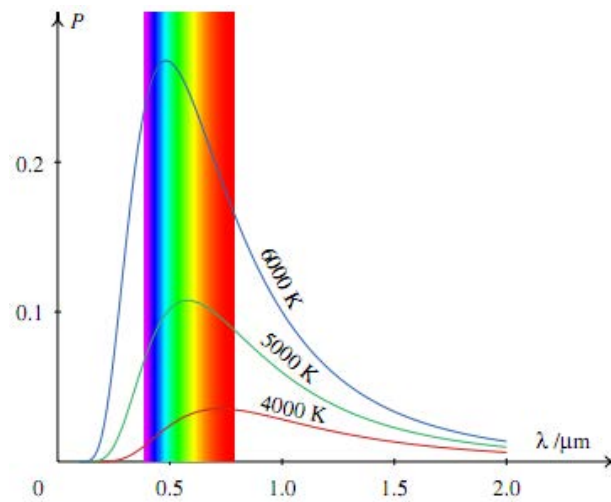


Figura 2.5: Radiação do Corpo Negro em Função da Temperatura e Comprimento de Onda[10]

Estes resultados obtidos por Max Planck foram conseguidos através da manipulação da Lei de Wien e da Lei de Stefan-Boltzmann. A Lei de Wien ou Lei de Deslocamento do Wien estabelece uma proporcionalidade inversa entre o comprimento de onda de emissão máxima e a temperatura absoluta do corpo. Esta pode ser obtida através da derivada da Lei de Planck em relação ao comprimento de onda pela Equação 2.2[9].

$$\lambda_{mx} = \frac{B}{T} \quad (2.2)$$

Em que:

$B = 2,898 \times 10^{-3} [m.K]$ - Constante de Dispersão de Wien

A Lei de Stefan-Boltzmann para o corpo negro, Equação 2.3, que pode ser obtida através da integração da Lei de Planck no domínio de λ entre zero e infinito, estabelece uma relação entre a radiância espectral e a temperatura[9].

$$E_b = \sigma T^4 \quad [W/m^2] \quad (2.3)$$

Em que:

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [W/m^2.K^4]$ - Constante de Stefan-Boltzmann

2.4 Emissividade

Num corpo real, ao contrário do que acontece num corpo negro, nem toda a radiação é absorvida (α), pois parte é reflectida (ρ) ou transmitida (τ). Uma consideração importante e comum a estes três parâmetros é o facto de todos dependerem do comprimento de onda de acordo com a Equação 2.4.

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (2.4)$$

Segundo a Lei de Kirchhoff da radiação térmica, qualquer corpo a uma determinada temperatura e comprimento de onda, apresenta valores de emissividade (ε) e absorção (α) iguais. Assim, através da Equação 2.4, chega-se à Equação 2.5.

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (2.5)$$

Desta forma surge o importante conceito emissividade, que é definido como a razão entre a energia emitida por um corpo qualquer e a energia emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Assim, numa pequena análise, conclui-se que a emissividade de um corpo negro é um e a de um espelho perfeito é zero[9]. O cálculo da emissividade para um corpo real pode ser efectuado através da Lei de Stefan-Boltzmann da Equação 2.3, mas com a alteração expressa na Equação 2.6.

$$E = \sigma \varepsilon T^4 \quad [W/m^2] \quad (2.6)$$

2.5 Variabilidade da Emissividade

Uma questão de grande relevo é a dependência que a emissividade apresenta em relação à temperatura, ao comprimento de onda e à direcção de observação em relação à superfície.

Estes três factores influenciam bastante os valores de emissividade dos materiais, o que pode conduzir à produção de erros aquando de uma medição, adulterando resultados.

Estes falsos resultados podem posteriormente conduzir também a conclusões que não traduzem a realidade.

2.5.1 Comprimento de Onda

A variabilidade que a emissividade apresenta em relação ao comprimento de onda depende fortemente dos materiais a analisar.

No caso dos gases e dos líquidos, a emissividade apresenta variações bruscas, ao invés do que acontece nos sólidos em que essas variações são lentas.

No que refere aos metais, Figura 2.6, a emissividade apresenta uma diminuição com o comprimento de onda, ao contrário do que acontece com os não-metais, Figura 2.7, onde regista um aumento.

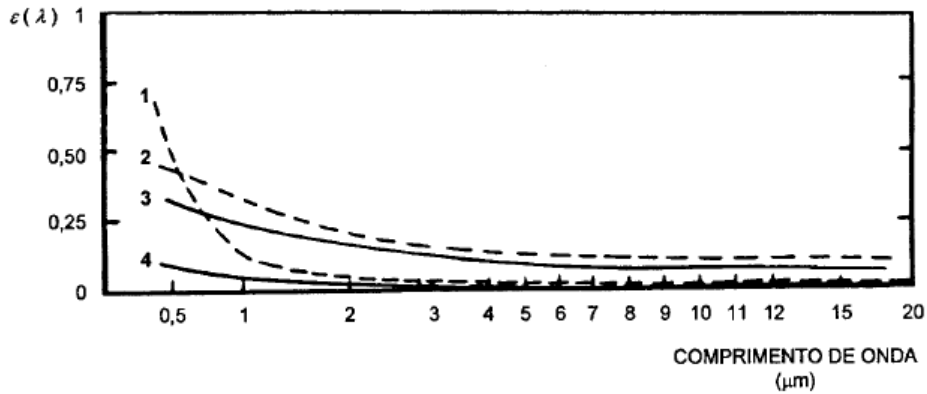


Figura 2.6: Emissividade do Cobre(1), Ferro(2), Alumínio(3) e Prata(4)[9]

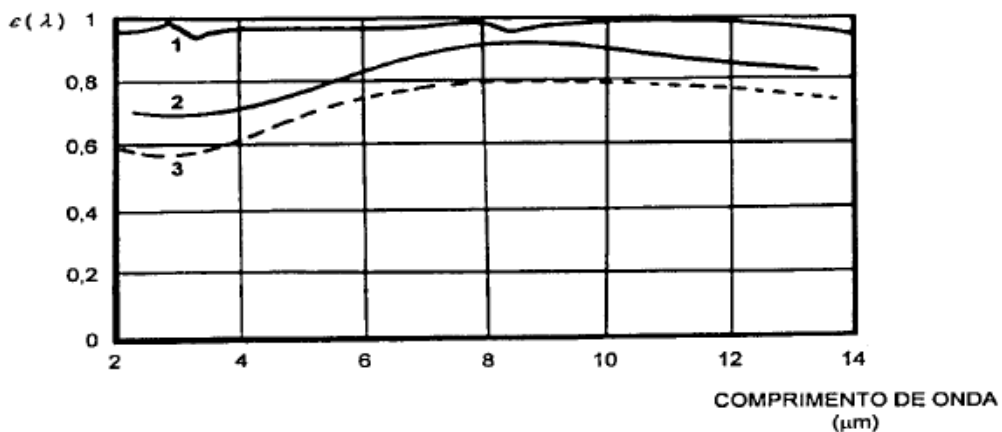


Figura 2.7: Emissividade da Água(1), Terra(2), Plástico(3)[9]

2.5.2 Ângulo de Observação

A variação da emissividade com o ângulo de observação pode originar valores de emissividade não reais no caso de superfícies não planas, ou seja, pode dar origem ao que se apelida de emissividade aparente.

No caso dos não metais, Figura 2.8, esta variação não se faz sentir, sendo mesmo nula para ângulos entre os 0° e os 60° em relação à perpendicular à superfície. No entanto, para valores acima dos 70° , observa-se uma descida abrupta até zero.

Nos metais Figura 2.9, a emissividade apresenta valores baixos e sem grandes variações para ângulos entre os 0° e os 40° , sofrendo aumentos bruscos para ângulos superiores.

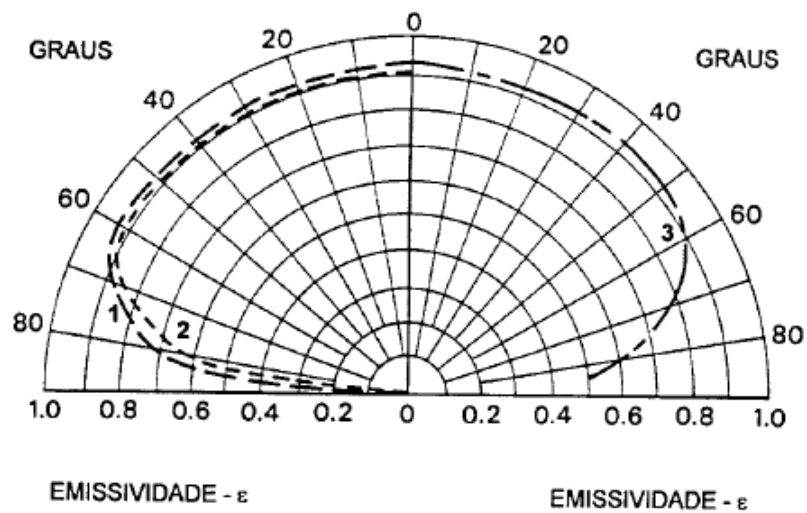


Figura 2.8: Emissividade Segundo o Ângulo de Observação para Madeira(1), Papel(2) e Vidro(3)[9]

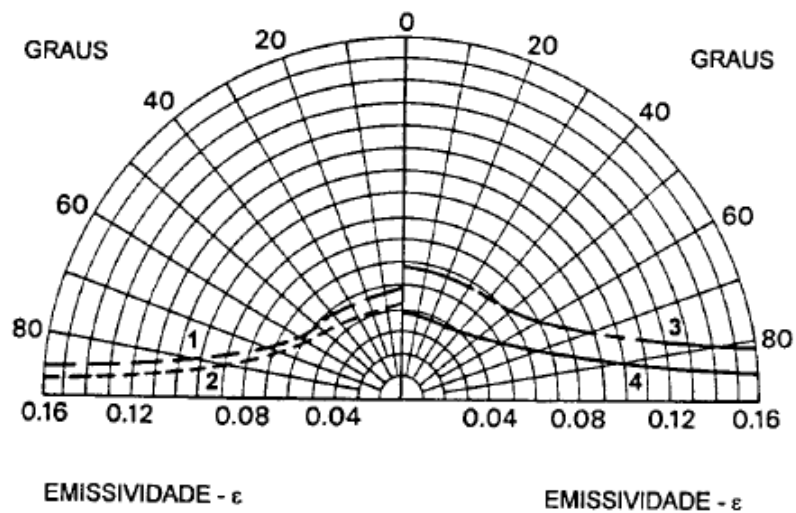


Figura 2.9: Emissividade Segundo o Ângulo de Observação para Níquel Polido(1), Níquel Baço(2), Crômio(3) e Alumínio(4)[9]

2.5.3 Temperatura

No que refere à temperatura, também existem diferenças consoante o tipo de material. Nos metais, Figura 2.10, a emissividade aumenta com a temperatura, embora não de forma muito brusca.

Nos restantes materiais, Figura 2.11, regista-se uma diminuição com esse mesmo aumento de temperatura[9].

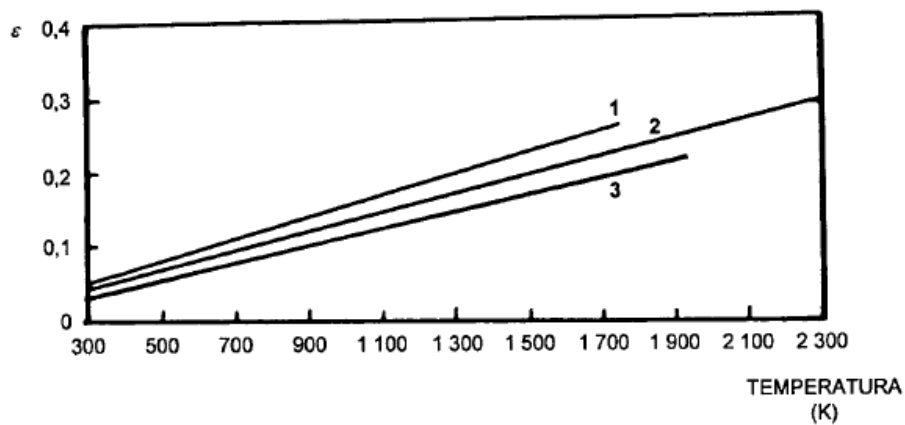


Figura 2.10: Variação da Emissividade com a Temperatura para Níquel(1), Tungsténio(2) e Platina(3)[9]

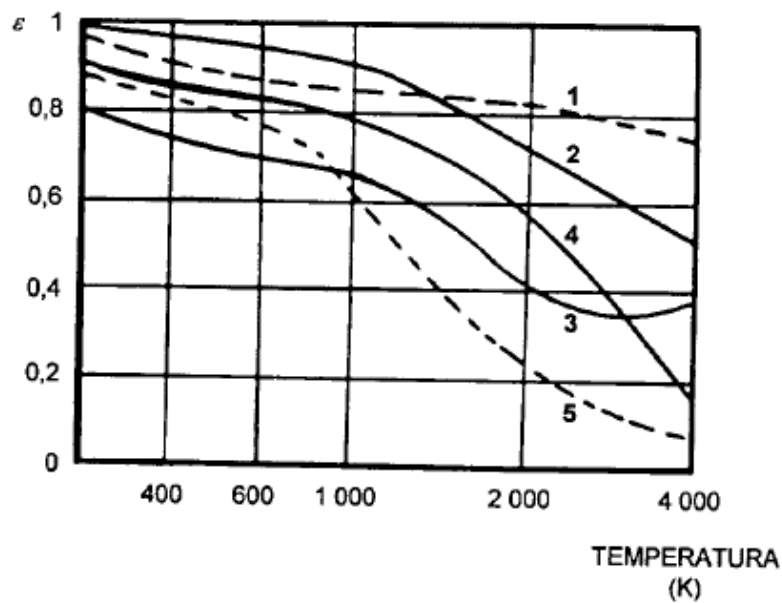


Figura 2.11: Variação da Emissividade com a Temperatura para Borracha(1), Porcelana(2), Cortiça(3), Papel(4), Argila Refractária[9]

No entanto, é importante referir que esta análise revela-se um pouco subjectiva uma vez que, em ambos os casos, os valores de emissividade dependem directamente do estado da superfície do material, como se pode verificar na Figura 2.12[9].

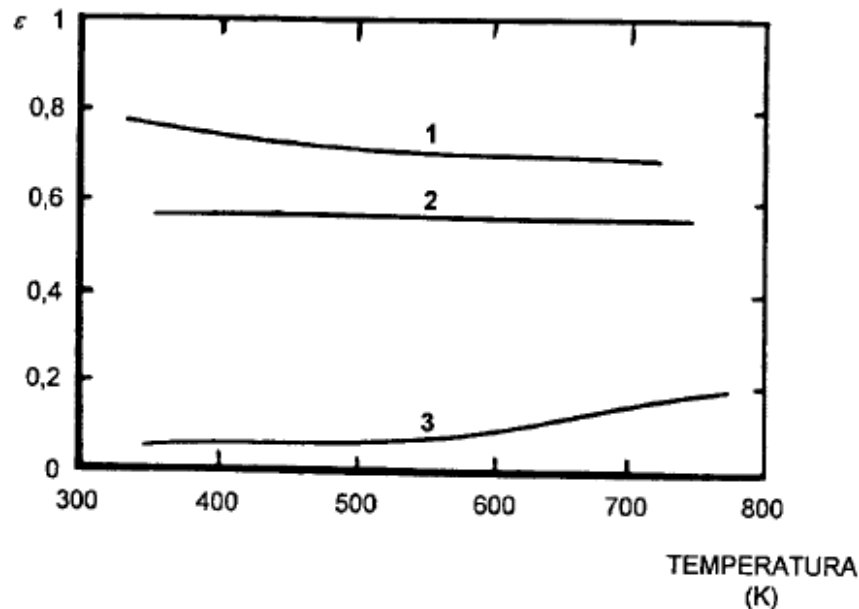


Figura 2.12: Variação da Emissividade do Cobre por Oxidação sendo Bastante Oxidado(1), Levemente Oxidado(2), Polido(3)[9]

2.6 Termogramas e Câmaras Térmicas

Um termograma, como já foi referido, trata-se de uma imagem térmica criada a partir da radiação infravermelha ou calor. Estas imagens representam numa escala de cores, a distribuição de temperatura de um determinado objecto.

O que torna isto possível são as câmaras termográficas, que permitem, não só a captação deste tipo de imagens, como também a realização de medidas e análises sobre as mesmas. Estes equipamentos, podem ser de dois tipos consoante o sistema de captação seja de varrimento, constituído apenas por um sensor e um sistema de varrimento óptico, ou FPA (Focal Plane Array) em que o detector é constituído por uma matriz bidimensional de sensores. No sistema de varrimento, a imagem é formada linha a linha por um conjunto de espelhos giratórios, o tempo de integração é curto ($5\mu s$), implicando uma grande complexidade mecânica e sensores do tipo MCT (Mercúrio, Cádmio, Telúrio). No sistema FPA, os pontos da imagem são captados simultaneamente por um elevado número de sensores, o tempo de integração é elevado (15ms), os sistemas mecânicos são substituídos por sistemas electrónicos e os sensores são constituídos por Pt,Si(platina, silício) e In,Sb (Índio, Antimónio)[11].

Apesar de toda esta tecnologia, convém ter em atenção os diversos factores que podem interferir na captação de imagens termográficas. Para além da emissividade, já abordada, é preciso especial cuidado com as condições atmosféricas no caso de uma medição ao ar livre, Figura 2.13, pois, estas podem impedir que a totalidade da radiação de um determinado corpo chegue até à lente da câmara. Factores como a humidade, a temperatura, ou mesmo a luz solar podem ter implicações negativas e levar a medições erróneas[12].

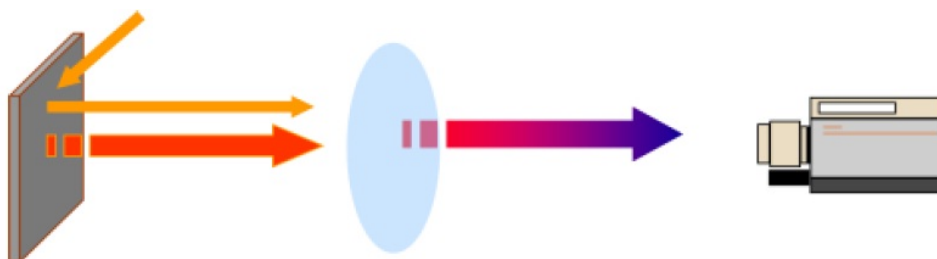


Figura 2.13: Influência da Atmosfera numa Medição[12]

Assim, é fundamental um acompanhamento desses parâmetros por parte do operador para evitar qualquer equívoco, tendo sempre presente que, para além disso, qualquer elemento que se encontre no "caminho óptico" ou mesmo o aquecimento da própria câmara podem interferir nos resultados finais [11], [12].

2.7 Resumo

Através da realização deste capítulo apreendeu-se que a termografia é uma técnica que permite criar um perfil térmico de um determinado objecto através da detecção da radiação térmica ou infravermelha por ele emitida.

Abordou-se também o conceito de emissividade e que esta pode ser calculada pela razão entre a energia emitida por um corpo real e a emitida por um corpo negro. Viu-se que a emissividade, característica de um corpo real, apresenta variações com a temperatura, comprimento de onda e ângulo de observação, o que pode ser enganoso aquando de uma medição.

Por fim, viu-se que captação de radiação só é possível através de aparelhos preparados para o efeito como as câmaras térmicas, pois, permitem a reprodução gráfica de um perfil térmico.

Capítulo 3

Aplicações da Termografia

Neste capítulo, referem-se algumas das principais aplicações da termografia, incidindo principalmente na área dos sistemas eléctricos e máquinas eléctricas, bem como uma abordagem acerca do papel desta técnica no campo da manutenção preditiva.

3.1 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é fulcral para muitas indústrias pois, através das varias técnicas que a constituem, permite aumentar a produtividade e reduzir as perdas económicas, com vista ao aumento da fiabilidade e da disponibilidade de um determinado sistema. Este tipo de manutenção tem como objectivo avaliar as condições reais de uma determinada máquina ou equipamento, através da recolha de dados que apresentem informação acerca do seu desgaste e processo de degradação. É portanto um modo de prever o tempo de vida útil das máquinas, dos equipamentos e das condições para que se tire partido desse mesmo tempo[13].

Entre as técnicas existentes de manutenção preditiva, surgem a vibração, os ultra-sons, a análise de óleos, a análise de motores eléctricos, a detecção de fugas e o alvo deste estudo, a termografia[14].

A termografia apresenta-se como um dos pilares de sustentação da manutenção preditiva pois, em situações em que haja a possibilidade de aplicar esta técnica, através do uso de câmaras termográficas, eleva-se a capacidade de detecção de falhas imperceptíveis ao olho humano que, de outra forma, poderiam resultar em enormes prejuízos, mas, acima de tudo, permite um enorme incremento do nível de segurança, tanto de quem efectua os testes, como de quem opera as máquinas[15].

A manutenção preditiva é um processo baseado na modificação de parâmetros e condições de desempenho de determinado equipamento, e pode ser comparada com uma inspecção sistemática que determina as condições de operação de determinados equipamentos. É importante salientar que quando é necessária uma qualquer intervenção no sentido de melhorar qualquer procedimento

no funcionamento de um equipamento, está-se perante uma manutenção correctiva planeada e não preditiva. Esta última tem como principal objectivo uma previsão, ou análise futurista, das possíveis falhas que podem vir a ocorrer num equipamento ou sistema, com o intuito de reduzir ao máximo os tempos de paragem por avaria. Defende portanto um acompanhamento permanente das condições dos equipamentos, considerando que uma intervenção só deve ser efectuada quando é estritamente fundamental, ou seja, quando os parâmetros apontam para a real necessidade de uma intervenção. Convém, no entanto, estabelecer a diferença com a manutenção preventiva, que defende a tese da retirada do equipamento de operação mediante o tempo de operação. A manutenção preditiva é conseguida pela medição, acompanhamento ou monitorização de dados. Isto pode ser feito através de uma monitorização subjectiva, exercida pelo pessoal de manutenção através do uso dos seus sentidos, bastando, por exemplo, detectar elevações de temperatura usando o tacto, ou através de uma monitorização objectiva, utilizando aparelhos específicos que fornecem valores de medição. No entanto, esta última ainda se pode subdividir em manutenção objectiva contínua, para casos onde o tempo de desenvolvimento de uma falha é bastante curto ou para casos de equipamentos de elevada responsabilidade, e em manutenção objectiva pontual, para as restantes situações [16], [17].

3.1.1 Manutenção Preditiva em Sistemas Eléctricos

Mais particularmente na manutenção preditiva de sistemas eléctricos, a termografia desempenha um papel de enorme relevância, na medida em que possibilita a detecção de problemas antes que estes ocorram, bem como permite o ajuste ou correcção de algumas situações que no futuro se podem revelar problemáticas, como, por exemplo, a sobrecarga de uma fase num sistema trifásico. No entanto, mais importante que isso é a segurança que oferece aquando da sua aplicação, como já foi referido anteriormente. Em qualquer programa de manutenção preditiva orientado a subestações, transformadores, linhas de transmissão, entre outros, é essencial a aplicação da análise termográfica de forma a evitar problemas, porque a este nível uma falha pode ter contornos catastróficos. Em sistemas mecânicos a termografia é aplicada em sistemas rotativos, caldeiras, sistemas de ventilação e refrigeração, nomeadamente [16], [17].

