

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

LUIZ HENRIQUE NEVES RODRIGUES

**ANÁLISE DE IMAGENS TÉRMICAS GERADAS
POR CÂMERA DE TERMOVISÃO NO ESTUDO DE
ISOLADORES DE COMPÓSITOS EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**



Recife,
2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

**ANÁLISE DE IMAGENS TÉRMICAS GERADAS POR CÂMERA
DE TERMOVISÃO NO ESTUDO DE ISOLADORES DE
COMPÓSITO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Cartografia e Sistemas de Geoinformação defendida e aprovada no dia 26/08/2009.

**Orientador: Prof° Dr. Admilson P. Pachêco
Co-orientador: Prof° Dr. Fábio Santana Magnani**

Recife
2009

R696a

Rodrigues, Luiz Henrique Neves.

Análise de imagens térmicas geradas por câmera de termovisão no estudo isoladores de compósitos em linhas de transmissão / Luiz Henrique Neves Rodrigues.- Recife: O Autor, 2009.
xiv, 127 folhas, il : figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociência e Tecnologias de Geoinformação, 2009.

Inclui Bibliografia e Anexos.

1. Geociências. 2.Sensoriamento Remoto. 3.Termovisão.
4.Isolador de Compósitos. 5.Linha de Transmissão I. Título.

UFPE

526

CDD (22. ed.)

BCTG/2009-201

**ANÁLISE DE IMAGENS TÉRMICAS GERADAS POR
CAMÊRA DE TERMOVISÃO NO ESTUDO DE
ISOLADORES DE COMPÓSITO EM LINHA DE
TRANSMISSÃO**

POR

LUIZ HENRIQUE NEVES RODRIGUES

Dissertação defendida e aprovada em 26/08/2009.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. ADMILSON DA PENHA PACHECO
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. techn. ANDRÉA DE SEIXAS
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA
Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Pernambuco

À minha mãe Marlene, por ter me ensinado a paciência no viver...
Ao meu pai Dr. Zé Fernando Rodrigues (*in memoriam*), pela ciência e trabalho...
Aos meus filhos Lia, Luiz e Fernando pelo convívio maravilhoso...

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio.

À Fátima Prestes pelos momentos de alegria e apoio; e principalmente pelo tempo de afastamento no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof^o Dr. Admilson P. Pachêco, pela orientação desse trabalho, pela amizade e pela motivação da escolha da termografia como linha de pesquisa.

Ao Prof^o Dr. Fábio Santana Magnani, pela co-orientação desse trabalho que valeu como orientação, pela amizade, por sua sede de conhecimento ser fonte de motivação, pela disponibilidade, pelo exemplo de profissional que representa e por permitir o crescimento do outro.

À Dr. Techn. Andrea de Seixas, pela presteza em resolver todos os nossos problemas acadêmicos

Ao Prof^o Dr. Armando Hideki Shinohara, pelo empréstimo da amostra de isolador polimérico.

Ao Professores do DEPARTAMENTO, Ana Lúcia e Adeildo, pelo convívio e pela experiência transmitida.

À Doutoranda Renata da Silva do DEMEC/UFPE, pela ajuda na determinação dos parâmetros do resistor e na confecção do cilindro das amostras de gesso.

Aos professores e funcionários do DEPARTAMENTO/UFPE, pelo convívio.

Aos professores Pedro Rosas e Antônio Belfort do DES/UFPE.

Ao Dr. Antônio Paollilo, pelo fornecimento dos resistores usados nas experiências.

Aos alunos Marcos Vinícius e Alcides pelo convívio e pelo grande apoio nos estudos e experimentos em Laboratório.

Aos colegas Carol, Thyago, Haroldo e Janaína (in memoriam) pelo convívio.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE pelo empréstimo da Câmera de infravermelho.

RESUMO

Estudos de Sensoriamento Remoto na faixa espectral do infravermelho termal (8 a 14 micrometros) permitem análises qualitativa e/ou quantitativa através de imagens termais da distribuição de temperatura superficial de objetos. A termografia por infravermelho pode ser dividida em dois tipos de termografia: a ativa e a passiva. Na passiva os imageamentos termais são realizados com o objeto aquecido pelo próprio processo físico observado (e.g., organismos vivos, fornos industriais e caldeiras). Na ativa, o aquecimento é artificialmente. Dessa forma pode-se analisar o comportamento térmico do objeto durante o resfriamento a partir do registro das distribuições de temperatura da superfície e identificar a presença de anomalias (invisíveis a olho nu). No Brasil, empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica e empresas especializadas em manutenção industrial preditiva fazem uso da termografia para detecção de pontos quentes em dispositivos elétricos. Em escala menor de utilização estão as indústrias que possuem equipamentos com temperatura de operação bem acima da temperatura ambiente como caldeiras, fornos e tubulações. A grande sensibilidade (0,08 °C) e a baixa precisão das câmeras de infravermelho (± 2 °C ou 2% da leitura, o que for maior) levam à utilização da termografia apenas em análises qualitativas. Além de imagens térmicas, a Ciência dispõe apenas de modelos baseados em um pequeno número de pontos de temperatura para a compreensão de processos de transferência de calor. Mas a termografia também pode ser usada em análises quantitativas, como na determinação de perdas energéticas em grandes equipamentos industriais. Neste contexto o objetivo principal deste estudo é estabelecer uma metodologia de Sensoriamento Remoto capaz de identificar, automaticamente isoladores poliméricos constituintes de Linhas de Transmissão, através da detecção de seus contornos e subseqüentemente definir as regiões de interesse para determinar pontos de máxima e mínima temperatura. Foram realizados quatro experimentos em laboratório e um em campo. A metodologia utilizada nas experiências divide-se em três partes: (a) método experimental, que consiste no aquecimento das amostras e na gravação de imagens termais; (b) método de pré-processamento, onde os termogramas foram manipulados através de paletas de cores, e a matriz contendo as temperaturas registradas pelos bolômetros da câmera de infravermelho FLIR S45[®] foi gerada e importada para o MS_EXCEL[®]; (c) e método de processamento digital das imagens termais. Para a detecção dos contornos foram utilizados diversos filtros derivativos (Laplacianos, Sobel, Canny, Prewitt, etc.). Os processamentos mostraram que os estimadores do tipo Sobel apresentaram os melhores resultados para os limiares entre 0,03 e 0,08. Em limiares acima de 0,08 ocorreu a perda dos dados, pois o filtro atenuava toda a informação contida na imagem. Para limiares abaixo de 0,03 houve um exagero de contornos. Nas experiências com os limiares adequados ($0,03 < Li < 0,08$) foram determinadas, com razoável precisão, as regiões de interesse, as temperaturas das amostras e os parâmetros geométricos do segmento de isolador polimérico utilizado como uma das amostras, bem como de um resistor incluso nas amostras de gesso. Na experiência em campo só foi possível a análise qualitativa, pois a relação distância de foco/dimensão do isolador não foi compatível com as lentes utilizadas, ou seja, a distância da câmera ao isolador foi da ordem de 6 metros, o que está muito grande comparado a largura do isolador. Este resultado, que é bastante relevante do ponto de técnico-científico, serviu para indicar o modelo de lente necessário para aquisição de dados térmicos em campo obtidos através de câmera de termovisão. Outro resultado qualitativo demonstrado foi o “efeito aleta” que os terminais do resistor provocam no processo de resfriamento.

Palavras-chaves: sensoriamento remoto, infravermelho, termovisão, detecção de contornos, linhas de transmissão, isoladores poliméricos

ABSTRACT

Studies of Remote Sensing in the thermal infrared range (8 to 14 micrometers) allow quantitative and/or qualitative analysis through thermals images of the superficial temperature distribution of the objects. The thermograph by infrared can be divided in two types: active and passive. In the passive one the thermals imaging are done with the heating of the object by the observed physics processes itself (e.g. life organisms, industrials ovens and boilers). In the active one, the artificial heating is done. In this way, can to analyze the thermal behavior of the object during the cooling starting from the recording of the temperature distributions of surface and to identify the anomaly existence (invisible for the humans without instruments). In Brazil, generation company and distributor of electric energy and industry predictive maintenance specialists companies use thermograph to detects the hot points in electrical devices. In lower scale of the utilization the industries that own equipments with operation temperature much above to the environment temperature like boilers, ovens and tabulations. The high sensibility (0,08 °C) and the low precision (± 2 °C ou 2%) of the infrared cameras drive through to use the thermograph only in qualitative analysis. In addition to the thermal images, the science have only the models based in little number of points of temperature to understand the heat transfer processes. The thermograph also can be used in quantitative analysis, like in losing energy detection in big industrial equipments. In this context, the main objective of this study is to develop a methodology of remote sensing capable to identify, automatically elements constitutive of the Electrical Energy Transmission Lines in high voltage (polymeric isolators), through its contours and subsequently to define the regions of interest to determinate points of maximum and minimum temperature. Four experiments were done in laboratory and one in the field. The methodology used in the experiences divides in three parts: (a) experimental method, that consist in the heating the samples and the recording of the thermals images; (b) preprocessing method, where the thermographs were manipulated through palettes of colors and the matrix contains the temperature recorded by the bolometers of thermocam FLIR S45TM was generated and imported to MS EXCELTM; (c) digital processing method of the thermal images. To determinate the counters was used several derivative filters (Laplacian, Sobel, Canny, Prewitt, etc.). The processes show that the estimators of the Sobel type present the best results for the thresholds between 0.03 and 0.08. In the thresholds above 0.08 data loses was observed, thus the filter mitigate the information in the image. For thresholds down to 0.03, an exaggeration of the contours was observed. For the cases of the experiments with the appropriated thresholds ($0.03 < Li < 0.08$) were determinate, with reasonable precision, the regions of interest, the temperatures of the samples, and the geometrics parameters of the polymeric isolator piece used as one of the samples, as well as of the resistor hidden in the gipsy samples. In the experiment in field only a qualitative analysis was possible, thus the rate focal distance/ dimension of the isolator is not compatible with the lens used, e.g., the distance from the camera to the isolator was in order to 6 meters, that is too much compared to the insulator width. This result served to indicate the model lens needed for thermal data acquisition in the field through the thermal camera. Other qualitative results demonstrated was the “wing effect” that the terminals of the resistors present in the cooling process.

Keywords: remote sensing, infrared, thermovision, contours detection, transmission line, polymeric insulator.

Sumário

1 . Introdução	1
1.1 Objetivo Geral.....	2
1.2 Objetivos Específicos.....	3
2 . Aspectos Fundamentais	5
2.1 Sistemas de Referência.....	5
2.2 Termografia: Mecanismo de Detecção de Temperatura.....	11
2.3 Processamento Digital de Imagens Termiais.....	27
3 . Experimentos com Imagens Termiais de um Isolador de Compósito Adquiridas em Laboratório	33
3.1 Aspectos Fundamentais Específicos.....	33
3.2 Procedimento Experimental e Processamento Digital das Imagens Termiais.....	46
3.3 Resultados.....	54
3.4 Discussão.....	61
3.5 Conclusão e Recomendações.....	61
4 . Experimentos com Imagens Termiais de um Placas de Gesso com ou sem a Inclusão de um Resisto Eletrônico	63
4.1 Aspectos Fundamentais Específicos.....	63
4.2 Procedimento Experimental e Processamento Digital das Imagens Termiais.....	67
4.3 Resultados.....	86
4.4 Discussão.....	91
4.5 Conclusão.....	92
5 . Experimentos com Imagens Termiais de um Placas de Gesso com ou sem a Inclusão de um Resisto Eletrônico	93
5.1 Introdução.....	93
5.2 Aspectos Específicos.....	93
5.3 Procedimento Experimental e Processamento Digital das Imagens Termiais.....	96
5.4 Resultados.....	105
5.5 Discussão.....	114
5.6 Conclusão.....	114
6 . Conclusão	116
7 . Referências Bibliográficas	119
Anexos	124

SIMBOLOGIA

SÍMBOLOS

	Denominação	Unidade (SI)
U_{tot}	Tensão de saída medida pela câmara para o caso real	V
U_{obj}	Tensão de saída calculada pela câmara para um corpo negro de temperatura T_{obj}	V
U_{refl}	Tensão de saída teórica da câmara para um corpo negro de temperatura T_{refl}	V
U_{atm}	Tensão de saída teórica da câmara para um corpo negro inserido num meio de temperatura T_{atm}	V
W_b	Poder emissivo total do corpo negro	W/m ²
W_o	Poder emissivo total de um objeto real	W/m ²
$W_{\lambda b}$	Poder emissivo espectral do corpo negro no comprimento de onda λ	W/m ² μ m
W_{tot}	Poder emissivo total que alcança o sistema de microbolômetro	W/m ² μ m
W_{refl}	Poder emissivo total emitido por todas as superfícies num hemisfério visto de um ponto do objeto	W/m ²
μ m		
W_{atm}	Poder emissivo total emitido pela atmosfera entre a câmara e o objeto	W/m ² μ m

SÍMBOLOS GREGOS

	Denominação	Unidade (SI)
ϵ	Emissividade	
λ	Comprimento de onda	μm
ν	Frequência da onda	Hz
ν	Viscosidade cinemática	m^2/s
ρ	Reflectividade	
τ	Transmissividade	

CONSTANTES

	Denominação	(SI)
c	Velocidade da luz no vácuo	$[2,998 \times 10^8 \text{ m/s}]$
h	Constante de Planck	$[6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}]$
k	Constante de Boltzmann	$[1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}]$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$[5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4]$

LISTA DE FIGURAS

❖ Capítulo 2

Figura 2.1 Determinação das coordenadas de um ponto através da medição polar. Fonte: de SEIXAS et al. (2003)	6
Figura 2.2 Nível do tripé, suporte utilizado para nivelar o instrumento	6
Figura 2.3 (a) Câmera ThermaCAM® S45. (b) Determinação do centro do sistema de referência do instrumento. (Fonte: FLIR, 2009)	7
Figura 2.4 Sistema de Coordenadas Cartesianas. Fonte: de SEIXAS et al. (2003)	7
Figura 2.5 Sistema de Coordenadas Cilíndrico. Fonte: de SEIXAS et al. (2003)	8
Figura 2.6 Diagrama da relação entre campos de visão e distância. 1: Distância até o alvo; 2: VFOV = Campo de Visão Vertical; 3: HFOV = Campo de Visão Horizontal; 4: IFOV = Campo de Visão Instantâneo (tamanho de um elemento detector). Fonte: FLIR (2009)	8
Figura 2.7 (a) Posicionamento das amostras sobre as bases de aço (b) posicionamento da câmera em relação às amostras (c) Dimensões da amostra de gesso com um cilindro de aço incluído (mm). Fonte: MAGNANI & DA SILVA (2007)	10
Figura 2.8 Evolução da distribuição de temperatura superficial da amostra com inclusão. Fonte: MAGNANI & DA SILVA (2007)	10
Figura 2.9 Determinação do centro de uma inclusão diretamente na termografia Fonte: MAGNANI e DA SILVA (2007)	10
Figura 2.10 Termografia do campanário da Igreja do Carmo. Fonte: LIMA, MAGNANI, e DA SILVA (2005)	12
Figura 2.11 Detecção de Pontos Quentes em Instalações Elétricas (a) Imagem Óptica (b) Termografia Fonte: DA SILVA, MAGNANI e LIMA, 2006	13
Figura 2.12 Espectro Eletromagnético: 1. Raio s-X e Gama; 2. UV; 3. Luz Visível; 4. Infravermelho; 5. Microondas; 6. Ondas radioelétricas. Fonte: FLIR (2009)	17
Figura 2.13 Interação e Efeitos entre Onda e Matéria. Fonte: FLIR (2009)	17
Figura 2.14 Emitância radiante espectral do corpo negro segundo a Lei de Planck, representada graficamente para várias temperaturas absolutas. 1: Emitância radiante espectral ($W/cm^2 \times 10^3 [\mu m]$); 2: Comprimento de onda [μm] Fonte: FLIR(2009)	20
Figura 2.15 Curvas de Planck em escalas semi-log de 100 K até 1.000 K. A linha pontilhada representa o lugar geométrico da emitância máxima a cada temperatura pelo Comprimento de onda. Fonte: FLIR (2009)	21
Figura 2.16 Emitância espectral (1) de três tipos de radiadores pelo Comprimento de Onda (2) onde os gráficos 3: Corpo Negro; 4: Assinatura Espectral; 5: Corpo cinzento. Fonte: FLIR (2009)	22
Figura 2.17 Representação da medição termográfica 1. Meio Adjacente 2. Objeto Analisado (b) Meio Adjacente 3. Atmosfera e 4. Câmera. Fonte: FLIR (2006)	23
Figura 2.18 Sistema de microbolômetro de 320 por 240. Fonte: <i>Infrared Solutions</i> (acessado em Nov. 2008)	24
Figura 2.19 Transmitância do infravermelho no gás carbônico (CO ₂) e na água (H ₂ O). Fonte: FLIR (2009)	25
Figura 2.20 Arranjos: Sensor individual, uma fileira de sensores e uma matriz de sensores (Retirado do Gonçalves e Wood, 2009)	29
Figura 2.21 (a) Imagem contínua projetada na matriz de sensores; (b) Resultado da Imagem amostrada e quantizada. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	29
Figura 2.22 Determinação do sistema de coordenadas (Referência) da câmera. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	30
Figura 2.23 Conceito de vizinhança. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	31
Figura 2.24 Máscara de filtros	32
Figura 2.25 Máscara no processo de filtros. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	32

❖ Capítulo 3

Figura 3.1 Geração de imagem digital (a) Imagem contínua. (b) "Plotagem" dos valores de amplitude (níveis de cinza) da imagem contínua sobre um segmento de reta AB. (c) Amostragem e Quantização. (d) Valores digitalizados da intensidade da imagem em AB. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	34
Figura 3.2 (a) Fonte de energia. (b) Um elemento da cena. (c) Sistema de Imageamento. (d) Projeção da cena no plano de sensores. (e) Imagem digital. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	35
Figura 3.3 Máscaras de filtros suavizantes	36

Figura 3.4 (a) Máscara do filtro usada para implementar o Laplaciano digital. (b) máscara usada com a extensão das equações que inclui os pixels vizinhos da diagonal, (c) e (d) duas outras implementações do Laplaciano. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).	38
Figura 3.5 (a) Imagem do Pólo Norte da Lua. (b) imagem filtrada com Laplace formato unit8. (c) imagem filtrada Com Laplace formato double e (d) Realce resultante da subtração de (c) de (a). Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	40
Figura 3.6 (a) Imagem original (rices.pgn). (b) imagem resultante do imcontour Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	41
Figura 3.7 (a) Imagem original (coins.pgn). Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	42
Figura 3.8 Imagens resultantes do uso dos filtros de Sobel e Canny. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009)	42
Figura 3.9 (a) Amostra manipulada com luvas de raspas de couro; (b) Estufa utilizada para aquecer as amostras	46
Figura 3.10 Amostra na base	46
Figura 3.11 Logger HH84 e Termohigroanemometro HHF7-P2	48
Figura 3.12 Termogramas da amostra (Isolador)	48
Figura 3.13 Termogramas registrando o resfriamento (a) t= 0 e (b) t = 20 min	49
Figura 3.14 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2.	49
Figura 3.15 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2.	50
Figura 3.16 (a) e (b) Binarizações. (c) filtragem geradas pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2.	50
Figura 3.17 Matriz temperatura em MS-Excel gerada pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2.	51
Figura 3.18 Saída de Máscara da ROI com a binarização de temperatura.	52
Figura 3.19 (a) Imagem IR_3961 (Realizada 28/05/08, 09:29 h). (b), (c) e (d) imagens componentes no plano HSI (Realizada 16/06/09, 16:22 h)	53
Figura 3.20 IR_3961(I) componente I do plano de cores HSI (Realizada 16/06/09, 16:22 h)	55
Figura 3.21 (a)IR_3961_l(g8). (d)sobel_pnt03. (e)sobel_pnt01.	56
Figura 3.22 (a) IR_3961_l(g8)g_sobel_pnt3. (b) sobel_pnt08. (c)sobel_pnt05. (d)sobel_pnt03. (e)sobel_pnt01	57
Figura 3.23 (a) IR_3961_l(g8)g_sobel_pnt03_clsBW (b) sobel_pnt05_clsBW (c) Fill_octag3	58
Figura 3.24 (a) IR_3961_l Alter (g8)Sobel_pt03_clsBW(newg4)_pt04. (b) 0,09, (c) 0,1.	58
Figura 3.25 (a)IR_3921(g8(conv)g8)l_sobel_ponto26)close(disk10) (b) newg8.	58
Figura 3.26 IR_3921(g8(conv)g8)l_sobel_ponto26)close(disk02)(newg4(1).(b) close e disk com 10.	59
Figura 3.27 Tela do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador).	60
Figura 3.28 Telas do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador).	60
Figura 3.29 Área de trabalho do MATLAB com a temperatura Máxima e mínima	61
❖ Capítulo 4	
Figura 4.1 Volume elementar e seus vizinhos. Situação (a) bidimensional e (b) tridimensional (extraído de Maliska (2004)).	64
Figura 4.1 Medição do pó de gesso em balança digital	67
Figura 4.2 (a) Resistor incluso; (b) Família dos resistores utilizados. (c) Geometria das amostras com o resistor incluso	68
Figura 4.3 Molde para gesso (a) Partes constituintes (b) Impermeabilização (c) suporte do resistor (d), (e) e (f) Processo de posicionamento do resistor na amostra. Posicionamento (setas vermelhas) dos terminais do resistor nas placas (g) Terminais do resistor por trás; (h) e (i) Terminais do resistor pelos lados (Realizadas entre 29/04/08 17:43 h e 30/04/08 11:11 h).	69
Figura 4.4 Logger HH84 e Termohigroanemometro HHF7-P2	70
Figura 4.5 Fonte MPS – 303D (Realizada em 30/04/08 10:15 h) e Multímetro Digital ET – 3850 (Realizada em 30/04/08 10:16 h) usados da experiência Exp3.	71
Figura 4.6 Estufa utilizada para aquecer as amostras.	72
Figura 4.7 Banca (Realizada em 07/05/08 10:00:53 h)	73
Figura 4.8 Termogramas da amostra (Realizada em 07/05/08 10:00:53 h)	73
Figura 4.9 A influência da posição dos terminais do resistor no processo de resfriamento das placas (Esquerda = lateral e direita = traseira) (a) T = 0; (b) T = 15 min e (c) T = 30 min. (Realizadas em 30/05/08 entre 9:30 e 10:04 h)	74
Figura 4.10 Imagem IR_4985 suas imagens componentes (plano HSI) H, S e I, respectivamente.	75

Figura 4.11 Termogramas registrando o resfriamento (a) $t = 0$, (b) $t = 10$ (c) $t = 20$ e (d) $t = 30$ min.	76
Figura 4.12 (a) Aquecimento via tensão elétrica; (b) Detalhe da conexão (Realizadas em 06/06/08 09:21 h).	76
Figura 4.13 (a) Imagem termal, (b) Amostra com resistor na bancada.	77
Figura 4.14 Imagem IR_3715 (Realização registrada na imagem).	78
Figura 4.15 Variação da temperatura estabilizada proporcional as tensões impostas nos terminais do resistor e indicadas abaixo dos termogramas (a) 26,83 V, (b) 23,24 V, etc. (Registro de datação nos termogramas)	79
Figura 4.16 Comparação de termogramas de superfícies onde a profundidades dos resistores são diferentes (Datação nos termogramas)	81
Figura 4.17 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2 (Realizada em 17/03/09 18:54 h).	82
Figura 4.18 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2 (Realizadas em 29/06/09 entre 22:04 – 22:06 h).	82
Figura 4.19 (a) e (b) Binarizações. (c) filtragem geradas pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2 (Realizadas em 12/03/09 entre 10:55 e 10:58).	83
Figura 4.20 Matriz temperatura em MS-Excel [®] gerada pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2. IR_3715 (Realizada 30/06/09, 19:50 h)	83
Figura 4.21 (a) Imagem IR_3715 (Realizada 12/05/08, 12:23 h). (b), (c) e (d) imagens componentes no plano HSI (Realizada 30/06/09, 19:50 h)	84
Figura 4.22 IR_3715_s(S) componente S do plano de cores HSI (Realizada 02/07/09, 00:05 h)	87
Figura 4.23 (a)IR_3715_s(f). (b)IR_3715_s(g4). (c)IR_3715_s(g8).	88
Figura 4.24 Tela do Excel destacando o formato do objeto (resistor). Arquivo: IR_3715_s_Matriz_RESISTOR.xls (Realizado 02/07/09, 00:28 h)	89
Figura 4.25 Telas do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador). Imagem IR_3715_s_Excel (Realizada 30/06/09, 12:23 h)	90
Figura 4.26 Área de trabalho do MATLAB com a temperatura Máxima e Mínima Imagem IR_3715 (Realizada 30/06/09, 19:50 h)	91

❖ Capítulo 5

Figura 5.1 (a) Torre. (b) Instalação. (c) Suporte da câmera.	97
Figura 5.2 (a) Torre. (b) Instalação. (c) Suporte de metal da câmera.	97
Figura 5.3 Vista do Isolador imageado.	98
Figura 5.4 (a) Instrumentos auxiliar de campo da esquerda para a direita: Logger HH84, Luxímetro – Fabricante Instrutherm – Modelo LDR-208, Termohigroanemometro HHF7-P2 e (b) Gerador de radiação em infravermelho Fabricante Omega – Modelo BB701.	98
Figura 5.5 Termografias da amostra (IR_6152 às 04:22 h)	100
Figura 5.6 Termografias registrando o aquecimento atmosférico.	100
Figura 5.7 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2.	101
Figura 5.8 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2.	101
Figura 5.9 (a) e (b) Binarizações. (c) filtragem geradas pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2.	102
Figura 5.10 Matriz temperatura em MS-Excel gerada pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2.	102
Figura 5.11 (a) Imagem IR_3961 (Realizada 28/05/08, 09:29 h).	103
Figura 5.12 Imagens Termais e horários dos imageamentos na experiência.	105
Figura 5.13 Imagens Termais e horários dos imageamentos na experiência.	106
Figura 5.14 Evolução da temperatura com o tempo. Tempo 0 corresponde ao horário político local 04:22 h.	106
Figura 5.15 Céu às 04:29 h (Alvorada, antes do nascer do sol)	107
Figura 5.16 Céu às 05:15 h (próximo ao nascer do sol)	107
Figura 5.17 Céu às 06:41 h (Sol encoberto)	107
Figura 5.18 IR_7256 componente I e S do plano de cores HSI (Realizada 16/02/09, 12:12 h)	108
Figura 5.19 (a)IR_7256_I(g4). (b) g8. (c) IR_7256_S(g4). (b) g8.	109
Figura 5.20 (a)IR_7256_I(g4). (b) g8. (c) IR_7256_S(g4). (b) g8.	110
Figura 5.21 IR_7256 e Máscara binarizada pela temperatura (ROI)	112
Figura 5.22 Tela do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador).	113
Figura 5.23 Telas do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador).	113

LISTA DE TABELAS

❖ Capítulo 2

Tabela 2.1 Campos de Visão Horizontal, Vertical e Instantâneo para determinadas distâncias até o alvo. Lente de 124 mm / tipo de câmera 218. Fonte: FLIR (2009).	9
Tabela 2.2 Parâmetros de diversas lentes. Fonte: FLIR (2009).	9
Tabela 2.3 Exemplos de detectores de temperatura. Adaptado de Dereniak e Boreman(1996) apud Da Silva (2007)	24

❖ Capítulo 3

Tabela 3.1 Filtros espaciais suportados pela função fspecial. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).	43
Tabela 3.2 Filtros espaciais suportados pela função edge. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).	44

❖ Capítulo 4

Tabela 4.1 Variáveis Físicas Utilizadas na Pesquisa (Adaptada de IPEM-SP, 2009)	65
Tabela 4.2 Valores de Tensão Utilizadas nos experimentos.	67

1. INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto, através do imageamento termal, permite a análise qualitativa e/ou quantitativa de termogramas da distribuição de temperatura superficial do objeto em estudo. A Termografia (Imageamento Termal) é uma das técnicas usadas para “ver o invisível” (Maldague, 2001), que utiliza a radiação de infravermelho para realizar diagnóstico não-destrutivo através de imagens da distribuição da temperatura superficial de objetos a partir de uma câmera de infravermelho, ou termovisor. Maldague (2001) também constata que existem dois tipos de imageamento termal: ativo e passivo. No imageamento termal passivo, perfis anormais da distribuição de temperatura são um indicativo de potencial problema. Neste tipo de termografia o aquecimento dos objetos é decorrente do próprio processo em que o objeto participa (e.g., processos industriais, atividades biológicas, incidência solar ou outros tipos de fontes, etc.). No imageamento termal ativo, o objeto precisa ser previamente aquecido artificialmente para que alguma forma de alteração na distribuição de temperatura indique as possíveis anomalias existentes, ou seja, anomalias que são “invisíveis a olho nu”, poderão ser percebidas nas distribuições de temperatura. Uma das técnicas de termografia ativa mais utilizada nos diagnósticos não-destrutivos é a submissão da amostra estudada a um estímulo térmico, por um longo período tempo (SH, sigla em inglês de *step heating*).

No começo da década de 80 do século passado, o desenvolvimento das primeiras câmeras de infravermelho com a utilização arranjo focal plano (em inglês, *focal plane array* - FPA), similar a estrutura de estado sólido das câmeras de vídeo CCD (em inglês, *charge-code device*), porém sensível ao infravermelho, revolucionou a indústria do infravermelho. Simultaneamente, a tecnologia de circuitos integrados possibilitou a fabricação de grandes arranjos bidimensionais não refrigerados baseados em microbolômetros.

A câmera S45/FLIR utiliza sistema de microbolômetro com frequência de imagens de 50/60 Hz, faixa de temperaturas de -40°C a 1500°C e precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$ ou 2% de leitura. A faixa espectral é de 7,5 a 13 μm , sendo classificada como uma câmera de LW (long wavelenght). A radiação medida pela câmera depende tanto da temperatura quanto da emissividade do corpo que está sendo analisado. Portanto, a informação da emissividade à câmera é fundamental para uma estimativa precisa da

temperatura do fluxo radiante medido. Normalmente os valores variam de 0,1 a 0,95. Para superfícies extremamente polidas têm-se emissividades inferiores a 0,1 e, para superfícies oxidadas os valores são superiores a 0,95. A transmitância do infravermelho no gás carbônico (CO₂) e na água (H₂O) varia de acordo com o comprimento de onda da radiação. Por esse motivo, a câmera S45/FLIR mede o infravermelho em uma faixa do FIR (*Far Infrared*) onde a absorção atmosférica é pequena.

As tecnologias de infravermelho realizam a aquisição das imagens termais, porém faz-se necessário o Processamento Digital das Imagens adquiridas pelos instrumentos, para se analisar de forma efetiva e poder tornar perceptivos alguns detalhes não detectáveis na observação direta dos termogramas e permitir interfaces com aplicações de automação industrial. As aplicações da Termografia na industrial já é uma prática rotineira, tanto para melhorar a eficiência energética, evitando o desperdício de energia em calor não reutilizável, como na prevenção de falha por aquecimento anômalo (excessivo ou insuficiente). Estas motivações também são percebidas nas empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica, onde tanto as perdas por calor como a falha por aquecimento inadequado são grandes causadores de ineficiência energética dos componentes dos parques de geração, linhas de transmissão e distribuição.

1.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo principal contribuir com o desenvolvimento de tecnologia que permita a aplicação do infravermelho na indústria através de processos que compõem uma metodologia de Sensoriamento Remoto capaz de identificar objetos através de seus contornos e, subseqüentemente, reconhecer as regiões de interesse para a análise de sua distribuição de temperatura superficial. Para atingir este objetivo, fez-se necessário o estabelecimento da teoria relacionada e foram realizados quatro experimentos em laboratório e um em campo.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o imageamento termal ativo em laboratório de modo a comprovar a eficácia da aplicação da metodologia proposta antes de aplicar em campo;
- Definir os Sistemas de Referência de Instrumento e do Objeto adequados a aquisição e análise de dados no Sensoriamento Remoto;
- Estudar a Termodinâmica e a Termografia que regem os fenômenos envolvidos de modo a permitir a análise das imagens termais a curta distância;
- Estudar a aplicação do ferramental disponível de Análise Espectral e o Processamento Digital de Imagem (PDI) através da detecção de contornos no diagnóstico dos elementos que compõe as linhas de transmissão;
- Estudar a teoria eletromagnética para a caracterização dos elementos que compõe as linhas de transmissão;
- Descrever os experimentos realizados em laboratório e no campo, que estabelecem a aplicação da metodologia proposta;
- Apresentar os resultados das análises das imagens termais das amostras que comprovam a metodologia que se divide em três processos: (a) aquisição de dados; (b) processamento intermediário; e (c) análise, através do processamento digital de imagens;
- Solucionar o seguinte problema: “Como a análise do imageamento termal pode auxiliar no diagnóstico não destrutivo dos elementos de uma linha de transmissão nas inspeções simples e rotineiras?”;

- Estudar o imageamento termal passivo em campo, pois nestas condições não é necessária a aplicada nenhuma forma de aquecimento externo ao processo no qual a amostra já sofre no seu funcionamento.

2. ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Esta dissertação em sua concepção é multidisciplinar e envolve as técnicas e atividades de diferentes áreas das Engenharias Cartográfica, Mecânica e Elétrica. A Engenharia Cartográfica inclui o Sensoriamento Remoto e a Geodésia, e fornece o tratamento adequado através dos Sistemas de Referência de Instrumento e do Objeto na etapa de aquisição e análise de dados. A Engenharia Mecânica envolve o estudo da Termodinâmica e Termografia, e inclui a análise das imagens termais a curta distância; e a Engenharia Elétrica fornece, além da caracterização dos elementos que compõem as linhas de transmissão, todo o ferramental de Análise Espectral e o Processamento Digital de Imagem (PDI) e Espectrografia. Portanto, o objetivo específico deste capítulo é apresentar de forma geral a fundamentação teórica que suportou os experimentos que fazem parte desta dissertação.

2.1 Sistemas de Referência

Segundo de SEIXAS et al. (2003) um sistema apropriado de coordenadas do objeto deverá ser empregado (de SEIXAS, 2001), caso o objeto tenha uma forma geométrica típica (cubo, esfera,...). Normalmente, os sistemas de coordenadas são denominados da seguinte forma:

(x,y,z) – Sistema de coordenadas do instrumento

(X,Y,Z) – Sistema de coordenadas superior e

- Sistema de coordenadas do objeto

As coordenadas tridimensionais x_i , y_i , z_i de um ponto objeto P_i podem ser determinadas através de medições polar com a origem no centro do instrumento e definidas pelos ângulos H_{z_i} e V_i , horizontal e vertical, respectivamente, e com origem no centro do instrumento (Figura 2.1). O instrumento que foi posicionado e centrado através de um fio a prumo no local fixado no chão do laboratório que está a 60 cm da projeção vertical da amostra, em seguida foi nivelado através nível do tripé (Figura 2.2), de modo que o eixo dos zz , definido pela vertical do ponto de medição,

coincida com o eixo vertical da câmera, o eixo dos xx será definido de modo a interceptar o eixo vertical da câmera no centro da mesma e um ponto escolhido no laboratório que será a direção zero (de referência) do sistema, perpendicular a linha do ponto fixado no chão do laboratório à amostra e o eixo dos yy torna o sistema ortogonal dextrógiro.

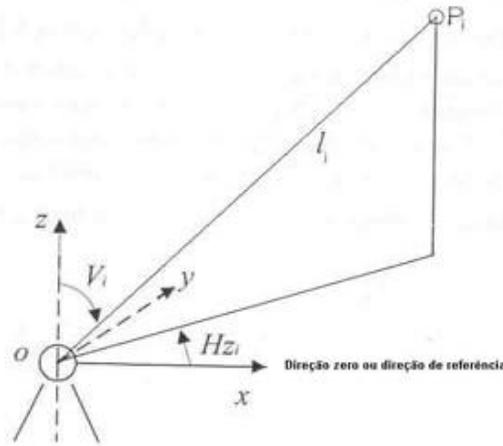


Figura 2.1 Determinação das coordenadas de um ponto através da medição polar.

Fonte: de SEIXAS et al. (2003).



Figura 2.2 Nível do tripé, suporte utilizado para nivelar o instrumento.

Todos os experimentos analisados utilizaram como instrumento de aquisição de dados a câmera de infravermelho da FLIR Systems modelo S45, ilustrada na Figura 2.3 (a), cujo centro coincide com o arranjo focal plano de sensores (bolômetros) onde as imagens são adquiridas (Figura 2.3 (b)).

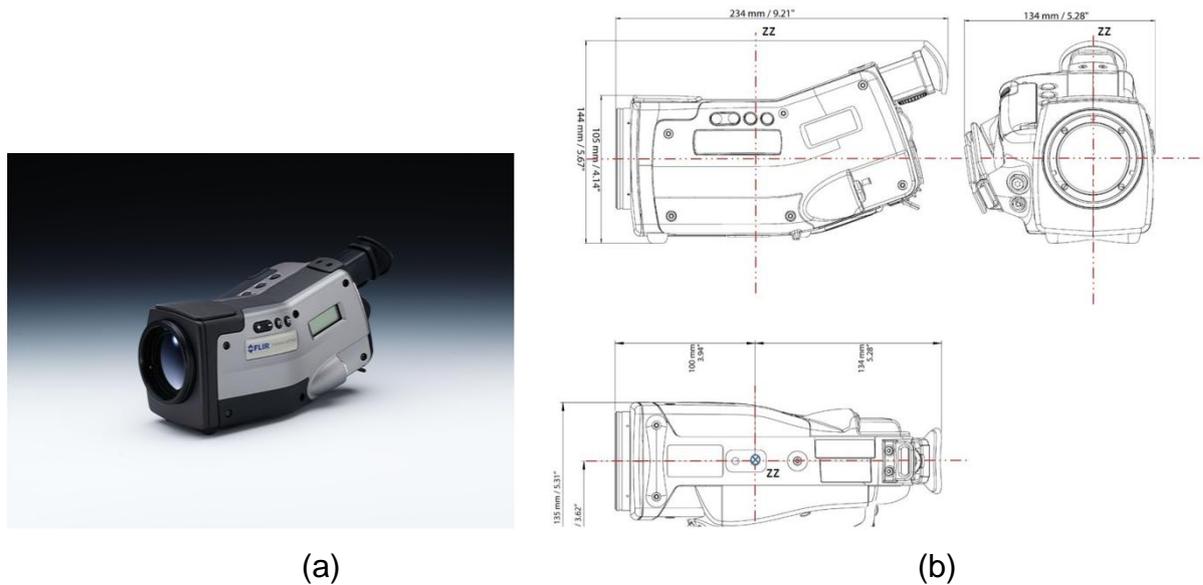


Figura 2.3 (a) Câmera ThermoCAM[®] S45. (b) Determinação do centro do sistema de referência do instrumento. (Fonte: FLIR, 2009)

Se a forma do objeto a ser estudada é pré-conhecida, como em todos os casos estudados nesta dissertação, então definimos um sistema de coordenadas do objeto, o qual apresentará uma forte ligação geométrica com o mesmo, simplificando a interpretação dos resultados. Assim, quando o objeto investigado tem a forma de um cubo, ajunta-se o mesmo a um sistema de coordenadas cartesianas (Figura 2.4).

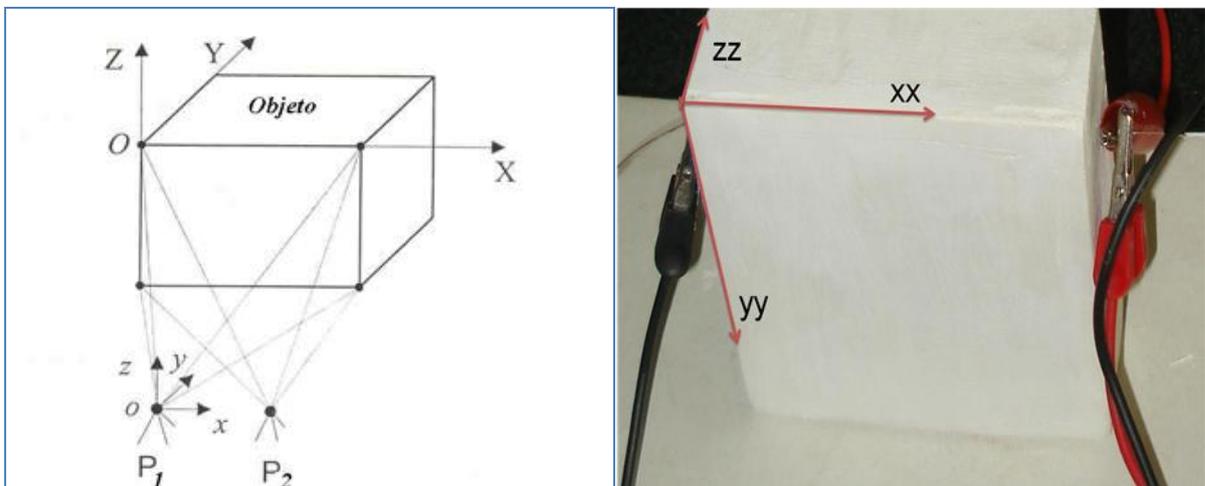


Figura 2.4 Sistema de Coordenadas Cartesianas. Fonte: de SEIXAS et al. (2003).

Os isoladores têm a forma de um disco ou conjunto de disco, o qual é simétrico ao eixo central, então é indicado o sistema de coordenadas cilíndricas (Figura 2.5). Em estudos matemáticos simplifica se for definido um sistema que coincida o eixo central da amostra com o eixo dos zz.

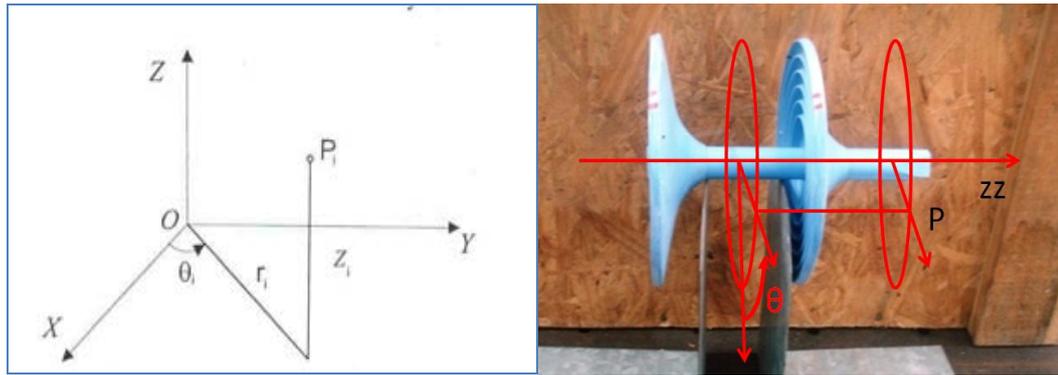


Figura 2.5 Sistema de Coordenadas Cilíndrico. Fonte: de SEIXAS et al. (2003).

Sistemas de medição polar através de câmeras termais são muito utilizados em várias aplicações industriais. A exigência do controle de qualidade, principalmente na indústria mecânica, acelera o desenvolvimento de novos sistemas de medição tridimensionais e novos métodos de medição. Estes métodos permitem a identificação destes objetos e o monitoramento de suas formas. O monitoramento e o controle geométrico do objeto de prova só serão possíveis, quando os sistemas de referência forem devidamente definidos (de SEIXAS et al., 2003).

Para a determinação de Sistemas de Coordenadas foram utilizadas as especificações fornecidas pelo fabricante da câmera de infravermelho, os parâmetros Campos de Visão Horizontal, Vertical e Instantâneo são determinados pela distância até o alvo. Vejamos o exemplo da lente de 124 mm / tipo de câmera 218 especificada no diagrama da Figura 2.6 e nas Tabelas 2.1 e 2.2.

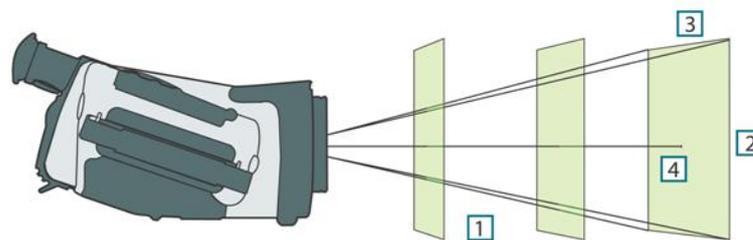


Figura 2.6 Diagrama da relação entre campos de visão e distância. 1: Distância até o alvo; 2: VFOV = Campo de Visão Vertical; 3: HFOV = Campo de Visão Horizontal; 4: IFOV = Campo de Visão Instantâneo (tamanho de um elemento detector). Fonte: FLIR (2009).

Tabela 2.1 Campos de Visão Horizontal, Vertical e Instantâneo para determinadas distâncias até o alvo. Lente de 124 mm / tipo de câmera 218. Fonte: FLIR (2009).

This table only applies to camera type number 218									
<i>Three-digit camera type number is stated on configuration label</i>									
<i>Focal length: 124 mm</i>									
<i>Resolution: 320 x 240 pixels</i>									
<i>Field of view in degrees: 6.83</i>									
D →	0.50	1.00	2.00	5.00	10.00	25.00	50.00	100.00	m
HFOV	0.06	0.12	0.24	0.60	1.19	2.98	5.97	11.94	m
VFOV	0.04	0.09	0.18	0.45	0.90	2.24	4.48	8.95	m
IFOV	0.19	0.37	0.75	1.86	3.73	9.32	18.65	37.30	mm
D →	1.64	3.28	6.56	16.39	32.79	81.97	163.93	327.87	ft.
HFOV	0.20	0.39	0.78	1.96	3.91	9.78	19.57	39.13	ft.
VFOV	0.15	0.29	0.59	1.47	2.93	7.34	14.67	29.35	ft.
IFOV	0.01	0.01	0.03	0.07	0.15	0.37	0.73	1.47	in.
Legend:									
<i>D = Distance to target in meters & feet</i>									
<i>HFOV = Horizontal field of view in meters & feet</i>									
<i>VFOV = Vertical field of view in meters & feet</i>									
<i>IFOV = Instantaneous field of view (size of one detector element) in millimeters & inches</i>									

Tabela 2.2 Parâmetros de diversas lentes. Fonte: FLIR (2009).

Lente →	124 mm	72 mm	36 mm	18 mm	9,0 mm
Limite da focagem aproximada (m)	4	1.2	0.3	0.1	0.15
Limite da focagem aproximada (pés)	13.11	3.93	0.98	0.32	0.49
número f	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Os estudos de Magnani & da Silva (2007) e da Silva (2007) utilizam como sistema de coordenadas dos objetos os sistemas cartesianos na determinação dos parâmetros geométricos e termofísicos de objetos inclusos escondidos em uma placa de gesso cúbica.

As termografias gravadas durante um resfriamento natural são usadas para determinar características termofísicas e espaciais dos materiais. Duas amostras são usadas: uma fabricada completamente de gesso e outra fabricada com um cilindro de aço engastado (Figura 2.7 a, b e c). As amostras são aquecidas a 120 °C e deixadas para resfriar por convecção natural em uma sala a 30 °C.

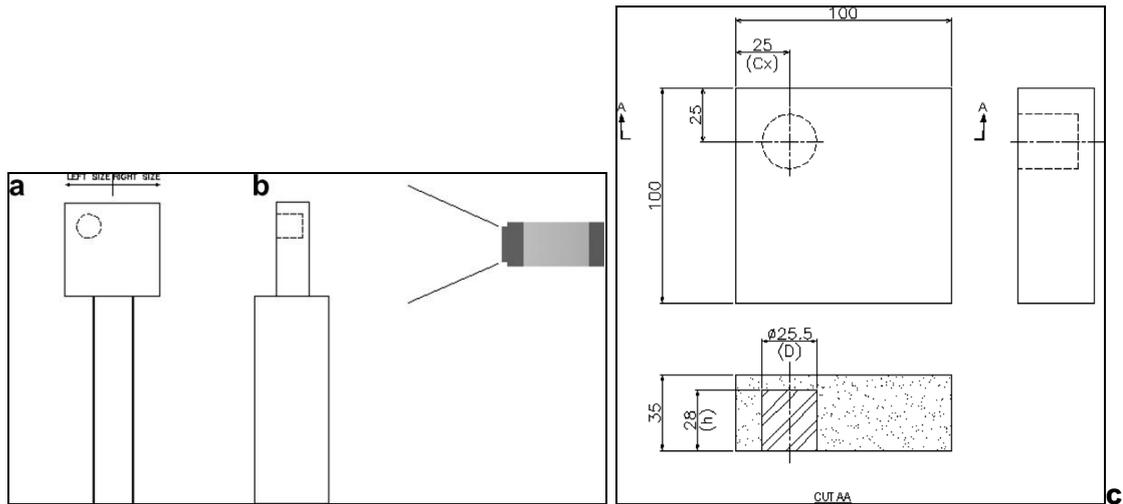


Figura 2.7 (a) Posicionamento das amostras sobre as bases de aço (b) posicionamento da câmera em relação às amostras (c) Dimensões da amostra de gesso com um cilindro de aço incluído (mm). Fonte: MAGNANI & DA SILVA (2007).

Todo o tratamento matemático na simulação numérica deste trabalho de Magnani & da Silva está embasado nos sistemas de referência pré-definidos sem os quais não seriam possíveis as comparações das medidas realizadas na termografia e o modelo matemático desenvolvido (Figuras 2.8 e 2.9).

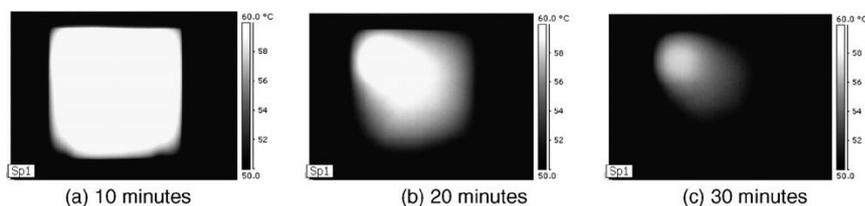


Figura 2.8 Evolução da distribuição de temperatura superficial da amostra com inclusão. Fonte: MAGNANI & DA SILVA (2007).

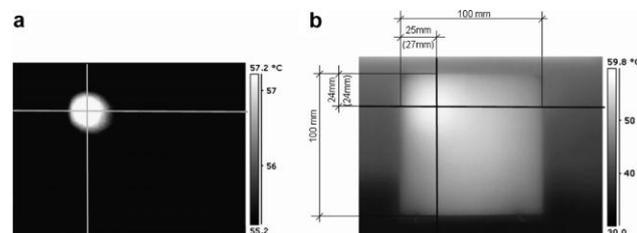


Figura 2.9 Determinação do centro de uma inclusão diretamente na termografia. Fonte: MAGNANI e DA SILVA (2007).

2.2 Termografia: Mecanismo de detecção de Temperatura

A aplicação da termografia está crescendo consideravelmente em diversas áreas do conhecimento humano, desde diagnóstico médico até determinação de perdas energéticas na indústria. Por exemplo, a termografia já está presente na área militar para detecção do calor do corpo humano (visão noturna), na área biomédica para detecção de algumas doenças que provocam alterações na perfusão sanguínea da pele de seres vivos e em manutenção de instalações elétricas e na detecção de infiltração de ar quente em edificações climatizadas em países de clima temperado.

No Brasil, empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica e empresas especializadas em manutenção industrial preditiva fazem uso da termografia para detecção de pontos quentes em dispositivos elétricos. Em escala menor de utilização estão as indústrias que possuem equipamentos com temperatura de operação bem acima da temperatura ambiente como caldeiras, fornos e tubulações.

A grande sensibilidade ($0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$) e a baixa precisão ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou 2% da leitura, o que for maior, que é bem inferior aos sensores de contato. e.g. termistores, $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) das câmeras de infravermelho levam à utilização da termografia apenas em análises qualitativas. Além de imagens térmicas, a ciência dispõe apenas de modelos baseados em um pequeno número de pontos de temperatura para a compreensão de processos de transferência de calor. Mas a termografia também pode ser usada em análises quantitativas, como na determinação de perdas energéticas em grandes equipamentos industriais.

Dois estudos interessantes na área de termografia feitos pelo Grupo de Engenharia Térmica da UFPE e relevantes para o nosso projeto. O primeiro fala da utilização de termografias para localização de falhas em edificações e o segundo sobre a detecção de problemas que causam aquecimento anormal de dispositivos de um poste da rede de distribuição de energia elétrica.

Do estudo de Lima, Magnani, e Da Silva (2005) apresentamos uma imagem da fachada da Igreja do Carmo, onde podem ser observadas as variações de temperatura (Figura 2.10).

Apesar de ser uma técnica ainda pouco utilizada em algumas áreas de conhecimento, a termografia demonstra ser uma ferramenta importante na análise e entendimento, quantitativos ou qualitativos, de fenômenos, ou na descoberta de efeitos encobertos à visão humana.

Pelas imagens termográficas adquiridas é possível se afirmar que a técnica de análise por infravermelho é capaz de identificar algumas falhas e/ou intervenções não visíveis ao olho humano ou que estejam situadas em pontos de difícil acesso. Constitui-se, portanto em recurso de grande potencial, especificamente em locais com poucos recursos financeiros, ou para uma primeira vistoria de monumentos históricos.

“Porém, devido à pequena variação de temperatura existente na região, recomenda-se que as imagens sejam tomadas à noite ou no início da manhã. Necessita-se, entretanto, que a técnica seja mais explorada no que se refere à sua aplicabilidade em regiões de clima tropical” (LIMA, MAGNANI, e DA SILVA, 2005).

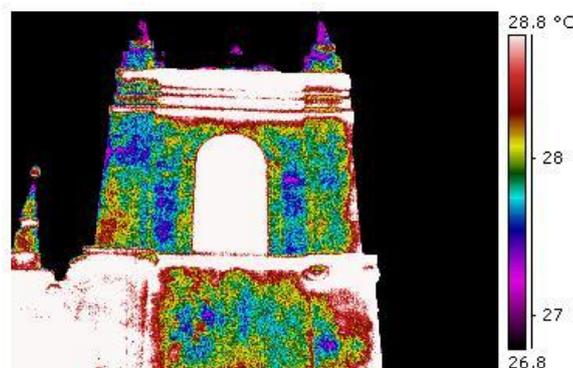


Figura 2.10 Termografia do campanário da Igreja do Carmo. Fonte: LIMA, MAGNANI, e DA SILVA (2005).

Neste artigo, Da Silva, Magnani e Lima (2006) apresentam uma análise dos dispositivos e os equipamentos que fazem parte de uma instalação elétrica e que necessitam trabalhar dentro de uma faixa de temperatura pré-estabelecida pelos fabricantes. Danos em equipamentos e paradas de fornecimento de energia elétrica em determinado local podem ser provocados por um aquecimento acima do suportado pelos componentes da instalação. O desgaste, os maus contatos e a

oxidação nesses componentes provocam o aquecimento anormal e, na maioria dos casos, não são visíveis.

A Figura 2.11 (a) apresenta uma foto óptica de um poste rede de distribuição onde não se pode verificar visualmente qualquer alteração dos componentes. Já a Figura 2.11(b) ilustra um termografia onde percebemos uma das chaves-fusíveis com aquecimento superior às demais. Este dispositivo provavelmente está com algum problema e, estando funcionando em uma temperatura inadequada, pode suspender o fornecimento de energia a qualquer momento.

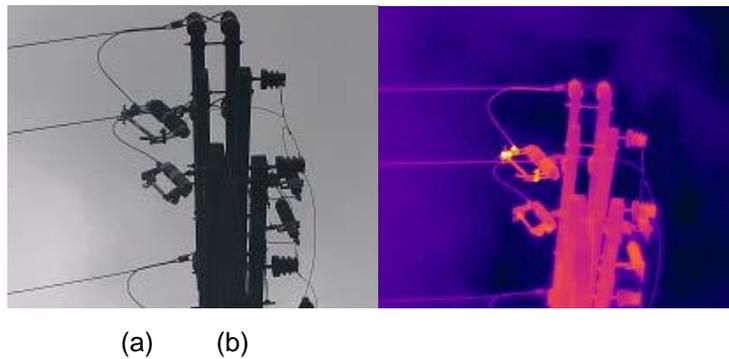


Figura 2.11 Detecção de Pontos Quentes em Instalações Elétricas (a) Imagem Óptica (b) Termografia Fonte: DA SILVA, MAGNANI e LIMA, 2006.

A realização de termografia em instalações elétricas permite a detecção de problemas que causam aquecimento anormal de dispositivos em um estágio inicial e em tempo de serem realizados reparos de forma a não prejudicar o funcionamento normal da instalação (DA SILVA, 2007).

Os estudos apresentados neste texto mostraram que a termografia é uma tecnologia de ensaio não-destrutivo que pode fornecer informações qualitativas e quantitativas a respeito do objeto analisado. A visualização de pontos quentes em instalações elétricas até a distribuição de temperaturas em superfícies para problemas sobre condução inversa de calor. Ou seja, a termografia pode ser aplicada em qualquer área da engenharia que necessita de informações sobre a temperatura instantânea ou comportamento térmico de objetos, estruturas ou processos (DA SILVA, 2007).

A termografia tem sido objeto de diversos trabalhos publicados. Büyükoztürk (1998) apresenta algumas técnicas de obtenção de imagens de estruturas de

concreto em ensaios não-destrutivos para detecção de anomalias e fala do desafio de obter imagens de estruturas de concreto, já que este é um material não-homogêneo. Ensaios não-destrutivos são importantes para detectar os efeitos da idade e da deterioração das estruturas de concreto. As técnicas citadas foram raios-X, ultra-som, tomografia e termografia. Este trabalho ressalta que a termografia possibilita imagens remotas, rápidas e seguras; e que suas limitações são a sensibilidade ao meio, onde as medições estão sendo realizadas, às condições da superfície analisada e a não informação a respeito da profundidade da anomalia, sendo necessário utilizar o ultra-som para este registro.

Ainda com relação a estudo de concreto e alvenaria, Clark et al. (2003) apresentaram estudos de inspeções em pontes. Através dos termografias foi possível detectar problemas de umidade e áreas de provável descamação do concreto. Neste trabalho é ressaltada a dificuldade da realização de termografias nessas estruturas em regiões de clima temperado, onde há uma baixa exposição das pontes à radiação solar dificultando a detecção dos problemas. Porém, com equipamentos mais sensíveis, que detectam diferenças de temperatura da ordem de 0,08°C, o estudo torna-se viável.

Estudos experimentais foram realizadas por Guerrero et al. (2005) para verificar quais fatores influenciavam na realizações de medições termográficas em materiais aplicados na construção civil. Foram analisados três materiais comumente utilizados em construções rurais da Espanha: adobe, tijolo vermelho e granito. Também foram feitas medidas através de termistores para comparação com os valores de temperatura medidos pela câmera de infravermelho. Os resultados mostraram que a emissividade, a cor e o tipo de acabamento influenciaram na temperatura medida pela câmera de infravermelho. Outra recomendação é que a superfície do objeto analisado seja plana e perpendicular ao eixo de medição da câmera e do objeto. As amostras com superfícies irregulares apresentaram grande dificuldade na interpretação dos resultados.

Em estudo direcionado a indústria, Dattoma et al. (2001) apresentaram um procedimento experimental para detectar defeitos em estruturas do tipo sanduíche através da utilização de termografia. O procedimento foi aplicado a uma lâmina de uma turbina e a resposta térmica do material foi analisada para diferentes tipos de

defeitos (infiltração de cola e de água e descolamento de material) inseridos em algumas amostras.

Legrand et al. (2002) mostraram a utilização de termografia ativa na detecção de obstruções por cola na montagem de tampas plásticas. Foi apresentado um sistema de controle em tempo real na linha de montagem das tampas. O aquecimento das amostras foi realizado por uma lâmpada alógena de 1000 W de potência. Se a obstrução por a cola for detectada, a tampa é descartada antes da embalagem. Antes de a termografia ser utilizada cerca de 15% da produção era descartada desnecessariamente através do processo de pesagem.

González et al. (2005) apresentaram a utilização do imageamento termal para detecção de defeitos em geradores de radiação, sendo possível a sua utilização no controle de qualidade da linha de produção destes equipamentos, especificamente na detecção de defeitos de fabricação.

Al-Kassir et al. (2005) apresentaram a utilização da termografia no estudo de sistema de ventilação e ar-condicionado de edificações. Foram analisados padrões térmicos das paredes, instalações elétricas, influência da umidade no comportamento dos materiais de construção e a relação entre evaporação de água e porosidade dos materiais da estrutura.

Técnicas de ensaios não-destrutivos podem ser utilizadas no monitoramento das características físicas de revestimentos de construções, na verificação do estado de preservação de elementos arquitetônicos ou no entendimento da composição de uma obra de arte. Meola et al. (2004) apresentaram alguns experimentos visando a discriminação de materiais a partir de seu comportamento térmico distinto detectado via termografia. Foram realizados experimentos com uma amostra composta de vários materiais (cortiça, teflon, lexan, plexiglas, glass/epóxi, madeira, PVC, borracha, poliestireno e carbono/epóxi). A amostra foi aquecida artificialmente por uma fonte de calor de 1 kW e as imagens térmicas foram realizadas enquanto a amostra era aquecida. Os resultados mostraram que a técnica permitiu a discriminação de materiais bastante parecidos como o lexan e o plexiglas. A partir disso, a termografia pode ser usada para avaliar modificações em

materiais (de estruturas ou de objetos) devido à idade, a tratamentos especiais nas superfícies e a condições ambientais adversas.

Devido à relativa baixa precisão das termografias, existe uma grande preocupação com a importância do processamento das informações. Técnicas de filtragem têm sido aplicadas para a superação dos problemas de incerteza das medições de temperatura destinadas a problemas inversos de condução de calor. Rainieri & Pagliarini (2002) apresentaram e validaram uma técnica de filtragem a ser aplicada em dados grosseiros para a solução de problemas inversos de condução de calor. O procedimento consiste em aplicar duas vezes o filtro de Wiener à uma distribuição de temperatura. Primeiramente os dados são pré-processados e o ruído é removido, tornando a distribuição de temperatura homogênea para encontrar o Laplaciano correto.

Algumas vezes, os defeitos em materiais aparecem sutilmente em termografias. A não uniformidade do infravermelho e as propriedades da superfície analisada contribuem para a degradação das imagens térmicas. Ibarra-Castanedo et al. (2004) apresentaram vários métodos de análise de dados nas etapas de pré-processamento e de processamento de imagens. Esses métodos tornaram os defeitos aparentes, aumentando a capacidade da termografia na detecção e na caracterização de anomalias.

Os princípios da teoria da termografia por infravermelho são intensamente utilizados nas aplicações acadêmicas, bélicas e industriais, seja para possibilitar a visão noturna, seja para testes e diagnósticos não-destrutivos. Os termografias gerados a partir da aquisição de imagens pela absorção da energia transmitida pela emissão de infravermelho pelos objetos alvo são as entradas de todas as análises feitas por esta dissertação.

A matéria independente de sua composição emite ondas eletromagnéticas. A radiação eletromagnética na análise espectral é dividida em bandas (raios cósmicos, raios gama, raios-X, ultravioleta, luz visível, infravermelho (IV), microondas e ondas de rádio - Figura 2.12) cujo comportamento de propagação segue as mesmas leis físicas. A banda de infravermelho é subdividida em: IV próximo (0,75-3 μm), IV médio (3-6 μm), IV distante (6-15 μm) e o IV extremo (15 μm).

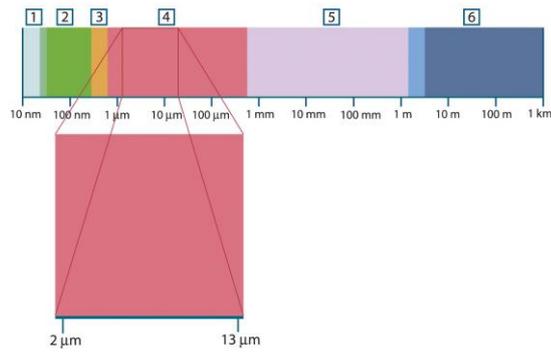


Figura 2.12 Espectro Eletromagnético: 1. Raios-X e Gama; 2. UV; 3. Luz Visível; 4. Infravermelho; 5. Microondas; 6. Ondas radioelétricas. Fonte: FLIR (2009).

Porém, as principais diferenças estão na interação e efeitos entre onda e matéria (Figura 2.13). Enquanto os corpos humanos são transparentes às ondas de rádio e semitransparentes aos raios-X, eles são completamente opacos à luz visível. Alguns tipos de onda, como a ultravioleta, podem causar mutações irreversíveis ao tecido humano. Do ponto de vista da interação com a matéria, a luz visível tem o mesmo comportamento que o infravermelho. A radiação na banda do infravermelho (IV) atua apenas na vibração das moléculas. A única diferença entre os dois tipos de onda é que o olho humano evoluiu para detectar a luz visível e não para detectar o infravermelho.

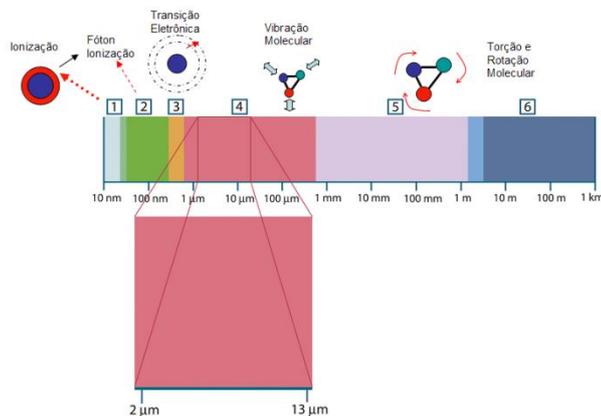


Figura 2.13 Interação e Efeitos entre Onda e Matéria. Fonte: FLIR (2009).

O comprimento da onda eletromagnética emitida por um corpo é função da temperatura. Um detector de radiação em infravermelho pode ser usado para a determinação da temperatura do corpo. Para a maioria dos materiais utilizados como isolantes elétricos (inclusive o vidro, que é opaco à radiação de infravermelho), as ondas emitidas no interior do objeto são absorvidas por moléculas próximas. Desta

forma, a radiação emitida pelo objeto é praticamente aquela emitida pela sua superfície. No objeto, a temperatura da superfície é função do comportamento térmico do interior do objeto.

Segundo a teoria da termodinâmica a radiação térmica é energia que se propaga no espaço na forma de ondas eletromagnéticas. A região do espectro de interesse neste projeto é a do infravermelho. O comprimento de onda se relaciona com dois outros parâmetros das ondas eletromagnéticas: a frequência e a energia do fóton pelas equações 2.1 e 2.2:

$$\lambda v = c \quad (2.1)$$

onde:

- v - Frequência da onda [Hz]
- c - Velocidade da luz no vácuo [2,998 x 10⁸ m/s]
- λ - Comprimento de onda [m]

$$E = h.v \quad (2.2)$$

onde:

- E - Energia do fóton [J]
- h - Constante de Planck [6,626 x 10⁻³⁴ J.s]

A equação (2.2) é conhecida como a hipótese de Planck para o corpo negro, onde admitia que a energia radiante fosse emitida e absorvida em quantas de energia, mas esta hipótese era considerada apenas como artifício de cálculo. Foi em 1905 que Einstein, investigando o efeito fotoelétrico, sugeriu a natureza quântica da luz e a quantização da energia em pequenos pacotes, os fótons, dada pela equação (2.2), também chamada de equação de Einstein. Como a frequência permanece constante, já que é o parâmetro que caracteriza a onda, a velocidade de propagação e o comprimento de onda mudam proporcionalmente quando as ondas viajam em diferentes materiais. Todo corpo que está acima do zero absoluto emite radiação

térmica e é justamente essa energia que é captada pelas câmeras de infravermelho para a obtenção de imagens térmicas de corpos.

Segundo Magnani, Guerrero, Lima e da Silva (2005), Max Planck desenvolveu a fórmula (equação 2.3) que descreve a emitância espectral de um corpo negro (um corpo que absorve toda a radiação em qualquer comprimento de onda). Quanto mais elevada for a temperatura, mais curto é o comprimento de onda ao qual a máxima é registrada:

$$W_{b\lambda} = \frac{2\pi h c^3}{\lambda^5 (e^{h\lambda T} - 1)} * 10^{-6} \quad (2.3)$$

onde:

- $W_{b\lambda}$ – Emitância espectral radiante de um corpo negro no comprimento de onda λ [Watt/m². μ m]
- h – Constante de Planck [6.626x 10⁻³⁴ J.s]
- c – Velocidade da luz [2.998 x 10⁸ m/s]
- λ – Comprimento de onda [m]
- k – Constante de Boltzmann [1.381 x 10⁻²³ J/K]
- T – Temperatura absoluta de um corpo negro [K]

Integrando a equação (2.3) de $\lambda=0$ até $\lambda=\infty$ obtém-se a equação 2.4 de Stefan-Boltzmann:

$$W_b = \sigma \cdot T^4 \quad (2.4)$$

onde:

- W_b – Emitância total de um corpo negro [W/m²]
- σ – Constante de Stefan-Boltzmann [W/m².K⁴]

A Figura 2.14 apresenta as curvas que representam esta lei para diferentes temperaturas.

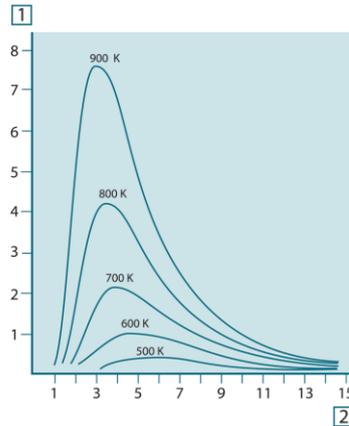


Figura 2.14 Emitância radiante espectral do corpo negro segundo a Lei de Planck, representada graficamente para várias temperaturas absolutas. 1: Emitância radiante espectral ($W/cm^2 \times 10^3 [\mu m]$); 2: Comprimento de onda [μm] Fonte: FLIR(2009).

A derivada da fórmula de Planck (equação (2.3)) em relação a λ , encontraremos os pontos de valor máximo conforme a equação (2.5).

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2,898}{T} [\mu m] \quad (2.5)$$

Esta fórmula exprime porque as cores variam de vermelho até laranja ou amarelo à medida que a temperatura de um objeto aumenta e é conhecida como a equação de Wien. O comprimento de onda da cor predominante é o mesmo que o calculado para $\lambda_{m\acute{a}x}$. O mesmo raciocínio pode ser feito para as cores e temperaturas das estrelas. Assim, uma estrela tão quente como a Sírio (11 000 K), que emite uma luz branca-azulada, irradia com o pico de emitância radiante espectral que ocorre dentro do espectro ultravioleta invisível, a um comprimento de onda de 0,27 μm . O Sol (aprox. 6 000 K) emite luz amarela, registra o pico a cerca de 0,5 μm no centro do espectro de luz visível. O gráfico com as Curvas de Planck em escalas semi-log de 100 K até 1.000 K (Figura 2.15) apresenta como se comporta o máximo para cada temperatura pelo comprimento de onda. A linha pontilhada representa os máximos da emitância e pode-se notar facilmente que este varia com a temperatura determinando o comprimento de onda emitido com maior intensidade (FLIR, 2009).

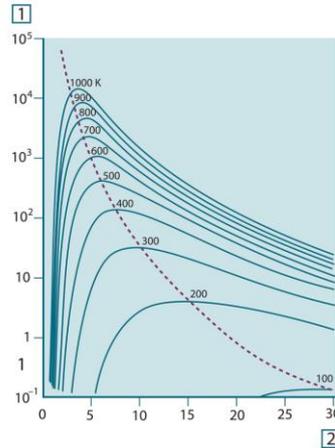


Figura 2.15 Curvas de Planck em escalas semi-log de 100 K até 1.000 K. A linha pontilhada representa o lugar geométrico da emitância máxima a cada temperatura pelo Comprimento de onda. Fonte: FLIR (2009).

Para os objetos reais o comportamento é bem diferente dos corpos negros perfeitos, portanto, um fator multiplicativo, chamado de emissividade, é incluído na equação (2.4) ajustando para nos dar uma correlação conforme a equação 2.6 seguinte:

$$W_{cinza} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.6)$$

onde:

ϵ – emissividade

Na verdade, a emissividade é função do comprimento de onda, mas em uma razoável simplificação, considera-se que a emissividade de um dado material é constante para todo comprimento de onda e o material, agora, é chamado de um corpo cinza. Portanto, consideram-se os três tipos de fontes de radiação, que se distinguem pelas formas como a emitância espectral de cada uma varia com o comprimento de onda conforme Figura 2.16.

- Um corpo negro, $\epsilon_\lambda = \epsilon = 1$,
- Um corpo cinzento, $\epsilon = \text{constante} < 1$ e
- Um radiador seletivo, ϵ varia com λ .

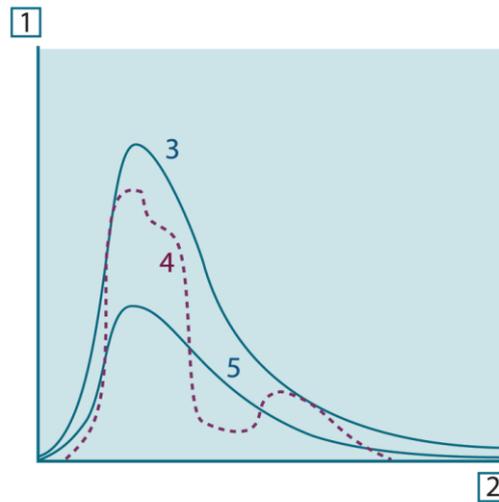


Figura 2.16 Emitância espectral (1) de três tipos de radiadores pelo Comprimento de Onda (2) onde os gráficos 3: Corpo Negro; 4: Assinatura Espectral; 5: Corpo cinzento. Fonte: FLIR (2009).

Desta forma, cada tipo de material terá uma “assinatura espectral” que define como a sua emitância varia com o comprimento de onda.

Em um experimento de medição de uma superfície, considera-se a reflexão da radiação e parte da radiação infravermelha emitida e refletida será atenuada pela atmosfera entre a superfície e a câmera. Então, a radiação total que alcança o detector da câmera é dada pela equação 2.7:

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_b + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad (2.7)$$

onde:

W_{tot} - Potência total de radiação que alcança o detector (medido)

W_b - Potência total radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura do objeto (calculada)

W_{refl} - Potência total de radiação emitida por todas as superfícies no hemisfério visto de um ponto no objeto.

W_{atm} - Potência de radiação total emitida pela atmosfera entre a câmera e o objeto

- ε - Emissividade da superfície que está sendo medida
- τ - Transmissibilidade da atmosfera entre a câmera e o objeto

A câmera de infravermelho ao visualizar um objeto recebe radiações emitidas não só pelo próprio objeto, mas também pelo meio adjacente e as refletidas pela superfície do objeto. Ambas as radiações são, em parte, atenuadas pela atmosfera na trajetória da medição. A estas, é adicionada uma terceira contribuição de radiações emitidas pela própria atmosfera. Esse processo é ilustrado na Figura 2.17.

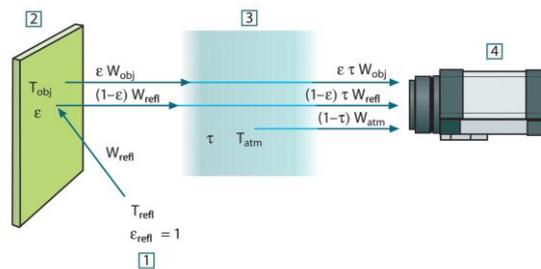


Figura 2.17 Representação da medição termográfica 1. Meio Adjacente 2. Objeto Analisado (b) Meio Adjacente 3. Atmosfera e 4. Câmera. Fonte: FLIR (2006).

Então na medição da radiação pela câmara considera-se também a temperatura ambiente, a emissividade do objeto e também do meio externo que se reflete no objeto.

Para ter uma medição precisa da temperatura é necessário levar em consideração alguns parâmetros do objeto, além da emissividade, a distância entre o objeto e a câmera, a umidade relativa e a temperatura refletida.

Como aplicação da teoria do infravermelho apresentada acima, os detectores térmicos respondem ao aquecimento gerado pela energia absorvida da radiação. Esse processo requer duas etapas: a mudança de temperatura do detector devido à radiação, e alguma mudança mensurável de parâmetro causada pela variação de temperatura. O parâmetro físico é então detectado por metodologia e instrumentação apropriada. A Tabela 2.3 apresenta exemplos de detectores de temperatura e seus mecanismos de detecção.

Tabela 2.3 Exemplos de detectores de temperatura. Adaptado de Dereniak e Boreman(1996) apud Da Silva (2007)

Detector	Mecanismo
Bolômetros	Resistência
Piroelétricos	Capacitância
Termopares	Tensão
Supercondutores	Resistência

A câmera S45/FLIR é equipada com os detectores do tipo microbolômetro que é um elemento sensor individual que sofre uma variação na sua resistência elétrica quando é aquecido devido à absorção de radiação. Este dispositivo é constituído de um circuito integrado de silício com uma fina camada de óxido de vanádio (VO_2 , V_2O_3 e V_2O_5) depositada. A mudança na resistência elétrica pode ser determinada através de uma leitura da variação resultante da corrente de polarização.

A câmera S45/FLIR utiliza o sistema de microbolômetro de 320 por 240, o que apresenta campo de visão (FOV – Field of View) maior do que nos sistemas de 160 por 120, porém as resoluções espaciais são idênticas. O sistema menor e sua câmera podem ser produzidos com um custo muito menor. Adicionalmente, um dos componentes mais caros de uma câmera é a lente e seu custo é proporcional ao tamanho do sistema de microbolômetro (Figura 2.18).

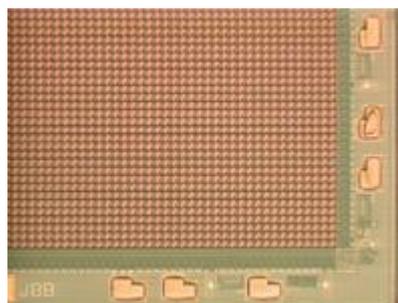


Figura 2.18 Sistema de microbolômetro de 320 por 240. Fonte: *Infrared Solutions* (acessado em Nov. 2008)

A câmera S45/FLIR utiliza sistema de microbolômetro com freqüência de imagens de 50/60 Hz, faixa de temperaturas de $-40^{\circ}C$ a $1500^{\circ}C$ e precisão de $\pm 2^{\circ}C$ ou 2% de leitura. A faixa espectral é de 7,5 a 13 μm , sendo classificada como uma câmera de LW (long wavelenght). A radiação medida pela câmera depende tanto da

temperatura quanto da emissividade do corpo que está sendo analisado. Portanto, a informação da emissividade à câmera é fundamental para uma estimativa precisa da temperatura do fluxo radiante medido. Normalmente os valores variam de 0,1 a 0,95. Para superfícies extremamente polidas têm-se emissividades inferiores a 0,1 e, para superfícies oxidadas os valores são superiores a 0,95.

A distância entre o objeto e câmera e a umidade relativa são parâmetros inseridos com o objetivo de se calcular a atenuação que a radiação sofre até chegar à lente do equipamento. Na Figura 2.19 pode-se observar que a transmitância do infravermelho no gás carbônico (CO₂) e na água (H₂O) varia de acordo com o comprimento de onda da radiação. Por esse motivo, a câmera S45/FLIR mede o infravermelho em uma faixa do FIR (*Far Infrared*) onde a absorção atmosférica é pequena.

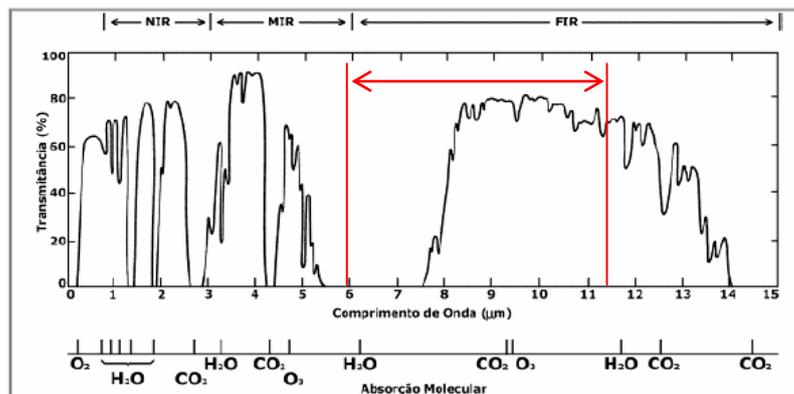


Figura 2.19 Transmitância do infravermelho no gás carbônico (CO₂) e na água (H₂O). Fonte: FLIR (2009).

A câmera converte a radiação incidente em temperatura, e para isso utiliza-se do fato de a potência emissiva total recebida, W_{fonte} , da fonte de temperatura de um corpo negro a T_{fonte} a uma distância curta gera um sinal de tensão de saída no seu sistema de microbolômetro, U_{fonte} , proporcional à entrada de potência emissiva. Assim define-se a equação (2.8):

$$U_{fonte} = C \cdot W_{fonte} \quad (2.8)$$

onde C é a constante de proporcionalidade.

Sendo a fonte um objeto real, com emissividade $\varepsilon(\lambda, T)$, a potência emissiva recebida será $\varepsilon(\lambda, T) \cdot W_{fonte}$

Multiplicando cada termo da equação (2.7) pela constante C da equação (2.8) e substituindo os produtos $C \cdot W$ pelo U correspondente, obtém-se a equação (2.9):

$$U_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot U_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot U_{refl} + (1 - \tau) \cdot U_{atm} \quad (2.9)$$

onde:

- U_{tot} - Tensão de saída medida pela câmara para o caso real;
- U_{obj} - Tensão de saída calculada pela câmara para um corpo negro de temperatura T_{obj} , ou seja, uma tensão que pode ser diretamente convertida em temperatura real requerida do objeto;
- U_{refl} - Tensão de saída teórica da câmara para um corpo negro de temperatura T_{refl} de acordo com a informação fornecida pelo operador;
- U_{atm} - Tensão de saída teórica da câmara para um corpo negro inserido em um meio de temperatura T_{refl} de acordo com a informação fornecida pelo operador.

O microbolômetro gera uma tensão U_{tot} que é medida pela câmera para o caso real, enquanto que as parcelas U_{refl} e U_{atm} referentes às potências emissivas de todas as superfícies do meio adjacente ao objeto e da atmosfera, respectivamente, são valores estimados a partir dos valores das temperaturas refletidas e atmosféricas informados pelo operador da câmera. Para o cálculo da tensão do objeto, a Equação 2.9 é reescrita e tem-se a equação (2.10):

$$U_{obj} = \left(\frac{1}{\varepsilon \cdot \tau} \right) U_{tot} + \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} U_{refl} + \frac{(1 - \tau)}{\varepsilon \cdot \tau} U_{atm} \quad (2.10)$$

A Equação 2.10 é a fórmula para medições termográficas em todos os equipamentos da FLIR Systems. Para cada valor de tensão gerado pelo microbolômetro é calculado um valor de tensão do objeto, que a câmera de

infravermelho associa a um valor de temperatura. Ou seja, a potência emissiva medida pelo microbolômetro é transformado em tensão, e esta em temperatura por um algoritmo interno da câmera.

2.3 Processamento Digital de Imagens Termiais

Segundo Gonzalez & Wood (2009) o Processamento Digital de Imagem (PDI) apresenta métodos que se aplicam em duas atividades: a melhoria da informação do imageamento para a interpretação do olho humano e o processamento dos dados da imagem para armazenagem, transmissão e representação para percepção de automática de máquinas (imageamento). Uma imagem pode ser definida através de uma função bidimensional, $f(x,y)$, onde x e y são as coordenadas espaciais (plana), e a amplitude de f no ponto é chamado de *intensidade* ou *nível de cinza* de uma imagem naquele ponto. Quando x , y e os valores de amplitude de f são todos finitos, quantidades discretas, esta imagem é chamada de imagem digital.

Portanto, uma imagem digital tem um número finito de elementos e cada um tem uma localização particular e valor, estes elementos são chamados de elementos de quadro, elemento de imagem, pels e pixels.

A visão é o sentido mais evoluído dos seres humanos, então não é surpresa que imagens ocupam uma posição importante na nossa percepção. Enquanto a visão do ser humano é limitada a uma banda visual do espectro eletromagnético (ver. Figura 2.12), as câmeras de imageamento cobrem praticamente todo o espectro eletromagnético, das ondas de rádio até gama. Elas capturam cenários gerados por fontes de energia que o homem não consegue visualizar e associa com imagens visíveis, como por exemplo, imagens termiais, ultra-som, microscópio eletrônico e imagens geradas por computador. Outra área se confunde com o PDI, é a visão por computador. Um dos objetivos recentes da Ciência é o uso do computador para emular a visão humana, incluindo aprendizado e ser capaz de fazer interferência e reagir baseado nas entradas visuais. A área de análise de imagem (também chamada interpretação de imagem) está entre o processamento

de imagem e a visão por computador. Não existe uma fronteira clara entre o PDI e a visão por computador.

Desta forma, diversas fontes de irradiação menos tradicionais como ultra-som e o padrão de iluminação gerada por computador podem ter uma análise semelhante. Similarmente, os elementos de cena podem ser objetos familiares, mas podem simplesmente uma molécula, uma formação rochosa ou um órgão do corpo humano.

MATLAB é uma linguagem de alta performance para computação técnica, que integra informática, visualização e programação em um ambiente de fácil utilização onde problemas e soluções são expressos em notação matemática comum (The MathWorks, 2009). É tipicamente utilizado em matemática, informática, desenvolvimento de algoritmo, modelagem, simulação, criação de protótipo, análise de dados, desenvolvimento de aplicação, construção de interfaces gráficas de usuário, etc.

É um sistema interativo cujos elementos básicos de dados são matrizes. Este software permite solução de muitos problemas técnicos de computação, especialmente as formulações com arrays e vetores, fato que se adaptar perfeitamente analisa imagens termais, em uma fração do tempo que se leva para escrever um programa em escala não interativa com C ou Pascal.

A Figura 2.20, abaixo, mostra as três principais modalidades de sensores de imagem e geração de imagens digitalizadas utilizadas para transformar irradiação de energia em imagens. O processo é o seguinte: A energia entrante é transformada em voltagem através da combinação da potência elétrica e o material sensor que responde a um tipo de energia que será detectada. A forma de onda da voltagem de saída é a resposta dos sensores, e uma quantidade digital é obtida de cada sensor pela digitalização destas respostas.

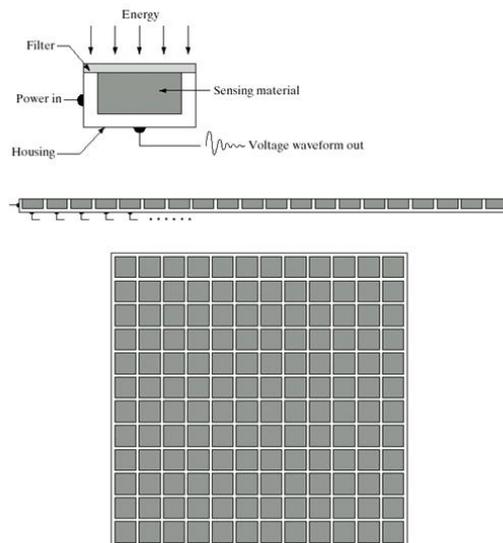


Figura 2.20 Arranjos: Sensor individual, uma fileira de sensores e uma matriz de sensores (Retirado do Gonzalez e Wood, 2009).

Em um dispositivo para imageamento, a primeira função realizada é a coleta da energia entrante que é focada uma imagem plana (Figura 2.21 - a). No nosso caso, o front-end deste dispositivo é uma lente de germânio que projeta a cena visualizada no matriz de sensores (bolômetros). A matriz de sensores, que é denominada de Arranjo do plano focal ou PFA (Plane Focal Array), produz as saídas proporcionais à integral da irradiação infravermelha recebida em cada sensor. Circuitos digitais e analógicos tratam estas saídas dos sensores e convertem-nas em um sinal de vídeo, que são digitalizados pelos circuitos dos sistemas imageador. A saída é uma imagem digital, como é mostrada na Figura abaixo (Figura 2.21 – b)

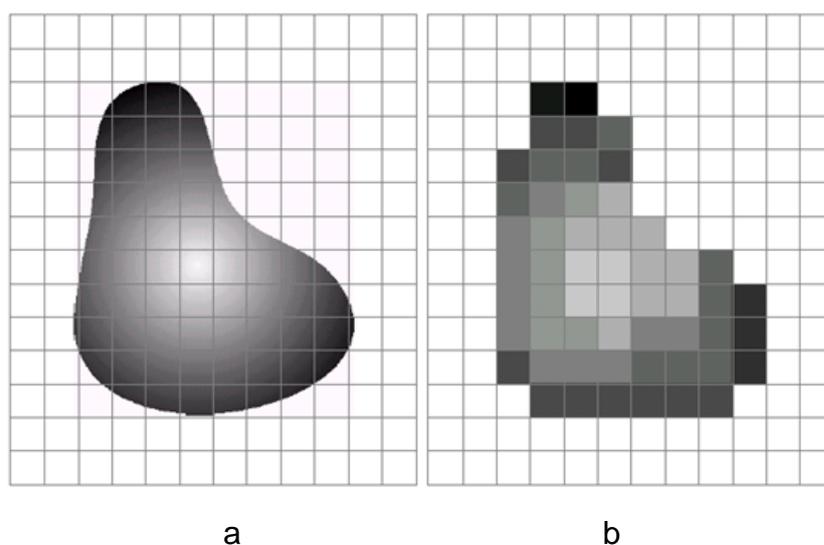


Figura 2.21 (a) Imagem contínua projetada na matriz de sensores; (b) Resultado da Imagem amostrada e quantizada. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Quando um arranjo de bolômetro (320 x 240) é usado par aquisição de imagem, não existe movimento e o número de bolômetro no arranjo estabelece o limite de amostras na direção vertical e horizontal. A quantização das saídas dos bolômetro é feita como na Figura 2.21 acima, que ilustra este conceito. A Figura 2.21 (a) mostra uma imagem contínua projetada no plano do arranjo de bolômetros. A Figura 2.21 (b) mostra uma imagem depois dos processos de amostragem e quantização. Claramente, a qualidade de uma imagem digital é determinada para um grau grande pelo número de amostras e os níveis de cinza usados na amostragem e quantização. Assim no arranjo de microbolômetros na câmera S45/FLIR têm 320 x 240 pixels. Desta forma as imagens termais serão formadas a partir de uma matriz de pixels e se já estabelece um sistema de referência para a câmera coincidindo como o arranjo de bolômetros, o sistema de referência do instrumento será como o mostrado na Figura 2.22 abaixo. Onde a imagem é representada como uma função de duas variáveis x e y .

Um cuidado que deve ser tomado em no momento que importação das imagens para o MATLAB, é o fato que em matriz não utiliza os pares ordenados dos eixos de referência, logo a origem passa a ser o ponto (1,1) invés do (0,0) do sistema de referência do instrumento.

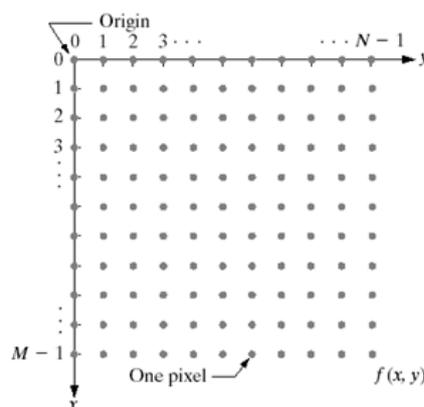


Figura 2.22 Determinação do sistema de coordenadas (Referência) da câmera.

Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Considerando que as imagens termais estão armazenadas em forma de matrizes digitais, estas podem agora ser tratadas matematicamente pelas rotinas no MATLAB. Inicialmente, a implementação do conceito de máscara de filtro que são utilizadas nos processos de realce. Esta metodologia será utilizada para responder o principal problema: *Como estabelecer automaticamente, ou seja, sem a intervenção humana, uma rotina de reconhecimento de padrões que se adequassem às formas típicas nas nossas amostras?*

O conceito de vizinhança é básico para a análise de imagens digitais. A aproximação principal na definição de vizinhança sobre um ponto (x,y) , é usar uma área de uma sub-imagem quadrada ou retangular centrada em (x,y) , como na Figura 2.23. Para cada ponto da imagem este conceito deverá ser usado. É facilmente percebível que nas bordas das imagens deve-se abstrair o modelo para preencher toda a área de vizinhança, uma vez que esta área da sub-imagem não será completa.

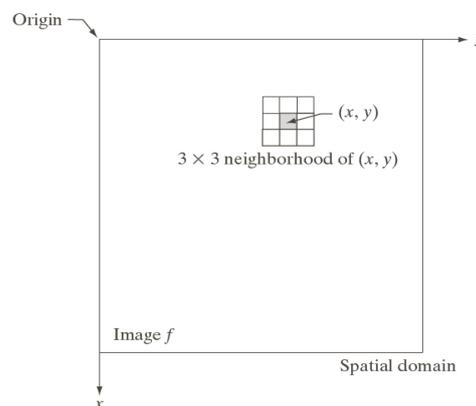


Figura 2.23 Conceito de vizinhança. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Máscaras (Figura 2.24) são utilizadas para filtragem de imagem, e atuam exatamente sobre a vizinhança de cada ponto. Este processo usa o mesmo mecanismo da convolução tradicional. A máscara interage com a imagem percorrendo toda a matriz (imagem) considerando para cada pixel os seus vizinhos conforme a Figura 2.25. O processo consiste em deslocar elemento central da máscara por todos os pontos da imagem e suas respectivas vizinhanças, limitadas pela máscara, todos os pontos deverão ser processados na filtragem.

w_1	w_2	w_3
w_4	w_5	w_6
w_7	w_8	w_9

Figura 2.24 Máscara de filtragens

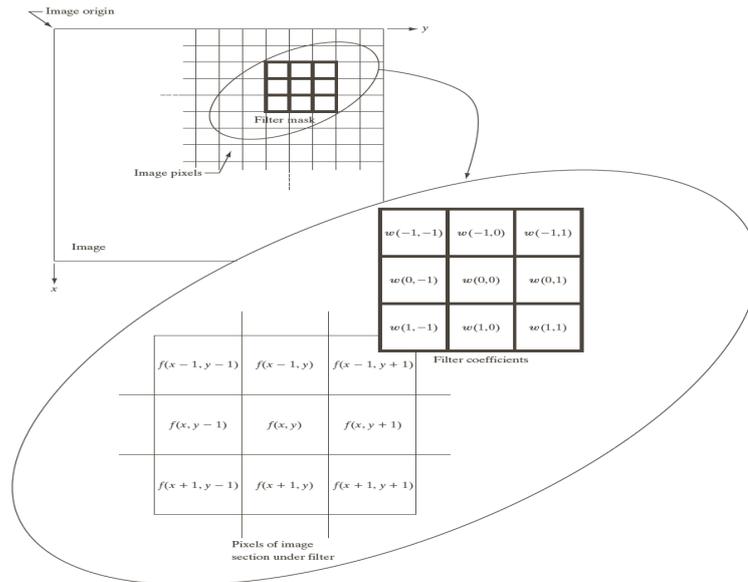


Figura 2.25 Máscara no processo de filtragens. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Em geral, filtragem linear de uma imagem f de tamanho $M \times N$ com uma máscara de filtro de tamanho $m \times n$ é dada pela expressão:

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (2.11)$$

onde $a = (m - 1)/2$ e $b = (n - 1)/2$. Para gerar uma imagem filtrada completa esta equação deve ser aplicada para $x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ e $y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

3. EXPERIMENTOS COM IMAGENS TERMAIS DE UM ISOLADOR DE COMPÓSITO ADQUIRIDAS EM LABORATÓRIO

Este capítulo tem como objetivo específico de apresentar os resultados da análise das imagens termiais de uma amostra (segmento de isolador) adquiridas em laboratório. O método divide-se em três partes: (a) aquisição de dados, que consiste na gravação de imagens termiais da amostra, após aquecimento em estufa e durante o período de resfriamento; (b) processamento intermediário, onde as imagens termiais são alteradas utilizando o aplicativo Quick_Report 1.2 da FLIR, que disponibiliza diversas paletas de cores para a geração de imagens diferenciadas com as mesmas temperaturas; e também gerando a matriz (planilha Excel) das temperaturas medidas em cada microbolômetro; (c) análise, que através do Processamento Digital Imagens sugere um método de reconhecimento do isolador e posterior determinação de pontos com temperatura máxima e mínima. Neste processamento são utilizadas rotinas desenvolvidas a partir do Image Processing Toolbox (que será citado como IPT ou Toolbox) disponível na biblioteca do software MATLAB 7.5, (versão 14 da The MathWorks, Inc).