3.2 Aplicações em Instalações Eléctricas

No campo das instalações eléctricas, a termografia desempenha um papel de destaque no que diz respeito a inspecções e manutenção. Nesta área, uma das principais causas de avarias é o surgimento de falhas devido à temperatura [1], [18].

Em qualquer circuito eléctrico, um aumento da resistência significa um obstáculo à passagem de corrente, gerando calor e, portanto, aumento de temperatura. Este fenómeno chama-se efeito Joule, em homenagem ao físico inglês James Prescott Joule. O físico concluiu que a energia térmica dissipada num condutor quando percorrido por uma corrente eléctrica é directamente proporcional à resistência do condutor, ao quadrado da intensidade de corrente e ao tempo durante a qual essa corrente passa $E = R \times I^2 \times \Delta T$ [19]. No entanto, esta resistência pode sofrer aumentos

significativos fruto de problemas como ligações mal apertadas, oxidadas ou corroídas, dimensionamentos deficitários dos cabos eléctricos ou falta de manutenção. Assim, surge o meio ideal para a termografia, Figura 3.1, possibilitando uma ampliação de horizontes na detecção de sobreaquecimentos em contactos e conexões ou mesmo aquecimento nos bornes de transformadores[2].

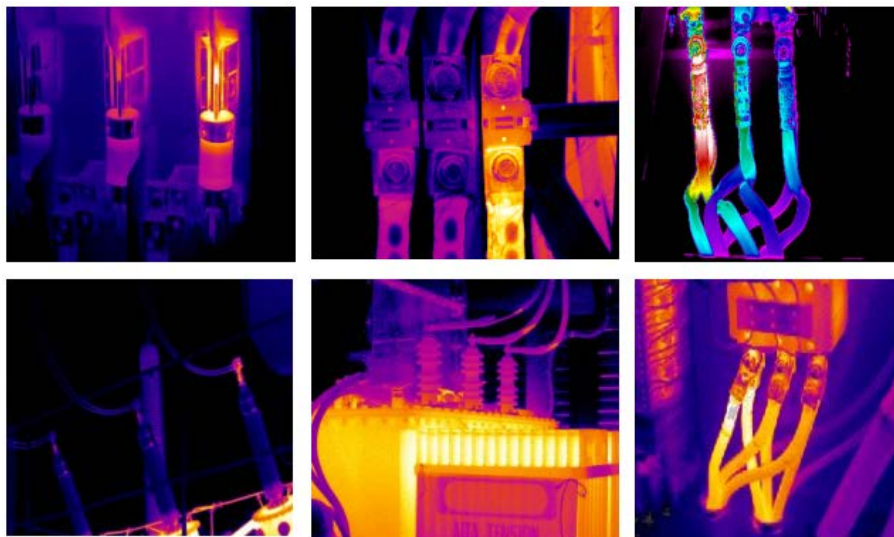


Figura 3.1: Termogramas em Sistemas Eléctricos[2]

Actualmente, a maioria das empresas em todo o mundo, aplicam a termografia como forma de prevenção e detecção de falhas ou avarias nas redes de energia, tornando-as mais disponíveis e fiáveis. Aliás, esta técnica é considerada a mais eficaz no campo de prevenção de falhas em equipamentos eléctricos[20]. A análise ou interpretação de uma imagem térmica tem de ser sempre acompanhada por um conhecimento acerca das normas de funcionamento do equipamento em questão, uma vez que é um factor importante para realizar um diagnóstico correcto. Um exemplo de aplicação reside na avaliação da temperatura dos fusíveis de um sistema trifásico de um quadro eléctrico, Figura 3.2. Como se pode observar pelo padrão de cores, existe um excesso de temperatura em dois dos fusíveis, permitindo afirmar que existe uma falha e que esta pode originar uma avaria, havendo assim, uma necessidade urgente de manutenção.



Figura 3.2: Quadro Eléctrico[20]

Outra questão de enorme relevância é o caso de redes eléctricas em calha suspensa, Figura 3.3. É bastante útil uma análise termográfica neste caso, uma vez que, não há necessidade de ter contacto com o material para avaliar o seu estado de funcionamento, tornando a tarefa de encontrar qualquer anomalia, num processo menos trabalhoso e demorado[21].

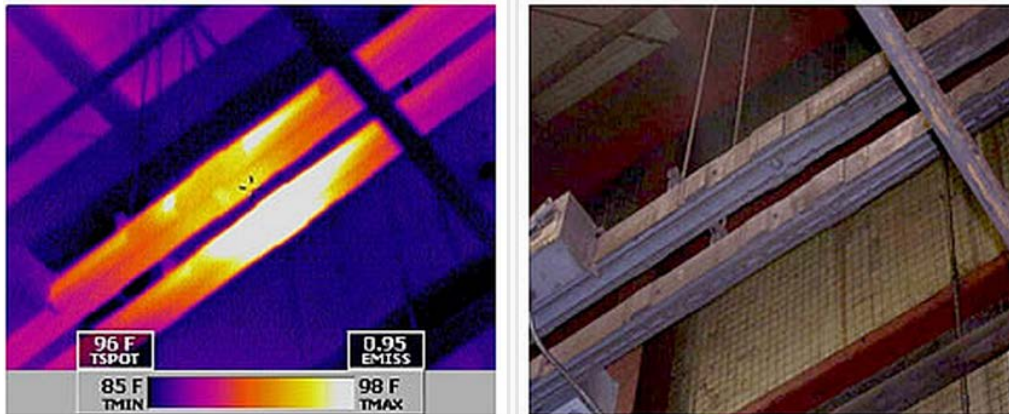


Figura 3.3: Rede Eléctrica em Calha Suspensa[21]

Não só em redes eléctricas de baixa tensão é possível uma análise termográfica dos equipamentos.

Repare-se na Figura 3.4, onde se observa uma conexão numa subestação. Numa breve análise visual, torna-se perceptível, a existência de um ponto de temperatura bastante superior aos restantes, marcado por uma circunferência de cor verde. Isto indica a presença de uma falha na conexão do cabo, designado por conexão frouxa[21].

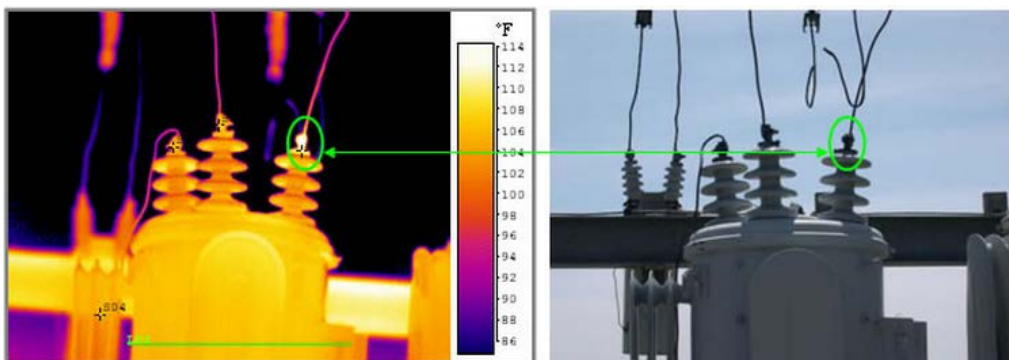


Figura 3.4: Conexões numa Subestação[21]

Nas linhas de transporte e distribuição de energia, também é possível efectuar análise acerca do estado dos equipamentos através da termografia, Figura 3.5. Nesta situação, é visível um elevado nível de temperatura em duas zonas de conexão. Este problema pode ser fruto da corrosão ou falta de aperto e pode originar uma quebra no fornecimento de energia, caso não seja reparado[21].



Figura 3.5: Linhas de Transporte e Distribuição de Energia[21]

Deste modo, verifica-se que no campo das redes eléctricas, quer sejam de baixa, média ou alta tensão, a termografia é uma ferramenta importante na detecção de falhas e/ou avarias, não desvalorizando, a enorme vantagem que oferece a nível de segurança aquando da sua aplicação.

3.3 Aplicações em Máquinas Eléctricas

As máquinas eléctricas dividem-se em três grandes grupos, estáticas, rotativas e lineares. As rotativas representam os motores e os geradores, as estáticas representam os transformadores, em comum, têm o facto de transformarem energia. Os transformadores transformam energia eléctrica, em energia eléctrica com características diferentes, enquanto, os motores e geradores transformam energia eléctrica em mecânica e mecânica em eléctrica, respectivamente[22].

Neste tipo de equipamentos, nem toda a potência absorvida é efectivamente consumida em serviço como forma de potência útil, pois, existem perdas, consequência do seu normal funcionamento, ou seja, do processo de transformação de energia. Assim, por esta ordem de ideias chega-se à Equação 3.1, de onde se conclui, que as perdas, de facto, têm uma influência significativa no rendimento de uma máquina eléctrica, o que por sua vez, terá consequências a nível económico.

$$\eta = \frac{\text{Potência útil}}{\text{Potência absorvida}} = \frac{\text{Potência útil}}{\text{Potência útil} + \text{perdas}} \quad (3.1)$$

Contudo, as perdas podem ser de diferentes tipos, consoante a sua origem. Podem ser perdas mecânicas, provocadas pelos atritos mecânicos e pelo arrastamento do fluido envolvente, perdas magnéticas, consequência das correntes de Foucault e de fenómenos de histerese, provenientes de núcleos percorridos por fluxos magnéticos variáveis no tempo, perdas suplementares, originadas por campos magnéticos parasitas e correntes de Foucault, e perdas por efeito Joule.

Uma questão fundamental, reside no facto de as perdas não serem constantes, variando consoante a carga, velocidade de rotação, frequência e indução máxima, respectivamente nas perdas Joule, mecânicas e magnéticas[22]. De forma geral as perdas são dissipadas no meio e manifestam-se pela produção de calor, precisamente onde a termografia incide, pois, há emissão de radiação infravermelha, permitindo a criação de termogramas. Estes podem ser um importante auxílio na detecção de falhas de refrigeração, curto-circuitos parciais entre espiras, isolamento, bem como no diagnóstico acerca do envelhecimento da máquina[1].

Assim, conclui-se que o controlo do aquecimento de uma máquina eléctrica é fundamental, para que as condições específicas de funcionamento nunca sejam ultrapassadas, sob pena de inutilizar irremediavelmente a máquina. Estas condições são materializadas através das classes de isolamento, que definem as temperaturas máximas não ultrapassáveis, de acordo com a classificação A,E,B,F e H[22].

Mais particularmente, em máquinas estáticas, a termografia é utilizada como forma de determinar possíveis falhas em estados iniciais, ou seja, quando estas ainda não são detectadas pelos respectivos sensores[1]. Em máquinas rotativas, é definida uma ideia de equilíbrio dinâmico entre peças girantes e fixas sustentada pelas leis da mecânica de fluidos e da transmissão de calor. Neste tipo de máquinas, o calor resultante do funcionamento em condições normais é dependente de factores como a pressão do trabalho, velocidade de deslizamento, coeficiente de atrito das superfícies e viscosidade do lubrificante. Este calor é dissipado por processos de condução, convecção e radiação, permitindo um equilíbrio entre o calor gerado e o dissipado. Ora, qualquer desequilíbrio fora dos parâmetros de projecto da máquina pode ser uma consequência de uma falha ou falhas, que podem ser facilmente determinadas através de uma análise termográfica quantitativa e/ou qualitativa[1].

3.3.1 Motores Eléctricos

A termografia em motores eléctricos, Figura 3.6, faz parte de um conjunto de técnicas de análise das condições dos equipamentos á qual se chama manutenção preditiva, como já foi referido anteriormente[2],[23].

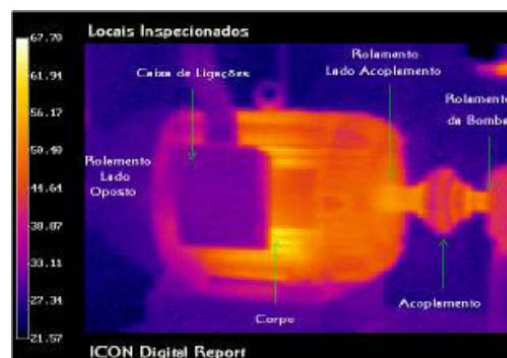


Figura 3.6: Termograma de Motor Eléctrico[2]

A elevação de temperatura e consequente radiação infravermelha, registadas num motor eléctrico devem-se ao em primeiro lugar ao seu normal funcionamento. Nestas condições, a zona que apresenta maior temperatura é o centro do motor, Figura 3.7, onde se encontram o estator e o rotor, uma vez que, o atrito existente entre os eixos e os rolamentos deve ser bastante reduzido[21].

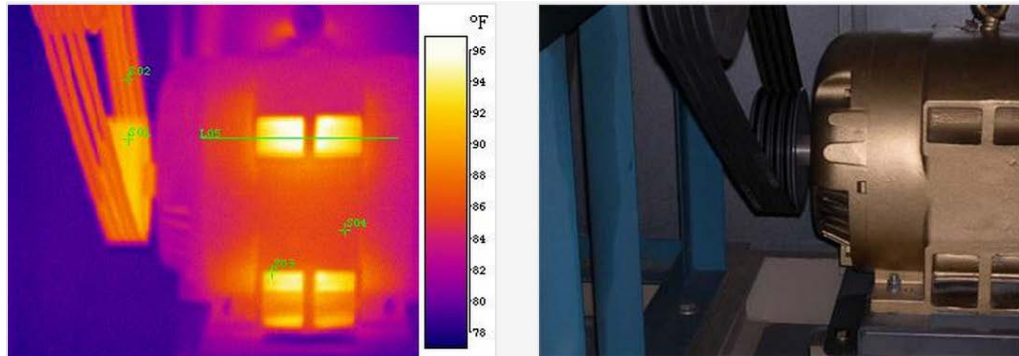


Figura 3.7: Motor Eléctrico Funcionamento Normal[21]

Um dos problemas já referidos é o surgimento de falhas que podem elevar substancialmente a temperatura deste tipo de equipamentos.

Uma das mais comuns é a falta de lubrificação, Figura 3.8, que provoca uma elevação do atrito entre as peças, gerando calor, o que conduz a um aumento de temperatura, tendo como principal consequência o desgaste do material[2].



Figura 3.8: Termograma de Motor - Falta de Lubrificação[2]

Apesar disto, não é com quantidades desproporcionadas de lubrificante que se resolve o problema, pois, é fundamental a existência de um equilíbrio entre necessidade e quantidade. Este equilíbrio é fulcral para não se provocar um fenómeno inverso ao que se pretende, uma vez que, um excesso de lubrificante pode gerar uma camada isolante, impedindo a dissipação de calor e originando um aumento de temperatura.

Este factor é particularmente prejudicial aos rolamentos do motor, na medida em que, o sobreaquecimento provocará uma diminuição do seu tempo de vida [21], como se verifica pela Figura 3.9.



Figura 3.9: Motor em Sobreaquecimento por Excesso de Lubrificante[21]

Outro tipo de falha bastante frequente é o desalinhamento de eixos, consequência de factores como montagens inadequadas, alinhamentos pouco precisos, desgaste ou pé manco. Este tipo de falha é responsável por uma enorme parcela, no que refere a perdas económicas, pois aumenta o consumo de energia e reduz o tempo de vida útil do motor[24].

Um alinhamento preciso possibilita uma redução das forças axiais e radiais, proporcionando maior estabilidade no rotor e menor desgaste das peças do motor, aumentando assim, o seu tempo de vida útil [25], [26]. Este fenómeno verifica-se em processos de transmissão de movimento, e pode ser de três tipos: paralelo, angular e combinado [25], como mostra a Figura 3.10.

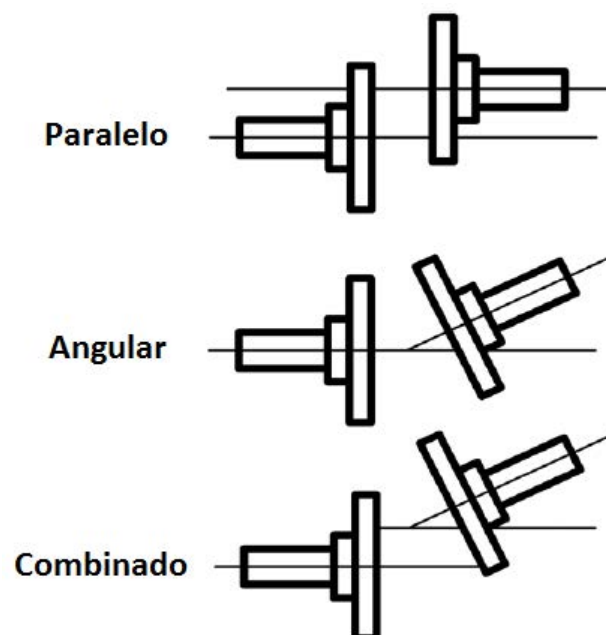


Figura 3.10: Tipos de Desalinhamentos de Eixos[25]

Além do desgaste, o desalinhamento pode produzir, ou aumentar, as vibrações em diferentes frequências. Estas vibrações podem ter uma enorme influência na corrente do estator, uma vez que o comportamento dinâmico do motor é afectado. Aqui, a termografia apresenta-se como uma solução na detecção deste tipo de problemas, pois, uma das consequências de um desalinhamento é o aumento de temperatura[24].

Na Figura 3.11, a temperatura na zona de acoplamento apresenta valores relativamente reduzidos, isto significa que não existe desalinhamento entre eixos ou que este é reduzido. Ao invés, na Figura 3.12, observa-se um aumento substancial de temperatura na mesma zona, o que leva a acreditar, na existência de um certo desalinhamento de eixos[25].



Figura 3.11: Motor com Eixos Alinhados[25]

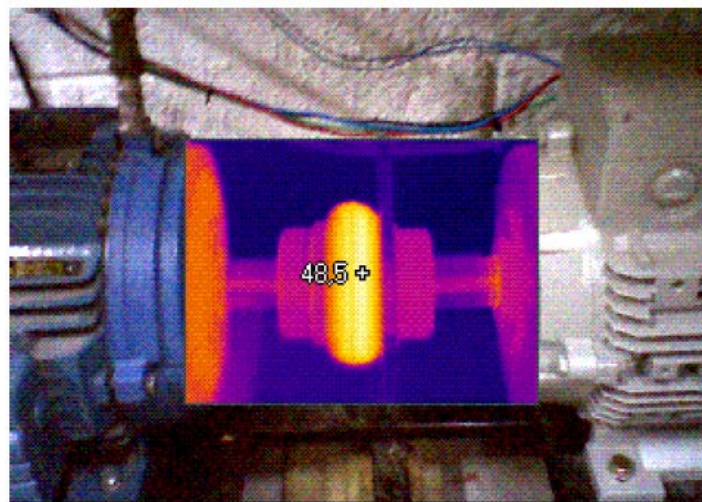


Figura 3.12: Motor com Eixos Desalinhados[25]

Um outro caso, bastante semelhante ao descrito anteriormente, reside no desalinhamento de roldanas quando unidas por uma correia de transmissão, Figura 3.13. Aqui, observa-se um certo desalinhamento, notório através do perfil de temperatura, provocado pelo atrito da correia de transmissão nas roldanas[21].



Figura 3.13: Desalinhamento de Roldanas[21]

3.3.2 Transformadores

Os transformadores são um dos mais importantes equipamentos numa rede eléctrica, pois deles depende a estabilidade dessa mesma rede. Nesta área, a termografia desempenha um papel de prevenção, pois permite monitorizar as condições de funcionamento da máquina. No caso dos transformadores a óleo é efectuada uma análise individualizada de cinco sectores, nomeadamente, a cuba da parte activa do transformador, onde se encontra também o óleo de refrigeração e isolamento, o comutador de variações de carga, para variar a razão de transformação, também conhecido por On-Load Tap Changer (OLTC), os radiadores de refrigeração, as buchas e as pinças de amarração [27], [28], [29]. Para uma medição da temperatura relacionada com a cuba do óleo e o comutador de carga, Figura 3.14, são efectuadas comparações entre as medições realizadas na zona superior, inferior e intermédia da máquina[27].

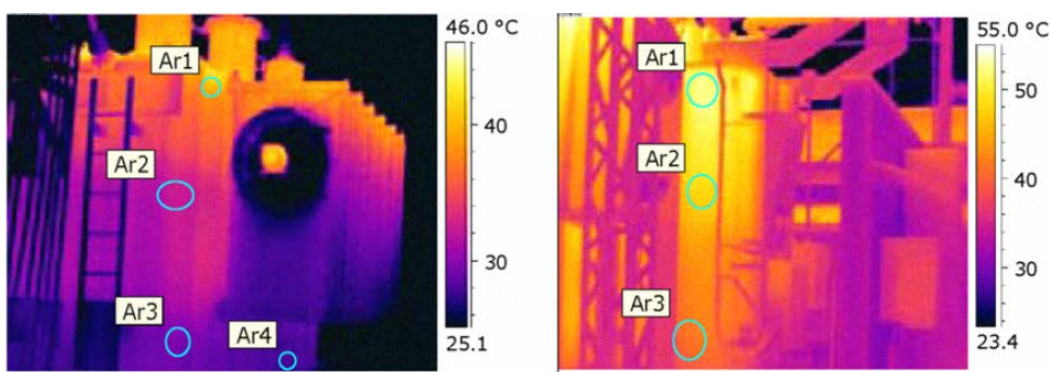


Figura 3.14: Análise da Temperatura da Cuba do Transformador[27]

No caso dos transformadores constituídos por bancos de radiadores, são recolhidos os perfis de temperatura de cada um desses radiadores, Figura 3.15.

Assim, à possibilidade de se estabelecer comparações entre os resultados obtidos, no sentido de se detectar anomalias, uma vez que, as temperaturas dos radiadores devem ser aproximadamente iguais, e qualquer discrepância pode significar a existência de falha[27].

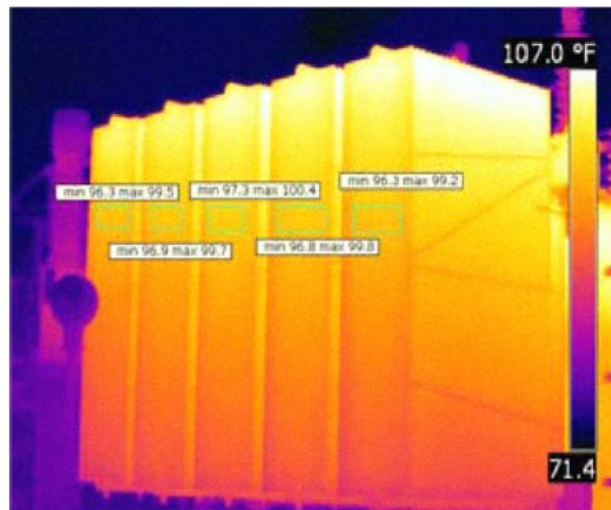


Figura 3.15: Análise da Temperatura dos Radiadores do Transformador[27]

No que refere às buchas, Figura 3.16, para uma correcta avaliação do seu estado, são realizadas um conjunto de três medições. Duas destas medições são realizadas nos extremos, pois, são zonas de conexão, logo mais susceptíveis de avaria, a terceira é realizada na zona central.

Mais tarde, os valores obtidos são comparados, com o objectivo de se detectar quaisquer incoerências, tal como acontece no caso anterior[27].