3.1 Aspectos Fundamentais Específicos

Além da Fundamentação Teórica (Capítulo 2) neste capítulo é detalhado um pouco mais a teoria que envolve o Processamento Digital de Imagens. Retomando a idéia que a imagem é uma função $f(x,y)$, foi então, desenvolvido o tratamento matemático necessário ao PDI. As primeiras técnicas aplicadas são tais que permitem o tratamento digital das imagens, e são elas a *amostragem* e a *quantização*. Discretizando x e y , ou seja, utilizando apenas alguns valores de coordenadas, de preferência os valores inteiros, assim, pegando algumas “amostras” de f nos pontos discretos, ou seja, os pontos cujas localizações são definidas pelos pares de coordenadas (x,y) que foram “amostrados”. Em seguida, determinando os patamares de níveis de cinza que f poderá assumir, ou seja, discretizando também os valores da amplitude de f em apenas alguns valores quantizados, ajustando com truncamento ou arredondamento os valores das amplitudes de f discretizado.

O exemplo da Figura 3.1 representa muito bem este processo descrito acima. Na Figura (3.1 -a) uma imagem contínua, $f(x,y)$, que precisa ser ditalizada. Através

da escolha de um segmento de reta AB e depois plotando os valores de amplitude (níveis de cinza) da imagem contínua na Figura 3.1 (b). Para “amostrar” esta função, amostras espaçadas igualmente são discretizadas ao longo de AB, como mostrado na Figura 3.1 (c). A quantização dos valores amostrados é feita com o auxílio da escala de cinza localizada na Figura (3.1 -c) e dividida em oito níveis discretos, variando de branco até preto. Assim, os valores amostrados da função $f(x,y)$ do segmento AB são então equalizados, ou seja, aproximados ou truncados para o nível de quantização mais apropriado (Figura 3.1 (d)).

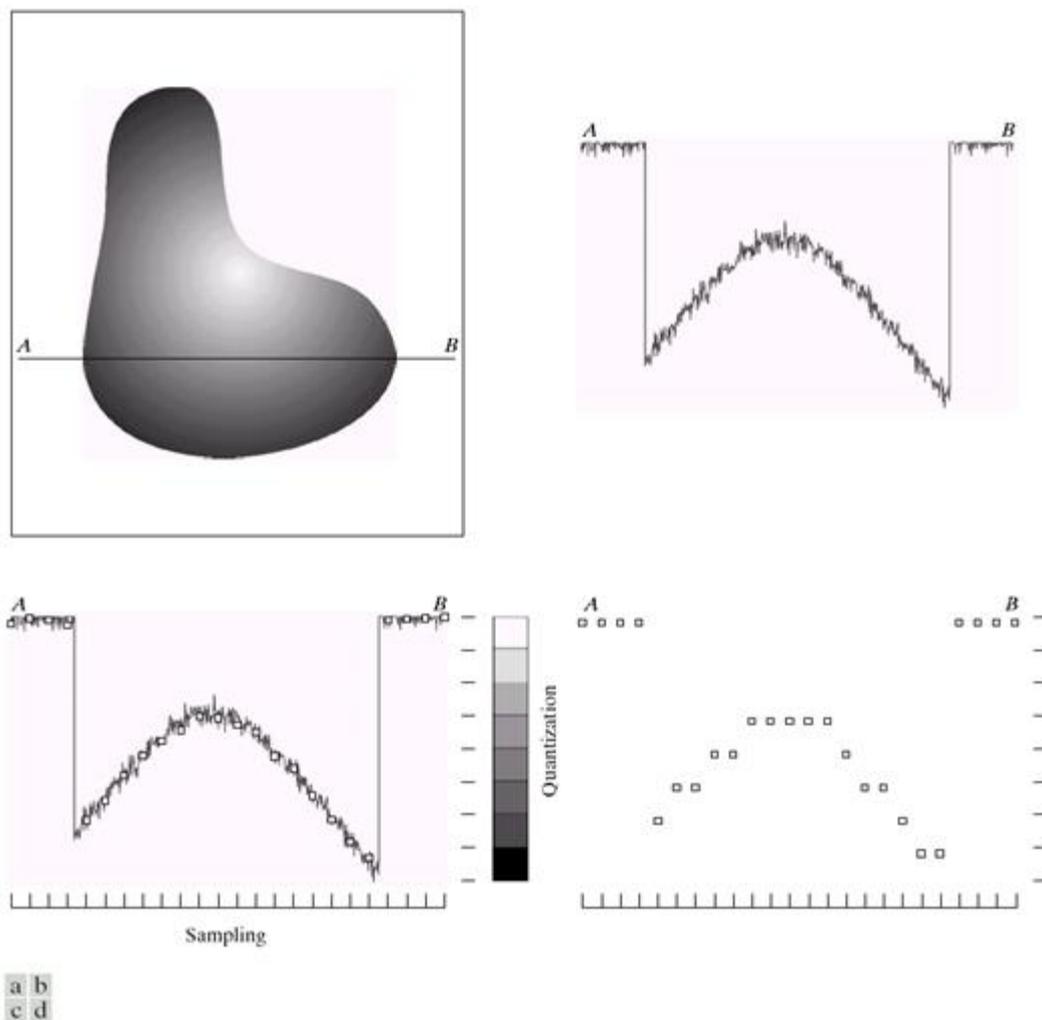


Figura 3.1 Geração de imagem digital (a) Imagem contínua. (b) “Plotagem” dos valores de amplitude (níveis de cinza) da imagem contínua sobre um segmento de reta AB. (c) Amostragem e Quantização. (d) Valores digitalizados da intensidade da imagem em AB. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Este procedimento pode ser estendido para uma amostragem bidimensional e assim uma digitalização de toda a imagem. No caso de imageamento digital (Figura 3.2 (a, b, c, d)), os sensores já fazem a “amostragem” (Figura 3.2 (d)) e a quantização é feita pelos circuitos eletrônicos já na saída dos sensores. Temos então os valores digitalizados de cada pixel encontrado na imagem na saída (Figura 3.2 (e)).

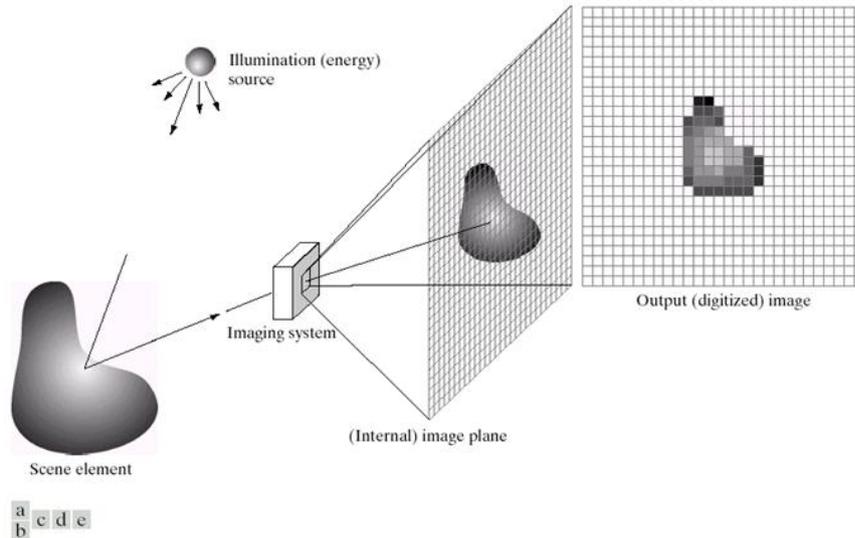


Figura 3.2(a) Fonte de energia. (b) Um elemento da cena. (c) Sistema de Imageamento. (d) Projeção da cena no plano de sensores. (e) Imagem digital. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Uma vez que a imagem está na forma digital ela então pode ser submetida a as ferramentas do PDI. As ferramentas básicas do PDI, por exemplo: transformações lineares de intensidade, as transformações log, o processamento e equalização de histogramas, ou as operações lógicas e aritméticas, e até mesmo filtragens lineares, já estão implementadas por diversos programas e rotinas que fazem parte do cotidiano dos profissionais de PDI. A opção de implementação foi o software MATLAB 7.5 da The MathWorks. Diante disto, detalhando o mecanismo da filtragem espacial de imagens digitais, que é a ferramenta principal dos procedimentos.

Como mencionado no capítulo 2, alguns operadores de vizinhança trabalha com os valores dos pixels da imagem na vizinhança e os valores correspondentes da sub-imagem que tem as mesmas dimensões que a vizinhança. A sub-imagem é chamada de *filtro*, *máscara*, *janela*, *template* ou *kernel*, sendo os dois primeiros têm terminologia mais equivalente. Os valores em uma sub-imagem são referentes aos coeficientes.

O conceito de filtro tem raízes na transformada de Fourier para processamento de sinais no chamado *domínio das freqüências*. O termo *filtragem espacial* diferencia da filtragem no domínio das freqüências. O mecanismo desta filtragem é semelhante ao apresentado no capítulo 2 e tem sua implementação na equação (2.11) repetida abaixo,

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (2.11)$$

Que se assemelha muito com o conceito muito conhecido chamado de *convolução*. Por esta razão a filtragem espacial linear é freqüentemente referenciada como “convolução de uma máscara com uma imagem”.

Diversos tipos de filtros espaciais podem ser desenvolvidos os mais simples são os filtros suavizantes, usados para suavizar a imagem e os ruídos que sempre são adicionados a ela (Figura 3.3) Já os filtros “destacadores”, usados para realçar detalhes que foram perdidos no processo de aquisição ou transmissão da imagem ou para destacar detalhes finos, que é exatamente o problema apresentado.

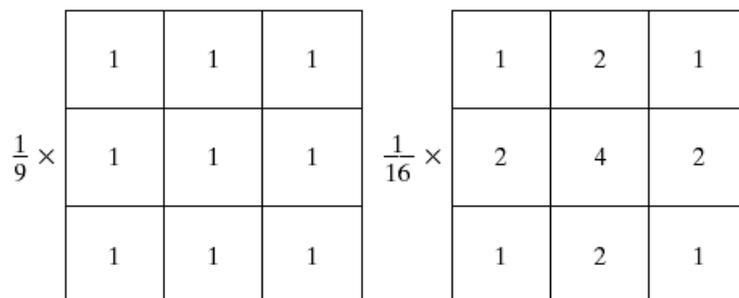


Figura 3.3 Máscaras de filtros suavizantes.

Considerando que um operador derivativo é capaz de destacar os pontos de descontinuidade de uma função, a nossa abordagem para o desenvolvimento do filtro que destacam os detalhes finos de uma imagem se baseia na diferenciação digital. Fundamentalmente, a resposta de um operador derivativo é proporcional ao grau de descontinuidade da imagem. Assim, a diferenciação de imagens realça as bordas e outras descontinuidades (como o ruído) e uniformiza áreas em que as variações são mais suaves.

Os fundamentos das derivadas de uma função digital são muito conhecidos na engenharia, portanto os detalhes destas técnicas não são apresentados (Gonzalez e Wood, 2009). Uma definição básica da derivada de primeira ordem de uma função unidimensional $f(x)$ é a diferença da equação (3.1):

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x + 1) - f(x) \quad (3.1)$$

A derivada parcial foi utilizada por que f é função de duas variáveis. Similarmente, a segunda derivada é definida como a diferença

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x + 1) + f(x - 1) - 2f(x) \quad (3.2)$$

É facilmente verificado o fato que estas duas definições satisfazem as condições de estado das derivadas

A derivada de segunda ordem apresenta características muito interessantes para o realce de imagem e, portanto, é apresentada em mais detalhes. A aproximação consiste basicamente da definição de uma formulação discreta da derivativa de segunda ordem e então a construção de uma máscara de filtro. O interesse básico nesta análise está nos filtros isotrópicos, que respondem de forma independente da direção das descontinuidades na imagem que está sendo filtrada, ou seja, filtros isotrópicos são *invariantes a rotação*.

Conforme demonstrado por Rosenfeld & Kak (1982) apud Gonzalez e Wood (2009), o operador derivativo isotrópico mais simples é o Laplaciano, o qual para a função (imagem) $f(x,y)$ de duas variáveis, é definido como

$$\nabla f(x,y) = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2} \quad (3.3)$$

Como as derivadas de qualquer ordem são operadores lineares, o Laplaciano é um operador linear. Para ser utilizável no processamento digital de imagem, esta equação precisa ser expressa em forma discreta. Existem diversas modos de definir um Laplaciano digital usando o conceito de vizinhança. Neste caso, vamos utilizar a definição da derivada parcial na direção x:

$$\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial^2 x^2} = f(x + 1, y) + f(x - 1, y) - 2f(x, y) \quad (3.4)$$

e, similarmente na direção y:

$$\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial^2 y^2} = f(x, y + 1) + f(x, y - 1) - 2f(x, y) \quad (3.5)$$

A implementação digital do Laplaciano bi-dimensional é obtida somando estes dois componentes:

$$\nabla f(x,y) = f(x + 1, y) + f(x - 1, y) + f(x, y + 1) + f(x, y - 1) - 4f(x, y). \quad (3.6)$$

Esta equação pode ser implementada em todos os pontos (x,y) em uma imagem pela convolução da imagem com a máscara espacial da Figura 3.4 (a) que dá um resultado isotrópico para rotações de incrementos de 90°.

0	1	0	1	1	1
1	-4	1	1	-8	1
0	1	0	1	1	1
0	-1	0	-1	-1	-1
-1	4	-1	-1	8	-1
0	-1	0	-1	-1	-1

a

b

c

d

Figura 3.4 (a) Máscara do filtro usada para implementar o Laplaciano digital. (b) máscara usada com a extensão das equações que inclui os pixels vizinhos da diagonal, (c) e (d) duas outras implementações do Laplaciano. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Nas direções diagonais é incorporada na definição do Laplaciano por adição dois termos a mais da equação acima, um para cada um das direções diagonais. A forma de cada um novo termo é o mesmo da Equação (3.4) ou da (3.5), mas as coordenadas são sobre as diagonais. Cada termo diagonal também contém uma parcela $-2f(x,y)$, o total subtraído dos termos diferença será $-8f(x,y)$. A máscara usada para implementar esta nova definição é a mostrada na Figura 3.4 (b). Esta máscara produzirá resultados para incrementos de 45° . As outras duas máscaras mostradas na Figura 3.4 também são usadas freqüentemente. Elas são baseadas na definição do Laplaciano que é o negativo, elas produzem resultados equivalentes, mas a diferença no sinal deve ser mantida em mente na combinação (por adição ou subtração) de uma imagem filtrada por laplaciano com outra imagem.

Sendo o Laplaciano um operador linear, este é usado para destacar descontinuidades de níveis de cinza em uma imagem e camuflar regiões com variações suáveis de níveis de cinza. Isto tenderá a produzir imagens que têm linhas de bordas cinzentas e outras descontinuidades, tudo superposto sobre uma região escura, fundo descaracterizado. As características do fundo podem ser recuperadas enquanto estiverem preservados os efeitos das formas da operação Laplaciana simplesmente adicionando o original e as imagens Laplacianas. Como notado, é importante manter em mente qual definição do Laplaciano está sendo usada. Se a definição usada tem um coeficiente central negativo, então subtraindo invés de adicionar, a imagem Laplaciana para obter um resultado destacado (Gonzalez & Wood, 2009).

Então o modo básico no qual se usa o Laplaciano para melhoramento de imagem é como segue:

$$g(x,y) = \begin{cases} f(x,y) - \nabla^2 f(x,y), & \text{se coef. central for negativo} \\ f(x,y) + \nabla^2 f(x,y), & \text{se coef. central for positivo} \end{cases}$$

A função fspecial ('laplacian', alpha) implementa uma máscara Laplaciana mais geral:

$$\begin{matrix} \alpha & 1-\alpha & \alpha \\ \hline 1+\alpha & 1+\alpha & 1+\alpha \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} 1-\alpha & -4 & 1-\alpha \\ \hline 1+\alpha & 1+\alpha & 1+\alpha \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \alpha & 1-\alpha & \alpha \\ \hline 1+\alpha & 1+\alpha & 1+\alpha \end{matrix}$$

o que permite que um ajuste fino seja feito no resultados do realce. Existem ainda diversas variações propostas (Filtragem de Sobel, Roberts, Canny) que serão apresentadas no decorrer de nossa exposição. Na Figura 3.5 mostra um exemplo da aplicação de um filtro Laplaciano sobre uma imagem (direta) após passar pelo filtro.

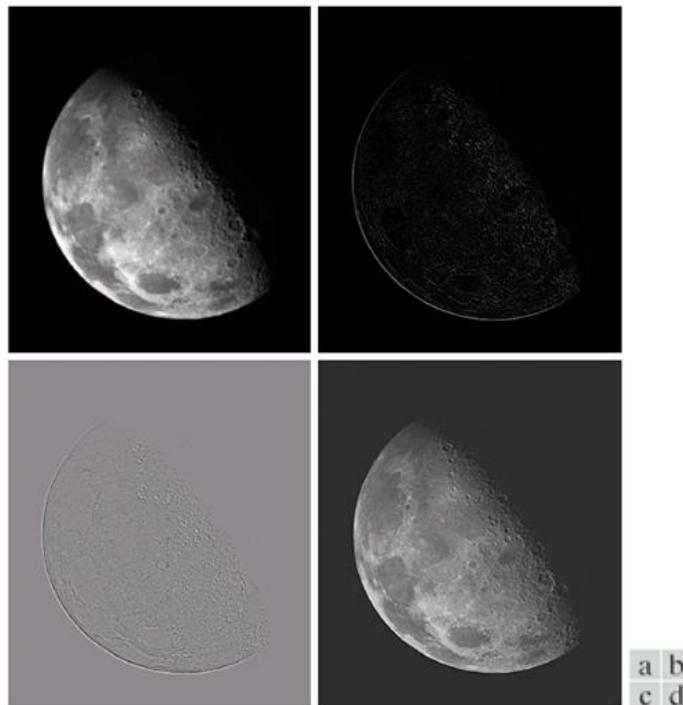


Figura 3.5 (a) Imagem do Pólo Norte da Lua. (b) imagem filtrada com Laplace formato unit8. (c) imagem filtrada com Laplace formato double e (d) Realce resultante da subtração de (c) de (a). Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

As implementações do PDI realizadas através do IPT do MATLAB apresentam uma aplicação básica, é a função `imcontour` que mostra os contornos da imagem com foco na intensidade das cores. A função `imcontour` é totalmente automática e, portanto, não permite qualquer tipo de ajuste. O exemplo abaixo demonstra o uso esta função com os simples comandos e resultado mostrado na Figura 3.6:

```
I = imread('rice.png');
imshow(I)
figure, imcontour(I,3)
```

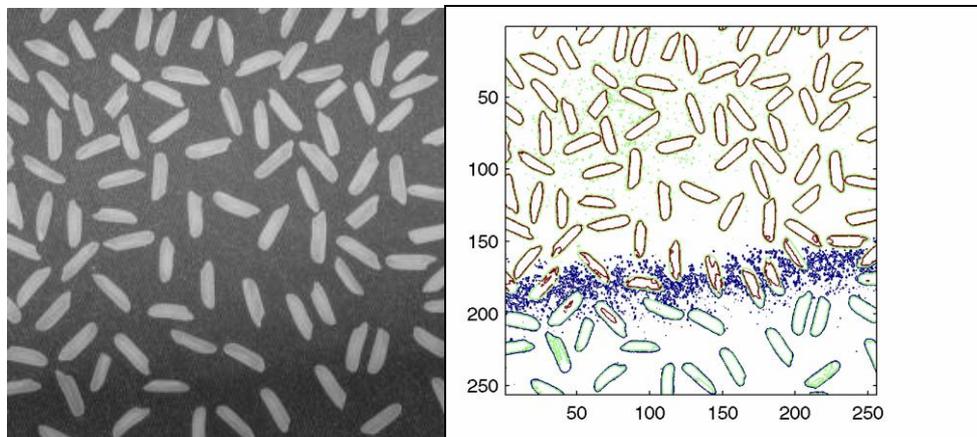


Figura 3.6 (a) Imagem original (rices.pgn). (b) imagem resultante do `imcontour`

Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Uma análise primária de contraste de contornos, também pode ser realizada a partir de comando simples com o `edge`, que permite o uso de vários filtros por exemplo: `sobel` e `canny`. A seqüência de comandos e seus resultados são apresentados nas Figuras 3.7 e 3.8 (Gonçalez & Wood, 2009):

```
I = imread('coins.png');
imshow(I)
```



Figura 3.7 (a) Imagem original (coins.pgn). Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

```
BW1 = edge(I,'sobel');  
BW2 = edge(I,'canny');  
imshow(BW1)  
figure, imshow(BW2)
```

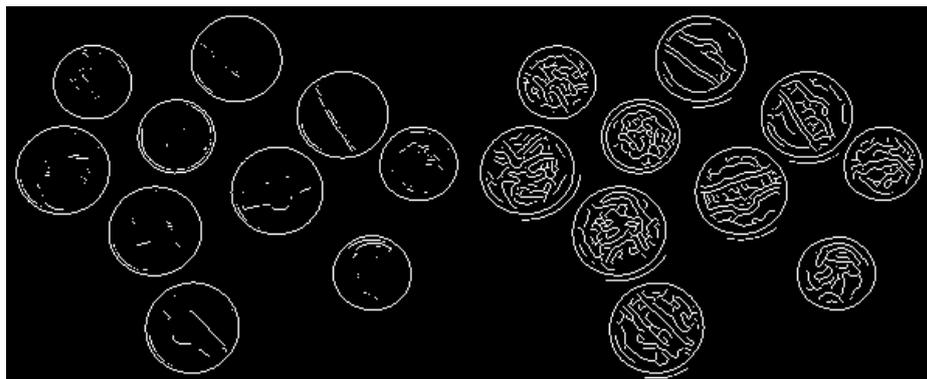


Figura 3.8 Imagens resultantes do uso dos filtros de Sobel e Canny. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

No ITP as máscaras de filtragens podem ser construídas de diversas formas. Várias máscaras filtro 2-D espaciais lineares são obtidas pelo uso da função `fspecial`, a qual gera uma máscara filtro, `w`, usando a sintaxe:

```
w = fspecial('type', parameters)
```

Onde ‘type’ especifica o tipo de filtro e parameters especificam o filtro especificado. Os filtros espaciais suportados por fspecial estão listados na Tabela 3.1, incluindo os parâmetros aplicáveis para cada filtro.

Tabela 3.1 Filtros espaciais suportados pela função fspecial. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Type	Parâmetros e Sintaxes
‘average’	fspecial(‘average’, [r c]). Um filtro mediana retangular de tamanho r x c. default 3X3. Um número no lugar de [r c] especifica um filtro quadrado
‘disk’	fspecial(‘disk’, r). Um filtro mediano circular (com uma área de tamanho $2r + 1$) com raio r. Default o raio é 5.
‘gaussian’	fspecial(‘gaussian’, [r c], sig). Um filtro Gaussiano passa baixa de tamanho r x c e um desvio padrão sig(positivo). O default são 3 X 3 e 0,5. Um número simples no lugar de [r c] especifica um filtro quadrado.
‘laplacian’	fspecial(‘laplacian’, alpha). Um filtro Laplaciano 3 X 3 cujo formato é especificado por alpha, um número no intervalo fechado [0,1]. O default é 0.5.
‘log’	fspecial(‘log’, [r c], sig). Laplaciano de um filtro Gaussiano (LoG) de tamanho r x c e devio padrão sig(positivo). Os defaults são 5 X 5 e 0.5. Um número simples no lugar de [r c] especifica um filtro quadrado.
‘Sobel’	fspecial(‘sobel’). Gera uma máscara Sobel, sv, que aproxima um gradiente vertical. Uma máscara para o gradiente horizontal é obtida pela transporta do resultado: sh = sv’.

O toolbox implementa a filtragem espacial linear utilizando a função imfilter, que tem a seguinte sintaxe mais utilizada:

`g = imfilter(f, w, ‘replicate’)`

Onde f é imagem de entrada, w é a mascar do filtro, g é o resultado do filtrado e 'replicate' é o parâmetro que define que bordas da imagem serão "replicada" para a utilização da máscara nesta região.

Seguindo o exemplo dos filtros acima, aplicando estas máscaras e filtros é obtida a ROI (região de interesse), ou seja, a região de reconhecimento do segmento do isolador conforme será visto no procedimento experimental. O detector de bordas mais eficiente, função edge do toolbox, permite utilizar diversos estimadores derivativos baseados nos critérios que já discutimos acima. Para alguns destes estimadores é possível especificar a direção das bordas que serão percebidas (Vertical / Horizontal ou ambas as direções). A sintaxe genérica é

$g = \text{edge}(f, \text{'método'}, \text{parâmetros});$

onde f é a imagem de entrada, método é uma das opções da Tabela 3.2 e parâmetros especifica o método utilizado.

Tabela 3.2 Filtros espaciais suportados pela função edge. Fonte: GONÇALEZ E WOOD (2009).

Detector de Borda	Parâmetros e Sintaxes
'Sobel'	Encontra bordas usando a aproximação de Sobel para derivativos e permite definir a direção (vertical, horizontal ou ambas) das bordas a serem realçadas. O patamar (threshold) pode ser definido na detecção das bordas.
'Canny'	Encontra bordas através de observações dos locais de máximo gradiente para $f(x,y)$. O gradiente é calculado usando o derivativo do filtro Gaussiano. O método usa dois patamares para detectar bordas fortes e fracas, e inclui as bordas fracas na saída somente se elas são conectadas a borda forte. Por causa deste fato, este método é preferido para detectar verdadeiras bordas fracas.
'gaussian'	fspecial ('gaussian', [r c], sig). Um filtro Gaussiano passa baixa de tamanho $r \times c$ e um desvio padrão sig(positivo). O default são 3×3 e 0,5. Um número simples no lugar de [r c] especifica um filtro quadrado.

O Processamento morfológico de imagem é uma teoria estudada vastamente e fornece o embasamento dos experimentos. O uso de imagens binarizadas, com seus valores ajustados para patamares (limites superiores e inferiores), e que sejam manipuladas por operadores lógicos já é tecnologia dominada no processamento de imagens e, portanto não será detalhada neste estudo (Gonzalez & Wood, 2009).

Utilizando outra função do toolbox que fornece as ferramentas baseadas no processamento morfológico de imagem que realiza o preenchimento da imagem através de uma dilatação seguida de uma erosão, os comandos `imopen` e `imclose`, que tem a seguinte sintaxe:

```
fo = imopen(A,B);  
c = imclose(A, B);
```

onde A é uma imagem binarizada e B é uma matriz de 0's e 1's que especifica o elemento estrutural que será utilizado na dilatação/erosão. Este elemento estrutural pode ser implementado automaticamente por uma função básica do ITP, a função `strel`, que constrói elementos estruturais com uma variedade de formas e tamanho. Sua sintaxe básica é

```
se = strel(shape, parameters)
```

onde `shape` define a forma da estrutura, por exemplo, disco, linha, octógono, diamante e retângulo. Os parâmetros variam dependendo da forma da estrutura, porém a definição das dimensões (largura, altura, raio etc.) é o mais importante na definição de um elemento estrutural.

Assim, considerando que praticamente a substituição de B por um objeto estrutural, SE, já é uma padronização nas sintaxes dos comandos `imopen` e `imclose` o que fornece as formas abaixo:

```
fo = imopen(A,SE);  
c = imclose(A, SE);
```

3.2 Procedimento Experimental e Processamento Digital das Imagens Termiais

A amostra (Figura 3.9 (a)) utilizada nestes experimentos foi um segmento de um isolador de uso comum nas linhas de distribuição de energia, que foi colocada em uma estufa (Figura 3.9 (b)) e aquecida a temperatura de 60°C por 12 horas para que a temperatura se estabilizasse. Em seguida, esta amostra foi retirada manualmente utilizando-se luvas de couro para minimizar o efeito de resfriamento por convecção, e colocada sobre a base (Figura 3.10).



(a)



(b)

Figura 3.9 (a) Amostra manipulada com luvas de raspas de couro; (b) Estufa utilizada para aquecer as amostras.



Figura 3.10 Amostra na base.

Para a realização dos termogramas a amostra foi colocada no suporte de metal (Figura 3.10), formada por duas plataformas de aço de 1 mm de largura e 20

cm de altura. A altura foi escolhida para minimizar a influência da base na convecção natural que ocorreu na superfície da amostra e a câmera de infravermelho foi posicionada a uma distância de 60 cm das superfícies a serem medidas. O tripé que dá suporte a câmera foi devidamente nivelado para garantir o sistema de coordenadas do instrumento, conforme recomendações do capítulo 2. Todas as medições foram realizadas entre 24 de abril e 10 de junho de 2008, portanto durante o outono deste ano, com temperatura ambiente média controlada de 26 °C, umidade relativa média controlada do ar de 57%, tendo sido fechadas todas as portas e janelas do laboratório com o intuito de não se ter correntes de ar que pudessem interferir na convecção natural durante o resfriamento da amostra. Para a realização das medições termográficas alguns cuidados foram tomados como: (a) ajustar a câmera de infravermelho (seleção da faixa de temperatura em que serão feitas as medições, onde para o caso dos experimentos apresentados foi de 0 a 120 °C; programação da gravação periódica de imagens com intervalo de tempo de 10 segundos e posicionamento correto da câmera); (c) iniciar medições; e (d) finalizar medições após 30 minutos do início.

O controle ambiental foi realizado através dos equipamentos para monitoramento das condições de temperatura ambiental (média de 26 °C) e umidade relativa do ar (média de 57%), como segue:

- *Logger de temperatura Omega **HH84** com termopar de superfície*

Objetivo: Determinação da temperatura ambiental e superficial dos isoladores nos experimentos para determinação da emissividade e registro da temperatura do ar durante todos os experimentos.

Informações principais: aceita todos os tipos de termopares. Faixa de temperatura depende do termopar e sonda utilizados (Figura 3.11 - ilustrativa)



Figura 3.11 Logger HH84 e Termohigroanemometro HHF7-P2

- Termohigroanemometro Omega **HHF7-P2**

Objetivo: Determinação da temperatura e umidade relativas do ar para garantir os parâmetros utilizados no processo de imageamento.

Informações principais: medição de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar (não utilizada nesta experiência!). Anemômetro de 1 in. (Figura 3.11 - ilustrativa).

(1) *Aquisição de dados*, após o posicionamento, durante o resfriamento da amostra foi realizado o imageamento pela câmera S45/FLIR, permitindo avaliar a distribuição de temperatura da superfície medida e analisar como se comportaria a distribuição durante o resfriamento. Este procedimento foi realizado diversas vezes e as imagens foram realizadas em duas posições: Lateral - Figura 3.12 (a) e frontal - Figura 3.12 (b). Nesses termogramas, as cores azul e verde representam temperaturas relativamente baixas, as cores vermelha e branca representam temperaturas relativamente altas, e a cor amarela indica temperaturas intermediárias.