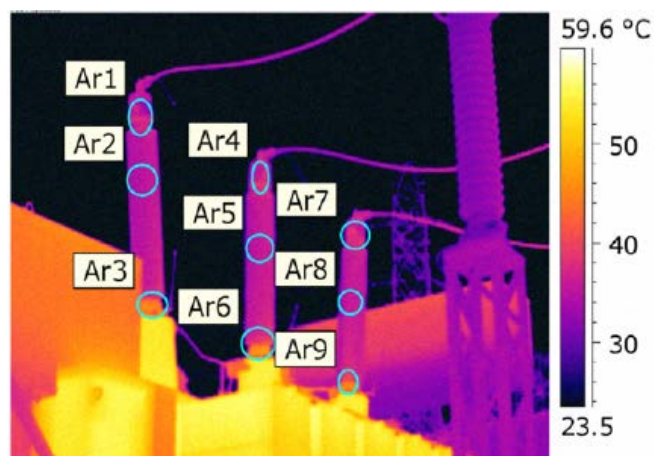


Figura 3.16: Análise da Temperatura das Buchas do Transformador[27]

Por fim, realiza-se também uma avaliação do estado das pinças de amarração, Figura 3.17, pois são as zonas de conexão entre as buchas e os cabos, e como tal, são pontos onde a ocorrência de falha é bastante provável[27].

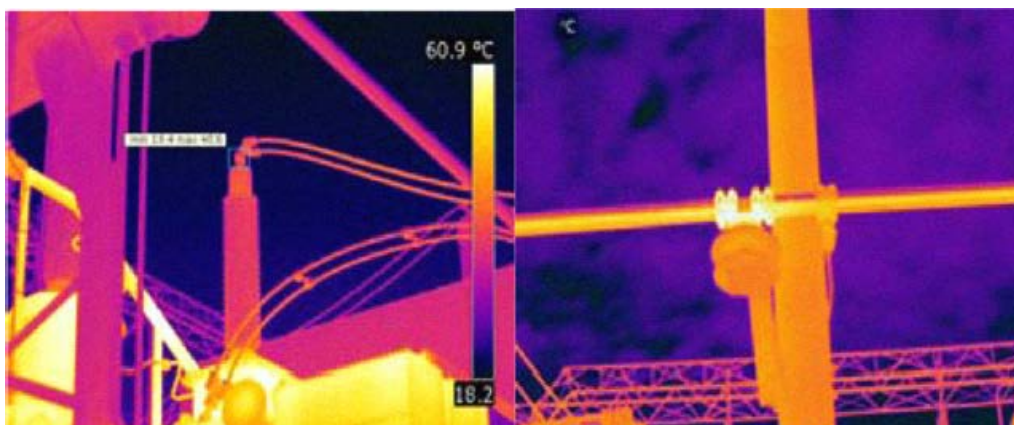


Figura 3.17: Análise da Temperatura das Pinças de Amarração do Transformador[27]

Deste modo, efectua-se uma análise repartida do transformador de forma a avaliar cada uma das partes mais susceptíveis de avaria.

Seguidamente apresentam-se duas situações concretas de falha, detectadas através de uma análise semelhante. Na Figura 3.18, observa-se uma imagem de uma análise efectuada num banco de radiadores, na qual se detecta diferenças de temperatura. Num olhar mais atento, nota-se que um dos radiadores apresenta uma temperatura inferior aos restantes, isto pode, ou não, significar uma falha na distribuição do fluxo do óleo[27].

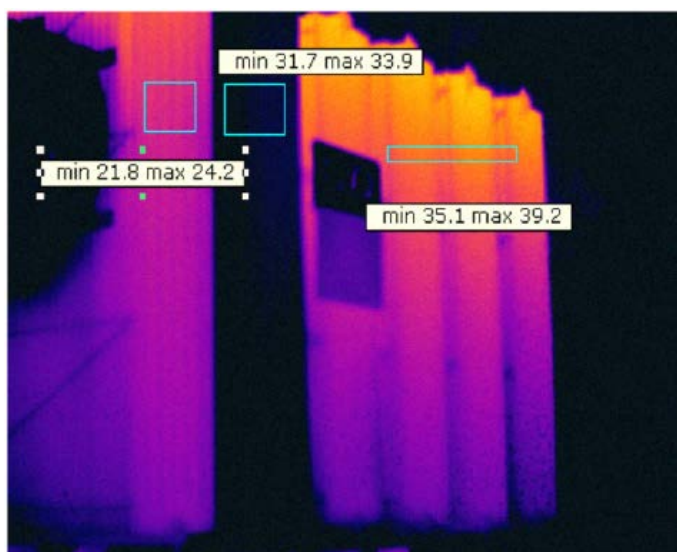


Figura 3.18: Situação de Falha num Banco de Radiadores[27]

Na Figura 3.19, é demonstrada uma análise à cuba do óleo do transformador, na qual se detecta um local sobreaquecido. Este excesso de temperatura indica problemas no interior da cuba, que pode significar, alguma perda de qualidade do óleo e como consequência, menor capacidade de isolamento[27].

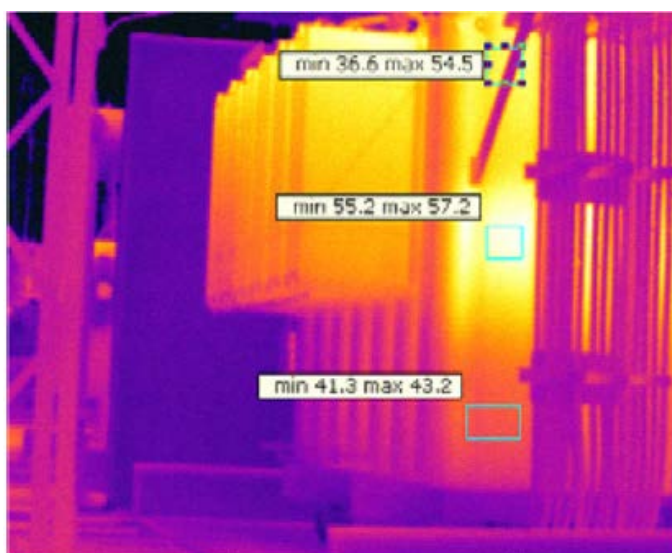


Figura 3.19: Situação de Falha na Cuba do Óleo[27]

No caso dos transformadores secos, o tipo de falhas externas que podem surgir são semelhantes, principalmente no que diz respeito às conexões, desenvolvendo no entanto, diferentes problemas internos. Embora a necessidade de manutenção não seja tão elevada como num transformador a óleo, é importante manter um certo controlo do seu estado de funcionamento.

3.4 Outras Aplicações

A termografia pode ser utilizada em qualquer processo em que a temperatura seja mensurável. Assim as aplicações da termografia são variadas, no entanto é amplamente utilizada na indústria tanto para inspeção, com vista a detecção de falhas, como para auxílio ao correcto funcionamento de vários processos industriais[1]. Tendo em conta que se pode detectar inúmeras falhas, sobressaem vantagens como a redução de custos com a manutenção, na medida em que se diminui as reparações diárias, com o pessoal, principalmente no que se refere a apólices de seguros para acidentes de trabalho, não desvalorizando a implicação que uma manutenção adequada pode ter no campo produtivo, uma vez que, menos avarias implicam menos tempo de paragem e portanto mais produção[3].

Na construção civil, Figura 3.20, a termografia desempenha um papel de enorme relevância principalmente na construção de edifícios. É uma ferramenta de bastante utilidade na resolução de problemas de isolamento térmico, na localização de fugas caloríferas e humidades internas, constituindo assim uma ferramenta importante no estudo de perdas energéticas[2].

Ora, as perdas energéticas constituem um factor de elevada preocupação no panorama da eficiência energética. Actualmente, na área da construção de edifícios, a eficiência energética desempenha um papel central, pois a energia consumida por habitações e edifícios de serviços representa uma parcela substancial dos consumos energéticos em todo o mundo. Em Portugal, apenas em 2009, foi criada legislação para responder de forma séria ao problema. Esta legislação impõe restrições e regras para a construção e transacção de edifícios, estabelecendo também critérios perante os quais os edifícios são classificados segundo uma determinada classe, estabelecendo-se, assim, a certificação energética de edifícios[30].

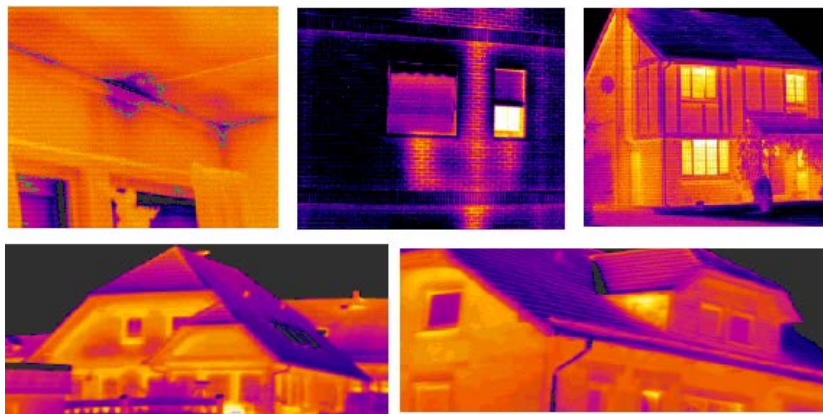


Figura 3.20: Termogramas de Edifícios[2]

No que refere à electrónica, Figura 3.21, há possibilidade de observar a distribuição de temperatura através de análises térmicas a placas de circuito impresso, detectando curto-circuitos e outros problemas inerentes a este tipo de materiais.

Deste modo, a técnica possibilita um maior controlo tanto de especificações como de qualidade, tornando os produtos mais fiáveis e disponíveis[2].

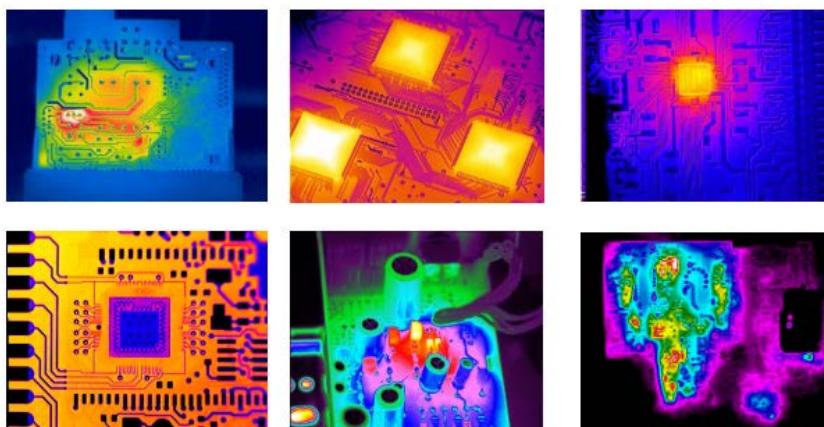


Figura 3.21: Termogramas na Electrónica[2]

Outra importante aplicação reside na aeronáutica, Figura 3.22, onde a técnica é aplicada ao ensaio de materiais, com vista à detecção de imperfeições, pontos quentes ou falhas ao nível eléctrico e electrónico[3]. É também uma ferramenta importante no que diz respeito a estudos acerca do comportamento térmico de pás e de túneis de vento. Para além disso, permite a caracterização térmica dos reactores bem como a localização de possíveis infiltrações de água[2]. Ora, aqui, a termografia demonstra todo o seu potencial pois, uma falha a este nível pode ter consequências graves ou mesmo catastróficas, levando a enormes prejuízos, tanto materiais como humanos, e como tal o nível de exigência é bastante elevado.

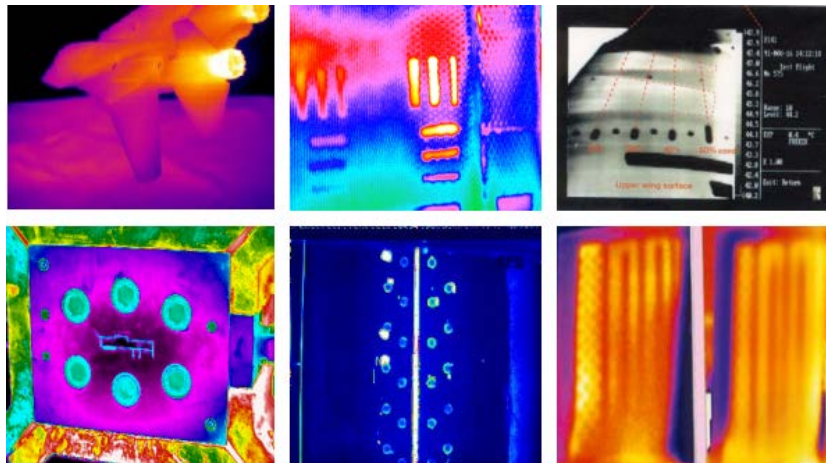


Figura 3.22: Termogramas na Aeronáutica[2]

Não desvalorizando nenhuma das áreas de aplicação já mencionadas, surge uma com uma importância cabal quanto à sua utilidade, a medicina, Figura 3.23. Nesta área é possível diagnosticar bastantes problemas de forma relativamente rápida e eficaz.

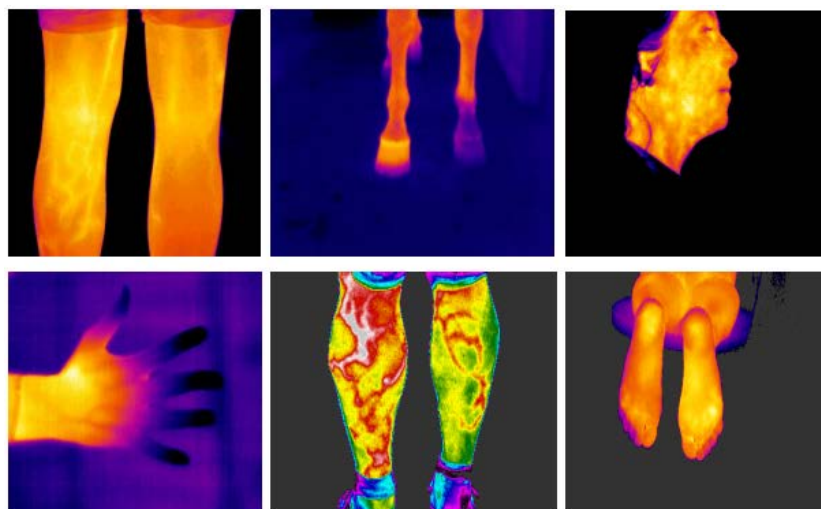


Figura 3.23: Termogramas na Medicina[2]

É possível a determinação de problemas circulatórios e a localização de infecções que à primeira vista não são detectáveis. Para além disso, é ainda um enorme aliado no estudo de problemas de locomoção e danos musculares. Todas estas funcionalidades de aplicação da termografia são igualmente inerentes à medicina veterinária[2].

Muitos dos avanços tecnológicos que surgiram nos últimos tempos tiveram, quase sempre, uma motivação militar, e a termografia não é excepção. A utilização da técnica celebrou-se exactamente nesta área, popularizando-se através do cinema. No entanto, ainda hoje é uma arma poderosa principalmente em combates nocturnos.

É também uma ajuda fundamental para problemas mais comuns da sociedade civil, como a vigilância aérea às rodovias, de forma a detectar infracções de trânsito, ou às florestas, com o intuito de dissuadir e detectar incêndios e baixar a percentagem que tem origem em mão criminosa no encoberto da noite.

Outra questão diz respeito à vigilância marítima, não só no sentido de permitir resgate de embarcações naufragadas mais rapidamente, como também na detecção de tráfico de estupefacientes, um tipo de crime bastante comum na costa portuguesa[2]. Algumas destas aplicações podem ser observadas na Figura 3.24.

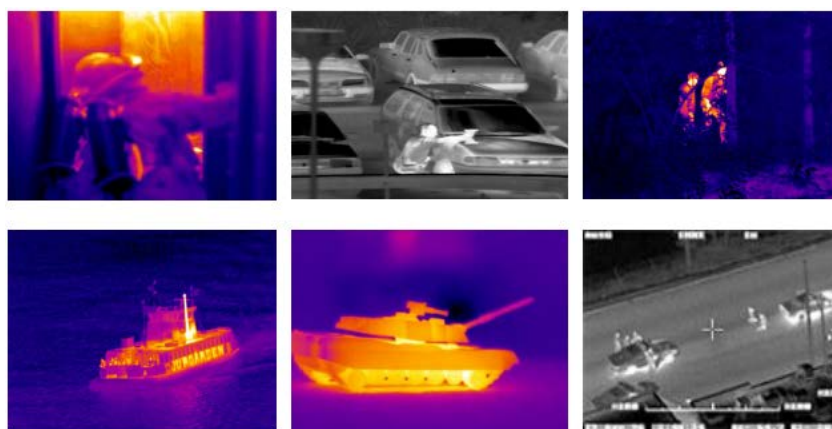


Figura 3.24: Termogramas na Segurança[2]

Também na indústria automóvel, Figura 3.25, a termografia é um forte aliado, no que diz respeito aos estudos de desempenho de alguns componentes fulcrais dos veículos.

É uma técnica frequentemente adoptada na análise das características térmicas dos motores, e dos níveis de temperatura de pneus, faróis e travões.

É igualmente fundamental em sectores um pouco menos abordados, como o controlo de sistemas de descongelação, constituindo, assim, uma mais valia no que refere ao desenvolvimento de novas tecnologias, que melhoram, não só o conforto, como a segurança automóvel[2].

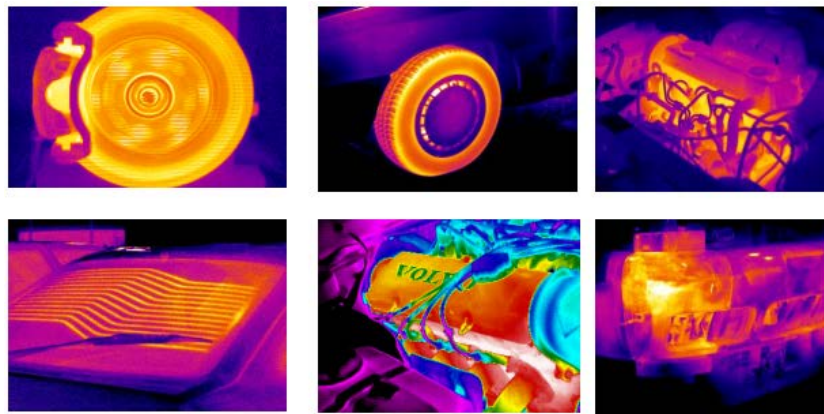


Figura 3.25: Termogramas na Indústria Automóvel[2]

Apresenta-se também como um factor bastante determinante em indústrias que tenham a necessidade de realizar manutenção de fornos, como o caso da metalurgia, Figura 3.26. A técnica tem bastante relevância no estudo da espessura das paredes do refractário, material de revestimento que suporta elevadas temperaturas que na grande maioria são cerâmicas, não desvalorizando a sua aplicação ao nível do controlo de temperatura e localização de fugas[2].

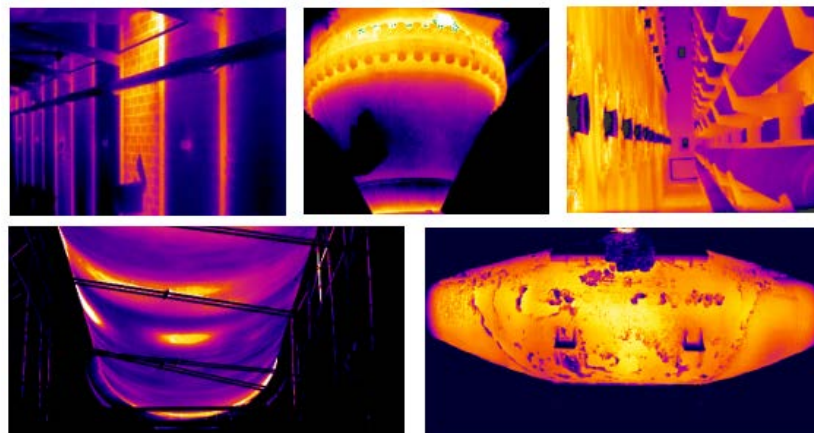


Figura 3.26: Termogramas na Indústria Metalúrgica[2]

Particularmente na siderurgia, ramo da metalurgia dedicado ao fabrico e tratamento do aço, tem um papel mais orientado ao levantamento de perfis térmicos de materiais fundidos durante a solidificação, para além da já referida inspecção dos revestimentos dos fornos[3].

Muitas outras indústrias, Figura 3.27, utilizam a termografia como forma de controlar a qualidade dos seus produtos, não só por análises directas a esses mesmos produtos, mas através da monitorização de processos e ajustes nas máquinas responsáveis por essa produção [2], [31].

Estes controlos permitem, de forma geral, um incremento tanto do nível de qualidade como do nível de produção, reduzindo os desperdícios e possibilitando uma produção mais forte e consistente.

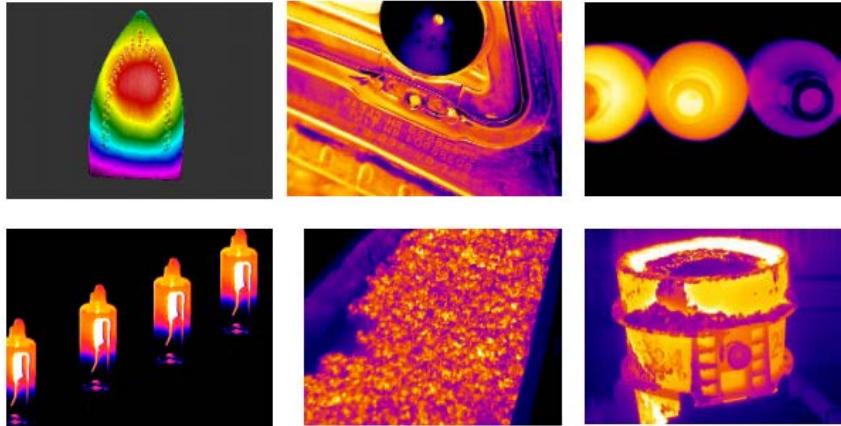


Figura 3.27: Termogramas na Indústria em Geral[2]

3.5 Resumo

Através da leitura deste capítulo, é possível perceber o papel da termografia nos sistemas de energia e máquinas eléctricas. Nesta área, a termografia é utilizada como técnica de manutenção preditiva, no sentido de detectar falhas ou avarias em equipamentos ou máquinas eléctricas, desde que, uma das consequências dessas falhas ou avarias seja a produção de calor. Desta forma permite a detecção de problemas como, conexões frouxas ou sobrecargas, no caso de sistemas de energia, ou eixos desalinhados e problemas de refrigeração no caso de motores e transformares, respectivamente.

Para além disso, viu-se que a termografia apresenta um vasto conjunto de aplicações que vão desde a electrónica à medicina, passando pela construção civil, aeronáutica e indústria em geral. Nesta última, para além da manutenção, pode desempenhar o papel de técnica de controlo de qualidade.