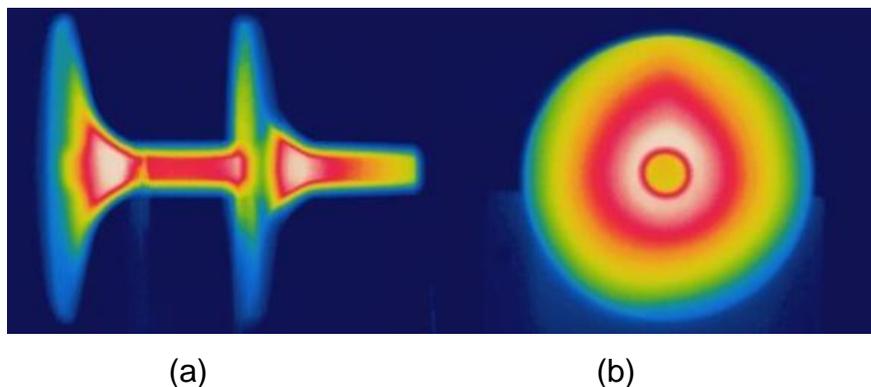


Figura 3.12 Termogramas da amostra (Isolador)

Os termogramas das superfícies da amostra permitem analisar como se comporta a distribuição de temperatura durante o resfriamento. Na Figura 3.13 (a) pode ser notado facilmente que as temperaturas da superfície da amostra estão nas faixas mais altas (vermelho), já na Figura 3.13 (b) as extremidades apresentam

temperatura nas faixas mais baixas, caracterizando o resfriamento da amostra. Este fenômeno já foi modelado matematicamente por da Silva (2007)

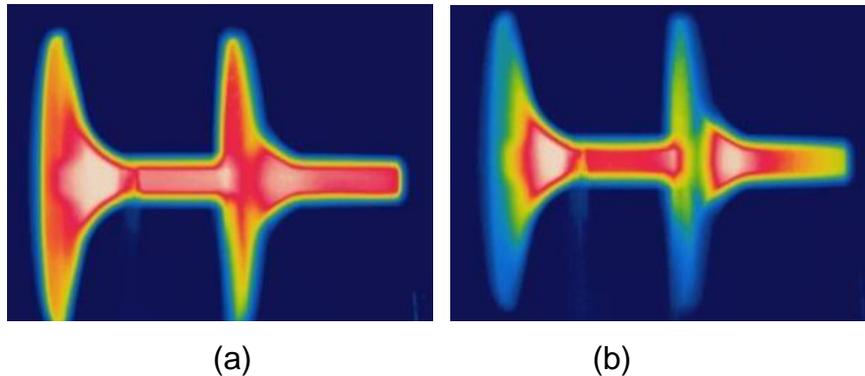


Figura 3.13 Termogramas registrando o resfriamento (a) $t = 0$ e (b) $t = 20$ min

(2) *Processamento preliminar*, onde as imagens termais foram alteradas utilizando o aplicativo QuickReport 1.2 da FLIR (Figura 3.14), utilizando as diversas paletas disponíveis gerando imagens específicas com as mesmas temperaturas e também gerando uma planilha em Excel das temperaturas medidas em cada microbolômetro específico. Este processamento foi realizado seguindo as etapas enumeradas abaixo:

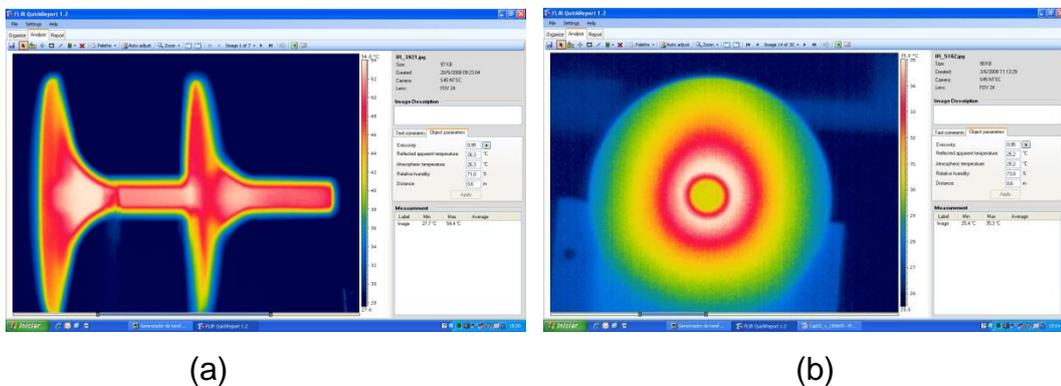


Figura 3.14 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2.

Etapa 1. Modificação das imagens utilizando as paletas disponíveis no menu paleta (Figura 3.15). Esta etapa não modifica o registro das temperaturas, antes simplesmente modifica as cores utilizadas para representar as temperaturas da mesma. Ou seja, ela mexe no plano RGB da mesma.

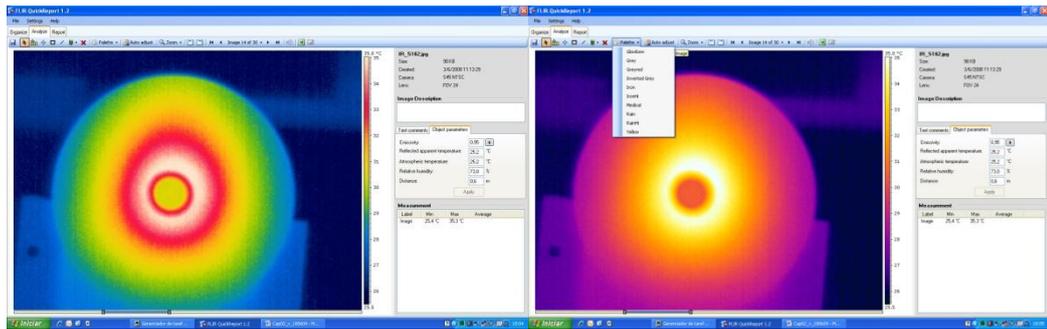


Figura 3.15 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2.

Etapa 2. Ajuste na faixa de exibição dos limites inferior e superior das temperaturas da imagem. Este ajuste permite que toda a faixa de temperatura captada pela Câmera S45/FLIR, seja observada dentro da escala de cores que está sendo utilizada. Este procedimento também serve para gerar diversas binarizações da imagem (Figura 3.16 – (a e b)). O aplicativo também pode ser utilizado para filtragens (Figura 3.16 (c)), porém este aplicativo não permite uma interação em tempo real, portanto são utilizadas as rotinas do MATLAB.

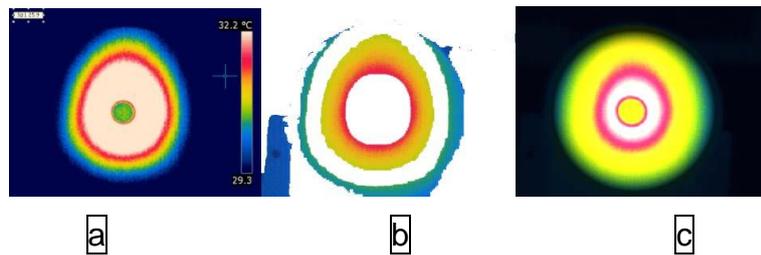


Figura 3.16 – (a) e (b) Binarizações. (c) filtragem geradas pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2.

Etapa 3. Geração da planilha Excel contendo a matriz (dim: 320 X 240) com as temperaturas de cada microbolômetros (Figura 3.17). Esta matriz após ajustes no formato das células foi importada para o MATLAB para o processamento das temperaturas na ROI (Região de Interesse).

Figura 3.17 Matriz temperatura em MS-Excel gerada pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2.

(3) *Análise*, que através do processamento digital das imagens termais utilizando rotinas do desenvolvidas a partir do Toolbox (IPT) do software MATLAB, sugere um método de reconhecimento do isolador e posterior determinação de pontos com temperatura máxima e mínima.

Respondendo o problema principal: Através de filtragens implementadas a partir de rotinas baseadas nas funções do toolbox obtêm-se os resultados dentro do esperado na teoria, ou seja, permite determinar a ROI e conseqüentemente separar os dados de temperatura registrados pela S45/FLIR. As rotinas filtram a imagem de modo a destacar as bordas de nossa amostra e posterior reconhecimento automatizado. Aplicando as rotinas diretamente nas imagens no espaço de cores RGB os resultados foram muito aquém do esperado, como é mostrado a seguir. Uma análise numérica da temperatura foi feita e em alguns casos, onde a temperatura da amostra estava muito acima da temperatura ambiental, pode-se realizar uma binarização da imagem direta. Estas condições, porém não ocorrem

freqüentemente no ambiente do campo, portanto, a Figura 3.18 apresenta a ROI encontrada que está muito próxima do ideal.

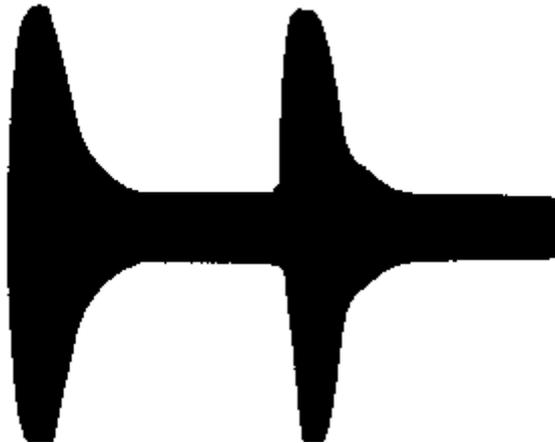
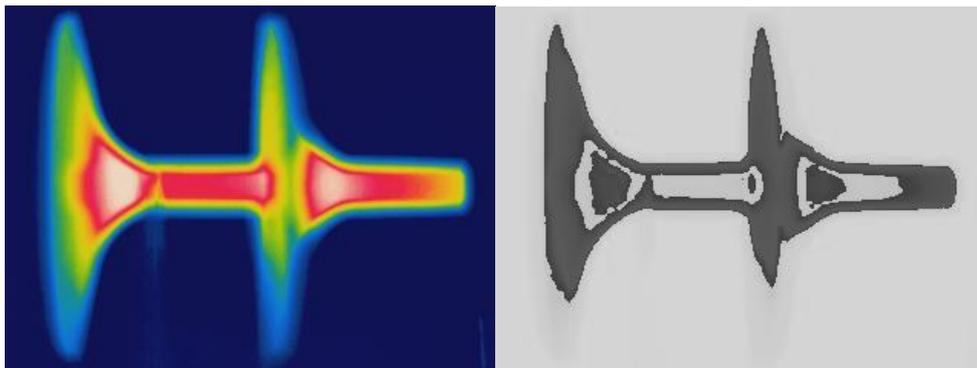


Figura 3.18 Saída de Máscara da ROI com a binarização de temperatura.

Seguimos então para o plano de cores HSI e através da função-M `rgb2hsi.m` (Ver anexo 1. Adaptada do Gonzalez, Woods e Eddins, 2009) e listada abaixo, é criada `hsi` que contém as imagens neste espaço de cores. A Figura 3.19 (a) abaixo mostra o termograma IR_3961 no espaço RGB que foi convertida para o HSI, e resulta as componentes H (Figura 3.19-b), S (Figura 3.19 -c) e I (Figura 3.19-d). Utilizando a componente intensidade (I), que em resumo é uma imagem em tons de cinza e representa as “intensidades” das cores da imagem em cada pixel.



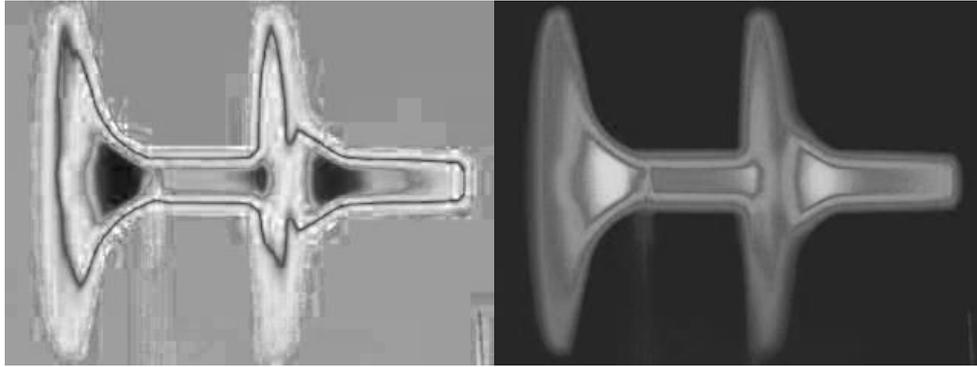


Figura 3.19(a) Imagem IR_3961 (Realizada 28/05/08, 09:29 h).
 (b), (c) e (d) imagens componentes no plano HSI (Realizada 16/06/09, 16:22 h) a b
c d

Após a mudança de plano de cores de RGB para HSI, utilizando a componente I da imagem e submetendo os diversos filtros para verificar qual deles melhor realçaria as bordas da amostra. Os filtros Laplacianos apresentaram os melhores resultados é mostrado no processo abaixo. As funções do IPT do MATLAB utilizadas foram as apresentadas acima, ou seja,

```
w = fspecial('type', parameters)
g = imfilter(f, w, 'replicate')
```

Como mostrado no Capítulo 2, as máscaras dos filtros Laplaciano negativo mais utilizados são gerados pelos comandos abaixo:

```
>> w4 = fspecial('laplacian', 0);
```

Este comando é semelhante ao simples comando abaixo:

```
>> w4 = [0 1 0; 1 -4 1; 0 1 0];
```

A partir destas máscaras a estrutura de filtros gerados automaticamente pelo comando `imfilter`. As transformações utilizadas nos filtros necessitam de uma imagem de entrada em `double`, assim foi utilizado o comando `im2double` antes destes filtros. Assim da rotina principal de filtragem teve a seguinte seqüência:

```
>> w4 = fspecial('laplacian', 0);
```

```
>> w8 = [1 1 1; 1 -8 1; 1 1 1];
>> f = im2double(f);
>> g4 = f - imfilter(f, w4, 'replicate');    % A subtração é utilizada nestes
                                             % comandos por causa
>> g8 = f - imfilter(f, w8, 'replicate');    % do Laplaciano ser negativo e,
                                             % portanto subtraímos
                                             % o resultado da imagem original f.
```

A filtragem aplicada na componente I das imagens termiais também pode ser aplicada diretamente nas imagens em RGB coloridas pela rotina `colorgrad` (Ver anexo 2), como foi implementada abaixo (Gonzalez, Woods e Eddins, 2009). Os resultados, porém, não foram satisfatórios como mostrado nos resultados.

Após a determinação da ROI e o reconhecimento do objeto, no caso o isolador, o problema se resumiu a analisar as temperaturas nesta região e determinar a temperatura máxima e mínima. Que foi implementado pelos comandos abaixo.

```
>>min = min(min(M1));
>>max = max(max(M1));
```

3.3 Resultados

A rotinas do processamento das imagens termiais no MATLAB apresentadas acima foram implementadas no laboratório de forma simples e direta. Os resultados obtidos com boa precisão são apresentados nesta seção.

1. Como resultado da função-M `rgb2hsi.m` as componentes I's (Figura 3.20) de nossas imagens passaram o diversos filtros implementados sempre pela funções-M (`imfilter`, `fspecial`, `edge`, etc...) do IPT. Os resultados mais interessantes estão listados e analisados em seguida.

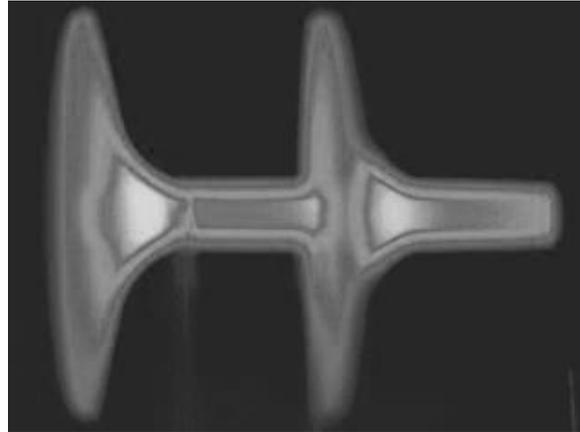


Figura 3.20 IR_3961(I) componente I do plano de cores HSI (Realizada 16/06/09, 16:22 h)

O primeiro filtro utilizado, como sugere a teoria adotada, foi o Laplaciano com máscara w_8 criada a partir dos comandos

```
>> w8 = [1 1 1; 1 -8 1; 1 1 1];
>> g8 = f - imfilter(f, w8, 'replicate');
```

gerando a imagem intermediária apresentada na Figura 3.21 (a). Posteriormente, esta imagem foi submetida novamente a este mesmo filtro e passou pelo detector de borda através da função `edge` com o detector de borda sobel com diversos fatores de limiar (`threshold`).

```
g = edge(g8, 'sobel', T);
```

O detector de borda Sobel usa as seguintes máscaras (Gonzalez, Woods e Eddins, 2009):

z1	z2	z3
z4	z5	z6
z7	z8	z9

Vizinhança da imagem

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

$$Gx = (z7 + 2z8 + z9) - (z1 + 2z2 + z3)$$

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

$$Gx = (z3 + 2z6 + z9) - (z1 + 2z4 + z7)$$

Assim foram geradas as seguintes imagens intermediárias através da função edge, detector de borda sobel, fatores de limiar 0,03 (Figura 3.21-b) e 0,01 (Figura 3.21-c).

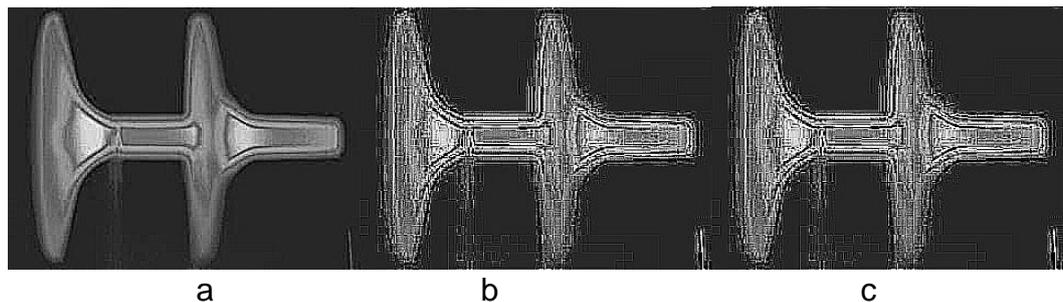
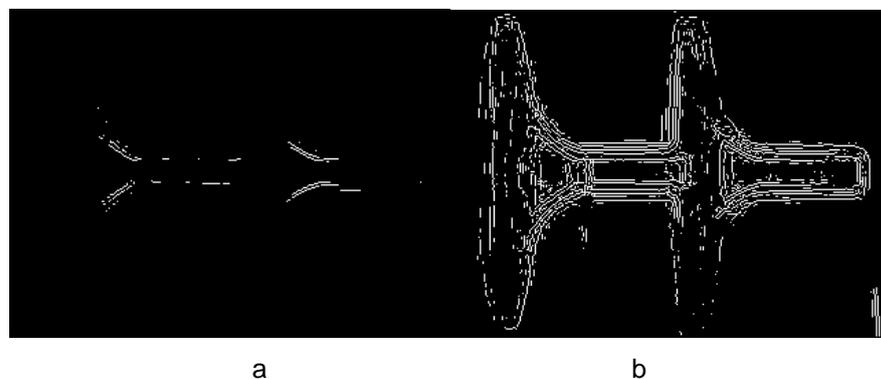


Figura 3.21(a)IR_3961_l(g8). (d)sobel_pnt03. (e)sobel_pnt01.

Em seguida foi repetido a utilização da função edge, detector de borda sobel, fatores de limiar 0.3 (Figura 3.22 -a) o que não proporcionou uma visualização completa, então é novamente submetida ao detector de bordas com o fator de limiar 0,08 (Figura 3.22 -b), 0,05 (c) 0,03 (d) e 0,01 (e).



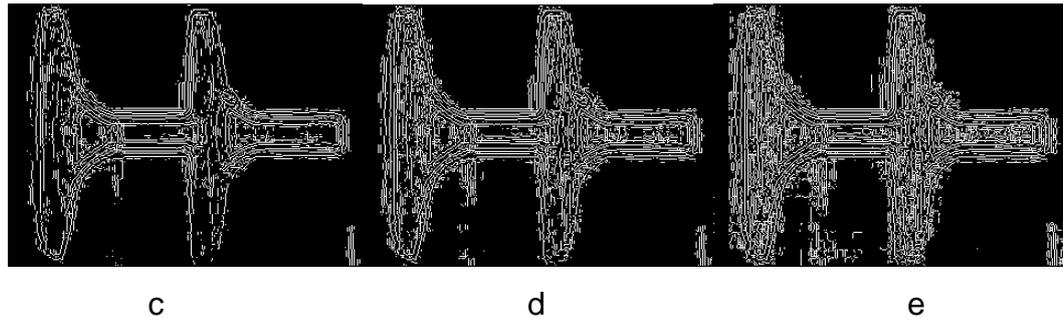


Figura 3.22 (a) IR_3961_l(g8)g_sobel_pnt3. (b) sobel_pnt08. (c)sobel_pnt05. (d)sobel_pnt03. (e)sobel_pnt01

O limiar 0,3 (Figura 3.22 (a)) apresenta a falta de sinal original, ou seja, o limiar ceifa praticamente todo o sinal original e o exagero observado no limiar 0,01 (Figura 3.22 (e)) não atendeu a expectativa teórica e, portanto foram descartadas.

Os limiares intermediários entre 0,08 e 0,03 (Figura 3.22 b, c e d) apresentam o sinal original preservado, ou seja, atenderam a expectativa teórica e, portanto foram utilizadas para a recuperação do objeto (segmento de isolador) através da combinação da dilatação e erosão como aplicação prática nas imagens processadas, utilizando a teoria da erosão e dilatação das imagens através dos comandos e elementos estruturais (Gonzalez, Woods e Eddins, 2009).

```
fo = imopen(g,se);
c = imclose(f,se);
```

este processamento permite a definição da ROI. Abaixo são apresentados alguns exemplos com a imagem IR_3961_l que após o uso dos filtros w8, sobel com parâmetro 0.03, 0.05, passou pela dilatação com parâmetro octogonal, conforme a Figura 3.23.

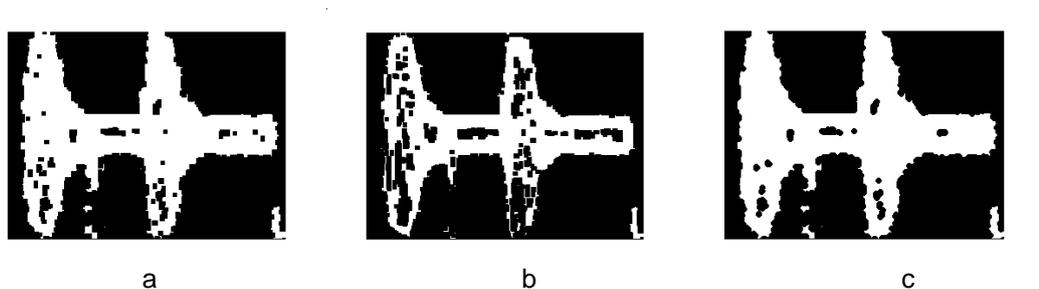


Figura 3.23 (a) IR_3961_I(g8)g_sobel_pnt03_clsBW (b) sobel_pnt05_clsBW
(c) Fill_octag3

Um processamento adicional permite a delimitação da região de interesse, ROI repassando os detectores de bordas com parâmetro 0.04, 0.09 e 0.1, conforme a Figura 3.24.

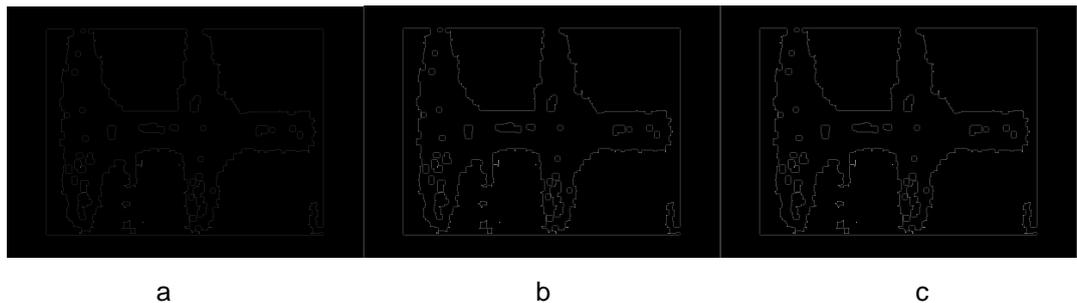


Figura 3.24 (a) IR_3961_I Alter (g8)Sobel_pt03_clsBW(newg4)_pt04. (b) 0,09, (c) 0,1.

Realizando os mesmos procedimentos com a amostra IR_3921, com o SE de disk = 10, e novamente filtrando com o w8. Os resultados foram ainda mais precisos e a máscara ficou muito próximo do contorno real, conforme a Figura 3.25.



Figura 3.25 (a)IR_3921(g8(conv)g8)l_sobel_ponto26)close(disk10) (b) newg8.

Um processamento adicional permite a delimitação da região de interesse, ROI repassando os detectores de bordas com parâmetro 1 e o parâmetro de disk de 2 e 10 conforme a Figura 3.26.

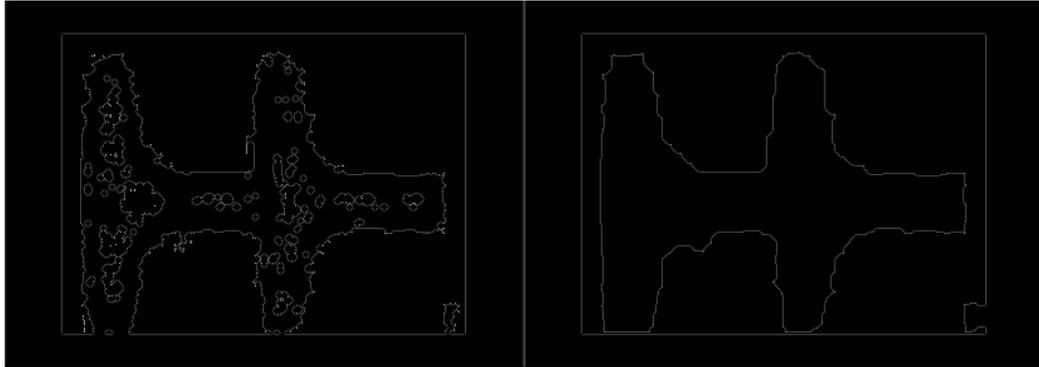


Figura 3.26 IR_3921(g8(conv)g8)_sobel_ponto26)close(disk02)(newg4(1).

(b) close e disk com 10.

A máscara gerada a partir da binarização da ROI é utilizada através de uma simples multiplicação com a matriz temperatura, gerada pelo software Quick Reporte, para determinar as temperaturas de interesse.

A matriz com as temperaturas (dim: 320 X 240) de cada microbolômetros gerada pelo Quick Report e importada para uma planilha Excel. Esta matriz após ajustes no formato das células foi importada para o MATLAB para o processamento das temperaturas na ROI (Região de Interesse). Este processamento utiliza a binarização para zerar as temperaturas fora da ROI, preservando as temperaturas de interesse. Esta matriz apresenta o formato característico da amostra, como pode ser visualizado nas Figuras 3.27, 3.28 e 3.29, abaixo.

Figura 3.27 Tela do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador).

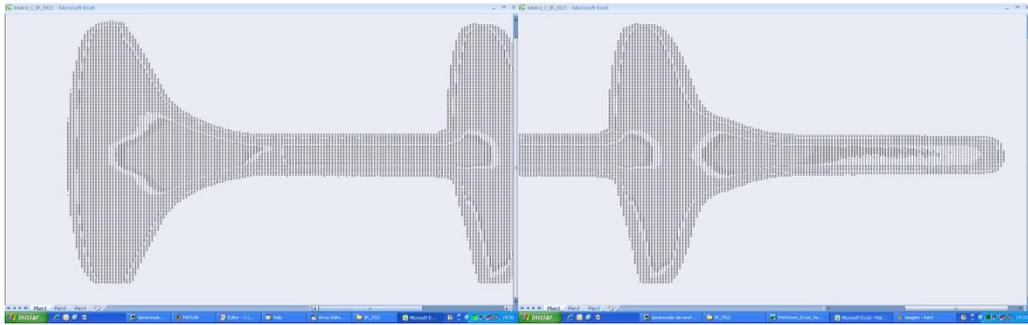


Figura 3.28 Telas do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador).

A análise desta matriz por uma rotina simples determina a temperatura máxima e mínima através dos comandos abaixo. Esta rotina gera os valores na área de trabalho (WorkSpace) mostrado na Figura 3.29.

`max = max(max(M1));`

`min = min(min(M1));`

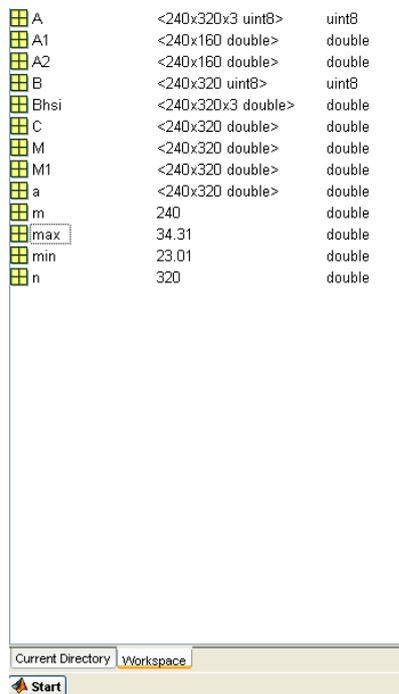


Figura 3.29 Área de trabalho do MATLAB com a temperatura Máxima e mínima

3.4 Discussão

Os resultados apresentados na sessão anterior já atingem o objetivo deste experimento, que é o de detectar os contornos dos objetos (segmento de isolador), porém muitas outras ferramentas de PDI deixaram de ser testadas.

A análise utilizada nesta dissertação é realmente de grande simplicidade e, portanto uma análise mais complexa e aprofundada pode ser realizada com resultados mais precisos.

3.5 Conclusão e Recomendações

O imageamento termal disponibiliza as imagens térmicas de superfícies. Apesar da grande sensibilidade das câmeras de imageamento termal modernas, devido à sua relativa baixa precisão a maioria dos estudos e aplicações que utilizam estes instrumentos é de análise qualitativa. Nestas experiências é demonstrado que as informações de temperatura dos termogramas também podem ser usadas em análises quantitativas.

A configuração da S45/FLIR e a entrada dos valores corretos dos parâmetros solicitados pelo equipamento são essenciais para a determinação da temperatura a partir de seus termogramas, pois estes dados são utilizados para estudos matemáticos e simulações posteriores com uso de modelos. As grandezas medidas e os parâmetros do objeto estudado precisam estar dentro dos limites aceitáveis da câmera para permitirem que a aquisição de dados seja o mais próxima da realidade e uma manipulação dos resultados obtidos tenham a precisão necessária. As situações difíceis de medições quando há fontes de radiação perturbadoras ou a emissividade do objeto é baixa exigem que o operador da câmera e o inspetor termográfico as contornem e garantam a qualidade da aquisição de dados.

As experiências mostraram que de uma simples visualização de fenômenos básicos até a determinação de parâmetros termofísicos e geométricos podem ser feitos através das aplicações da termografia, que tem a grande vantagem de ser um ensaio não-destrutivo.

Como recomendações, as imagens geradas nesta experiência poderão ser utilizadas para análises mais complexas e que poderão apresentar resultados mais refinados.

Muitas das ferramentas de PDI deixaram ser utilizadas e, portanto, fazem parte de nossa recomendação para um estudo posterior.

Novas lentes estão sendo adquiridas pelo GET UFPE via FINEP e poderão ser utilizadas para a avaliação com diferentes parâmetros.

Um banco de imagens foi criado e está sobre a guarda do Departamento de Engenharia Cartográfica e uma cópia com o Departamento de Engenharia Mecânica, ambos da UFPE. Este banco contém muitas imagens geradas nesta experiência que poderão ser utilizadas para análises do resfriamento e também para comparação entre os resultados experimentais e as simulações com os modelos matemáticos mais complexos que utilizem o formato dos isoladores.

4.EXPERIMENTOS COM IMAGENS TERMAIS DE PLACAS DE GESSO COM OU SEM A INCLUSÃO DE UM RESISTOR ELETRÔNICO

Este capítulo apresenta os resultados das análises das imagens termiais adquiridas em laboratório de amostras em forma de placas de gesso com ou sem a inclusão de um resistor. Três experiências básicas foram realizadas com o mesmo tipo de amostras. A primeira (Exp1) teve o objetivo de avaliar qualitativamente o efeito aleta sobre os conectores do resistor; na segunda (Exp2) verificou, apenas qualitativamente, o processo de resfriamento das amostras após a retirada da estufa; e por último a experiência (Exp3) mais significativa, por apresenta uma anomalia introduzida através de um resistor incluso nas placas, verificou o processo de aquecimento com escalas de potência dissipada pelo resistor. Todas seguiram um mesmo método que se divide em três partes: (a) aquisição de dados, que consiste na gravação de imagens termiais das amostras através da câmera térmica S45/FLIR, após aquecimento em estufa ou por uma tensão elétrica no resistor; (b) processamento intermediário, onde as imagens termiais são alteradas utilizando o aplicativo Quick_Report 1.2 da FLIR, que disponibiliza diversas paletas de cores para a geração de imagens diferenciadas com as mesmas temperaturas; e também gerando a matriz (planilha Excel) das temperaturas medidas em cada microbolômetro; (c) análise, que através do Processamento de Digital Imagens utilizando rotinas desenvolvidas a partir do Image Processing Toolbox (que será citado como IPT ou Toolbox) disponível na biblioteca do software MATLAB 7.5, (versão 14 da The MathWorks, Inc) sugere um método de reconhecimento das amostras e inclusões para posterior determinação de pontos com temperatura máxima e mínima.