Capítulo 4

Termodinâmica e Transferência de Calor

Este capítulo serve para apresentar um conjunto de resultados, obtidos através do estudo efectuado sobre os modos de transferência de calor, nomeadamente, condução, convecção e radiação. É atribuída maior profundidade ao modo de transferência de calor por radiação, uma vez que, era essencial conhecer alguns dos meandros deste fenómeno para a implementação de métodos matemáticos na aplicação desenvolvida, com o objectivo de estender o horizonte informativo que se poderia alcançar a partir de uma imagem térmica.

É realizada também uma pequena abordagem à termodinâmica, no sentido de expor, as suas principais leis, que são essenciais ao entendimento de processos de transferência de calor.

4.1 Termodinâmica

Apesar de ter sido James Prescott Joule a provar que a energia mecânica poderia ser convertida em energia calorífica, foi James Watt o pioneiro na conversão de calor em energia mecânica, o que lhe permitiu desenvolver o primeiro motor a vapor[32]. Tanto a conversão de calor em trabalho, como qualquer conversão de energia de um determinado tipo para outro, é governado pelas leis da termodinâmica. Deste modo, a termodinâmica assenta em três leis fundamentais chamadas primeira, segunda e terceira leis da termodinâmica[33].

A primeira lei da termodinâmica, fruto da lei da conservação de energia, estabelece que a energia total transferida para um sistema é igual à variação da sua energia interna. No entanto, esta lei pode ser escrita de várias formas consoante o tipo de sistema a que se refere: isolado, fechado ou aberto[34], [33].

No que diz respeito a um sistema isolado, Figura 4.1, não existe qualquer interacção entre o sistema e a sua vizinhança, ou seja, nada entra ou sai do sistema[34]. Este tipo de conceito, pode ser descrito matematicamente através da Equação 4.1.

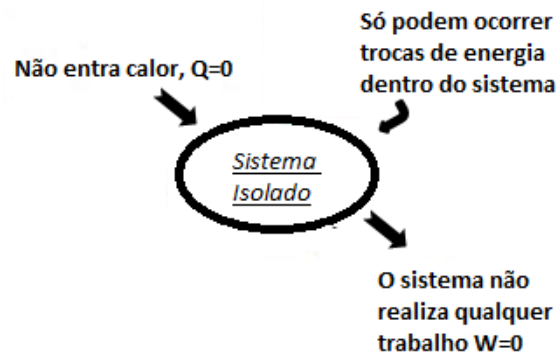


Figura 4.1: Sistema Isolado

$$\Delta U = \Delta E_p + \Delta E_c = 0 \quad (4.1)$$

Em que:

ΔU [J] - Variação da Energia Interna

ΔE_p [J] - Variação da Energia Potencial

ΔE_c [J] - Variação da Energia Cinética

Para um sistema fechado, de massa fixa, Figura 4.2, apenas se verifica troca de calor e trabalho com a vizinhança[34], logo a equação anterior é reformulada para a Equação 4.2.



Figura 4.2: Sistema Fechado

$$\Delta U = \Delta E_p + \Delta E_c = Q - W \quad (4.2)$$

Em que:

Q [J] - Calor (Trocado entre o sistema e o meio)

W [J] - Trabalho (Trocado entre o sistema e o meio)

Para um sistema aberto, Figura 4.3, massa, calor e trabalho podem sair ou entrar no sistema[34]. No caso do volume se manter inalterado, este sistema também pode ser chamado de volume de controlo, apresentando a seguinte Equação 4.3.



Figura 4.3: Volume de Controlo

$$E_{in} + E_g - E_{out} = \Delta E_{st} \quad (4.3)$$

Em que:

E_{in} [J] - Energia que entra no sistema

E_g [J] - Energia gerada no sistema

E_{out} [J] - Energia que sai do sistema

ΔE_{st} [J] - Variação da Energia armazenada no sistema

Um aspecto novo que surge nesta última equação é o termo energia gerada, que pretende identificar a energia que é produzida no interior de um volume de controlo. Esta situação verifica-se, por exemplo, no caso da conversão da energia eléctrica em energia térmica, devido à passagem de corrente numa resistência, onde se poderá afirmar que $E_g = I^2 R$ [34].

De forma mais simples, mas não menos importante, surge a segunda e terceira leis da termodinâmica. A segunda lei estabelece que, o calor flui sempre do corpo a temperatura mais elevada para o de temperatura mais baixa, acrescentando que, para que aconteça o fenómeno inverso, é necessário realizar trabalho sobre o sistema externamente. A terceira lei ou lei zero da termodinâmica define que, se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, então estes também estão em equilíbrio térmico entre si[34].

4.2 Transferência de Calor

A transferência de calor não é mais do que a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Assim, sempre que existe uma diferença de temperatura num determinado meio ocorre uma transferência de calor.

Este processo pode ocorrer através de três modos diferentes, condução, convecção ou radiação, Figura 4.4.

Quando a transferência de calor ocorre num meio estacionário, quer seja sólido ou fluido, é aplicado o termo condução. Por outro lado, quando esta se dá entre uma determinada superfície e um qualquer fluido em movimento, aplica-se o termo convecção. O termo radiação é aplicado quando existe transferência de calor entre duas superfícies por acção da energia emitida através de ondas electromagnéticas, aspecto comum a qualquer corpo que se encontre a uma temperatura diferente de zero[35].

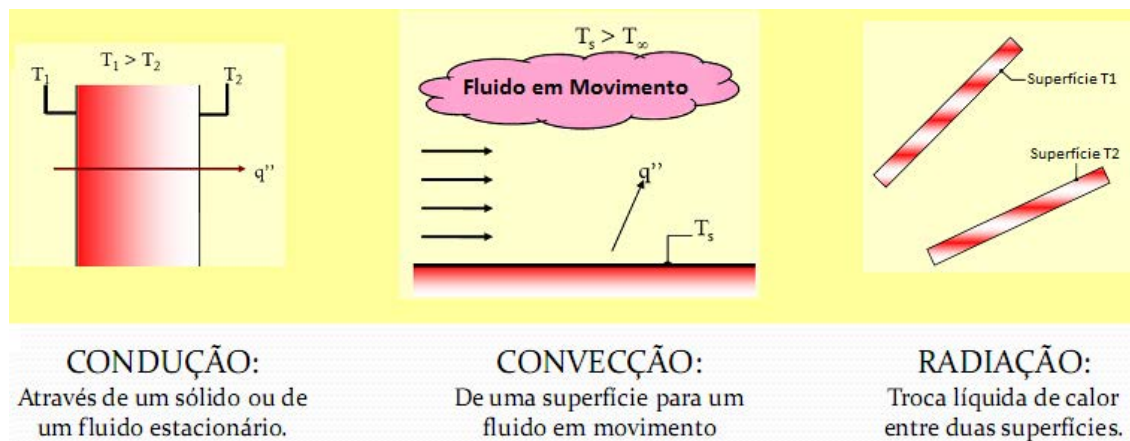


Figura 4.4: Modos de Transferência de Calor[36]

4.3 Condução

Quando se fala de condução, é fundamental recordar alguns conceitos na área atómica e molecular, uma vez que este modo de transferência de energia é um processo que ocorre a esse nível.

O fenómeno pode ser visualizado como uma transferência de energia entre partículas, das mais carregadas para as menos carregadas, fruto da interacção entre elas.

Para que se perceba o modo como se processa este tipo de transferência de energia, basta pensar no caso das partículas de um gás, onde exista um gradiente de temperatura, Figura 4.5.

As moléculas da zona de maior temperatura, ficam energeticamente mais carregadas, este facto faz com que estas adquiram maior vibração e velocidade, provocando um aumento do número de choques entre moléculas.

A consequência deste comportamento molecular desencadeia o processo de transferência de energia das moléculas mais carregadas para as menos carregadas.

Desta forma, ocorre uma transferência de calor por condução no sentido descendente de temperatura, uma vez que, acontecem choques entre moléculas que se encontram acima e abaixo de x_0 , originando o fluxo de calor q_x'' [35].

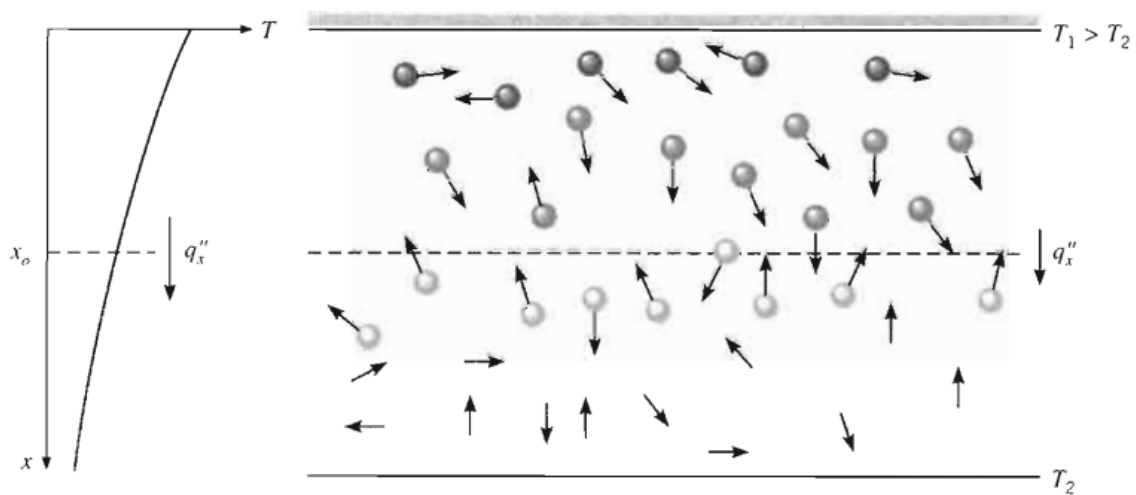


Figura 4.5: Transferência de Calor num Meio Gasoso[35]

No caso dos líquidos, o que acontece é exactamente o mesmo, no entanto, neste caso, a interacção entre moléculas é bastante mais frequente, uma vez que estas se encontram muito mais próximas do que no caso de um gás.

Para os sólidos o tipo de fenómeno que ocorre é similar aos dois referidos anteriores, contudo, existem diferenças que se verificam consoante o material é ou não condutor térmico. Nos materiais não-condutores, a transferência de energia dá-se exclusivamente através de ondas na superfície dos retículos (arranjo tridimensional de pontos ocupados por átomos, iões, moléculas ou grupos destes), enquanto nos materiais condutores, além desse factor, ainda existe o movimento de translação dos electrões, e portanto a transferência de calor é mais rápida.

Este tipo de processo pode ser quantificado através de equações de taxa de transferência de calor, que permite calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo[35], [37].

Para se calcular a energia transferida num processo de condução, recorre-se à conhecida lei de Fourier, que quando aplicada para o caso da Figura 4.6, adquire a forma que se encontra representada na Equação 4.4.

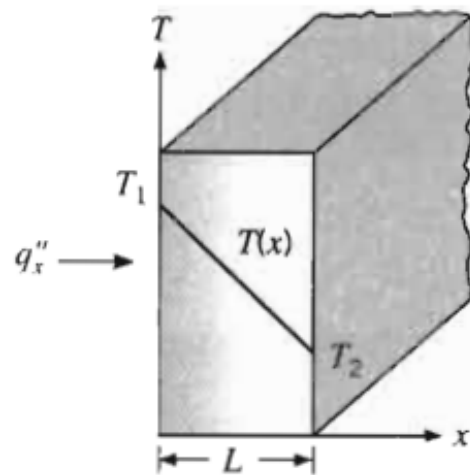


Figura 4.6: Parede Plana[35]

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.4)$$

Em que:

q''_x [W/m²] - Fluxo de Calor por Condução

k [W/m · K] - Condutividade Térmica

$\frac{dT}{dx}$ [K/m] - Gradiente de Temperatura

É de notar um sinal negativo na expressão acima, que é justificado pelo facto da transferência de calor se dar no sentido decrescente da temperatura[37]. Assim, o fluxo de calor representa a taxa de transferência de calor na direcção x por unidade de área perpendicular à direcção de transferência, logo para se saber a taxa de transferência de calor por condução $q_{cond}(W) = q'' A$.

4.4 Convecção

A transferência de calor por convecção pode acontecer por dois mecanismos, o movimento aleatório molecular, também chamado de difusão, ou através do movimento macroscópico do fluido. Este tipo de fenómenos, quando na presença de um gradiente de temperatura, permitem transferências de calor entre moléculas.

Quando se está na presença de um fenómeno de difusão, é comum atribuir-se o nome de convecção, se pelo contrário se está perante um processo de movimento global de um fluido, atribui-se o nome de advecção. Este último é facilmente entendível, pois, é um processo semelhante ao que acontece no transporte de sedimentos no leito de um rio por acção da água. Apesar desta distinção, ambos os processos são globalmente conhecidos apenas por convecção. Assim, a transferência de calor por convecção, Figura 4.7, entre uma superfície e um fluido em movimento, acontece quando estes se encontram a temperaturas diferentes[38], [35].

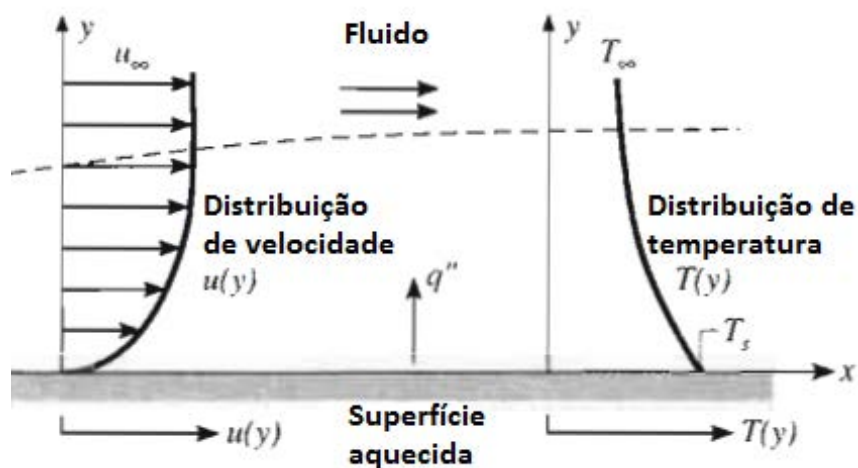


Figura 4.7: Transferência de Calor por Convecção[35]

Na figura acima é visível a interacção entre um fluido e uma superfície aquecida, da qual resulta uma região chamada camada limite de velocidade ou hidrodinâmica, onde a velocidade associada ao fluxo varia, de zero (superfície) até u_{∞} . Para além disso, havendo uma diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, existirá uma região desse mesmo fluido onde a temperatura irá variar entre a temperatura da superfície T_s e uma temperatura T_{∞} , formado uma nova camada. Esta nova camada, nomeada de camada limite térmica, pode ser maior, menor ou igual à camada de velocidade, sendo que sempre que $T_s > T_{\infty}$ ocorre transferência de calor por convecção entre o fluido e a superfície, de acordo com a 2ª lei da termodinâmica. Assim, pode falar-se na existência de duas camadas limite, uma limitada pela velocidade outra limitada pela temperatura.

Fazendo um paralelismo com a difusão e movimento global do fluido, conota-se que o primeiro ocorre ao nível da superfície ($y = 0$) pois é uma região onde a velocidade do fluido é baixa, ao contrário da segunda que se faz sentir através do aumento da espessura da camada limite térmica, à medida que o escoamento se vai efectuar no sentido de x , fazendo com que o calor no interior dessa camada seja "arrastado" e mesmo transferido para o fluido fora da camada limite[35], [39].

A convecção pode ser um processo natural, quando ocorre espontaneamente, ou forçado caso seja provocado propositadamente por meios externos[38].

A convecção natural, ocorre por diferenças de densidade devido às variações de temperatura no fluido[38].

Um exemplo deste tipo de processo está na Figura 4.8, onde se observa um caso de convecção livre de um conjunto de placas expostas ao ar. Neste caso, quando o ar entra em contacto com as placas, experimenta um aumento de temperatura, o que implica uma redução da sua densidade, tornando-o mais leve que o ar circundante. Este facto induz um fluxo vertical do ar quente, que é logo substituído por ar circundante, mais frio, num processo contínuo[35], [38].

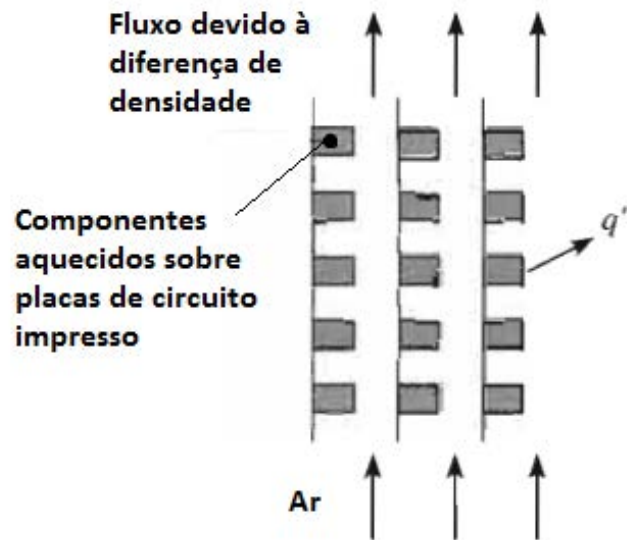


Figura 4.8: Convecção Natural[35]

A convecção forçada, Figura 4.9, acontece quando o escoamento ocorre devido a agentes externos como ventiladores, bombas ou mesmo ventos atmosféricos[39].

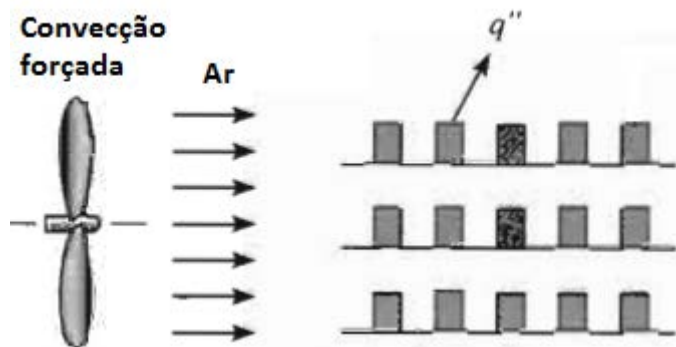


Figura 4.9: Convecção Forçada[35]

Embora exista esta distinção, não é imperativo que, quando se tenha convecção forçada, não exista convecção natural ou vice-versa. Isto acontece porque pode haver situações em que exista um misto das duas formas, bastando para isso que, por exemplo, no caso da figura da convecção natural, existisse um ventilador que fosse utilizado para forçar a subida do ar, auxiliando desta forma o movimento de ar devido à diferença de densidade[35], [39].

Desta forma pode-se descrever a transferência de calor por convecção, como uma troca de energia no interior de um fluido, provocado por uma combinação entre a condução e o movimento global do fluido.

No entanto, ainda existem mais dois casos de convecção que envolvem a troca de calor latente, que é associada à mudança entre o estado líquido e gasoso do fluido.

Estes casos são a ebulição, que pode resultar do movimento do fluido, provocado pela movimentação das bolhas de vapor que se formam no fundo de uma panela com água em ebulição, Figura 4.10, e a condensação, que pode resultar da condensação de vapor de água na superfície externa de um tubo onde passa água fria[35], Figura 4.11.

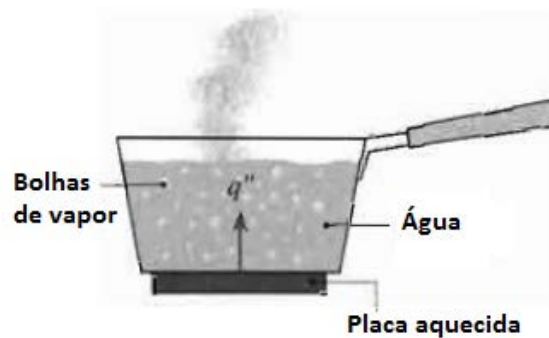


Figura 4.10: Ebulição[35]

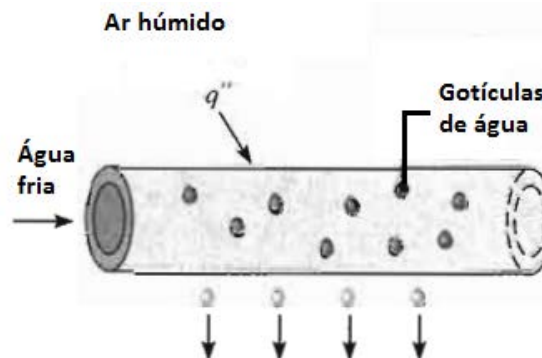


Figura 4.11: Condensação[35]

Uma nota importante reside no tipo de movimento do fluido, pois este pode apresentar um fluxo ou escoamento que pode ser laminar ou turbulento.

Um escoamento laminar ocorre geralmente a baixas velocidades e em fluidos com elevada viscosidade, sendo caracterizado pelo movimento de partículas em trajetórias bem definidas. Ao invés, o escoamento turbulento é caracterizado pelo movimento irregular das suas partículas e ocorre principalmente em fluidos onde a viscosidade é relativamente baixa, como o caso da água[38], [39], Figura 4.12.

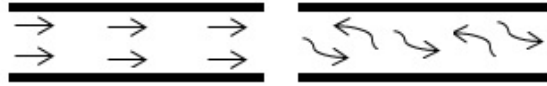


Figura 4.12: Escoamento Laminar e Turbulento

O fluxo de calor por convecção, também pode ser determinado, à imagem do que acontece com a condução. No entanto, para este caso, a forma de se quantificar este fluxo é através da aplicação da Equação 4.5, que é mais vulgarmente conhecida como a lei do arrefecimento de Newton[35].

$$q''_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (4.5)$$

Em que:

q''_{conv} [W/m^2] - Fluxo de Calor por Convecção

h [$W/m^2 \cdot K$] - Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

T_s [K] - Temperatura da Superfície

T_∞ [K] - Temperatura do Meio Circundante

Por fim, é de assinalar uma extrema importância, no que refere ao coeficiente de transferência de calor por convecção pois este depende das condições da camada limite, que por sua vez, depende da natureza do movimento do fluido, da geometria da superfície e de um conjunto de propriedades termodinâmicas e de transporte fundamentais a um bom processo de cálculo[35].

4.5 Radiação

A radiação térmica, já abordada anteriormente de forma introdutória, reaparece neste ponto, de modo a realizar a sua integração nos processos de transferência de calor, com o intuito de se perceber, de forma mais detalhada, o seu papel nesta área, factor fundamental ao trabalho em questão.

Relembrando um conjunto de ideias importantes para a sistematização do assunto, sabe-se que a radiação térmica é a energia emitida por qualquer corpo com temperatura diferente de zero, e que esta não necessita de meio para se propagar. Também já se fez referência à lei de Stefan-Boltzmann, que define o poder emissivo de um corpo negro (corpo ideal), permitindo saber a taxa pela qual a energia é libertada por unidade de área.

Esta equação também é aplicável para um corpo real, quando multiplicado por um factor chamado emissividade, característica intrínseca ao material em causa.

Apesar do que já foi referido acerca da radiação, é fundamental referir que esta, para além de emitida também pode ser incidente numa determinada superfície, fruto da emissão de uma qualquer fonte, chamando-se neste caso de irradiação G , como se verifica na Figura 4.13.