4.1 Aspectos Fundamentais Específicos

O embasamento teórico geral foi apresentado no capítulo 2 – Aspectos Teóricos, porém nesta experiência existe o processo (Exp3) que envolve o aquecimento das placas que têm um resistor incluso que é submetido a uma tensão elétrica. Além da

teoria geral da eletricidade que apresenta o comportamento elétrico de uma resistência submetida a uma tensão elétrica sobre seus terminais e a potência dissipada em forma de calor, é também necessário considerar a termodinâmica (da Silva, 2007), que além de possibilitar uma simulação matemática do comportamento da condução de calor tridimensional e transiente no interior da placa de gesso, através do estudo da potência necessária para elevar a temperatura aos patamares desejados, indicou o valor nominal de resistência necessário e o resultado esperado na superfície imageada.

Da Silva (2007) em seus trabalhos apresenta um modelo matemático e sua discretização para solução de um problema de condução de calor tridimensional e transiente de placas de gesso e desenvolveu complexos programas de computação eletrônica que através da teoria da termodinâmica são capazes de: (1) tratar imagens termiais; (2) resolver problemas de condução de calor tridimensional e transiente, além de comparar os resultados da simulação com dados experimentais extraídos de termogramas; (3) fazer comparações entre resultados de simulações, e (4) comparar dados de termogramas.

Segundo da Silva (2007) “Para a obtenção das equações aproximadas foi utilizado o Método dos Volumes Finitos (MVF), baseado em Maliska (2004). O MVF transforma uma equação diferencial parcial num sistema de equações lineares a serem resolvidas simultaneamente e é baseado em um balanço de energia nos volumes elementares”. A malha empregada no problema é regular e uniforme, em coordenadas cartesianas, conforme ilustram a Figura 4.1-a (situação bidimensional) e a 3.1-b (situação tridimensional).

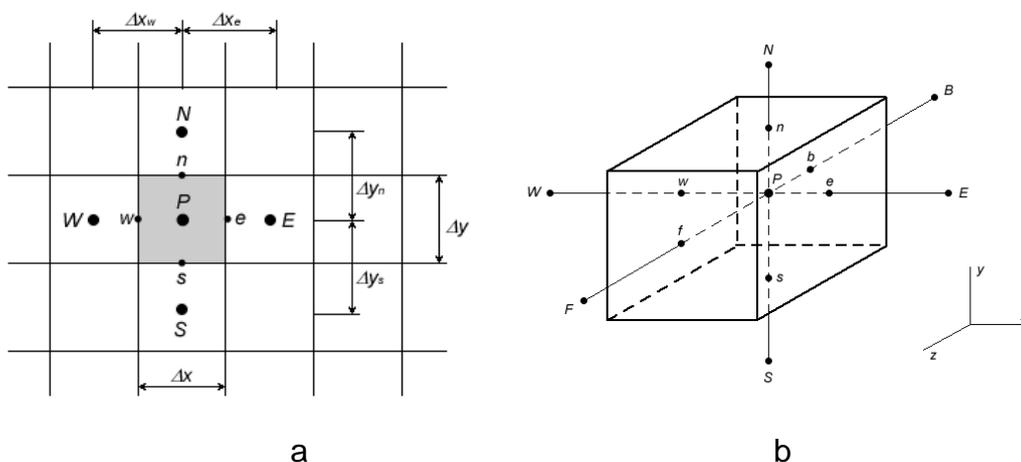


Figura 4.1 Volume elementar e seus vizinhos. Situação (a) bidimensional e

(b) tridimensional (extraído de Maliska (2004)).

Diversos estudos desenvolvidos por Lima et al. (2005) , Magnani et al. (2005) , Magnani & da Silva (2008) já comprovaram a eficácia desta metodologia para determinação das propriedades termofísicas e a geometria dos objetos envolvidos neste tipo de experiência. Basicamente, destes estudos de termodinâmica foi utilizado o valor de potência necessário para aquecer a placa de gesso até temperaturas nos patamares que são detectáveis pela câmera térmica S45/FLIR. Este valor foi próximo abaixo de 1 W.

A partir desta informação a teoria física básica de eletricidade faz uso de modelos básicos para descrever o comportamento físico dos materiais submetidos a campos eletromagnéticos. Com a determinação do resistor AC10 de fio axial 90 ohms, 10 W, e portanto uma limitação da potência máxima dissipada de 10 W, foi empregada então uma variação da potência dissipada de 1 W até 8W com intervalos de 1 W, que permite uma visualização satisfatória dos fenômenos envolvidos.

Segundo o IPEM-SP (2009) as definições das variáveis envolvidas no problema, com seus nomes, símbolos e grandezas estão representadas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 Variáveis Físicas Utilizadas na Pesquisa (Adaptada de IPEM-SP, 2009)

grandeza:	TENSÃO ELÉTRICA, DIFERENÇA DE POTENCIAL
nome:	Volt
plural do nome:	Volts
símbolo:	V
definição:	Tensão elétrica entre os terminais de um elemento passivo de circuito, que dissipa a potência de 1 Watt quando percorrido por uma corrente invariável de 1 Ampère.
grandeza:	RESISTÊNCIA ELÉTRICA
nome:	Ohm
plural do nome:	Ohms

símbolo:	Ω
definição:	Resistência elétrica de um elemento passivo de circuito que é percorrido por uma corrente invariável de 1 Ampère, quando uma tensão elétrica constante de 1 Volt é aplicada aos seus terminais. (O ohm é também unidade de impedância e de reatância em elementos de circuito percorridos por corrente alternada.)
grandeza:	POTÊNCIA, QUANTIDADE DE ENERGIA
nome:	Watt
plural do nome:	Watts
símbolo:	W
definição:	Potência desenvolvida quando se realiza, de maneira contínua e uniforme, o trabalho de 1 Joule em 1 segundo.

Da teoria básica de eletricidade sabe-se que a potência P [W (Watt)] dissipada em uma resistência R (Ω (ohm)) submetida a uma tensão U (V (Volt)) é dada pela equação (4.1):

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (4.1)$$

manipulando a equação tem-se a equação (4.2):

$$U^2 = P * R, \quad (4.2)$$

tirando a raiz quadrada dos dois lados da equação, tem-se a equação (4.3)

$$U = \sqrt{P * R}. \quad (4.3)$$

Sendo assim para variar a potência dissipada conforme descrito acima, optou-se por utilizar uma resistência é tem 90 Ω de modo a possibilitar a utilização de uma

fonte disponível, as experiências (Exp3) foram realizadas seguindo a Tabela 4.2 abaixo:

Tabela 4.2 Valores de Tensão Utilizadas nos experimentos.

$P[W]$	$U[V]$
8	26,83
7	25,01
6	23,24
5	21,21
4	18,97
3	16,43
2	13,42
1	9,49

4.2 Procedimento Experimental e Processamento Digital das Imagens Termiais

Na preparação do gesso para moldagem das placas foi usada a proporção de 50% de água e 50% de pó de gesso na massa básica. Foi tomado o cuidado nesta preparação para que todas as amostras tenham o mesmo comportamento de transferência de calor. As quantidades de pó de gesso e de água foram medidas em balança digital com precisão de 0,5 g, conforme ilustra a Figura 4.1.



Figura 4.1 Medição do pó de gesso em balança digital

Foram confeccionadas quatro placas de gesso, ambas com dimensões 10 x 10 x 3,5 cm (Figura 4.2 (a) - ilustra a geometria da amostra com resistor incluso com os conectores saindo por trás da amostra!) sendo uma composta apenas de gesso (que será chamada amostra de gesso) e as outras três com a inclusão de um resistor (Figura 4.2 (b) e (c)) de uso geral AC10 de 90 ohms, 10 W de fio axial fornecido gentilmente por Vishay Phoenix do Brasil (que serão chamadas amostras com resistor incluso).

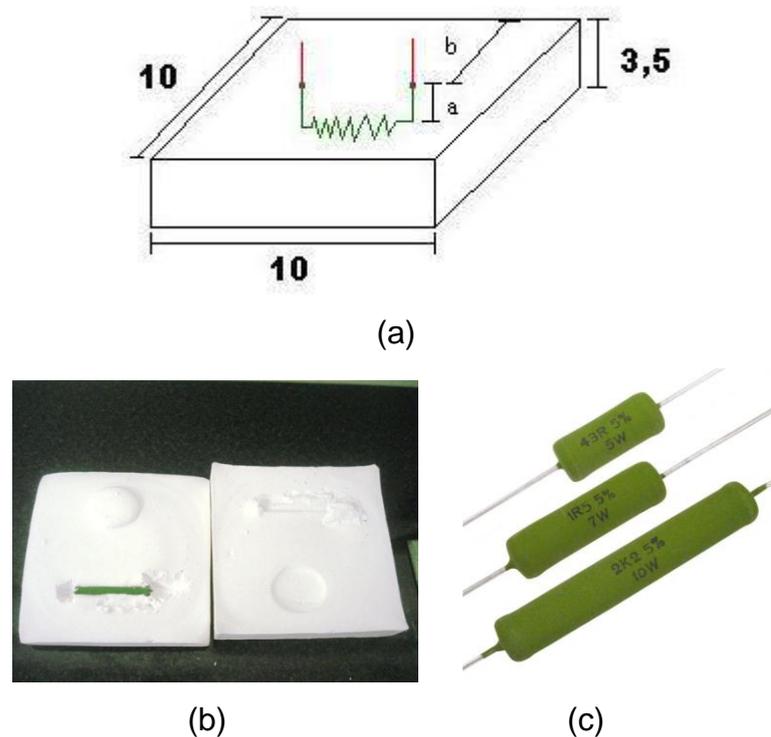


Figura 4.2 (a) Resistor incluso; (b) Família dos resistores utilizados. (c) Geometria das amostras com o resistor incluso.

As amostras foram confeccionadas a partir de um molde próprio para gesso. Assim, foi possível obter um material adequado à realização dos ensaios, com alternativas de variações na profundidade das placas e no posicionamento do resistor em locais previamente determinados. A distância b foi fixada em 2,5 cm. As amostras com os conectores saindo por trás têm a profundidade a medindo 1,5 e 2,5 cm. Para estudos do efeito aletas (Ver detalhe na Figura 4.3 (g), (h) e (i)) foi confeccionada uma mostra com os terminais estendidos para que fossem acessados pelos lados da placa e não por trás como as outras duas placas com um resistor incluso. Nesta amostra a profundidade a medindo 2 cm.

Antes da colocação da massa no molde, ilustrado desmontado na Figura 4.3 (a), houve a necessidade de passar margarina como desmoldante para que a placa não colasse no mesmo (Figura 4.3 (b)). Na confecção das amostras com o resistor incluído, o posicionamento do mesmo foi feito antes da colocação da massa no molde, com o auxílio de um suporte (Figura 4.3(c)), seguindo o processo descrito no registro fotográfico abaixo (Figura 4.3 (d), (e), (f), (g), e (h)) permitindo uma correta localização e evitando uma intervenção na estrutura da placa depois que ela estivesse pronta.

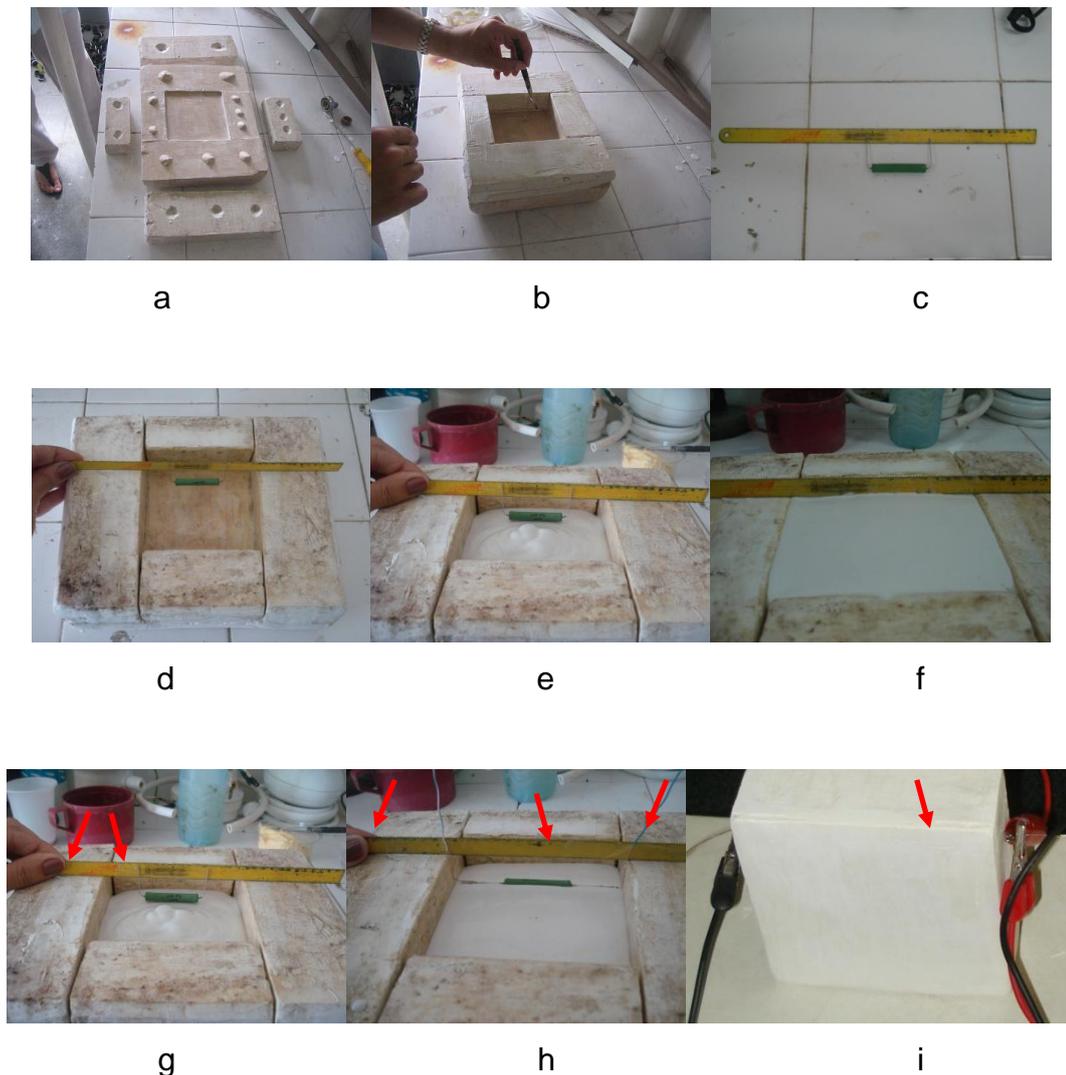


Figura 4.3 Molde para gesso (a) Partes constituintes (b) Impermeabilização (c) suporte do resistor (d), (e) e (f) Processo de posicionamento do resistor na amostra. Posicionamento (setas vermelhas) dos terminais do resistor nas placas (g) Terminais do resistor por trás; (h) e (i) Terminais do resistor pelos lados (Realizadas entre 29/04/08 17:43 h e 30/04/08 11:11 h).

Após 30 minutos, tempo de cura das placas de gesso, as partes móveis do molde foram removidas e as placas foram descoladas com facilidade, então foram deixadas por 2 horas em condição ambiente (30 °C e umidade relativa de 75%), e depois colocadas em uma estufa por 24 horas a uma temperatura de 85 °C para secagem. O objetivo de secar o máximo possível as amostras foi o de controlar as propriedades termofísicas do gesso, já que a umidade poderia alterar essas propriedades. Foi realizado um polimento nas superfícies de modo a manter a uniformidade da mesma.

Em todas as experiências realizadas (Exp1, 2 e 3) o controle ambiental foi realizado através dos equipamentos para monitoramento das condições de temperatura ambiental (média de 26 °C) e umidade relativa do ar (média de 57%), como segue:

- Logger de temperatura Omega HH84 com termopar de superfície

Objetivo: Determinação da temperatura ambiental e superficial das amostras nos experimentos para determinação da emissividade e registro da temperatura do ar durante todos os experimentos.

Informações principais: aceita todos os tipos de termopares. Faixa de temperatura depende do termopar e sonda utilizados. Figura 4.4 (ilustrativa)

- Termohigroanemometro Omega HHF7-P2

Objetivo: Determinação da umidade relativo do ar.

Informações principais: medição de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar. Anemômetro de 1 in. Figura 4.4 (ilustrativa)



Figura 4.4 Logger HH84 e Termohigroanemometro HHF7-P2

Na experiência Exp3, o controle da tensão sobre o resistor foi realizado nos equipamentos para monitoramento das tensões e correntes, que são o display incluído na fonte e o multímetro digital externo mais preciso:

- Fonte de tensão MINIPA – MPS – 303D

Objetivo: Impor sobre os terminais do resistor a tensão adequada para o imageamento.

Informações principais: geração controlada de uma tensão elétrica nos terminais dos resistores. Figura 4.5-a.

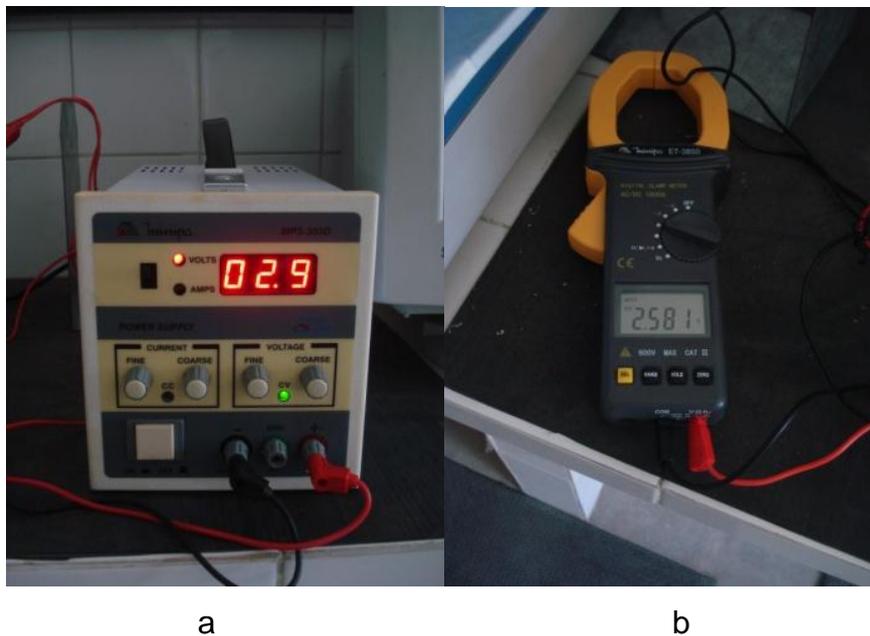


Figura 4.5 Fonte MPS – 303D (Realizada em 30/04/08 10:15 h) e Multímetro Digital ET – 3850 (Realizada em 30/04/08 10:16 h) usados da experiência Exp3.

- Multímetro Digital MINIPA ET - 3850

Objetivo: Determinação mais precisa da Tensão imposta sobre os terminais do resistor.

Informações principais: medição com mais precisão da tensão elétrica gerada pela Fonte acima. Figura 4.5-b.

Procedimentos das

Aquecimento Utilizando a Estufa

Nas experiências *Exp1* e *Exp2*, amostras foram submetidas ao aumento da temperatura através de uma estufa (Figura 4.6 a – foto ilustrativa) e aquecida a temperatura de 60°C por 12 horas para que a temperatura se estabilizasse. As amostras foram retiradas manualmente utilizando-se luvas de couro para minimizar o efeito de resfriamento por convecção, e colocada sobre a base.



Figura 4.6 Estufa utilizada para aquecer as amostras.

Para a realização dos termogramas as amostras foram colocadas na banca (Figura 4.7), formada por uma mesa comum e um suporte simples de papelão. A câmera de infravermelho foi posicionada a uma distância de 60 cm das superfícies a serem medidas. O tripé que dá suporte a câmera foi devidamente nivelado para garantir o sistema de coordenadas do instrumento, conforme recomendações do capítulo 2. Todas as medições foram realizadas entre 12 de maio e 05 de junho de 2008, portanto durante o outono do referente ano, com temperatura ambiente média controlada de 26 °C, umidade relativa média controlada do ar de 57%, tendo sido fechadas todas as portas e janelas do laboratório com o intuito de não se ter correntes de ar que pudessem interferir na convecção natural durante o resfriamento da amostra. Para a realização das medições termográficas alguns cuidados foram tomados como: (a) ajustar a câmera de infravermelho (seleção da faixa de temperatura em que serão feitas as medições, onde para o caso dos experimentos

apresentados foi de 0 a 120 °C; programação da gravação periódica de imagens com intervalo de tempo de 10 segundos entre uma imagem e outra; e, posicionamento correto da câmera); (c) iniciar medições; e (d) finalizar medições após 30 minutos do início.



Figura 4.7 Banca (Realizada em 07/05/08 10:00:53 h)

(1) Aquisição de dados, após o posicionamento, durante o resfriamento da amostra foi realizado o imageamento pela câmera S45/FLIR, permitindo avaliar a distribuição de temperatura da superfície medida e analisar como se comportaria a distribuição durante o resfriamento.

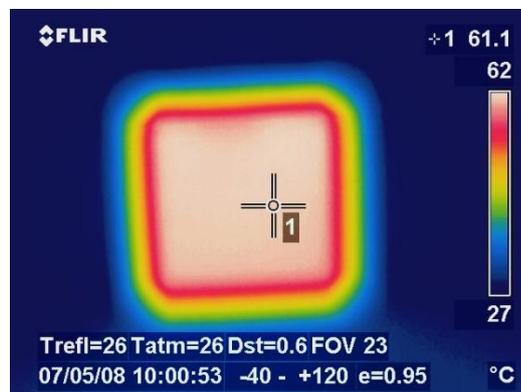


Figura 4.8 Termogramas da amostra (Realizada em 07/05/08 10:00:53 h)

Na experiência *Exp1*, o processo de verificação do efeito aletas é estudado qualitativo e portanto não tem o PDI com uma ferramenta exigida para as análises. Os termogramas abaixo (Figura 4.9) apresentam o efeito aletas no processo de resfriamento das amostras, após aquecimento na estufa, com o posicionamento dos terminais do resistor incluso diferenciados. A placa do lado esquerdo tem os

terminais pelos lados da placa de gesso e a placa do lado direito tem os terminais pela frente da amostra.

Na Figura 4.9 (c) apresenta os termogramas já no final do processo de resfriamento, onde pode notar duas áreas de concentração de cor branca localizadas exatamente nos locais dos terminais do resistor, neste momento a aquisição de imagens foi interrompida, pois apenas este efeito era necessário registrar. Este efeito determinou que o imageamento fosse realizado para os três tipos de placa com inclusão do resistor.

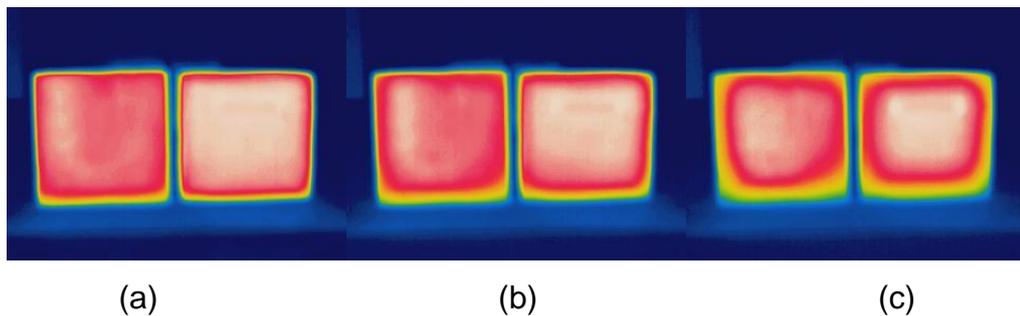
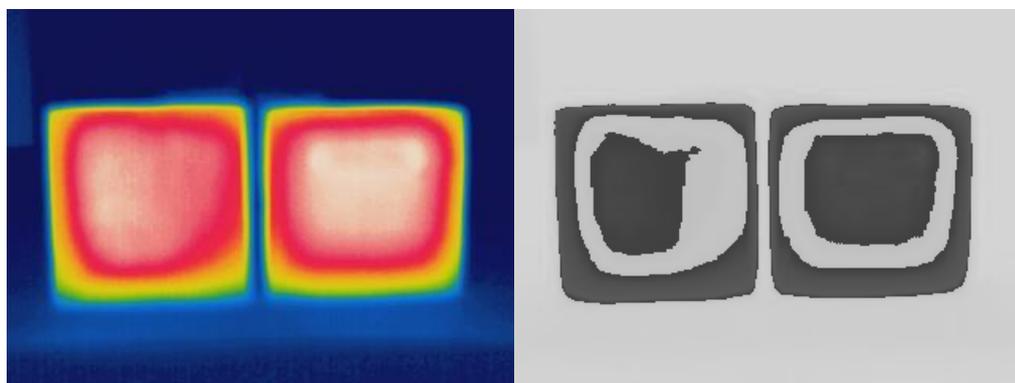


Figura 4.9 A influência da posição dos terminais do resistor no processo de resfriamento das placas (Esquerda = lateral e direita = traseira) (a) $T = 0$; (b) $T = 15$ min e (c) $T = 30$ min. (Realizadas em 30/05/08 entre 9:30 e 10:04 h)

Foram realizadas algumas tentativas de determinar algum processamento digital nos termogramas (Figura 4.10) desta experiência, mas a baixa precisão da S45 /FLIR não permite a visualização das bordas no efeito aleta, por este motivo não continuamos com a análise via PDI.



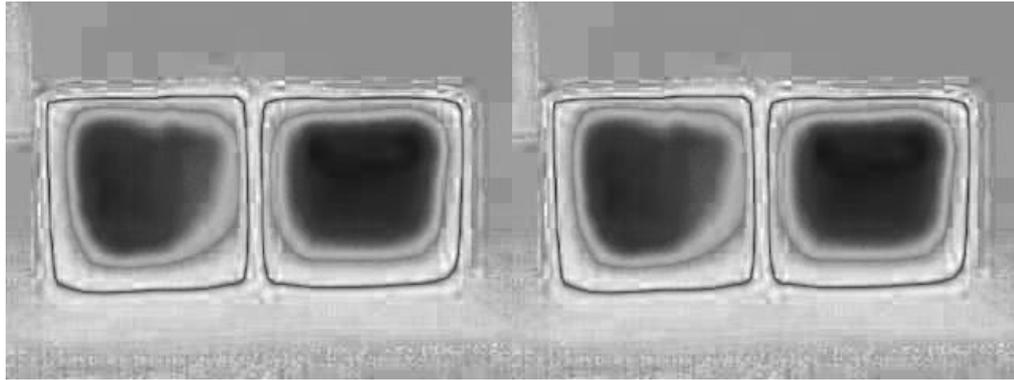
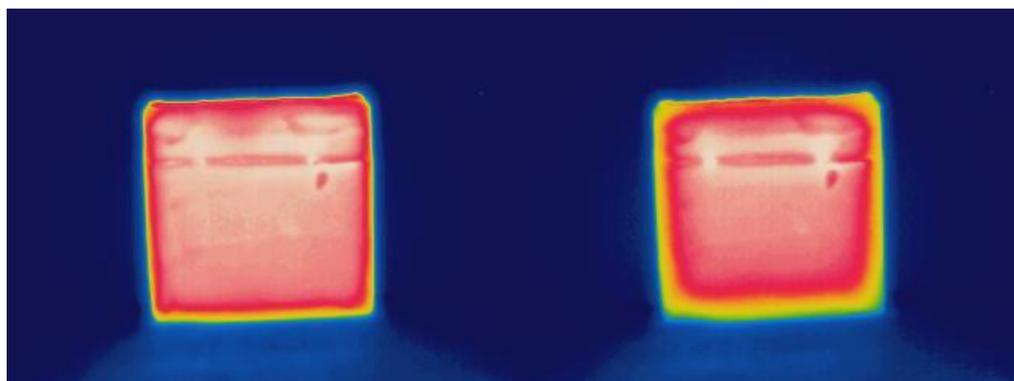


Figura 4.10 Imagem IR_4985 suas imagens componentes (plano HSI) H, S e I, respectivamente.

a	b
c	d

Exp2: Processo de verificação do resfriamento das amostras

Os termogramas das superfícies da amostra permitem analisar como se comporta a distribuição de temperatura durante o resfriamento. As figuras 3.11 (a-d) caracterizam o resfriamento da amostra com o aumento da área de cores amarela, verde e azul que representam as temperaturas nas faixas mais baixas. Este fenômeno já foi modelado matematicamente por da Silva (2007).



a

b

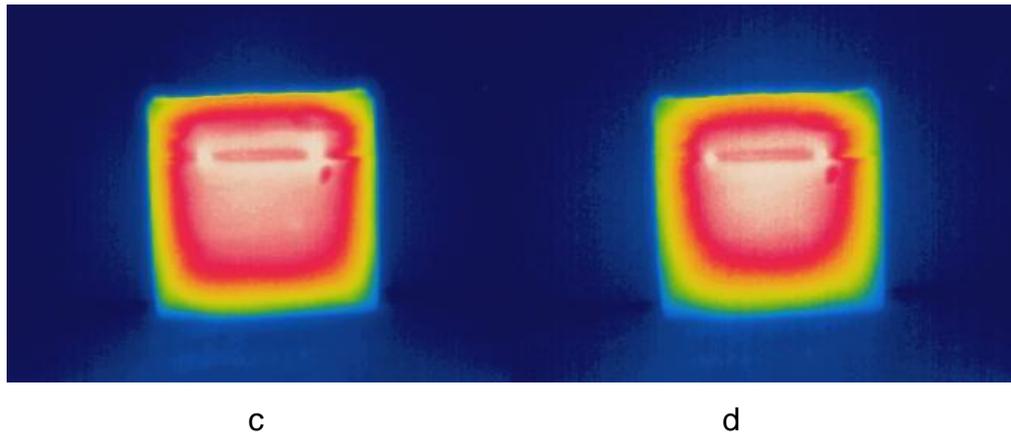


Figura 4.11 Termogramas registrando o resfriamento (a) $t = 0$, (b) $t = 10$ (c) $t = 20$ e (d) $t = 30$ min.

A observação direta destas imagens termiais denota que as placas não tinham sido devidamente polidas antes da realização dos termogramas, pois a marca do suporte utilizado para a colocação dos resistores no molde durante o preparo das amostras está muito visível. Por este motivo, as análises do resfriamento não foram extrapoladas para o estudo numérico.

Nos procedimentos das experiências *Exp3*, os terminais dos resistores inclusos nas placas de gesso foram conectados a fonte de tensão MINIPA MPS – 303D e ao multímetro digital MINIPA ET – 3850 conforme mostrado na Figura 4.12. A fonte de tensão foi ajustada para os valores definidos na Tabela 4.2 e o multímetro digital garantiu uma precisão de 2 mV para este ajuste.

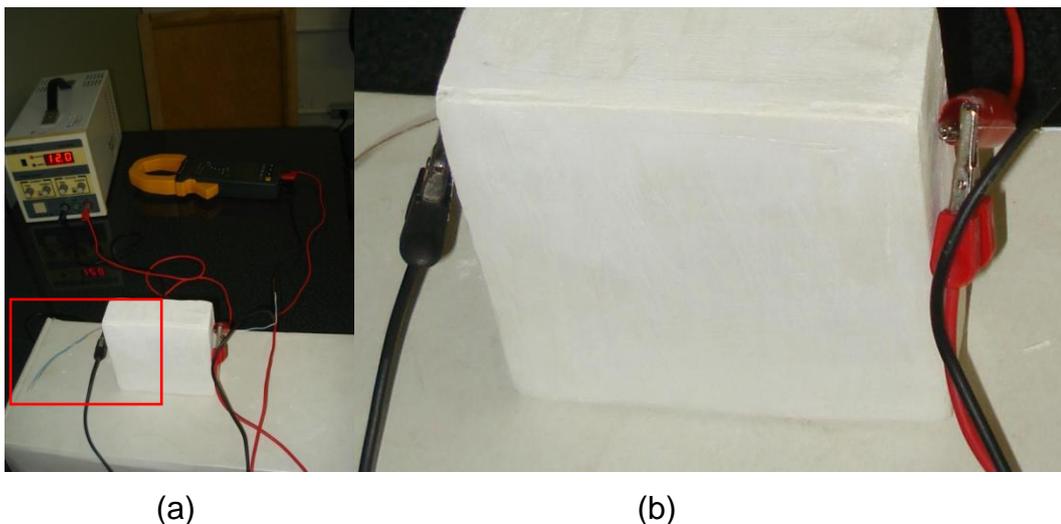


Figura 4.12 (a) Aquecimento via tensão elétrica; (b) Detalhe da conexão (Realizadas em 06/06/08 09:21 h).

Para a realização dos termogramas (Figura 4.13 a) as amostras foram colocadas na banca (Figura 4.13 b), formada por uma mesa comum e um suporte simples de papelão e conectadas aos instrumentos necessários. A câmera de infravermelho foi posicionada a uma distância de 60 cm das superfícies a serem medidas. O tripé que dá suporte a câmera foi devidamente nivelado para garantir o sistema de coordenadas do instrumento, conforme recomendações do capítulo anterior. Todas as medições foram realizadas entre 24 de abril e 10 de junho de 2008, portanto durante o outono do referente ano, com temperatura ambiente média controlada entre 23 e 26 °C, umidade relativa média controlada do ar de 57%, tendo sido fechadas todas as portas e janelas do laboratório com o intuito de não se ter correntes de ar que pudessem interferir na convecção natural durante o resfriamento da amostra. Para a realização das medições termográficas alguns cuidados foram tomados como: (a) ajustar a câmera de infravermelho (seleção da faixa de temperatura em que serão feitas as medições, onde para o caso dos experimentos apresentados foi de 0 a 120 °C) e (c) as medições foram realizadas apenas quando as temperaturas superficiais da placa se estabilizaram.

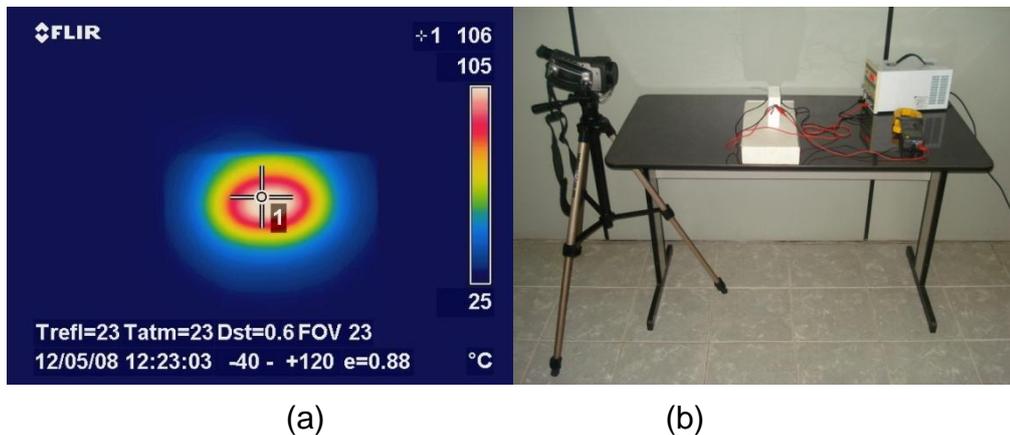


Figura 4.13 (a) Imagem termal, (b) Amostra com resistor na bancada.

(1) Aquisição de dados, após a estabilização da temperatura superficial da amostra foi realizado o imageamento (Figura 4.14) pela câmera S45/FLIR, permitindo avaliar a distribuição de temperatura da superfície medida. Nesses

termogramas, as cores azul e verde representam temperaturas relativamente baixas, as cores vermelha e branca representam temperaturas relativamente altas, e a cor amarela indica temperaturas intermediárias.

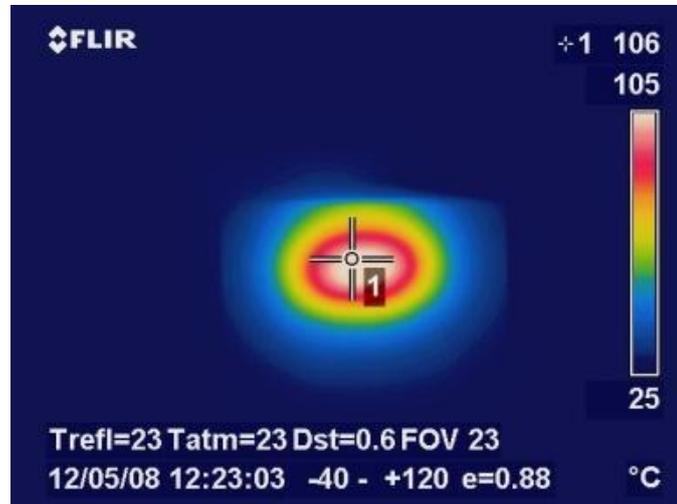
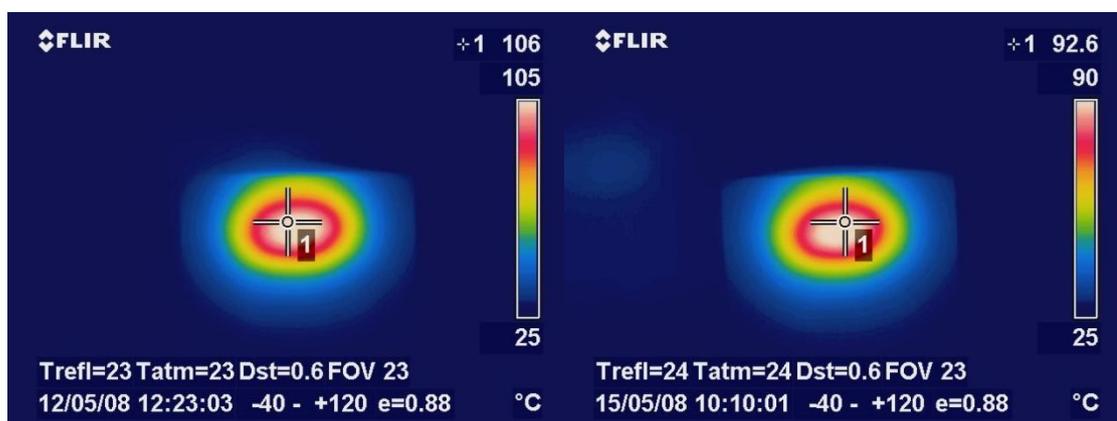


Figura 4.14 Imagem IR_3715 (Realização registrada na imagem).

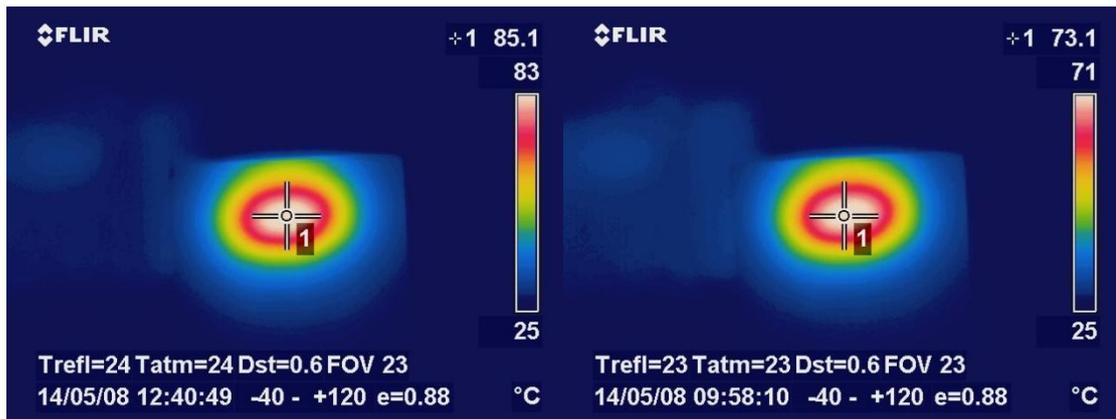
Neste registro pode-se facilmente verificar os ajustes realizados na S45/FLIR antes do imageamento, ou seja, Temperaturas consideradas para reflexão e atmosférica em 23°C, valores de registro em – 40 até 120 °C, emissividade de 0.88 e FOV de 23.

Na Figura 4.15, abaixo, são apresentadas as imagens termiais realizadas para valores de tensão da Tabela 4.2.



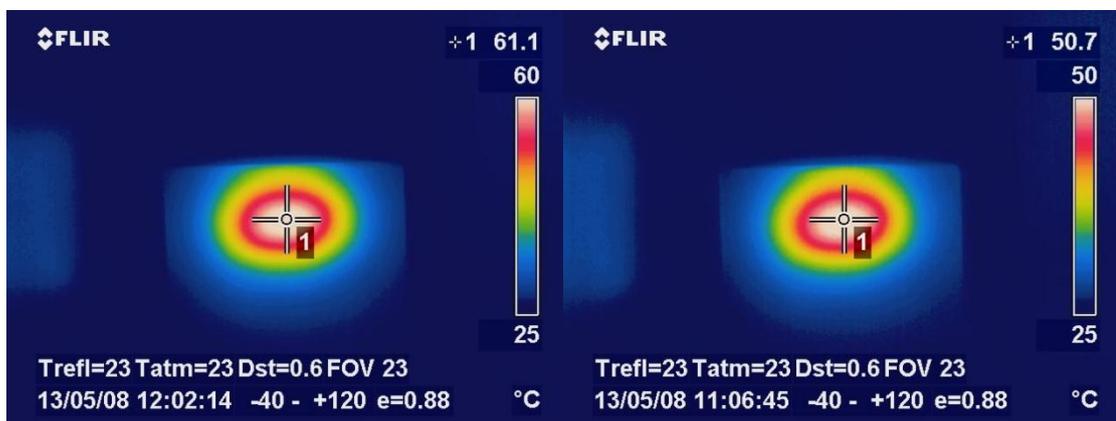
(a) IR_3715(26,83 V)

(b) IR_3722 (23,24 V)



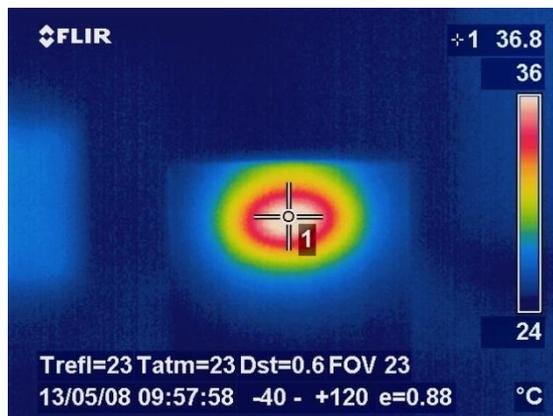
(c) IR_3721 (21,21 V)

(d) IR_3720 (18,97 V)



(e) IR_3719(16,43 V)

(f) IR_3718(13,42 V)



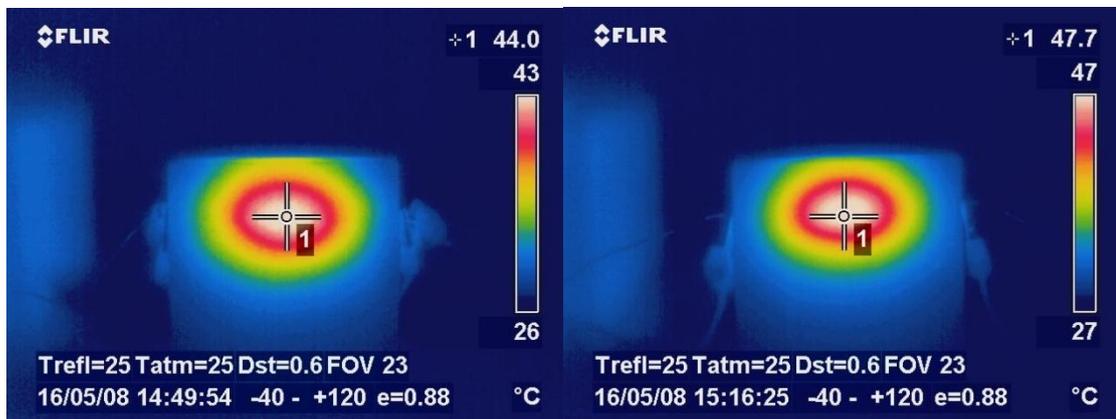
(g) IR_3717 (9,49 V)

Figura 4.15 Variação da temperatura estabilizada proporcional as tensões impostas nos terminais do resistor e indicadas abaixo dos termogramas (a) 26,83 V, (b) 23,24 V, etc. (Registro de datação nos termogramas)

Pela observação direta pode-se notar que as imagens são muito semelhantes e que não é possível perceber nenhuma grande diferença apenas na geometria da superfície da amostra. As únicas grandes diferenças que podem ser notadas, por

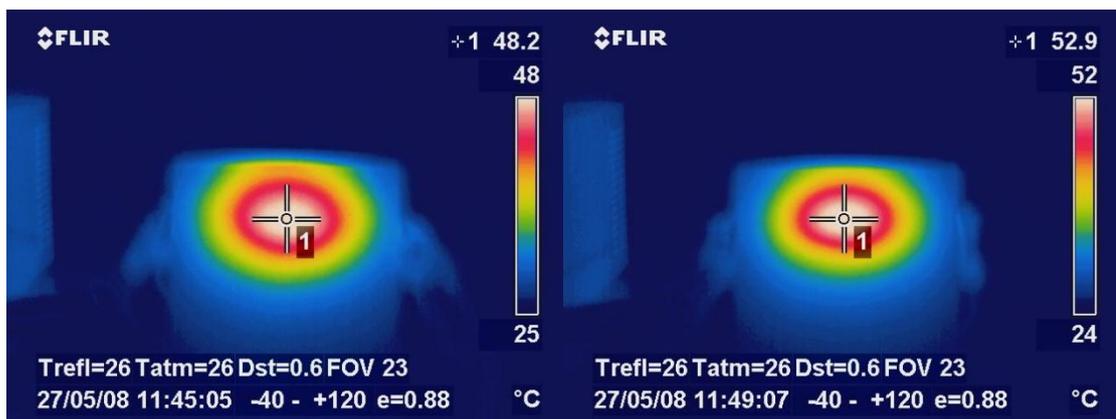
observação direta, estão nas temperaturas registradas, seja nas escalas, seja nos elementos medidores de ponto. Confirmando o previsto pela teoria as temperaturas variam conforme a variação da tensão imposta nos terminais do resistor.

Foi realizada uma comparação qualitativa das imagens (Figura 4.16) feitas para superfícies onde as profundidades em que os resistores foram colocados são diferentes, 1,5 e 2 cm. Novamente pela observação direta pode-se notar que as imagens são muito semelhantes e que não é possível perceber nenhuma grande diferença apenas na geometria da superfície da amostra, exceto pela pequena inclinação do eixo da elipse das temperaturas mais elevadas, devido ao deslocamento para baixo de um dos lados do resistor.



IR_3725(1,5 cm)

IR_3726(2 cm)



IR_3919(1,5 cm)

IR_3920(2 cm)

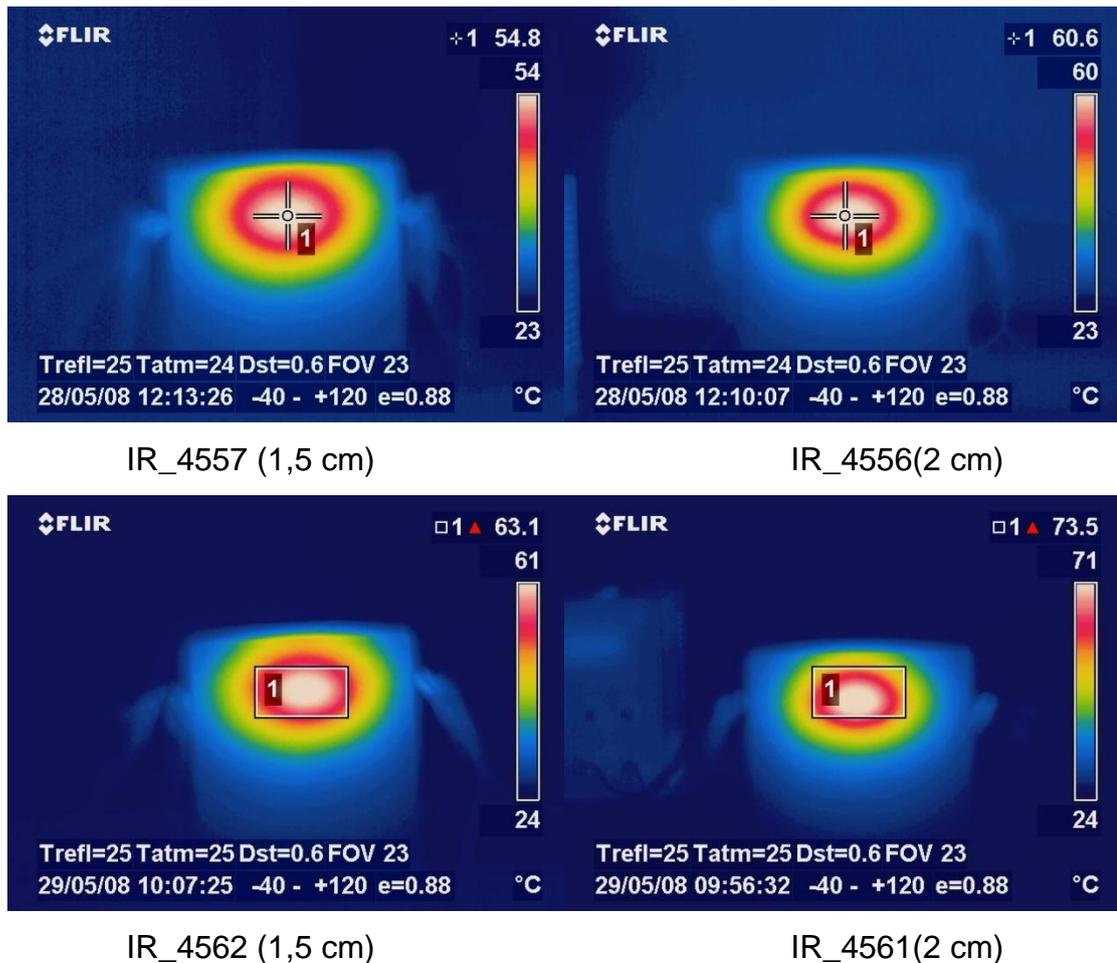
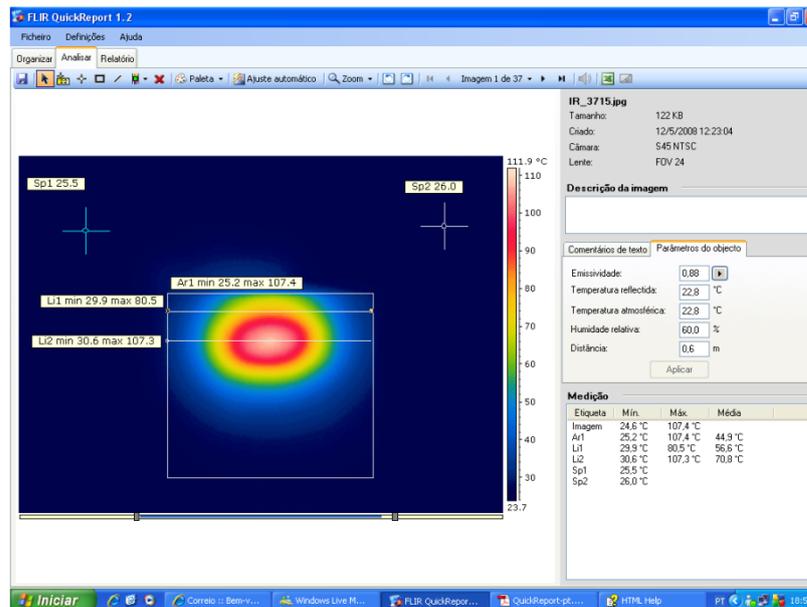


Figura 4.16 Comparação de termogramas de superfícies onde a profundidades dos resistores são diferentes (Datação nos termogramas)

As únicas diferenças que podem ser notada, por observação direta, estão nas temperaturas registradas, seja nas escalas, seja nos elementos medidores de ponto ou de área. As temperaturas variam bastante como previsto na teoria de propagação de calor. Um estudo detalhado poderá ser realizado utilizando os programas apresentados anteriormente para comparar geometricamente todos os níveis de temperaturas das imagens e das simulações numéricas.

(2) Processamento preliminar, alterações foram aplicadas nas imagens termiais utilizando o aplicativo QuickReport 1.2 da FLIR (Figura 4.17). Com a utilização das diversas paletas disponíveis foram geradas imagens específicas com as mesmas temperaturas; e também foi gerada uma planilha em Excel das temperaturas medidas em cada microbolômetro específico. Este processamento foi realizado seguindo as etapas enumeradas abaixo:



(a) (b)

Figura 4.17 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2 (Realizada em 17/03/09 18:54 h).

Etapa 1. Modificação das imagens utilizando as paletas disponíveis no menu palette (Figura 4.18), esta etapa não modifica o registro das temperaturas, simplesmente modifica as cores utilizadas para representar as temperaturas da mesma. Ou seja, ela mexe no plano RGB da mesma.

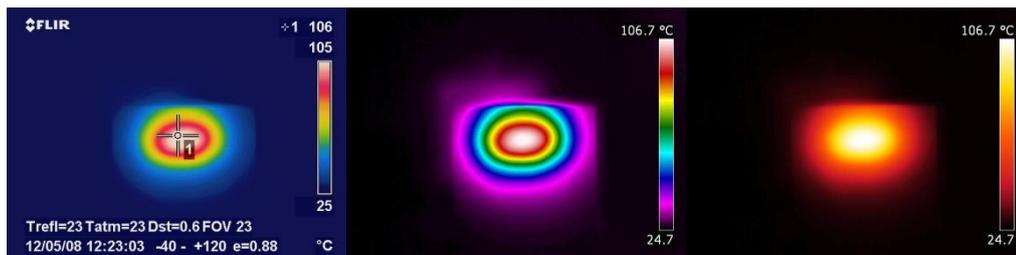


Figura 4.18 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2 (Realizadas em 29/06/09 entre 22:04 – 22:06 h).

Etapa 2. Ajuste na faixa de exibição dos limites inferior e superior das temperaturas da imagem. Este ajuste permite que toda a faixa de temperatura captada pela Câmera S45/FLIR, seja observada dentro da escala de cores que está sendo utilizada. Este procedimento também serve para gerar diversas binarizações da imagem (Figura 4.19 a / b). O aplicativo também pode ser utilizado para filtragens (Figura 4.19 c), mas foram utilizadas as rotinas do MATLAB.

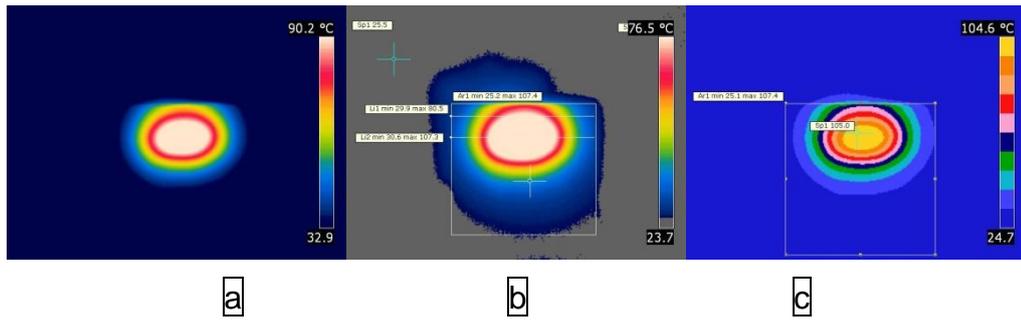


Figura 4.19 (a) e (b) Binarizações. (c) filtragem geradas pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2 (Realizadas em 12/03/09 entre 10:55 e 10:58).

Etapa 3. Geração da planilha Excel contendo a matriz (320 X 240) com as temperaturas registradas por cada microbolômetro (Figura 4.20). Esta matriz após ajustes no formato das células foi importada para o MATLAB para o processamento das temperaturas na ROI (Região de Interesse).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	24,85	24,96	24,94	24,94	24,93	24,85	25,17	24,85	24,81	24,85	24,87	25,08	24,85	24,94	25,04	25,15	25	24,95	25,08
2	24,91	25,05	25,06	24,95	24,67	25,05	24,86	24,9	25,03	24,84	24,9	24,98	25,03	24,88	25,15	25,03	24,89	25,03	24,85
3	24,87	25,1	25,05	24,96	24,76	24,72	24,99	25,03	24,95	25,06	24,88	25,16	24,85	24,89	25,08	24,94	24,98	24,76	24,96
4	25	25,01	24,88	24,87	24,99	24,99	24,87	24,91	25,03	24,93	24,89	25,03	24,89	25	25	25,18	25,08	24,85	24,91
5	24,8	25,04	24,97	25,08	24,7	24,95	24,98	25,02	25,02	24,99	24,9	25,11	24,84	24,89	25,24	24,99	24,95	25,08	25,09
6	24,84	24,94	24,94	24,98	24,99	24,9	25,08	24,84	25,09	24,98	25,03	24,97	24,97	24,85	25,11	25,14	25,07	25,14	25,08
7	24,95	24,75	24,92	25,08	24,95	24,99	24,71	24,95	24,96	24,85	25,11	24,89	24,75	24,94	25,01	25,18	24,97	25,09	25,19
8	24,86	24,92	24,95	24,85	24,95	24,77	25,03	25,05	25,11	24,65	25,07	25,08	25,06	25,16	25,3	25,08	25,06	25,04	25,06
9	24,97	25,08	24,91	24,95	24,94	25,03	25,1	25,16	24,95	25,05	25,12	25,17	24,84	24,8	24,75	24,94	25,07	25,01	24,89
10	24,91	25,26	25,14	25,13	25,04	25,08	25,18	24,93	25,02	25,08	25	24,86	24,92	25,06	25,08	24,99	25,23	24,75	24,85
11	24,8	25,06	24,86	25,04	24,85	25,01	24,89	25,03	25,02	24,97	24,94	24,94	24,76	25,14	24,98	25,12	24,75	25,01	24,89
12	24,88	24,98	25	24,89	25,04	25,03	25,07	25,03	24,89	25,2	24,92	25,08	25,02	25,04	24,94	24,96	25,15	25,17	25,17
13	24,8	24,86	25,1	25,1	24,97	24,94	24,96	24,92	25,05	25,09	24,97	25,08	24,99	25,06	24,99	25,18	25,04	25,1	25,03
14	25	25,05	25,24	24,96	24,8	25,01	25,02	25,03	25,1	25,09	24,95	24,94	24,87	24,8	24,94	24,98	24,95	25,12	25,04
15	24,99	25,21	24,94	25,23	24,97	25,06	25,08	25,08	24,91	24,95	25,06	24,82	25,03	25,25	24,99	25,08	25,09	25,17	24,99
16	24,95	25,2	24,8	25,04	24,85	24,74	25,21	25,13	25,09	25,17	24,89	25,02	24,94	24,95	25,12	24,95	25,08	25,1	24,89
17	24,73	25,17	25	25,3	25	24,94	24,96	25,1	25,02	25,16	24,8	24,86	24,92	24,89	25,12	25,09	24,97	25,04	25,12
18	24,86	24,96	24,86	24,99	24,78	25,01	25,06	24,94	24,84	24,89	25,04	24,95	24,93	25,03	24,76	25,08	25,18	24,87	24,96
19	24,94	24,85	24,94	25,15	24,89	24,75	25,05	25,11	25,04	25,05	24,98	24,94	25,05	24,99	25,12	25,21	25,18	25,22	24,99
20	24,94	25,03	25,03	25,04	24,88	25,01	25,2	25,06	25,16	25,01	25,04	25,07	25,11	24,85	25,04	25,13	25,09	25,14	24,89
21	24,72	24,96	25,05	25,03	24,83	24,99	25,2	25,07	24,9	24,99	25,02	25,23	24,87	25,17	25,14	25,23	25	25,15	24,94
22	24,98	25,03	24,84	25,11	24,96	24,89	25,29	24,99	24,97	25,08	25,06	25,07	24,78	25,04	24,99	25,18	25,12	25,21	25,08
23	24,75	24,99	25,08	25,01	25,02	24,8	24,96	25,29	25,17	25,12	25,09	25,19	24,99	25,15	24,94	25,03	25,03	24,99	25,31
24	24,91	24,89	25,17	25,03	24,92	24,93	25,06	25,11	25,13	24,92	24,79	25,04	24,99	25,03	25,08	24,92	24,87	25,08	24,98
25	25,02	24,98	25,17	25,06	24,89	24,86	25,05	25,1	25,08	24,85	25,08	25,08	24,98	25,01	25,22	25,36	24,98	25,19	24,94
26	25,05	24,85	25,12	24,82	25,02	24,98	24,99	24,94	25,15	25,03	25,16	24,99	24,94	25,08	25,26	24,99	25,28	25,01	25,01
27	24,94	25,12	25,15	25,05	25,01	24,99	25,21	25,18	25,31	25,04	25,14	25,16	24,99	25,01	25,17	25,09	25,3	25,05	24,99
28	24,76	25,03	25,06	25,05	24,8	24,89	25,22	25,02	25,05	25,03	24,92	25,24	24,94	24,94	25,24	24,99	25,09	25,12	25
29	24,85	25,1	24,88	24,94	25,03	24,97	24,76	24,85	24,96	25,12	24,91	25,16	25,01	25,09	25,15	25,15	25,01	25,12	25,07
30	24,94	24,9	25,01	25,11	24,91	24,91	25,17	24,88	25,08	25,11	25,1	25,14	25,04	24,91	25,15	25,11	25,28	25,21	25,21
31	25,03	25,31	25,12	25,21	24,95	24,94	25,04	25	25,08	25,04	25,03	25,12	24,96	25,21	25,29	25,14	25,12	24,98	25
32	24,89	25,09	25,06	24,85	24,75	24,94	25,16	25,15	25,3	25,02	24,91	25,22	25,18	25,18	25,15	25,05	25,09	25,25	25,1
33	24,96	25,2	24,93	25,03	25,1	25	25,06	25,08	25,01	24,87	25,16	25,11	24,96	25,13	25,12	25,05	24,98	25,11	25,18
34	25,09	24,95	24,99	24,98	24,85	25,1	25,15	25,21	25,08	24,99	25,18	25,12	25,21	25,07	25,27	25,04	25,09	25,15	25,2
35	25,03	25,21	24,99	25,12	24,88	25,09	25,02	25,19	25,21	25,12	24,89	25,09	25,01	25,04	25,08	25,21	25,21	25,12	25,25

Figura 4.20 Matriz temperatura em MS-Excel® gerada pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2. IR_3715 (Realizada 30/06/09, 19:50 h)

(3) Análise, que através do PDI dos termogramas utilizando rotinas desenvolvidas a partir do IPT do MATLAB, sugere um método de reconhecimento do resistor e posterior determinação de pontos com temperatura máxima e mínima.

Respondendo o problema principal: Proposta é utiliza as filtragens implementadas a partir de rotinas baseadas nas funções do toolbox para determinar a ROI e conseqüentemente separar os dados de temperatura registrados pela S45/FLIR.

Aplicando a conversão para o plano de cores HSI e através da função-M `rgb2hsi.m` (adaptada do Gonzalez, Woods e Eddins, 2009 e listada no Anexo), é criada hsi que contém as imagens neste espaço de cores. A Figura 4.21 (a) abaixo mostra um dos termogramas no espaço RGB que foi convertida para o HSI, e resultaram as componentes H (Figura 4.21 b), S (Figura 4.21 -c) e I (Figura 4.21 d). Utilizando a componente intensidade (I), que em resumo é uma imagem em tons de cinza e representa as “intensidades” das cores da imagem em cada pixel.