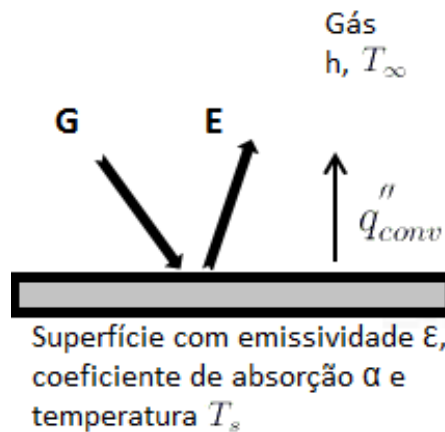


Figura 4.13: Transferência de Calor por Radiação

Por observação da figura acima, e por intuição, sabe-se que, no geral, uma superfície que esteja sob a influência de uma irradiação tem tendência para aquecer[37]. Este facto deve-se à radiação absorvida pela superfície, que faz com que o material aumente a sua energia térmica, numa proporção que é dada pela Equação 4.6.

$$G_{abs} = \alpha G \quad (4.6)$$

Em que:

G [W/m^2] - Irradiação

α - Coeficiente de Absorção

É de realçar o facto de, na Figura 4.13, para além da irradiação e do poder emissivo, estar presente o fluxo de calor por convecção, uma vez que tanto a radiação como a convecção são fenómenos de superfície, ao contrário do que acontece com a condução. Outro pormenor bastante relevante a considerar é o facto de o coeficiente de absorção não depender apenas do material, como o caso da emissividade, mas também da natureza da irradiação[37]. Em grande parte dos problemas, para o cálculo da radiação de uma dada superfície, são realizadas aproximações, de forma a facilitar processos.

Exemplo desse tipo de procedimento é o cálculo do fluxo de radiação de uma dada superfície, considerando-a como uma superfície cinzenta, difusa, e que esta se encontra sob influência de uma superfície isotérmica muito maior, que apresenta as características de um corpo negro, Figura 4.14.

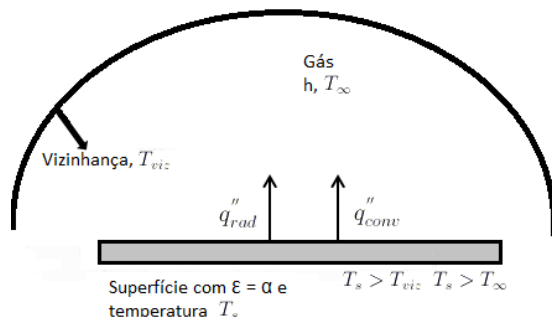


Figura 4.14: Transferência de Calor por Radiação entre uma Superfície e a sua Vizinhança

Neste tipo de aproximação, $\alpha = \epsilon$, característica de um corpo cinzento. Além disso a vizinhança é considerada como um corpo negro, o que indica que a irradiação que atinge a superfície em estudo, é igual à emitida por um corpo desse género[37], surgindo a Equação 4.7 e a Equação 4.8.

$$G = \sigma T_{viz}^4 \quad (4.7)$$

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = \epsilon E_b(T_s) - \alpha G = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (4.8)$$

Em que:

σ [$W/m^2 \cdot K^4$] - Constante de Stefan-Boltzmann

E_b [W/m^2] - Poder Emissivo de um Corpo Negro

q''_{rad} [W/m^2] - Fluxo de Calor por Radiação

ϵ - Emissividade

T_s [K] - Temperatura da Superfície

T_{viz} [K] - Temperatura da Vizinhança

$A [m^2]$ - Área da Superfície

Apesar de se conseguir calcular o fluxo de calor por radiação, este não chega para definir o fluxo total de calor transferido q_t'' a partir da superfície, pois ainda existe a componente do fluxo de calor por convecção. Neste caso, a forma de obter esse valor, é através da Equação 4.5 e da primeira lei da termodinâmica, segundo a Equação 4.9

$$q_t'' = q_{conv}'' + q_{rad}'' \quad (4.9)$$

4.5.1 Lei de Kirchhoff

A aproximação anterior de $\alpha = \varepsilon$, pode ser explicada através da lei de Kirchhoff e do conceito de troca de radiação num invólucro isotérmico, Figura 4.15.

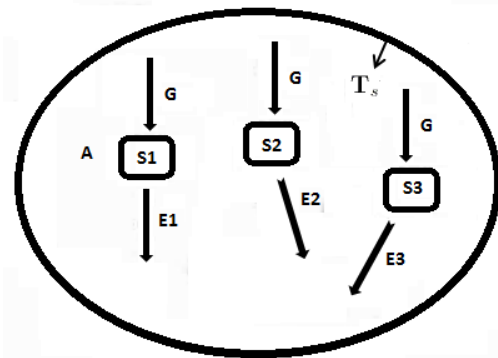


Figura 4.15: Invólucro Isotérmico

Qualquer superfície que se encontre neste invólucro, irá receber radiação igual à emitida por um corpo negro, ou seja, $G = E_b(T_s)$. Como, em regime permanente, a temperatura de todas as superfícies no invólucro será a mesma e igual a T_s , então a taxa de transferência de energia para cada superfície deve ser nula [35], [37], o que resulta na Equação 4.10.

$$\alpha GA - E(T_s)A = 0 \Rightarrow \alpha = \varepsilon \quad (4.10)$$

Pois:

$$\alpha GA - E(T_s)A = 0 \Leftrightarrow \alpha E_b(T_s)A - E(T_s)A = 0$$

$$\Leftrightarrow \alpha \sigma T_s^4 A - \varepsilon \sigma T_s^4 A = 0 \Rightarrow \alpha = \varepsilon$$

4.5.2 Corpo Cinzento

Um corpo cinzento é uma aproximação que permite calcular a quantidade de energia que um corpo real emite, Figura 4.16. Na verdade, um corpo real apresenta valores de emissividade que são variáveis com o comprimento de onda e inferiores aos de um corpo negro. No entanto, quando se pretende calcular a quantidade de energia que um corpo real emite, não há grande interesse em determinar esse valor para um determinado comprimento de onda, salvo alguma exceção, uma vez que, o mais habitual, é haver necessidade de se determinar o total de emissão desse mesmo corpo[38], [35].

Assim, aproximando uma determinada superfície real de uma superfície cinzenta, está-se a retirar a dependência que a emissividade dessa superfície real tem do comprimento de onda, logo pode-se afirmar, segundo Kirchoff, que $\alpha = \varepsilon$.

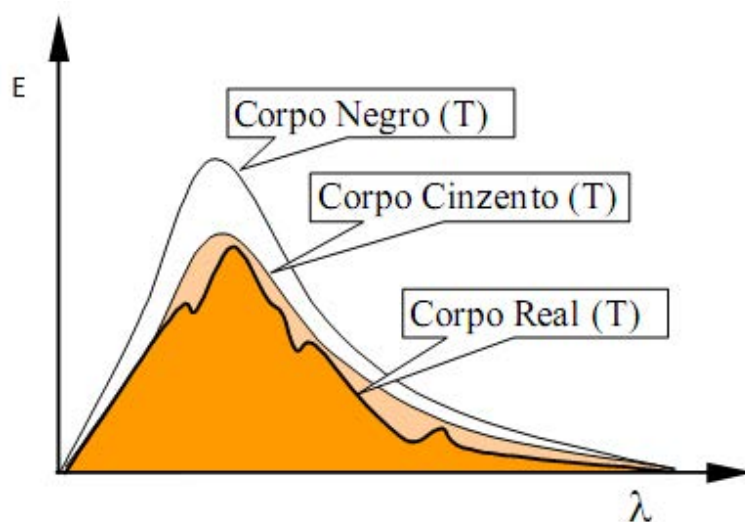


Figura 4.16: Relação entre os Corpos: Negro, Cinzento e Real[40]

4.5.3 Emissão, Absorção e Transmissão

Uma questão bastante importante, e já referida anteriormente, diz respeito aos coeficientes de absorção, emissão e reflexão. Aqui, o assunto reaparece de forma a realizar a sua integração com a irradiação, pois existe uma interdependência.

Como se pode observar na Figura 4.17, a energia recebida por um dado corpo ou irradiação, apresenta uma componente absorvida, devido ao coeficiente de absorção α , e uma componente transmitida, devido ao coeficiente de transmissão τ .

Para além disso, verifica-se a existência de uma fracção da irradiação que é reflectida devido ao coeficiente de reflexão ρ . Esta reflexão é dependente da direcção da radiação incidente e reflectida[35].

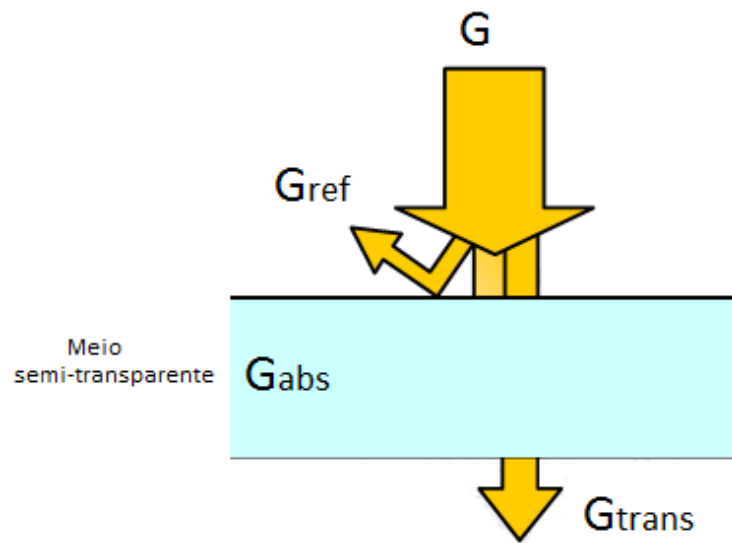


Figura 4.17: Meio semi-transparente exposto à irradiação[40]

Este aspecto permite definir o tipo de reflexão que pode ser difusa, caso a intensidade da radiação reflectida seja independente do ângulo de reflexão, qualquer que seja a direcção da radiação incidente, ou especular se essa dependência se verificar[35], Figura 4.18.



Figura 4.18: Reflexão Difusa e Especular[35]

Deste modo, de forma geral a irradiação pode ser calculada pela Equação 4.11.

$$G = G\alpha + G\tau + G\rho \Rightarrow \alpha + \tau + \rho = 1 \quad (4.11)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} ; \rho = \frac{G_{ref}}{G} ; \tau = \frac{G_{trans}}{G}$$

Assim, é possível afirmar que uma superfície opaca apresenta $\tau = 0$ e uma superfície translúcida $\tau \neq 0$.

4.5.4 Intensidade da Radiação

Como já foi referido a radiação emitida por uma dada superfície propaga-se em todas as direcções possíveis. De igual modo, a radiação incidente numa determinada superfície pode ser proveniente de diferentes direcções, o que influencia a maneira como a superfície se comporta perante essas radiações. Como se pode observar pela Figura 4.19, a direcção da radiação pode ser obtida através dos ângulos θ e ϕ em coordenadas esféricas. O ângulo sólido $d\omega$ está subentendido por uma superfície diferencial dA_n onde a radiação passa, e pode ser calculado pela Equação 4.12, onde r representa a distância entre a superfície emissora e a receptora[35], [38].

Assim, a intensidade de radiação permite determinar a quantidade de radiação que está a ser emitida numa dada direcção, Figura 4.19.

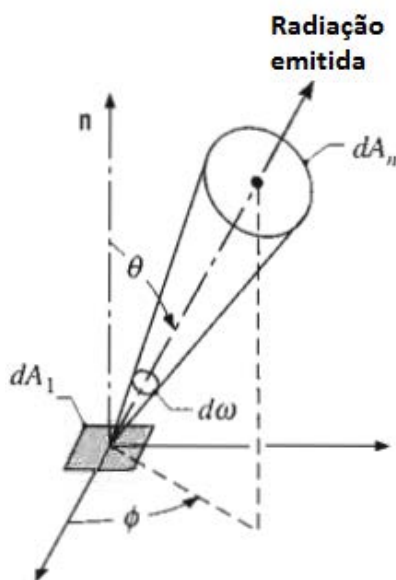


Figura 4.19: Emissão de radiação de dA_1 numa determinada direcção[35]

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} \quad (4.12)$$

Em que:

$d\omega$ [sr] (esterradiano) - Ângulo Sólido Diferencial

dA_n [m^2] - Superfície Diferencial

r [m] - Raio da Esfera (distância)

Deste modo, a taxa pela qual a radiação de comprimento de onda λ deixa dA_1 e passa através de dA_n pode ser calculada pela Equação 4.13.

$$dq_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos\theta dw \quad (4.13)$$

Em que:

$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi)$ [$W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$] - Intensidade Espectral

Em grande parte das aplicações é possível realizar aproximações, tal como efectuado anteriormente, de modo a facilitar os processos de cálculo[35], [38]. Assim, tomando a superfície emissora como difusa, a intensidade da radiação deixa de depender da direcção e pode ser calculada pela Equação 4.14.

$$E = I\pi \quad (4.14)$$

Em que:

I [$W/m^2 \cdot sr$] - Intensidade de Radiação Total

E [W/m^2] - Poder Emissivo

Um factor importante a referir é que a área usada para definir a intensidade de radiação é uma componente de dA_1 que é perpendicular à direcção de radiação, o que significa que corresponde a $dA_1 \cos(\theta)$, Figura 4.20.

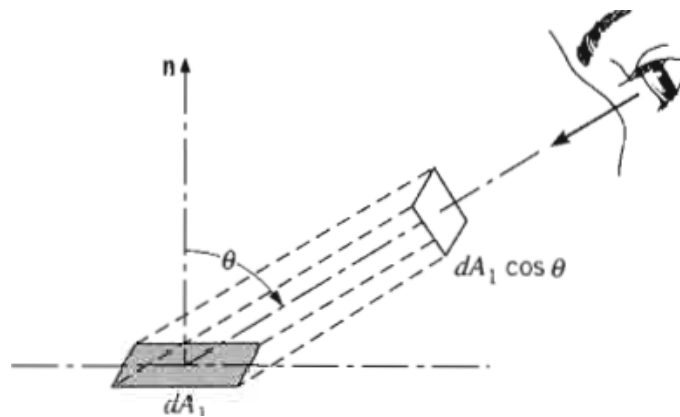


Figura 4.20: Projecção de dA_1 normal à direcção de propagação[35]

4.5.5 Troca de Radiação entre Superfícies

Até este ponto o estudo da radiação tem apenas considerado superfícies isoladas, no entanto é importante verificar o que acontece quando existe troca de radiação entre superfícies. Para esta análise é assumido um conjunto de considerações, de forma a simplificar os procedimentos de cálculo. Deste modo, é assumido que as superfícies são opacas difusas e cinzentas, estão separadas por um meio não-participante, ou seja, um meio que não tem qualquer interferência no processo de troca de energia, a reflexão é difusa, radiosidade e a irradiação são uniformes, e cada superfície é isotérmica[40].

De realçar, que radiosidade, Figura 4.21, representa a totalidade da energia que sai de uma superfície: a emitida mais a reflectida.

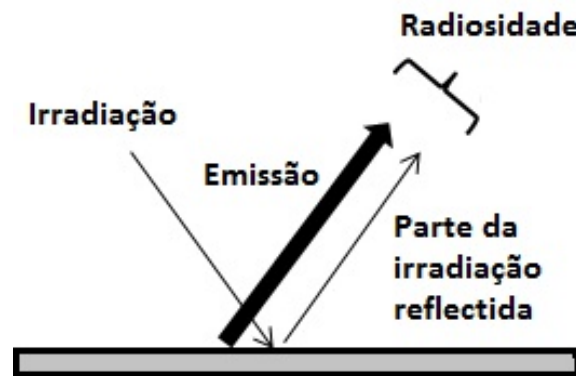


Figura 4.21: Radiosidade

A taxa líquida na qual a radiação deixa uma superfície i representa a taxa de energia que teria de ser fornecida a essa mesma superfície de modo a manter a sua temperatura constante. Esta taxa consiste na diferença entre a radiosidade e a irradiação da superfície[40], Equação 4.15.

$$q_i = A_i(J_i - G_i) \quad (4.15)$$

Em que:

q_i [W] - Taxa líquida na qual a radiação deixa a superfície i

Das definições de radiosidade e de superfície opaca, difusa e cinzenta chega-se à taxa líquida de transferência de calor por radiação de uma superfície, Equação 4.16

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i)/\epsilon_i A_i} \quad (4.16)$$

Para o cálculo da troca de radiação entre duas ou mais superfícies, é necessário introduzir o conceito de factor de forma F_{ji} , que define a fracção de radiação que sai de j e intercepta i . Assim, a partir de um conjunto de deduções, obtidas a partir do factor de forma [35], [38], chega-se à Equação 4.17.

$$\frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i A_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (4.17)$$

O factor de forma, é um componente essencial neste tipo de cálculo, uma vez que, este, é dependente da posição relativa das superfícies e, portanto, é puramente geométrico [38].

Este factor pode ser calculado pela Equação 4.18, e apresenta importantes relações que facilitam, em muitos casos, a sua determinação para além de fornecerem mecanismos necessários para se chegar à Equação 4.17 .

Estas relações são a reciprocidade, Equação 4.19, e a regra do somatório, Equação 4.20.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (4.18)$$

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (4.19)$$

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (4.20)$$

Apesar da relativa complexidade que a forma geral de cálculo do factor de forma apresenta, para muitas situações este cálculo é quase imediato.

Contudo os resultados para as superfícies mais comuns encontram-se tabelados, como demonstra a Figura 4.22, onde se encontram os factores de forma para algumas geometrias tridimensionais.


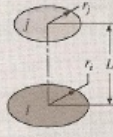
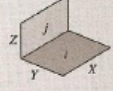
GEOMETRIA	RELAÇÃO
Retângulo Alinhados Paralelos (Fig. 13.4) 	$\bar{X} = X/L, \bar{Y} = Y/L$ $F_{ij} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$
Discos Paralelos Coaxiais (Fig. 13.5) 	$R_1 = r_1/L, R_2 = r_2/L$ $S = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}$ $F_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ S - [S^2 - 4(R_1/R_2)^2]^{1/2} \right\}$
Retângulos Perpendiculares com um Vértice Comum (Fig. 13.6) 	$H = Z/X, W = Y/X$ $F_{ij} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} + \frac{1}{4} \ln \left[\frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \right] \frac{W^6(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right) \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{W^6}$

Figura 4.22: Factores de Forma de Superfícies Tridimensionais[35]

4.6 Resumo

Este capítulo permitiu perceber que os fenómenos responsáveis pela transferência de calor são a condução, convecção e radiação, sendo que, para os compreender é necessário entender alguns conceitos de termodinâmica. Assim, a condução é um processo de transferência de calor que envolve a interacção entre partículas de um determinado corpo ou fluido, existindo algumas variações na forma como se processa consoante o estado em que se processa.

A convecção envolve processos de difusão e movimento global de um fluido em relação a um determinado corpo que pode ser laminar ou turbulento, por processos naturais, forçados ou mistos. O factor mais importante na sua quantificação é o coeficiente de transferência de calor por convecção, uma vez que, este depende de um conjunto de propriedades termodinâmicas e de transporte que definem o tipo de situação a analisar.

No que refere à radiação, a transferência de calor acontece através da emissão de ondas electromagnéticas, e a sua quantificação depende da emissividade da superfície a analisar e do meio envolvente. De forma a simplificar o cálculo da radiação emitida por um determinado corpo, existe um conjunto de aproximações que podem ser levadas em conta, tais como: corpo cinzento, opaco, ambiente envolvente equiparado a um corpo negro através da aplicação da lei de Kirchhoff e emissão difusa. Define também a irradiação como sendo a quantidade de radiação que atinge uma determinada superfície e que esta pode ser absorvida, reflectida, ou transmitida.

Por fim, são abordados outros assuntos do mesmo tema, como a intensidade de radiação, que permite determinar a quantidade de radiação emitida numa dada direcção, a troca de radiação entre superfícies, e os conceitos inerentes de factor de forma e radiosidade.

Capítulo 5

Aplicação Informática Desenvolvida

O capítulo que se segue apresenta, de forma detalhada, todo o procedimento seguido na elaboração da aplicação informática que foi desenvolvida. Neste contexto, apresentam-se os requisitos que conduziram à linguagem de programação e ferramentas utilizadas, bem como, a metodologia de desenvolvimento, não desvalorizando, algumas questões de processamento.

5.1 Requisitos

Para a elaboração da aplicação informática, era exigido um conjunto de requisitos base, que visavam, fundamentalmente, estender as funcionalidades da aplicação "QuickReport" da empresa FLIR, no que se refere à análise de dados provenientes de imagens termográficas obtidas com equipamento da mesma marca.

A aplicação da FLIR, sendo de distribuição livre, apresenta aspectos inerentes a essa condição, ou seja, contém funcionalidades bastante escassas para a análise de imagens térmicas. Para se obter mais informação é necessário adquirir versões superiores, que, obviamente, deixam de ser livres e, como tal, implicam custos. Na análise desta aplicação, verifica-se a existência de um conjunto de funcionalidades centrais, que, fundamentalmente, são: a análise de imagens térmicas, a obtenção de padrões de temperatura totais ou parciais dessas mesmas imagens e a criação automática de relatórios em formato (PDF).

Uma das falhas importantes neste sistema é o facto de não permitir criar um perfil gráfico de temperatura, que ilustre de forma mais intuitiva o modo como esta varia ao longo da zona analisada. Outra questão bastante relevante reside no facto de não facultar ao utilizador uma forma de optar pelo formato de relatório desejado ou personalizar este tipo de documento, conforme as suas pretensões. Neste contexto, a aplicação a desenvolver teria de se revelar como uma mais-valia na análise de dados provenientes de imagens térmicas, ou seja, teria de acrescentar algo mais às funcionalidades já existentes.

Para responder ao problema, era fundamental que esta funcionasse em consonância com a já existente, de modo a alargar o horizonte de informação que poderia ser obtida.

Deste modo, era necessário colmatar a questão gráfica, documental e informativa, sendo que, esta última exigiria um estudo, prévio, acerca de termodinâmica e transferência de calor de forma a extrair mais informação de uma imagem térmica.

5.2 Metodologia de Desenvolvimento

Para o desenvolvimento da aplicação de uma forma segura e estruturada, era necessário estar ciente dos requisitos que esta deveria respeitar, de forma a estabelecer uma sequência hierárquica de tarefas a realizar.

A primeira tarefa, talvez a mais importante de todo este processo, residiu na escolha da ferramenta e da linguagem de programação a utilizar. Uma vez que este aspecto não fazia parte dos requisitos, sendo deixado ao critério do autor, tornou-se fulcral efectuar uma escolha acertada logo à partida, de modo a evitar futuras complicações, no que refere à possibilidade da ferramenta implementar as funcionalidades necessárias, pois, em caso negativo, o projecto poderia ficar inviabilizado por questões temporais. Após uma análise da relação funcionalidades a implementar/potencialidades de algumas aplicações e linguagens de programação, chegou-se à conclusão que o MATLAB respondia bastante bem ao tipo de funcionalidades a implementar, nomeadamente no que refere à criação e manipulação de gráficos, ao tratamento de dados e ao desenvolvimento de relatórios, uma vez que apresenta mecanismos de interacção com editores de texto relativamente simplificados. Neste ponto, as duas únicas questões que ainda estavam pendentes, era o facto de o MATLAB ser uma ferramenta paga e o desconhecimento em relação à sua permissão para criar aplicações independentes. O primeiro problema foi resolvido, pelo facto da FEUP disponibilizar o MATLAB no seu servidor de aplicações APPS, enquanto o segundo se solucionou quando se descobriu o GUI, uma ferramenta do MATLAB que permite criar interfaces gráficas e torná-las independentes.

Reunidas as condições necessárias, iniciou-se a elaboração da aplicação, embora, numa fase inicial, este processo se restringisse a aprendizagem, pois a ferramenta utilizada era praticamente desconhecida. Após o período de adaptação, que se revelou quase contínuo, começou por se implementar separadores, de forma a dividir a aplicação por secções consoante a sua função. Deste modo, como as funcionalidades mais gerais eram conhecidas, criaram-se três separadores, um para a elaboração e manipulação de gráficos, outro para a obtenção de informação, que nesta altura ainda criava bastantes interrogações relativamente aos meios para a sua obtenção, e um terceiro que seria especialmente vocacionado para o desenvolvimento de relatórios. Seguidamente procedeu-se ao desenvolvimento do separador para a criação e manipulação de gráficos, através de dados numéricos importados a partir do Microsoft Excel, pois, este formato de ficheiro revelou ser o elo de ligação entre a nova aplicação e a aplicação FLIR, uma vez que, esta última, revelou permitir a exportação de ficheiros no formato (xlsx), com as temperaturas referentes a cada píxel

de uma imagem térmica. Além disso, ainda era permitido que essa exportação fosse específica de uma determinada zona ou linha, desenhada pelo utilizador em cima da imagem térmica.

Mais tarde, procedeu-se à primeira análise de dados provenientes nos ficheiros (xlsx) de forma a obter os valores referentes à média, mínimo e máximo do conjunto de dados importados. Posteriormente, iniciou-se o desenvolvimento de uma forma de tornar os gráficos mais intuitivos, estudando e implementando uma configuração que permitisse ao utilizador alterar o formato de gráfico de acordo com as suas pretensões. Além disso, foi criada uma barra de ferramentas, com algumas funções de manipulação gráfica, nomeadamente ampliação, rotação, arrastamento e pesquisa ponto a ponto.

Concluída esta primeira fase referente à importação e manipulação de gráficos e dados, passou-se ao desenvolvimento do menu principal, bem como ao melhoramento de todo o separador, desenvolvendo um conjunto de funcionalidades que enriquecessem e expandissem as já existentes, caso da procura de valores de forma individual, da capacidade de sobrepor gráficos de modo a estabelecer comparações e da possibilidade de escolha entre duas áreas de gráfico e todas as funcionalidades inerentes a um processo de interacção do género, principalmente no que refere a questões de memória.

Terminado o primeiro separador, iniciou-se a concepção do separador que disponibilizaria a informação a obter a partir dos dados importados. A questão fundamental neste ponto era descobrir que tipo de informação se poderia obter a partir dos dados importados, bem como, a forma como estes seriam obtidos, revelando-se inevitável a realização de um estudo acerca de termodinâmica e transferência de calor. Após este estudo, procedeu-se à sua implementação, de forma faseada. Numa primeira abordagem criaram-se procedimentos de cálculo individuais para cada grandeza; numa segunda fase efectuou-se a integração destes cálculos com a criação de gráficos, de forma a desenvolver um fluxo de informação que permitisse ao utilizador, após a importação de dados e o fornecimento de alguns parâmetros inerentes a esses mesmos dados, obter toda a informação disponível.

Para o desenvolvimento do terceiro separador, referente à elaboração do relatório, fez-se uma pesquisa acerca de todas as funcionalidades do MATLAB nesse campo. Desta forma, optou-se por duas vias, uma que passa pela publicação de um relatório a partir de um ficheiro de código MATLAB preconcebido, permitindo ao utilizador escolher a imagem, o gráfico e a informação analítica a inserir, não esquecendo a possibilidade de este relatório poder ser criado em formato (HTML), (PDF), (docx) (Microsoft Word) ou (ppt) (Microsoft PowerPoint). A segunda via passa pela exportação de uma imagem, de um gráfico e da informação analítica para um novo ficheiro (docx), e pela abertura de um template preconcebido em Microsoft Word.

Mais tarde, foram criados os ficheiros de ajuda, um para cada separador, de forma a tornar a interface mais amigável, facilitando a utilização da aplicação ou explicando a forma como a informação é obtida no caso do separador para esse efeito. Para finalizar, tentou-se dar um ar mais atractivo e entusiasmante à aplicação para que a sua utilização não se torne pesada e desinteressante.

A última tarefa passou por tornar a aplicação criada independente do MATLAB, ou seja, fazer com que o seu uso fosse possível sem ser necessário a instalação do próprio MATLAB, não desprezando, a inclusão da aplicação FLIR nesse mesmo ficheiro. Todo este procedimento foi efectuado tendo em vista uma futura ampliação, ou seja, foram utilizados processos que não fecham a aplicação em relação à implementação de melhorias ou novas funcionalidades.

5.3 Modo de Funcionamento

A pasta da aplicação desenvolvida contém o ficheiro "TabPanel.m" onde se encontra o código central do programa, o ficheiro "TabPanel.fig" onde se encontra todo ambiente gráfico, o ficheiro "RelatorioTermografico.m" responsável pela elaboração de relatórios nos quatro formatos referidos anteriormente, três ficheiros de ajuda em formato (PDF), um por cada separador, um template em Microsoft Word para a elaboração de relatórios mais personalizáveis, a pasta da aplicação FLIR, para que esta esteja acessível na nova aplicação, e a pasta "ADT", que contém a pasta "distrib", onde se encontra um executável que permite correr a nova aplicação de forma independente do MATLAB. É importante referir, que ADT foi o nome atribuído à aplicação e ao executável, que significa Análise de Dados Termográficos.

Como já foi abordado, esta aplicação pode ser executada isoladamente, a partir de um ficheiro executável, ou através do MATLAB. Para esta segunda opção, após a selecção da pasta que contém a aplicação, é possível proceder à sua execução de duas formas, nomeadamente através da digitalização do comando 'TabPanel', na linha de comandos do próprio MATLAB, ou clicando com o rato no ficheiro "TabPanel.m" e pressionando a tecla 'F9', do teclado.

5.3.1 Separador Gerar Gráfico

Após a execução da aplicação, o primeiro separador que surge é o "Gerar Gráfico", que apresenta o aspecto da Figura 5.1.



Figura 5.1: Separador Gerar Gráfico

Neste separador, nota-se que a zona de maior relevo é precisamente a "Área de Gráfico", Figura 5.2, uma vez que esta é uma funcionalidade central. Observando melhor a figura, conota-se que esta zona apresenta duas áreas de gráfico, a superior e a inferior. Aqui é possível gerar gráficos, tanto numa como noutra área, permitindo estabelecer comparações e análises visuais dos dados em estudo, sendo que, o eixo dos x corresponde aos pixéis e o eixo do y às temperaturas em graus Celsius.

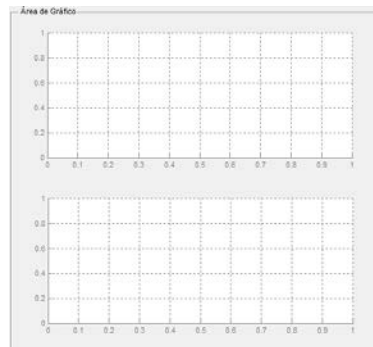


Figura 5.2: Área de Gráfico

A zona responsável pela selecção das áreas de gráfico chama-se "Escolha Área de Gráfico", Figura 5.3, e permite escolher entre a "Área de gráfico 1", correspondente à superior, e a "Área de Gráfico 2" correspondente à inferior.

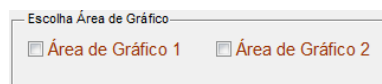


Figura 5.3: Escolha Área de Gráfico

A zona seguinte diz respeito ao menu principal do separador em causa, Figura 5.4, que apresenta um conjunto de cinco botões, que possibilitam a realização das funcionalidades mais importantes à aplicação, permitindo ao utilizador usufruir destes, de uma forma simples e intuitiva.



Figura 5.4: Menu Principal

Observando a figura anterior por ordem ascendente, começa por se encontrar o botão "Sair", que, tal como o nome refere, permite sair da aplicação, de forma segura, pois surge uma janela que questiona o utilizador se este pretende realmente sair. O botão seguinte, de nome "FLIR", permite a abertura da aplicação "QuickReport" da FLIR, que tem a aparência da Figura 5.5.

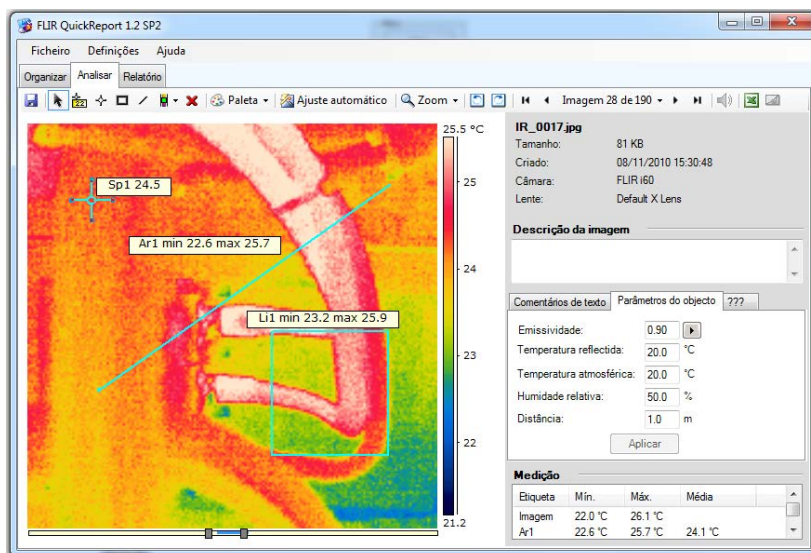


Figura 5.5: Separador Análise do QuickReport da FLIR

Na figura anterior, apenas é ilustrado o separador "Análise", pois é o mais relevante para o caso. Aqui, há possibilidade de criar secções, linhas ou pontos de determinadas zonas da imagem, para além de outras funcionalidades inerentes à análise de imagens como é a variação de contraste. Posteriormente, há possibilidade de exportar para Microsoft Excel cada uma dessas medições individualmente, ou mesmo a totalidade da imagem. Estes ficheiros exportados apresentam a temperatura em graus Celsius de cada píxel da medição efectuada ou da imagem, consoante o pretendido. A exportação é efectuada através de um botão no canto superior direito da imagem acima, que apresenta o símbolo do Microsoft Excel.

Continuando a subir na Figura 5.4, aparece o botão "Imagem", que possibilita a abertura de uma imagem numa nova janela, com algumas funcionalidades da ferramenta Imtool do MATLAB, com o intuito de se visualizar a imagem térmica ou zona de imagem térmica que corresponde aos dados analisados graficamente, de forma a estabelecer ligação entre os dois tipos de informação.

Seguidamente, surge o botão "Limpar", que tal como o nome indica, permite limpar a área de gráfico seleccionada bem como os dados referentes a esse processo.

Por último, aparece o botão "Novo", que, quando pressionado, abre uma janela que sugere a escolha de um ficheiro do formato (xlsx) para importar. Este ficheiro deve corresponder a um conjunto de temperaturas, obtido a partir de uma imagem térmica da aplicação da FLIR, tal como descrito anteriormente. No entanto, para que surja a referida janela, é necessário seleccionar previamente uma das áreas de gráfico para que o programa saiba onde irá reproduzir os dados, caso contrário surgirá um aviso a alertar para essa situação.

Ao carregar um novo gráfico, surgirá sempre um painel para a introdução de informação, por parte do utilizador, relativa aos dados em estudo, que posteriormente serão manipulados no separador "Cálculos", como se verificará mais adiante.

A zona seguinte chamada "Tipo de Gráfico", Figura 5.6, diz respeito à análise visual dos gráficos gerados, permite alternar o tipo de gráfico entre cinco possibilidades consoante a área de gráfico seleccionada, tornando a análise mais intuitiva.

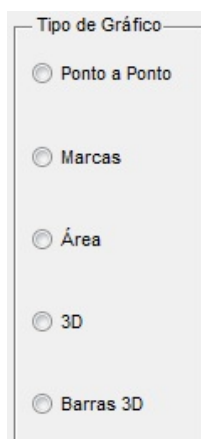


Figura 5.6: Tipo de Gráfico

Assim existe hipótese de visualizar gráficos do tipo "Ponto a Ponto", que traça uma linha que passa nas temperaturas de cada píxel, "Marcas", que faz o mesmo que o anterior, mas marcando a temperatura de cada um dos píxeis individualmente a cor verde, "Área", que tal como o nome indica, apresenta uma área que corresponde à zona inferior à linha temperatura/píxel, "3D", que permite uma visualização a três dimensões dos dados em análise, e, por último, "Barras 3D", que cria um gráfico de barras a três dimensões.

É fundamental salientar a importância da demonstração a três dimensões, não só por ser bastante intuitivo, como pelo facto de ser a forma encontrada de se conseguir representar áreas.

A função de bloqueio, Figura 5.7, tem o papel de, quando seleccionada, para uma determinada área de gráfico, permitir que o gráfico que se importe na operação seguinte, seja desenhado sobre a mesma área na qual se efectuou o bloqueio, permitindo desta forma a sobreposição de gráficos de forma a analisar variações que seriam mais dificilmente notadas desenhando em duas áreas de gráfico diferentes. Esta função apenas está disponível no tipo de gráfico "Ponto a Ponto", pois, em qualquer um dos outros tipos, esta função tornaria os gráficos bastante imperceptíveis.

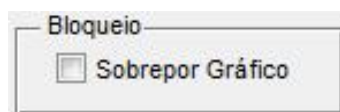


Figura 5.7: Sobrepor Gráfico

A imagem da Figura 5.8 representa a zona do separador em análise que disponibiliza o máximo, mínimo e média das temperaturas, em graus Celsius, para cada uma das zonas de gráfico, consoante os dados importados.



Figura 5.8: Estatística de Temperatura

Na Figura 5.9, apresenta-se outra funcionalidade que diz respeito à procura de valores de temperatura, através da introdução do valor de x, ou seja do píxel. Esta procura ocorrerá no gráfico da zona seleccionada, permitindo determinar um valor de temperatura num ponto específico, de forma mais minuciosa.

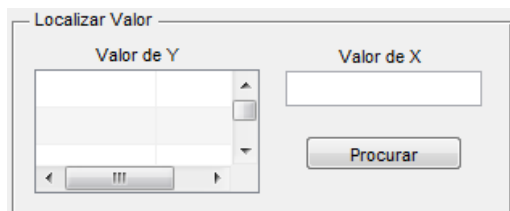


Figura 5.9: Localizar Valor de Temperatura

Na zona superior da janela da aplicação desenvolvida, surge uma barra de ferramentas vocacionada para a análise e manipulação gráfica, Figura 5.10.



Figura 5.10: Barra de Ferramentas

Observando a imagem anterior da esquerda para a direita, os primeiros botões a surgir são as funções de ampliação, que possibilitam ampliar ou reduzir a área de gráfico pretendida. Seguidamente, aparece a opção de arrastamento que, tal como o nome o diz, permite arrastar a área de gráfico ao longo do eixo do x ou y. Continuando no mesmo sentido, encontra-se a função de rotação, que permite realizar a rotação de uma área de gráfico, opção bastante útil para gráficos

de três dimensões. A seguir, surge um botão que permite criar um ponto na linha de gráfico e percorrer todo o gráfico ponto a ponto, obtendo os valores de x e y para cada um. Por fim, aparece um botão informativo, que faz surgir uma janela com informação acerca do autor da aplicação.

Por último, no canto superior direito da aplicação, existe um botão que se encontra ilustrado na Figura 5.9. Este é um botão comum a todos os separadores, pois fornece informação acerca da aplicação, de forma a auxiliar o utilizador. A informação que surge ao clicar neste botão, é específica para o separador activo, Anexo A.



Figura 5.11: Botão de Ajuda

5.3.2 Separador Cálculos

O separador "Cálculos" tem como objectivo principal fornecer mais informação acerca da imagem termográfica analisada. Para que se obter esta informação, procedeu-se a um estudo sobre temas da termodinâmica e transferência de calor, como já foi referido anteriormente. Após este estudo, verificou-se que, para a obtenção de dados acerca da energia térmica de uma determinada superfície, existia um conjunto variado de situações diferentes, consoante a superfície em análise e o meio que a envolvia, o que dificultava, em termos temporais, a implementação pretendida. Reunindo este aspecto, e o facto de ser a radiação o centro nevrálgico de todo este projecto, criou-se uma área específica de acção, para a obtenção de informação acerca da energia térmica de uma dada superfície[35].

Assim, assume-se que as superfícies em análise são opacas, $\tau = 0 \Rightarrow \rho = 1 - \alpha$, cinzentas, $\alpha = \varepsilon$, e difusas, emitem radiação em todas as direcções, qualquer que seja o ângulo de incidência da irradiação. Assumiu-se também que a vizinhança era substancialmente maior que a superfície da qual se obtinha a imagem térmica, de forma aplicar o conceito de corpo negro pela Lei de Kirchhoff[35]. Por fim, também se assumiu que a temperatura da superfície seria uma média de temperaturas da zona analisada, obtida no momento do carregamento de dados para a geração de gráficos. Deste modo, pelo separador "Cálculos" é possível obter os valores das seguintes grandezas:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (5.1)$$

$E [W/m^2]$ - Poder Emissivo

$$G_{abs} = \alpha G \quad (5.2)$$

G_{abs} [W/m^2] - Energia Térmica Absorvida

$$G_{ref} = \rho G \quad (5.3)$$

G_{ref} [W/m^2] - Energia Térmica Reflectida

$$G = \sigma T_{viz}^4 \quad (5.4)$$

G [W/m^2] - Irradiação

$$J = E + G_{ref} \quad (5.5)$$

J [W/m^2] - Radiosidade

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (5.6)$$

q''_{rad} [W/m^2] - Fluxo de Calor por Radiação

$$q_{rad} = A \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (5.7)$$

q_{rad} [W] - Taxa de Transferência de Calor por Radiação

$$q''_{conv} = h(T_s - T_{viz}) \quad (5.8)$$

q''_{conv} [W/m^2] - Fluxo de Calor por Convecção

$$q'' = q''_{rad} + q''_{conv} \quad (W/m^2) \quad (5.9)$$

q'' [W/m^2] - Fluxo de Calor por Radiação e Convecção

Onde:

ε - Emissividade

α - Coeficiente de Absorção

ρ - Coeficiente de Reflexão

h [$W/m^2 \cdot K$] - Coeficiente de Convecção

A [m] - Área

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ [$W/m^2 \cdot K^4$] - Constante de Stefan-Boltzmann

T_s [K] - Temperatura da Superfície

T_{viz} [K] - Temperatura da Vizinhança

Como se observa na Figura 5.12, o separador em questão apresenta a negro os dados que podem ser inseridos, excepto a constante de Stefan-Boltzmann, a cor de tijolo os resultados que podem se obtidos.

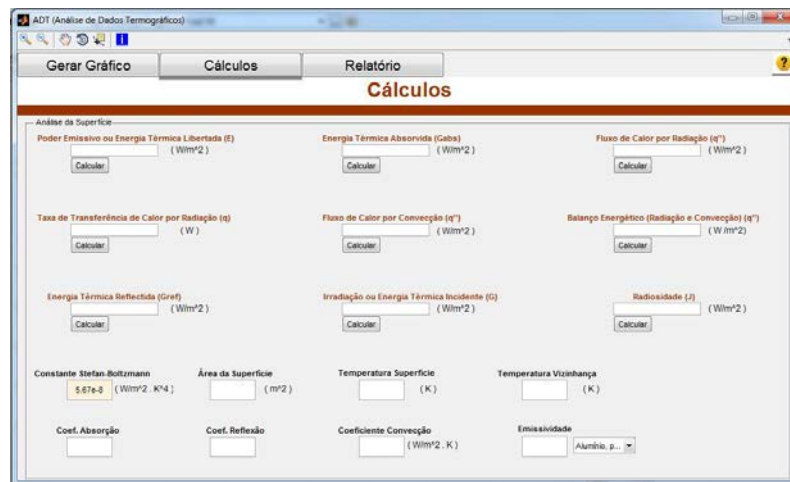


Figura 5.12: Separador Cálculos

Cada um dos resultados apresenta um botão que permite efectuar o cálculo manual da grandeza correspondente, de modo a validar resultados para um qualquer fim, desde que sejam introduzidas as respectivas variáveis em causa. Apenas para a emissividade existem alguns valores predefinidos, que, no entanto, também necessitam de ser seleccionados manualmente.

Além disso, esta informação pode ser obtida de forma automática, a quando da importação de dados para gerar um novo gráfico, pois, em cada operação desse género, surge uma janela que solicita ao utilizador a introdução de informação específica referente aos dados analisados.

Como se pode observar pela Figura 5.13, os dados solicitados ao utilizador são a emissividade, a temperatura da vizinhança ou do meio envolvente, a área da superfície analisada e o coeficiente de convecção. Apesar do surgimento desta janela, não é imperativo a introdução destes dados, no entanto, as grandezas dependentes desses valores não serão calculadas de forma automática.

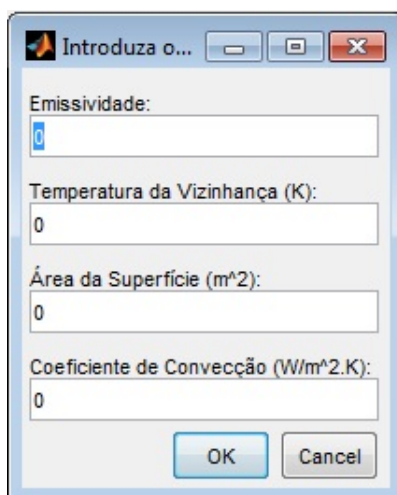


Figura 5.13: Janela de Introdução de Dados

É importante referir que a convecção surge neste âmbito de forma menos trabalhada que a radiação, uma vez que não era o alvo deste estudo. No entanto, achou-se importante a sua inclusão, uma vez que também se trata de um fenómeno de superfície, mas a sua presença nos resultados, depende quase totalmente do utilizador. É de salientar, ainda, a presença de um botão de ajuda, semelhante ao encontrado no separador anterior, que disponibiliza informação sobre o modo como os resultados são obtidos e as condições a respeitar para que estes sejam fiáveis, Anexo B.

5.3.3 Separador Relatório

O separador "Relatório", Figura 5.14, tal como o nome sugere, permite a criação de um relatório, que documente toda a análise efectuada com a aplicação.



Figura 5.14: Separador Relatório

Observando a figura anterior, constata-se a existência de um botão de contorno vermelho, que sobressai em relação aos outros, pois, este apresenta uma importância extrema em todo o processo de criação de relatório. Através deste botão, é possível guardar um ficheiro de texto que contém toda a informação acerca dos resultados e variáveis do separador "Cálculos", bem como, a informação acerca do tipo de gráfico escolhido. Todos estes dados são os últimos que o utilizador estabeleceu antes de efectuar esta operação.

Assim, antes de criar qualquer relatório é importante guardar os dados da sessão, numa zona conhecida do disco rígido, pois, mais tarde, estes serão solicitados para a elaboração de relatório.

Um pormenor importante reside no facto de este ficheiro de texto, depois de guardado, de forma alguma deve ser editado sob pena de se inviabilizar a lista de dados. Em torno deste botão central, existem outros quatro com os símbolos do Microsoft Word, Microsoft PowerPoint, PDF e HTML. Estes quatro botões permitem a criação de um relatório predefinido no ficheiro "RelatorioTermografico.m", no formato correspondente ao fundo do botão. Ao se pressionar um destes botões, surgirão de forma sequencial três janelas, que solicitaram ao utilizador a imagem a colocar no relatório, o ficheiro (xlsx) utilizado na análise e um ficheiro de texto que deverá ser guardado previamente, como referido anteriormente.

Por fim, existem mais dois botões no canto inferior direito, que possibilitam, da esquerda para a direita, a exportação de dados para um documento (docx) e a abertura de um template no mesmo formato. Aqui, a única dificuldade pode ser a exportação de dados, no entanto, o procedimento é equivalente ao realizado para o outro tipo de relatórios, aparecendo três janelas, sequencialmente, que solicitam uma imagem, um ficheiro (xlsx) e o ficheiro de texto com os dados da sessão.

Contudo, qualquer dificuldade pode ser esclarecida, através do ficheiro de ajuda para a elaboração de relatório, que especifica a função de cada botão individualmente, Anexo C.

5.4 Questões Relevantes de Processamento

Apesar de haver a possibilidade de tornar a aplicação desenvolvida independente do MATLAB, esta apenas funcionará em computadores com o mesmo sistema operativo, em que se encontra instalada a versão MATLAB que lhe deu origem.

Deste modo, se esta for criada em Windows 64 bits, não funcionará no Windows 32 bits, no entanto se for executada a partir do MATLAB, funcionará em qualquer sistema operativo sem restrições. Um dos problemas encontrados ocorreu precisamente com a criação de um executável independente, pois, neste caso, os botões para a criação de um relatório, nos quatro formatos possíveis, deixam de estar operacionais, razão pela qual surgiu a hipótese de abrir um template preconcebido em Microsoft Word. A programação efectuada através do GUI do MATLAB funciona por eventos, Anexo D, sendo que todo o código fica guardado em ficheiros do tipo M-Files, assim pronunciados por apresentarem uma extensão (.m), como já foi referido[41], [42].

5.5 Resumo

A metodologia de desenvolvimento seguida visava a criação de uma hierarquia de tarefas, que possibilitasse uma implementação consistente e estruturada da aplicação, não desvalorizando o importante processo de escolha da ferramenta a utilizar. A criação da aplicação envolveu uma aprendizagem constante, pois, a ferramenta utilizada era praticamente desconhecida, uma vez que apresenta uma linguagem específica. Outro ponto fundamental residiu no estudo de temas de termodinâmica e transferência de calor, que se revelou fundamental às implementações conduzidas no separador de cálculo.

No que se refere à aplicação, esta ficou subdividida em três grandes blocos: criação de gráficos a partir de dados importados em formato (xlsx), a obtenção de mais informação de caris científico acerca dos dados importados, segundo condições específicas, e a elaboração de relatórios. Por fim, analisaram-se algumas complicações relacionadas com o facto de a aplicação funcionar de forma independente do MATLAB. No entanto, de forma geral, o MATLAB revelou-se bastante competente nas funcionalidades exigidas para a elaboração da aplicação.

É de salientar, que a estrutura de separadores que foi adoptada teve como principal motivo futuras expansões da aplicação.

Capítulo 6

Resultados

O presente capítulo serve para apresentar as potencialidades e os limites da aplicação informática desenvolvida na análise de uma imagem térmica de uma superfície real. Para isso, apresenta a metodologia a seguir para a captação e análise de uma imagem térmica, de modo a respeitar a área de acção para a qual a aplicação foi projectada.

A análise é realizada com o objectivo de explorar os recursos que a aplicação disponibiliza, de forma a retirar conclusões quanto à sua funcionalidade e fiabilidade.

6.1 Aplicação do Sistema

Para testar a aplicação, de forma credível, era necessário analisar um caso em concreto para que se fosse confrontado com todo o tipo de as questões e problemas que isso poderia levantar.

6.1.1 Critérios na Escolha da Superfície

A superfície a analisar teria de ser compatível com a área de acção na qual a aplicação intervém, sob pena de se obterem resultados erróneos. Deste modo, optou-se pelo uso de uma superfície bastante pequena em relação ao meio envolvente, de forma a haver possibilidade de aplicar o conceito de corpo negro a esse mesmo meio. Outra questão levada em conta tem a ver com o impacto da geometria da superfície no fenómeno da convecção, pois, embora a aplicação permita calcular o fluxo de calor por este efeito, o coeficiente de convecção é inteiramente da responsabilidade do utilizador.

Neste contexto, utilizou-se uma superfície lisa, com características e geometria que nos permitissem aplicar valores típicos do coeficiente de convecção do ar.

6.1.2 Critérios na Recolha da Imagem Térmica

A recolha da imagem térmica é uma etapa de extrema importância em todo o processo, uma vez que existem vários factores que podem influenciar os dados obtidos. Desde logo, é necessário haver preocupação com o local da medição, pois a existência de vento ou a carga solar terão repercussões não desejadas. Assim, estas devem ser efectuadas, preferencialmente num local que não esteja exposto a esse tipo de condições.

Além disso, é fundamental que se tenha em atenção a presença de outras fontes de calor, na proximidade da superfície da qual se está a obter a imagem térmica. A presença destas fontes pode originar reflexão na superfície que se está a ensaiar, ou seja, a câmara capta, não só a radiação emitida pela superfície em estudo, como parte da radiação emitida pela fonte de calor. Além disso, deve eliminar-se a presença de qualquer obstáculo entre a câmara e a superfície, quer seja vidro ou plástico transparente, pois isso impossibilita a medição, sendo que, o ideal, era mesmo eliminar a atmosfera e toda a sua atenuação, o que não é possível por motivos óbvios.

Para a recolha das imagens térmicas, é importante ter em atenção que estas devem ser obtidas perpendicularmente à superfície, a uma distância que permita uma boa focagem, mas, previamente, deve-se sempre efectuar a calibração da câmara. Esta calibração consiste na definição da emissividade do material que constitui a superfície a analisar.

6.1.3 Procedimento Laboratorial

Reunindo os critérios definidos anteriormente, começou por se escolher o corpo a ensaiar, optando-se por uma superfície de madeira, quadrada, lisa, com 4.5 cm de lado e 0.5 cm de espessura, Figura 6.1.



Figura 6.1: Superfície de Madeira para o Ensaio

Seguidamente, para se obter uma imagem térmica que fosse suficientemente perceptível, aqueceu-se a superfície para que esta ficasse a uma temperatura superior à do ambiente circundante.

O aquecimento foi realizado recorrendo a uma resistência circular em contacto com o centro da superfície, através de uma pequena chapa em alumínio, para que o calor fosse transmitido à madeira o mais uniformemente possível, sem permitir que esta atingisse a temperatura de inflamação.

Enquanto se procedia ao aquecimento, mediu-se a temperatura ambiente, $T_{amb} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, e calibrou-se a câmara termográfica utilizada, Figura 6.2, com a emissividade da madeira $\varepsilon = 0.85$, valor predefinido existente no equipamento.



Figura 6.2: Câmara Térmica – FLIR i60

Após algum tempo, retirou-se o pedaço de madeira de cima da resistência e da chapa de alumínio, afastando estas duas fontes de calor do local de forma a evitar reflexões. Por fim, colocou-se o pedaço de madeira numa superfície horizontal e procedeu-se à recolha de uma imagem térmica.

Todo este procedimento foi realizado em ambiente controlado, no Laboratório de Máquinas Eléctricas da FEUP, de modo a evitar as implicações de um ambiente externo.

6.1.4 Procedimento na Aplicação Desenvolvida

Após a recolha da imagem térmica, iniciou-se a aplicação desenvolvida para a concretização da análise. Começou por se aceder à aplicação "FLIR QuickReport", disponível a partir da anterior, para se seleccionar apenas a área que contém a superfície analisada e exportar os dados de temperatura dessa mesma área para um ficheiro do Microsoft Excel. Posteriormente, efectuou-se o mesmo procedimento para uma linha que passa pelo centro da superfície, ao longo do seu comprimento. Mais tarde, importaram-se esses dois ficheiros para a nova aplicação, um para cada área de gráfico, introduzindo-se os dados solicitados apenas em relação à área, pois, a linha, neste caso, apenas serve para termo de comparação visual. Assim os dados introduzidos foram $\varepsilon = 0.85$, $T_{viz} = 296\text{ K}$ e $A_s = 0.002025\text{ m}^2$.

Para o coeficiente de convecção do ar, atribuiu-se um valor intermédio dos valores tabelados para este tipo de grandeza, no que refere à convecção livre por acção de gases. Deste modo, como estes valores se situam no intervalo $[2; 25] W/m^2 \cdot K$, definiu-se $h = 10 W/m^2 \cdot K$ [35].

Concluído todo este procedimento, passou-se à análise dos resultados obtidos.

6.2 Análise dos Resultados Obtidos

A imagem térmica da superfície de madeira que se obteve foi a da Figura 6.3.

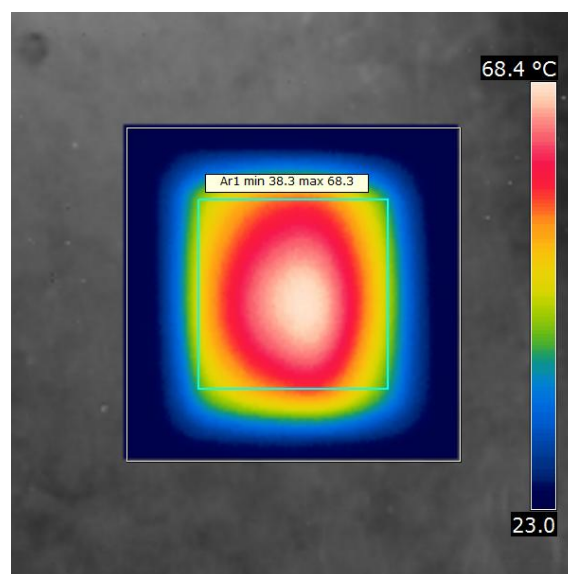


Figura 6.3: Imagem Térmica da Superfície de Madeira

Pela Figura 6.3, constata-se um padrão de temperatura que corresponde ao esperado, ou seja, a temperatura máxima a ocorrer no centro da superfície. Este facto é devido à resistência utilizada que estava em contacto directo com o centro da chapa de alumínio de auxílio ao aquecimento que, por sua vez, expandia todo o calor ao longo da superfície, originando um aquecimento do centro para a periferia.

Deste modo, a zona mais fria, a azul-escuro, é a superfície da bancada onde se realizou o ensaio e a azul-claro a reflexão da radiação nessa mesma superfície. O limite do pedaço de madeira encontra-se delimitado por uma faixa de cor verde.

É importante assinalar que esta imagem corresponde a um modo de captura da câmara utilizada que é nomeada de imagem na imagem. Este modo permite sobrepor uma imagem térmica a uma imagem digital normal, permitindo perceber as questões de reflexão referidas anteriormente, bem como o ajuste da área seleccionada para se proceder à análise gráfica.

Após um ligeiro ajuste da área para que esta contivesse toda a superfície analisada e de se ter traçado uma linha ao longo do perfil de temperatura, que passa pelo ponto mais quente, chegou-se à Figura 6.4.

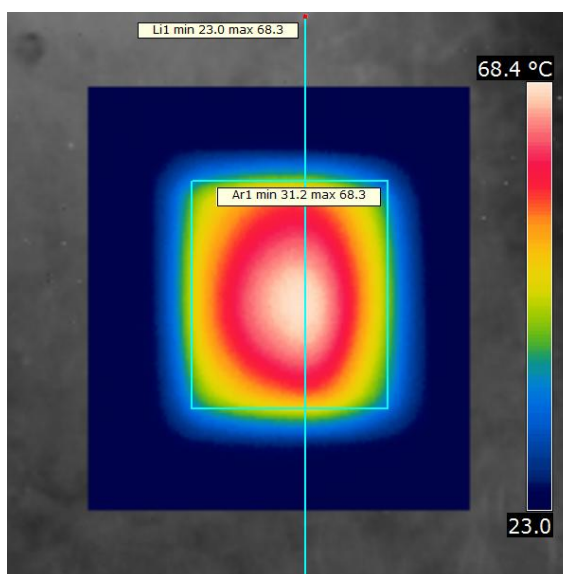


Figura 6.4: Imagem com Linha e Área Ajustada

Na Figura 6.4, ao contrário do que acontece com a temperatura mínima, é visível um ligeiro decréscimo da temperatura máxima na área e na linha seleccionadas, de 68.4°C para 68.3°C , fruto de uma certa imprecisão da aplicação FLIR.

Seguidamente, procedeu-se à exportação das temperaturas referentes à área e à linha da Figura 6.4, para o Microsoft Excel, para poderem ser importados pela aplicação desenvolvida. Assim os gráficos obtidos pela nova aplicação são os da Figura 6.5.

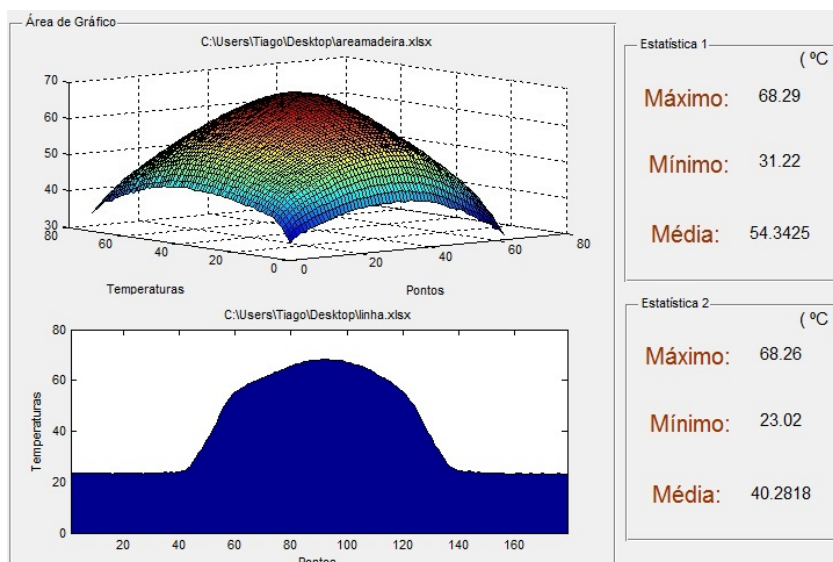


Figura 6.5: Gráficos obtidos pela Aplicação Desenvolvida

Na Figura 6.5, o gráfico superior corresponde às temperaturas da área da superfície analisada e o inferior às temperaturas contidas numa linha ao longo do comprimento da mesma superfície,

que passa pelo ponto mais quente. Observando o gráfico superior, nota-se o que já era de esperar, ou seja, um gradiente de temperatura do centro para a periferia da superfície analisada, onde o centro corresponde ao ponto mais quente, com 68.29°C de temperatura, e o mais frio a 31.22°C . O gráfico inferior fornece a variação de temperatura, desde a temperatura ambiente, aproximadamente 23°C , até a um máximo de 68.26°C , no centro da superfície, confirmando o que acontece no gráfico superior. Posteriormente, procedeu-se à avaliação dos resultados analíticos efectuados pela aplicação, através dos valores inseridos aquando da importação dos ficheiros do Microsoft Excel. A temperatura da superfície assumida é a obtida através da média de temperaturas da área analisada, Figura 6.6.

The screenshot shows a software interface for surface analysis with the following data:

Parameter	Value	Unit
Poder Emissivo ou Energia Térmica Libertada (E)	553.365	(W/m ²)
Energia Térmica Absorvida (Gabs)	369.972	(W/m ²)
Fluxo de Calor por Radiação (q'')	183.393	(W/m ²)
Taxa de Transferência de Calor por Radiação (q)	0.37137	(W)
Fluxo de Calor por Convecção (q'')	313.425	(W/m ²)
Balço Energético (Radiação e Convecção) (q'')	496.817	(W/m ²)
Energia Térmica Reflectida (Gref)	65.2892	(W/m ²)
Irradiação ou Energia Térmica Incidente (G)	435.261	(W/m ²)
Radiosidade (J)	618.654	(W/m ²)
Constante Stefan-Boltzmann	5.67e-8	(W/m ² · K ⁴)
Área da Superfície	0.002025	(m ²)
Temperatura Superfície	327.342	(K)
Temperatura Vizinhança	296	(K)
Coef. Absorção	0.85	
Coef. Reflexão	0.15	
Coeficiente Convecção	10	(W/m ² · K)
Emissividade	0.85	Alumínio, p...

Figura 6.6: Resultados Analíticos Obtidos

Dos dados da Figura 6.6, obtidos segundo os critérios de acção da aplicação, pode retirar-se que a quantidade total de energia emitida pela superfície de madeira, devido à radiação térmica provocada pelo aquecimento, corresponde ao poder emissivo, $E = 553.365 \text{ W/m}^2$.

Como o meio envolvente, ou vizinhança, apresenta as características de um corpo negro, o seu poder emissivo traduz-se na irradiação, ou energia térmica que atinge a superfície de madeira com origem na vizinhança, ou seja, $G = 435.261 \text{ W/m}^2$. Desta irradiação, a superfície absorve, $G_{abs} = 369.972 \text{ W/m}^2$, devido ao seu coeficiente de absorção, α , e reflecte, $G_{ref} = 65.2892 \text{ W/m}^2$, devido ao seu coeficiente de reflexão, ρ .

Assim, a quantidade de energia que a câmara capta diz respeito ao poder emissivo, E , da superfície de madeira, mais a parte reflectida da irradiação que incide sobre a mesma, G_{ref} , que constitui a radiosidade, $J = 618.654 \text{ W/m}^2$.

No entanto, a perda de energia global da superfície é devida à radiação e à convecção, que se traduzem no fluxo de calor por radiação, $q''_{rad} = 183.393 \text{ W/m}^2$ e no fluxo de calor por convecção, $q''_{conv} = 313.425 \text{ W/m}^2$. Assim, de acordo com a primeira lei da termodinâmica, a quantidade de energia que está a ser dissipada para o meio é de 496.817 W/m^2 .

Por fim ainda é possível verificar que a taxa de transferência de calor da superfície de madeira devido à radiação térmica é, aproximadamente, $q_{rad} = 0.37 W$.

Deste modo, em regime permanente, a temperatura da superfície tende a igualar-se à do meio circundante, pois, a energia que esta liberta vai sendo cada vez menor por não existir aquecimento, ao contrário da energia emitida pelo meio que se mantém, desde que nada varie a sua temperatura.

Finalizado este procedimento, passou-se à elaboração do relatório final, que reproduz a imagem que se analisou, o gráfico correspondente e todos os valores da zona de cálculo, resultados e variáveis. Optou-se neste caso pela versão em HTML, mas poderia ser em PDF, Microsoft Word ou Microsoft PowerPoint.

Na Figura 6.7, pode ver-se o aspecto do relatório, no entanto, este encontra-se disponível integralmente no Anexo E.

Relatório de Análise Termográfica

Este documento disponibiliza informação referente à análise termográfica efectuada no programa ADT.

Contents

- [Imagem Termográfica](#)
- [Gráfico da Variação de Temperatura da Zona Seleccionada](#)
- [Dados Recolhidos da Análise Efectuada](#)

Imagem Termográfica

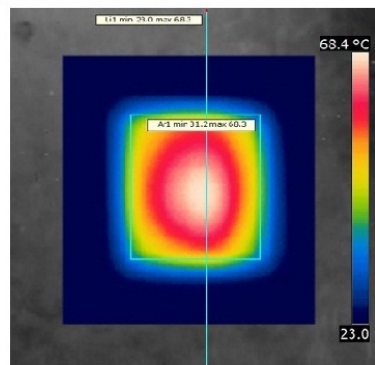
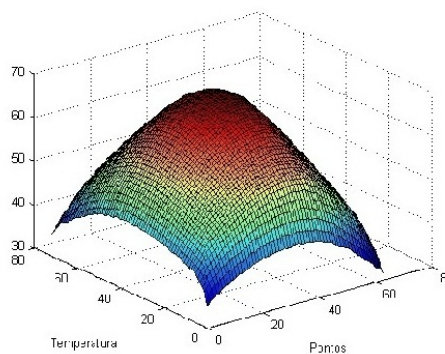


Gráfico da Variação de Temperatura da Zona Seleccionada



Dados Recolhidos da Análise Efectuada

- Máximo(°C); Mínimo(°C); Média(°C); Média(K)

68.2900 31.2200 54.3425 327.3425

Figura 6.7: Exemplo de Relatório Final em HTML

6.3 Resumo

Os ensaios realizados e descritos neste capítulo foram uma forma de avaliar as potencialidades da aplicação desenvolvida.

Para se efectuar uma avaliação coerente, era imprescindível recorrer a um caso real, de modo a criar condições para a confrontação com todos os problemas que poderiam surgir numa análise do género. Esta ideia ficou provada logo na análise da imagem térmica com o programa da FLIR, onde se detectaram pequenas imprecisões no que se refere à temperatura máxima.

Deste modo, após a submissão da imagem térmica obtida à aplicação da FLIR para se reajustar as zonas de medição, exportaram-se os ficheiros para o Microsoft Excel, com os valores de temperatura para essas mesmas zonas.

Seguidamente, importaram-se esses ficheiros para a aplicação desenvolvida, introduziram-se os parâmetros correspondentes à superfície de madeira e efectuou-se uma análise crítica da informação obtida.

Finalizou-se todo o processo com a criação de um relatório em HTML através da aplicação desenvolvida, onde se encontram todos os dados da análise efectuada.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalho Futuro

Este trabalho previa uma revisão das aplicações da termografia, no âmbito dos sistemas de energia e máquinas eléctricas, tendo como principal objectivo, o desenvolvimento de uma aplicação informática que expandisse o potencial de outra já existente.

7.1 Conclusão

Constatou-se que a aplicabilidade da termografia é extremamente variada, vai desde a indústria metalúrgica ou automóvel até à aeronáutica ou medicina.

No que se refere a sistemas de energia e máquinas eléctricas, a termografia é aplicada como uma técnica de manutenção preditiva, que consiste num modo de avaliação das condições de uma determinada máquina ou equipamento, de forma a recolher informação quanto ao seu desgaste e processo de degradação.

Desta forma, conclui-se que, sendo a termografia uma técnica que permite avaliar a radiação térmica emitida por qualquer corpo, e visto que, a maioria das anomalias em máquinas eléctricas ou sistemas de energia produz calor, a aplicação da termografia para a detecção dessas mesmas anomalias é possível, rápida e eficaz, para além de garantir segurança a quem a realiza, uma vez que, não há necessidade de haver contacto directo com os equipamentos ou máquinas analisadas.

O principal objectivo deste trabalho residiu no desenvolvimento de uma aplicação informática para análise de imagens térmicas, produção de material documentativo e integração com a aplicação “FLIR QuickReport”, já existente. A nova aplicação foi desenvolvida em MATLAB, o que exigiu a aprendizagem de uma nova linguagem de programação e um breve estudo sobre o tema da termodinâmica e transferência de calor.

As suas funcionalidades foram testadas e comprovadas através de um ensaio laboratorial, concluindo-se que acrescenta importantes avanços, principalmente no que se refere à análise gráfica e à elaboração de relatórios personalizados.

7.2 Trabalho Futuro

Para trabalho futuro, considera-se importante tornar a aplicação desenvolvida completamente independente da aplicação “FLIR QuickReport”. Para isso, é necessário implementar uma forma de análise de imagens térmicas, que elimine a necessidade de exportação e importação de ficheiros do Microsoft Excel.

Igualmente importante é a expansão dos processos para a obtenção de resultados referentes à convecção, pois isso proporcionaria um alargamento do horizonte informativo fornecido pela aplicação.

Por fim, apesar dos resultados do separador de cálculos terem sido testados teoricamente, considera-se fundamental a realização de ensaios práticos com uma base científica bastante acentuada, que permitam vir a sustentar de forma mais sólida, a veracidade dos valores apresentados.

Anexo A

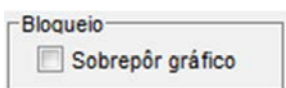
Ajuda do Separador de Geração de Gráficos

Este anexo tem como objectivo apresentar o documento de ajuda referente ao separador de geração de gráficos, disponível na aplicação desenvolvida.

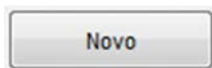
- **Botões do Separador "Gerar Gráfico"**



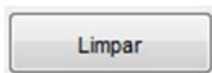
Permite seleccionar qual a área de gráfico pretendida, a superior ou a inferior.



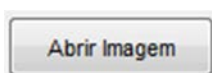
Se seleccionado permite gerar dois gráficos na mesma área.



Permite abrir um novo ficheiro Excel para gerar um gráfico.



Limpa a área de gráfico seleccionada.



Permite abrir uma imagem, para estabelecer ligações entre o gráfico e a respectiva imagem.



Permite sair do programa.

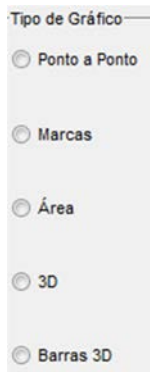


Permite abrir a aplicação "QuickReport" da FLIR.

ADT - AJUDA



Permite procurar um valor de x do gráfico seleccionado.



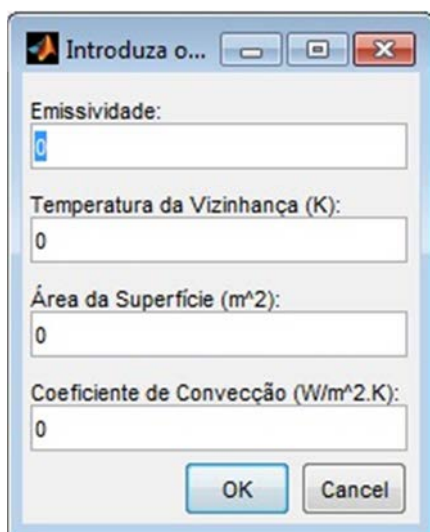
Permite seleccionar cinco tipos de gráficos diferentes.



Barra de ferramentas. Da esquerda para a direita surgem: os botões de zoom, os botões de análise gráfica, nomeadamente, o arrastamento, a rotação e análise ponto a ponto. Por fim, surge um botão que disponibiliza informação acerca do autor da aplicação.



Permite obter ajuda em relação ao separador activo: "Gerar Gráfico", "Cálculos" e "Relatório".



Esta janela surge sempre que se gera um novo gráfico. Aqui é possível introduzir as variáveis da superfície em estudo, permitindo assim que o programa efectue todos os cálculos disponíveis de forma automática. Estes cálculos aparecerão no separador "Cálculos".

Anexo B

Ajuda do Separador de Cálculos

Este anexo tem como objectivo apresentar o documento de ajuda referente ao separador de cálculos, disponível na aplicação desenvolvida.

- **Poder Emissivo ou Energia Térmica Libertada**

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

ϵ = Emissividade

σ = Constante de Stefan – Boltzmann (W/m² · K⁴)

T_s = Temperatura da Superfície (K)

- **Energia Térmica Absorvida**

$$G_{abs} = \alpha G \text{ (W/m}^2\text{)}$$

α = Coeficiente de Absorção

G = Irradiação (W/m²)

- **Energia Térmica Reflectida**

$$G_{ref} = \rho G \text{ (W/m}^2\text{)}$$

ρ = Coeficiente de Reflexão

G = Irradiação (W/m²)

- **Irradiação ou Energia Térmica Incidente**

$$G = \sigma T_{viz}^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

σ = Constante de Stefan – Boltzmann (W/m² · K⁴)

T_{viz} = Temperatura da Vizinhança Envolverte (K)

- **Radiosidade**

$$J = E + G_{ref} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$E = \text{Poder Emissivo (W/m}^2\text{)}$

$G_{ref} = \text{Energia Térmica Reflectida (W/m}^2\text{)}$

- **Fluxo de Calor por Radiação**

$$q''_{rad} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$\epsilon = \text{Emissividade}$

$\sigma = \text{Constante de Stefan – Boltzmann (W/m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}$

$T_s = \text{Temperatura da Superfície (K)}$

$T_{viz} = \text{Temperatura da Vizinhança Envolvente (K)}$

- **Taxa de Transferência de Calor por Radiação**

$$q_{rad} = A\epsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \text{ (W)}$$

$A = \text{Área da Superfície (m}^2\text{)}$

$\epsilon = \text{Emissividade}$

$\sigma = \text{Constante de Stefan – Boltzmann (W/m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}$

$T_s = \text{Temperatura da Superfície (K)}$

$T_{viz} = \text{Temperatura da Vizinhança Envolvente (K)}$

- **Fluxo de Calor por Convecção**

$$q''_{conv} = h(T_s - T_{viz}) \text{ (W/m}^2\text{)}$$

h = *Coeficiente de Convecção* (W/m² · K)

T_s = *Temperatura da Superfície* (K)

T_{viz} = *Temperatura da Vizinhança Envolvente* (K)

- **Balanco Energético Radiação e Convecção**

$$q'' = q''_{rad} + q''_{conv} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

q''_{rad} = *Fluxo de Calor por Radiação* (W/m²)

q''_{conv} = *Fluxo de Calor por Convecção* (W/m²)

- **Condições da Análise Efectuada**

Situação particular em que se considera um conjunto de parâmetros bastante específicos.

Ambiente: Equiparado a um corpo negro

Superfície a Observar:

- *Cinzento:* $\epsilon = \alpha$
- *Opaco:* $\alpha + \rho = 1$ pois $\tau = 0$
- *Difuso:* *Emite radiação igualmente em todas as direcções*

α = *Coeficiente de Absorção*

ρ = *Coeficiente de Reflexão*

τ = *Coeficiente de Transmissão*

- **Correspondência de Variáveis**

$\sigma = \text{Constante Stefan - Boltzmann } (W/m^2 \cdot K^4)$

$T_s = \text{Temperatura Superfície } (K)$

$T_{viz} = \text{Temperatura Vizinhaça } (K)$

$\epsilon = \text{Emissividade}$

$A_s = \text{Área da Superfície } (m^2)$

$h = \text{Coeficiente Convecção } (W/m^2 \cdot K)$

$\rho = \text{Coef. Reflexão}$

Anexo C

Ajuda do Separador de Relatórios

Este anexo tem como objectivo apresentar o documento de ajuda referente ao separador de relatórios, disponível na aplicação desenvolvida.

- **Botões do Separador "Relatório"**



Guarda os dados referentes ao programa num ficheiro de dados (txt) com informação acerca de todos os cálculos efectuados e o tipo de gráfico. **Fundamental para posteriormente desenvolver o relatório.**



Depois dos dados guardados, este botão cria um relatório em HTML, solicitando a imagem, o gráfico (Excel) e o ficheiro de dados (txt).



Depois dos dados guardados, este botão cria um relatório em PDF, solicitando a imagem, o gráfico e o ficheiro de dados.



Depois dos dados guardados, este botão cria um relatório em PowerPoint, solicitando a imagem, o gráfico e o ficheiro de dados.



Depois dos dados guardados, este botão cria um relatório em Word, solicitando a imagem, o gráfico e o ficheiro de dados.



Este botão permite exportar todos os dados para um ficheiro Word, solicitando uma imagem, um gráfico (Excel) e o ficheiro de dados (txt). **É igualmente necessário guardar o ficheiro de dados antes de executar este processo.**



Este botão permite abrir um template em Word que facilita a elaboração de um relatório.

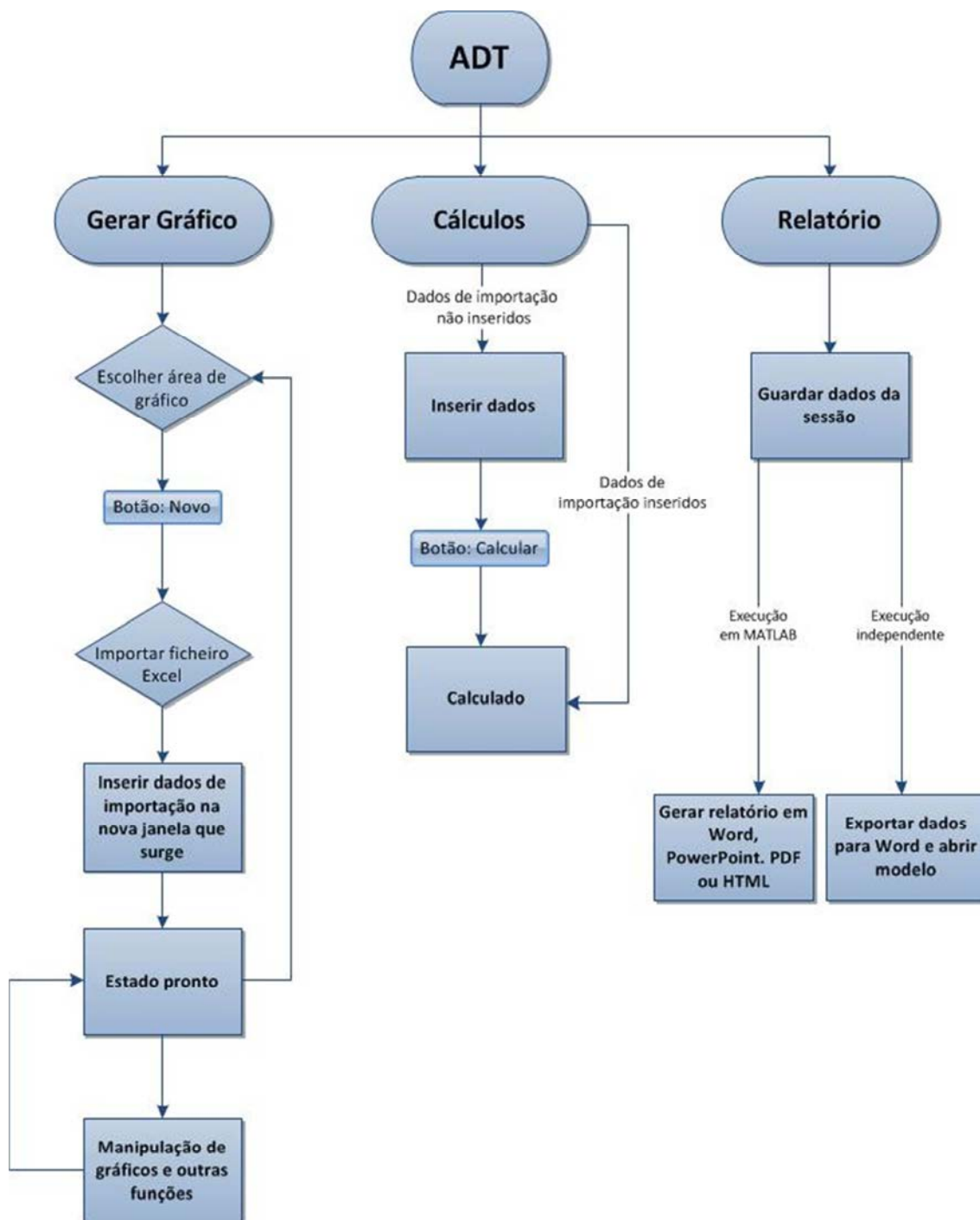
Os dois últimos botões são importantes, para o caso da aplicação funcionar de forma independente do MATLAB, uma vez que, todos os outros (HTML, PDF, WORD, PowerPoint) perdem as suas funcionalidades nesse cenário.

Anexo D

Organograma da Aplicação Desenvolvida

Este anexo tem como objectivo apresentar um organograma que define o funcionamento da aplicação desenvolvida.

ADT - Organograma



Anexo E

Relatório de Análise Termográfica em HTML

Este anexo tem como objectivo apresentar o relatório de análise termográfica, do ensaio efectuado em laboratório.

Relatório de Análise Termográfica

Este documento disponibiliza informação referente à análise termográfica efectuada no programa ADT.

Contents

- [Imagem Termográfica](#)
- [Gráfico da Variação de Temperatura da Zona Seleccionada](#)
- [Dados Recolhidos da Análise Efectuada](#)

Imagem Termográfica

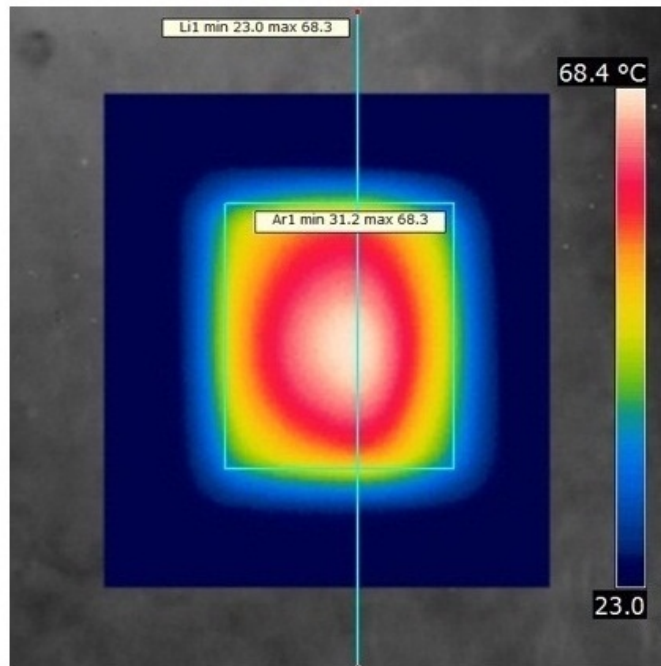
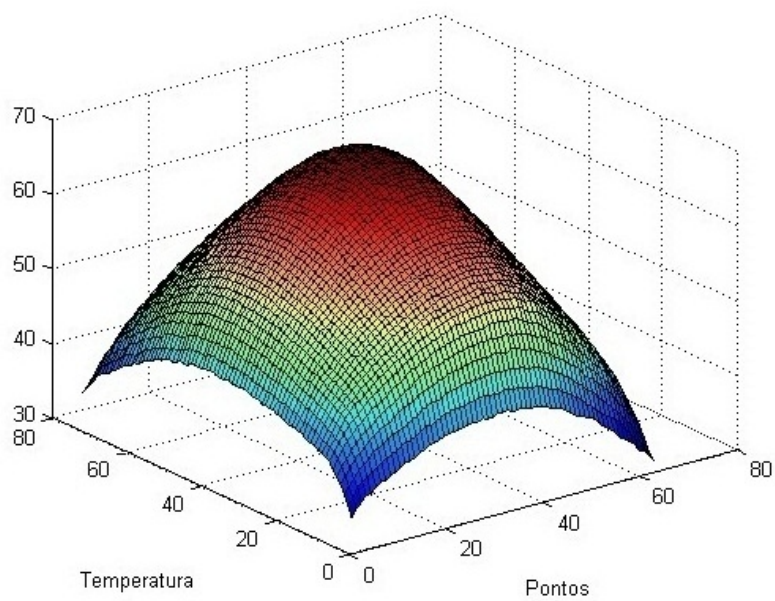


Gráfico da Variação de Temperatura da Zona Seleccionada



Dados Recolhidos da Análise Efectuada

- *Máximo(°C)*; *Mínimo(°C)*; *Média(°C)*; *Média(K)*

68.2900 31.2200 54.3425 327.3425

- *Emissividade; Temperatura da Vizinhança(K); Coeficiente de Convecção(w/m² · K); Área(m²)*

0.8500 296.0000 10.0000 0.0020

- *Poder Emissivo ou Energia Térmica Libertada $E = \epsilon\sigma T_s^4$ (W/m²)*

553.3646

- *Energia Térmica Absorvida $G_{abs} = \alpha G$ (W/m²)*

369.9720

- *Energia Térmica Reflectida $G_{ref} = \rho G$ (W/m²)*

65.2892

- *Irradiação ou Energia Térmica Incidente $G = \sigma T_{viz}^4$ (W/m²)*

435.2611

- *Radiosidade $J = E + G_{ref}$ (W/m²)*

618.6538

- *Fluxo de Calor por Radiação $q''_{rad} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4)$ (W/m²)*

183.3927

- *Taxa de Transferência de Calor por Radiação $q_{rad} = A\epsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4)$ (W)*

0.3714

- *Fluxo de Calor por Convecção $q''_{conv} = h(T_s - T_{viz})$ (W/m²)*

313.4247

- *Balanco Energético Radiação e Convecção $q'' = q''_{rad} + q''_{conv}$ (W/m²)*

496.8173

Desenvolvido por: Tiago Gonçalves - FEUP 2011

Referências

- [1] Ozório Resende C. Filho. Aplicações termográficas na manutenção.
- [2] Tavares Kleber Martins Felipe Rossi Anderson S. Fraga Marcos R. Ensaio não destrutíveis - termografia, Outubro 2009.
- [3] Ricardo e Aline. Termografia. Disponível em <http://www.scribd.com/doc/38190339/TERMOGRAFIA>, acessado a última vez em 09 de Fevereiro de 2011.
- [4] Thermotronics. Curso básico de termografia aplicada à indústria. Setembro 2008.
- [5] Infopédia Porto Editora. Espectro electromagnético. <http://www.infopedia.pt/§espectro-electromagnetico,3/>, acessado a última vez em 07 de Fevereiro de 2011.
- [6] Gustavo Sacadura Botte. Espectro electromagnético. http://nautilus.fis.uc.pt/wwwfi/hipertextos/espectro/hiper_espectro_iv.html/, acessado a última vez em 07 de Fevereiro de 2011.
- [7] Infopédia Porto Editora. Infravermelho. 2003. <http://www.infopedia.pt/§infravermelho>, acessado a última vez em 07 de Fevereiro de 2011.
- [8] Prof. César Augusto Zen Vasconcellos. Lista temática e de problemas no. 2 – radiação de corpo negro. Relatório té, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [9] Eva Sofia Botelho Machado Barreira. *Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Março 2004.
- [10] J. E. Villate. Física moderna - texto de apoio para docentes do 12º ano. Relatório té, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Setembro 2005.
- [11] Paulo Canhoto Ana Moita, Luís Silva. Termografia. Relatório té, Instituto Superior Técnico, Novembro 2000.
- [12] João Afonso. Termografia. Relatório té, ITEAG - Instalações Técnicas Especiais, Lda, Março 2010.
- [13] Hayrton Rodrigues Do Prado Filho. Manutenção preditiva: acompanhando as condições dos equipamentos, Março 2010.
- [14] MRA Instrumentação. Manutenção preditiva. 2011. Disponível em <http://www.mra.pt/industria/produtos/manutencao-preditiva>, acessado a última vez em 09 de Fevereiro de 2011.

- [15] MRA Instrumentação. Câmaras termográficas. <http://www.mra.pt/industria/produtos/manutencao-preditiva/camaras-de-termografia//>, acessido a última vez em 07 de Fevereiro de 2011.
- [16] Manutenção preditiva caminho para a excelência. <http://www.scribd.com/doc/6317650/manutencaopreditivaNascif//>, acessido a última vez em 07 de Fevereiro de 2011.
- [17] A. Muchortov V. Rodionov V. Minein B. Romanov C. Churtin A. Ignatushin Yu.P. Aksyonov, A. Golubev. On-line and off-line diagnostics for power station hv equipment. Relatório té, IEEE.
- [18] Hou Niancang. The infrared thermography diagnostic technique of high-voltage electrical equipments with internal faults. Relatório té, IEEE, 1998.
- [19] Infopédia Porto Editora. Efeito joule. 2003. Disponível em [http://www.infopedia.pt/\\$efeito-joule](http://www.infopedia.pt/$efeito-joule), acessido a última vez em 09 de Fevereiro de 2011.
- [20] Javad Haddadnia Abolfazl Rahmani. Intelligent fault detection of electrical equipment in ground substations using thermo vision technique. Relatório té, IEEE, 1997.
- [21] Chuck Peterson. Peterson predictive maintenance. <http://www.petersonpredict.com/>, acessido a última vez em 16 de Março de 2011.
- [22] Artur Fernandes Costa. *Acetatos de Máquinas Eléctricas - Capítulo 1 Fundamentos de Máquinas Eléctricas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [23] António João Marques Cardoso. *Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos*. Coimbra Editora, 1991.
- [24] Howard A. Gaberson. Rotating machinery energy loss due to misalignment. Relatório té, IEEE, 1996.
- [25] Cristian H. De Angelo José M. Bossio, Guillermo R. Bossio. Angular misalignment in induction motors with flexible coupling. Relatório té, IEEE, 2009.
- [26] Senior Member IEEE Gérard-André Capolino Fellow IEEE Sophie Sieg-Zieba Javad Rastegar Fatemi, Humberto Henao. Load influence on induction machine torque and stator current in case of shaft misalignment. Relatório té, IEEE, 2009.
- [27] A. Pharmatrisanti H. Gumilang B. Cahyono R. Siregar N.Y. Utami, Y. Tamsir. Evaluation condition of transformer based on infrared thermography results. Relatório té, IEEE, Julho 2009.
- [28] *Manual de Instalação e Manutenção para Transformadores a Óleo*. WEG.
- [29] *Transformadores de Força*. Siemens.
- [30] Fernando Pires Maciel Barbosa. *Políticas Energéticas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [31] Chu Kiong Loo Wai Kit Wong, Poi Ngee Tan e Way Soong Lim. An effective surveillance system using thermal camera. Relatório té, IEEE, 2009.
- [32] B K Sarkar. *Thermal Engineering*. Tata McGraw-Hill, 2005.

- [33] R Rudramoorthy. *Thermal Engineering*. Tata McGraw-Hill, 2006.
- [34] Octave Levenspiel. *Termodinâmica Amistosa para Engenheiros*. Edgard Blucher LTDA.
- [35] David P. DeWitt Frank P. Incropera. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa - Quinta Edição*. LTC, 2003.
- [36] Professor Eduardo Loureiro. *Transmissão de Calor*. POLI/UPE.
- [37] B.K. Venkanna. *Heat and Mass Transfer*. Asoken K. Ghosh, PHI, 2010.
- [38] P. K. NAG. *Heat and Mass Transfer Second Edition*. Tata McGraw-Hill, 2007.
- [39] José Carlos Fernandes Teixeira Pedro Alexandre Moreira Lobarinhas. *Transferência de Calor por Convecção*. Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade do Minho, 2004.
- [40] J Carlos Lopes da Costa. *Radiação Térmica*. ISEP Departamento de Engenharia Mecânica.
- [41] Cristiano S. de Abreu Carlos A. A. Vinhais. Introdução ao matlab. Relatório té.
- [42] Steven L. Eddins Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. *Digital Image Processing using MATLAB*. Prentice- Hall, 2003.