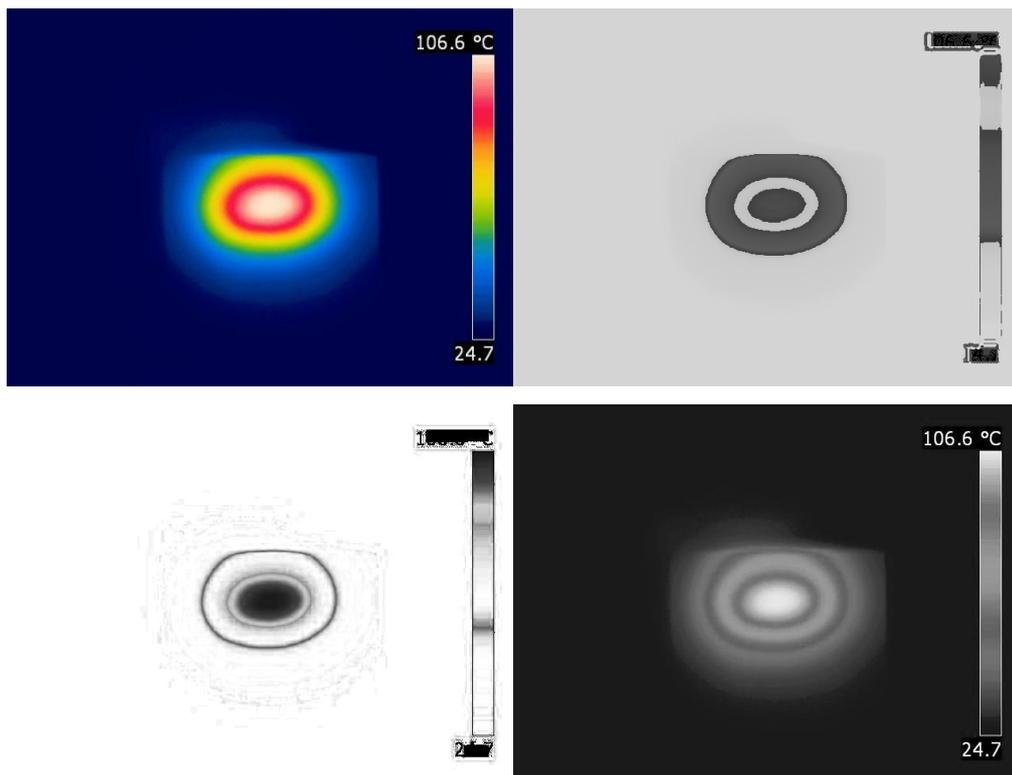


Figura 4.21 (a) Imagem IR_3715 (Realizada 12/05/08, 12:23 h). (b), (c) e (d) imagens componentes no plano HSI (Realizada 30/06/09, 19:50 h) a b
c d

Após a mudança de plano de cores de RGB para HSI, utilizando a componente I das imagens e submetendo aos diversos filtros para verificar qual deles melhor realçaria as bordas de nossa amostra. Os filtros Laplacianos apresentaram os

melhores resultados como mostrado abaixo. As funções do IPT do MATLAB utilizadas foram as apresentadas acima, ou seja,

```
w = fspecial('type', parameters)
g = imfilter(f, w, 'replicate')
```

Como foi mostrado em nosso embasamento teórico as máscaras dos filtros Laplaciano negativo mais utilizados são gerados pelos comandos abaixo:

```
>> w4 = fspecial('laplacian', 0);
```

Este comando é semelhante ao simples comando abaixo:

```
>> w4 = [0 1 0; 1 -4 1; 0 1 0];
```

A partir destas máscaras utilizando a estrutura de filtros gerados automaticamente pelo comando `imfilter`. As transformações utilizadas nos filtros necessitam de uma imagem de entrada do tipo `double`, assim foi utilizado o comando `im2double` antes destes filtros. Assim a rotina principal (no anexo 1) de filtragem teve a seguinte seqüência:

```
>> w4 = fspecial('laplacian', 0);
>> w8 = [1 1 1; 1 -8 1; 1 1 1];
>> f = im2double(f);
>> g4 = f - imfilter(f, w4, 'replicate'); % A subtração é utilizada nestes comandos
>> g8 = f - imfilter(f, w8, 'replicate'); %por causa que o Laplaciano é negativo e
                                         %portanto subtraímos o resultado da
                                         %imagem original.
```

A filtragem aplicada na componente I das imagens termiais também pode ser aplicada diretamente nas imagens em RGB coloridas pela rotina `colorgrad`, como foi implementada no capítulo 2 (Gonzalez, Woods e Eddins, 2009). Os resultados, porém, não foram satisfatórios como mostrado nos procedimentos abaixo.

Após a determinação da ROI e o reconhecimento do objeto, no caso o resistor, o problema se resume a analisar as temperaturas nesta região e determinar a temperatura máxima e mínima. Que foi realizado pelos comandos abaixo.

```
>>min = min(min(M1));  
>>max = max(max(M1));
```

4.3 Resultados

Exp1

Apesar do estudo realizado sobre o EFEITO ALETAS nesta pesquisa ter sido apenas qualitativo, ou seja, apenas a foi realizada a observação direta dos termogramas, o resultado demonstrou qualitativamente o efeito nas temperaturas superficiais da placa.

Exp2

Mesmo sendo o registro do processo de resfriamento das placas prejudicado por causa das falhas no polimento das placas, o resfriamento pode ser observado e estudos sobre o efeito de rugosidade poderá ser realizados. As diversas imagens termiais deverão ser objeto de estudo posterior.

Exp3

A rotinas do processamento das imagens termiais no MATLAB, apresentadas nos capítulos anteriores, foram implementadas no laboratório de forma simples e direta.

Como resultado da função-M `rgb2hsi.m` as componentes S's (Figura 4.22) das imagens passaram o diversos filtros implementados sempre pela funções-M (`imfilter`,

fspecial, edge, etc.) do IPT. Os resultados mais interessantes estão listados e analisados (Figura 4.22).

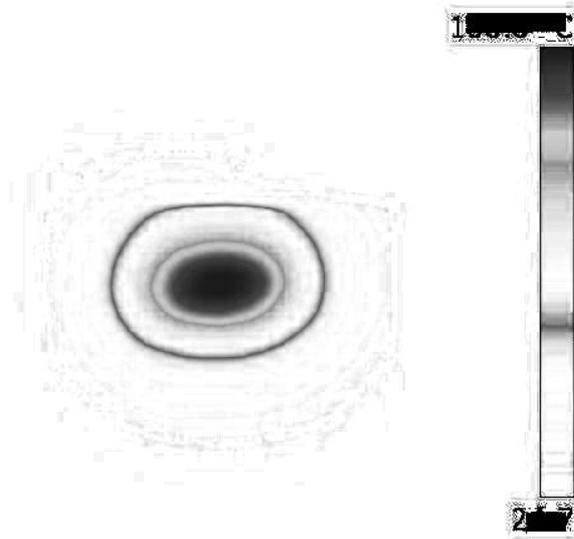


Figura 4.22 IR_3715_s(S) componente S do plano de cores HSI (Realizada 02/07/09, 00:05 h)

O primeiro filtro utilizado, como sugere a teoria adotada, foi o Laplaciano com máscara w8 criada a partir dos comandos

```
>> w8 = [1 1 1; 1 -8 1; 1 1 1];  
>> g8 = f - imfilter(f, w8, 'replicate');
```

gerando a imagem intermediária apresentada na Figura 4.23 (a). Posteriormente, esta imagem foi submetida novamente a este mesmo filtro e passou pelo detector de borda através da função edge com o detector de borda sobel com diversos fatores de limiar (threshold).

```
g = edge(g8, 'sobel', T);
```

Relembrando o detector de borda Sobel usa as seguintes máscaras, como apresentado no Capítulo 3:

z1	z2	z3
z4	z5	z6
z7	z8	z9

Vizinhança da imagem

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

$$Gx = (z7 + 2z8 + z9) - (z1 + 2z2 + z3)$$

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

$$Gx = (z3 + 2z6 + z9) - (z1 + 2z4 + z7)$$

Assim foram geradas as seguintes imagens intermediárias através da função edge, detector de borda sobel, fatores de limiar 0,03 (Figura 4.23 (b)) e 0,01 (Figura 4.23(c)).

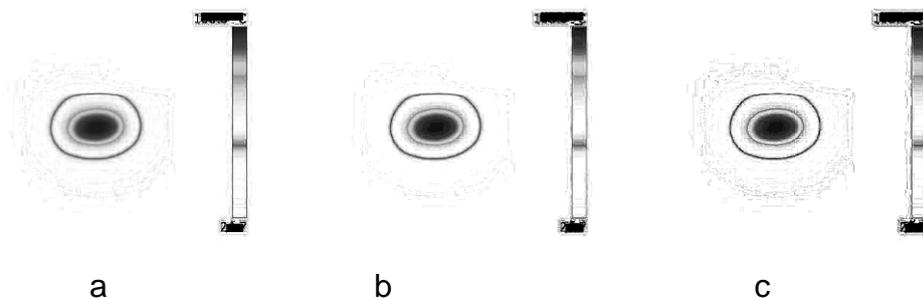


Figura 4.23 (a)IR_3715_s(f). (b)IR_3715_s(g4). (c)IR_3715_s(g8).

O mesmo roteiro do capítulo 3 poderia ser seguido, ou seja, a utilização da função edge, detector de borda sobel, com diversos fatores, mas este procedimento já não é necessário pois a ROI já está facilmente determinada.

A máscara gerada a partir da binarização da ROI é utilizada através de uma simples multiplicação com a matriz temperatura, gerada pelo software Quick Reporte, para determinar as temperaturas de interesse.

A matriz com as temperaturas (dim: 320 X 240) de cada microbolômetros gerada pelo Quick Report e importada para uma planilha Excel. Esta matriz após ajustes no formato das células foi importada para o MATLAB para o processamento das temperaturas na ROI (Região de Interesse). Este processamento utiliza a binarização para zerar as temperaturas fora da ROI, preservando as temperaturas de interesse. Esta matriz apresenta o formato característico da amostra, como pode ser visualizado nas Figuras 3.24 e 3.25.

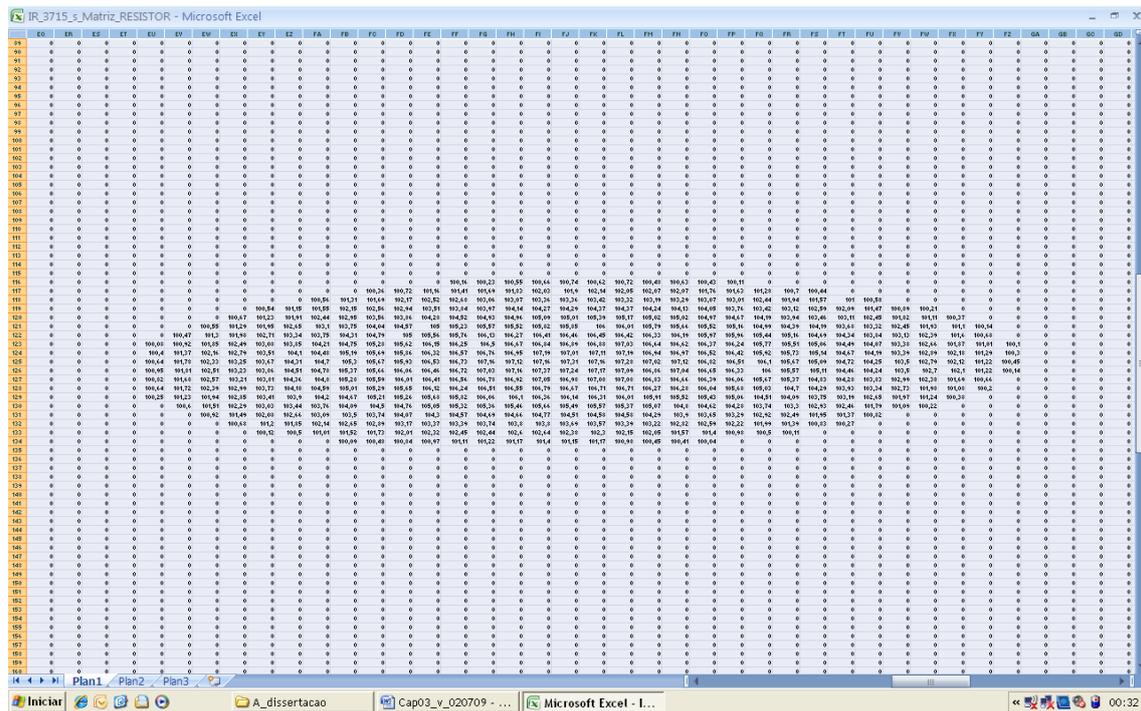


Figura 4.24 Tela do Excel destacando o formato do objeto (resistor). Arquivo: IR_3715_s_Matriz_RESISTOR.xls(Realizado 02/07/09, 00:28 h)

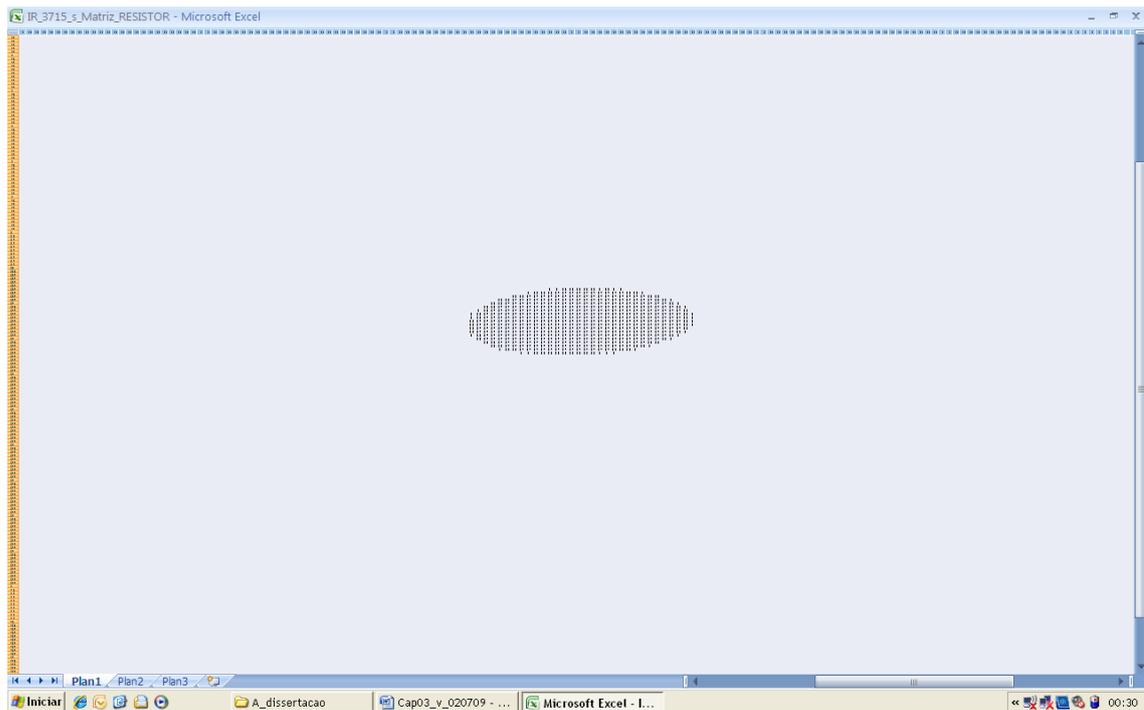


Figura 4.25 Telas do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador).

Imagem IR_3715_s_Excel (Realizada 30/06/09, 12:23 h)

A análise desta matriz por uma rotina simples determina a temperatura máxima e mínima através dos comandos abaixo. Esta rotina gera os valores na área de trabalho (WorkSpace) mostrado na Figura 4.26.

```
max = max(max(M1));
```

```
min = min(min(M1));
```

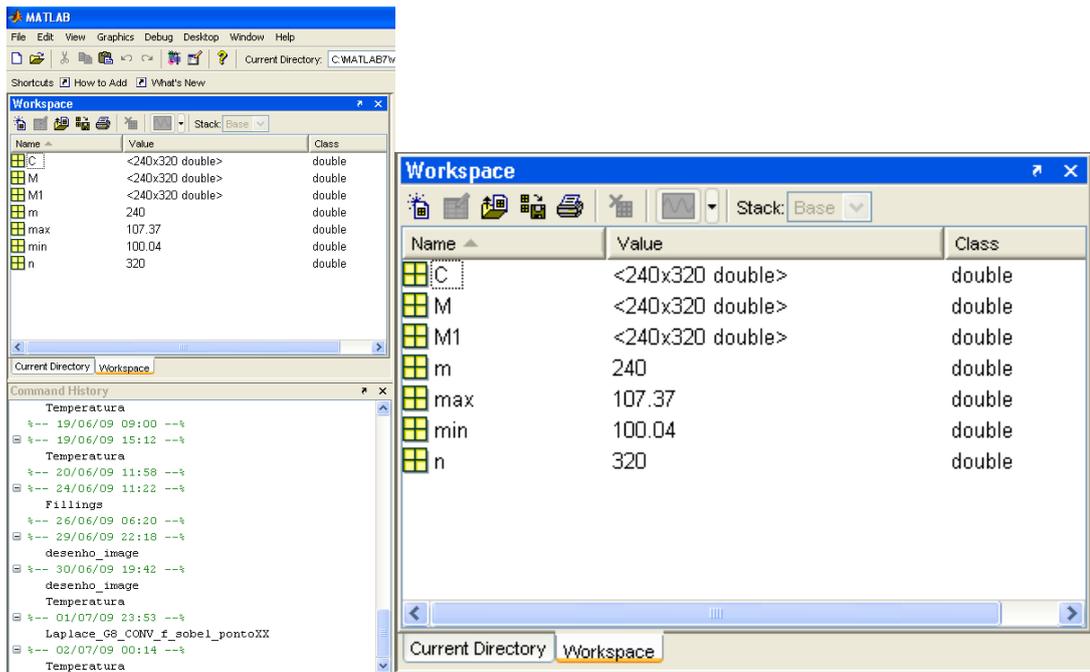


Figura 4.26 Área de trabalho do MATLAB com a temperatura Máxima e Mínima Imagem IR_3715 (Realizada 30/06/09, 19:50 h)

4.4 Discussão

Os resultados qualitativos apresentados na experiência Exp1, sobre o efeito aleta, foram satisfatórios apesar da simplicidade da mesma. O estudo do resfriamento em conjunto com este efeito propriamente dito, pode ser analisado com a comparação dos modelos matemáticos já dominados.

Na experiência Exp2, sobre a distribuição de temperatura superficial da amostra durante o resfriamento, prejudicada por causa das rugosidades na superfície das amostras, mesmo assim a base de dados poderá ser objeto de estudo mais complexo de comparação com simulações com modelo matemático adaptado ao tipo de rugosidade.

Diante dos resultados apresentados pela experiência Exp3, a discussão sobre como pode-se aprofundar mais esta pesquisa.

4.5 Conclusão

O imageamento termal disponibiliza termogramas de superfícies. As experiências demonstram que as informações de temperatura dos termogramas também podem ser usadas em análises quantitativas, mesmo com a relativa baixa precisão das câmeras térmicas. As grandezas e os parâmetros do objeto estudado através da teoria do infravermelho permitem a aquisição de dados bem próxima da realidade e uma manipulação dos resultados obtidos com maior precisão. As experiências mostraram que de uma simples visualização de fenômenos básicos até a determinação de parâmetros termofísicos e geométricos podem ser feitos através das aplicações com o imageamento termal.

A pesar da simplicidade e do uso restrito das ferramentas de PDI, os resultados alcançados nestas experiências foram satisfatórios e atingiram os objetivos das mesmas, que eram qualitativos para as Exp1 e Exp2; e quantitativos para a Exp3, com reconhecimento automático das formas geométricas do resistor incluso. Nesta última o processamento matemático proposto foi realizado de forma satisfatória.

Foram realizados termogramas de amostras com o resistor incluso em profundidades diferentes, mas o estudo foi apenas qualitativo. Pois a semelhança geométrica dos termogramas na experiência Exp3, os processamentos analíticos foram realizados apenas utilizando um termograma, a IR_3715.

Muitas das ferramentas de PDI deixaram ser utilizadas por causa da limitação do prazo, portanto fazem parte de nossa recomendação para um estudo posterior.

Um banco de imagens foi criado e está sobre a guarda do DECART e uma cópia com o GET, ambos da UFPE.

5. EXPERIMENTOS COM IMAGENS TERMAIS DE UM ISOLADOR ADQUIRIDAS EM CAMPO

5.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo específico apresentar um método de análise das imagens termiais adquiridas em campo de uma amostra (isolador polimérico energizado) instalada em torre de linha de transmissão de alta-tensão de uma geradora de energia elétrica para contribuir na possível previsão de falhas em componentes da mesma através da caracterização de modificações nas propriedades termofísicas destes componentes. O método divide-se em três partes: (a) aquisição de dados, que consiste na gravação de imagens termiais da amostra, durante o amanhecer no período das 04:22 h às 07:05 h no dia do ensaio (10/12/2008) porque neste horário é possível verificar o aumento da temperatura do ambiente devido ao sol. (b) processamento intermediário, onde as imagens termiais são alteradas utilizando o aplicativo Quick_Report 1.2 da FLIR, que disponibiliza diversas paletas de cores para a geração de imagens diferenciadas com as mesmas temperaturas; e também gerando a matriz (planilha Excel) das temperaturas medidas em cada microbolômetro; (c) análise, que através do Processamento Digital Imagens utilizando rotinas desenvolvidas a partir do Image Processing Toolbox (que será citado como IPT ou Toolbox) disponível na biblioteca do software MATLAB 7.5, (versão 14 da The MathWorks, Inc) sugere um método de reconhecimento do isolador e posterior determinação de pontos com temperatura máxima e mínima. Neste experimento também foi feito o levantamento de curvas de evolução de temperatura em campo.

5.2 Aspectos Específicos

O comportamento térmico de um objeto, durante o seu resfriamento ou aquecimento, depende da sua geometria, do seu material interno, da sua superfície e das condições às quais esse objeto é exposto. A combinação de todas essas

condições condiciona a transferência de calor, que por sua vez condiciona a distribuição de temperatura no objeto. Uma apresentação clássica dos fenômenos de transferência de calor pode ser encontrada em Incropera (1990). Rohsenow et al. (1998) apresentam um grande compêndio de resultados da área de transferência de calor.

A evolução da distribuição da temperatura no interior do objeto é estudada pela Condução de Calor - que estuda a transferência de calor em objetos sólidos -, tendo como propriedades relevantes a condutividade térmica e a capacidade térmica (massa específica multiplicada pelo calor específico). A condutividade térmica influencia a facilidade com que uma perturbação de temperatura é propagada pelo meio. Já a capacidade térmica relaciona a variação de temperatura em função de uma variação de energia. Ozisik (1993) apresenta uma visão geral da Condução do Calor. Carslaw and Jaeger (1986) apresentam várias soluções analíticas. Maliska (2004) e Tannehill et al. (1997) focam o seu trabalho nas soluções computacionais.

Além das propriedades internas do objeto, a evolução da temperatura depende também das condições externas: vento, chuva, radiação solar etc. Essas interações são separadas em duas grandes áreas do conhecimento: Convecção e Radiação Térmica. Como exemplo, Macedo et al. (2006) apresentam um estudo sobre a influência de alguns destes parâmetros no equilíbrio térmico de um termômetro de globo.

A Convecção estuda a transferência de calor em fluidos. No caso deste projeto, como o interesse está na transferência de calor na interface sólido-fluido, a propriedade de interesse é o coeficiente de transferência de calor por convecção, que por sua vez é função da geometria, rugosidade, distribuição da temperatura, do fluido e do tipo de escoamento. A teoria da Convecção é bem apresentada por Bejan (1994), enquanto Maliska (2004) introduz o uso do Método dos Volumes Finitos para a solução computacional de problemas de Convecção de Calor.

A Radiação Térmica estuda a transferência de calor por meio de radiação térmica entre duas superfícies, podendo haver ou não um meio participante entre elas. Existem vários textos clássicos de radiação, dentre os quais se destacam Siegel e Howell (2001) & Modest (2003). Ao lado da geometria, a propriedade de maior interesse neste caso é a emissividade, que compara o comportamento real de um material em relação à previsão teórica de um corpo negro. Esta propriedade é função da temperatura, do comprimento de onda, do ângulo e da condição

superficial do material. Um caso bastante importante de radiação térmica é a energia solar. Duffie & Beckman (2006) escrevem o texto clássico desta área, tanto do ponto de vista teórico quanto de engenharia. Viana et al. (2006) apresentam um estudo do uso de luxímetro para a estimativa da radiação solar. Dois sites são interessantes nesta área: Clima Tempo (2008) para a previsão do clima no local do experimento, que influencia a atenuação da radiação solar extraterrestre e Solar Position Calculator (2008) para o cálculo rápido da geometria solar.

As mudanças internas de temperatura em um objeto influenciam alterações de temperatura na sua superfície, que por sua vez influenciam a emissão de radiação de infravermelho, que por sua vez pode ser atenuada ou amplificada por um meio participante, que pode ser detectada por uma câmera de infravermelho juntamente com a radiação refletida pelo objeto. Portanto, é preciso mesclar duas áreas do conhecimento: (a) análise termográfica, que leva em conta todos os fenômenos desde a emissão/reflexão até o processamento da imagem e (b) o uso de métodos inversos para detectar modificações em parâmetros a partir da sua influência nas imagens termográficas. As técnicas de problemas inversos ou de estimativa de parâmetros podem ser vistas em Beck et al. (1985), Taler & Duda (2006) e Ozisik & Orlande (2000). Magnani e da Silva (2007), da Silva & Magnani (2006) e da Silva et al. (2006) apresentam esses métodos inversos no caso específico do uso da termografia.

Existem vários textos especializados na detecção da radiação por infravermelho: Hudson (1969), Dereniak e Boreman (1996) e Maldague (2001). A contraposição dos textos de Hudson (1969), escrito no momento em que a termografia começava a ser usada na área civil e de Maldague (2001), com aplicações atuais, expõe claramente a evolução desta área nos últimos 40 anos. Sobre questões práticas da realização da termografia, além de Maldague (2001), têm-se também Holst (2000) e Kaplan (1999). Uma série de trabalhos pode ser citada sobre o uso da termografia: Magnani et al. (2005), da Silva et al. (2006), Castelletti et al. (2006), Almeida et al. (2006) e Araújo et al. (2006). Uma boa introdução da interação entre radiação e matéria pode ser encontrada em Kotlarchyk (2002) e Hyperphysics (2008).

Holman (2000) discute várias questões experimentais, como lidar com erros e calibrações. Bezerra et al. (2006) apresentam uma calibração específica de câmera de infravermelho S45/FLIR, bem como a influência de parâmetros externos na

medição da temperatura. Finalmente, Pansini (2005) apresenta um texto introdutório sobre linhas de transmissão bastante útil para usuário não especializado nesta área.

5.3 Procedimento Experimental e Processamento Digital das Imagens Termiais

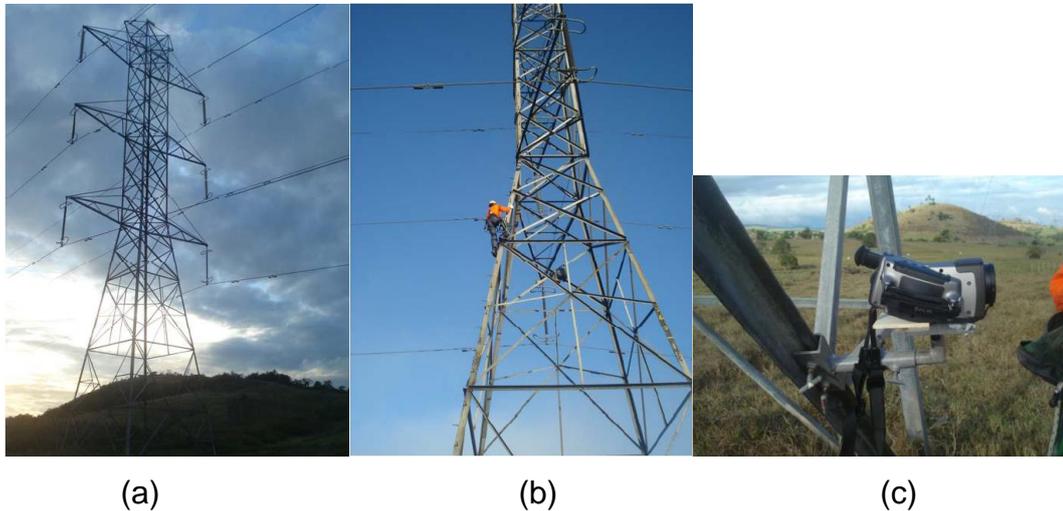
Por tratar-se de desenvolvimento de metodologia em campo, foram necessárias várias reuniões preliminares entre o grupo de colaboradores da UFPE e a concessionária. No início da execução das medições houve a necessidade de detalhar as atividades que seriam realizadas, propor algumas modificações técnicas no intuito de melhorar os resultados e sanar algumas contradições no roteiro do processo.

Antes da realização do ensaio em si, foram previstas três etapas de preparação: i) visita a diversos tipos de torres de alta tensão para visualizar os ensaios e projetar a fixação da câmara na torre, ii) teste em campo, próximo a Recife, para verificar a influência do campo eletromagnético, treinamento da equipe e logística de fixação e iii) teste no próprio local do ensaio definitivo, para testar a logística de transporte e fixação da câmara na torre.

No local da torre (latitude 8° 24' sul geográfico e longitude 35° 21' oeste geográfico) no dia do ensaio (10/12/2008), o azimute do sol no horário do nascimento foi de 113° (magnético). O horário político local do nascimento do sol seria aproximadamente 04:57 h e do início da alvorada aproximadamente às 04:26 h. Esses valores são apenas referência para a escolha do horário de início do ensaio.

Calibração da câmera de infravermelho: A câmera foi instalada em frente ao calibrador de infravermelho (precisão 0,2 °C), sendo realizados 3 ensaios entre as temperaturas de -15 °C e +120 °C. A curva de calibração obtida foi $T_{real} = 1,09 * T_{medida} - 4,37$, com as temperaturas expressas em °C. Também foram comparadas as temperaturas do logger com um termômetro de vidro calibrado (precisão 0,1°C), ambos imersos em um copo de água, sendo realizados 3 ensaios entre 5 °C e 40 °C. Não houve diferença entre as duas medições.

Como amostra utilizada nestes experimentos foi escolhida o isolador da linha inferior do lado norte (Figura 5.1 (a)). No dia anterior foi ensaiado todo o procedimento, desde a fixação até a operação da câmera (Figura 5.1 (b)). Em relação à fixação, o suporte (Figura 5.1 (c)) mostrou-se bem fácil de operar.



(a) Torre. (b) Instalação. (c) Suporte da câmera.
Figura 5.1 (a) Torre. (b) Instalação. (c) Suporte da câmera.

Para a realização dos termogramas o suporte de metal da câmera foi devidamente nivelado para garantir o sistema de coordenadas do instrumento, conforme recomendações de capítulo anterior.



Figura 5.2 (a) Torre. (b) Instalação. (c) Suporte de metal da câmera.

Para a realização das medições termográficas alguns cuidados foram tomados como: (a) ajustar a câmera de infravermelho (seleção da faixa de temperatura em que serão feitas as medições, onde para o caso dos experimentos apresentados foi de 0 a 120 °C; programação da gravação periódica de imagens com intervalo de tempo de 10 segundos entre uma imagem e outra; e, posicionamento correto da

câmera); (c) iniciar medições 04:22 h; e (d) finalizar medições 07:05 h. Abaixo (Figura 5.3) a fotografia da parte ensaiada do isolador.



Figura 5.3 Vista do Isolador imageado

O controle ambiental e calibração dos instrumentos, e as luminosidade e temperatura do ar foram registrados a 50 cm do chão. O ideal teria sido instalar uma estação climática próximo ao isolador, com medições de radiação solar, temperatura, velocidade do vento e temperatura, mas essas medições estão fora do escopo desta dissertação, como segue:

- Gerador de radiação em infravermelho Omega BB701

Objetivo: Calibração da câmera de infravermelho.

Informações principais: faixa de temperatura - 15°C a + 150°C, emissividade

0.9. Figura 5.4 (ilustrativa).



Figura 5.4 (a) Instrumentos auxiliar de campo da esquerda para a direita: Logger HH84, Luxímetro – Fabricante Instrutherm – Modelo LDR-208,

Termohigroanemometro HHF7-P2 e (b) Gerador de radiação em infravermelho
Fabricante Omega – Modelo BB701

-Luxímetro –Instrutherm – Modelo LDR-208

Objetivo: Estimativa da radiação solar. Figura 5.4 (ilustrativa).

- Logger de temperatura Omega HH84 com termopar de superfície

Objetivo: Determinação da temperatura ambiental e superficial dos isoladores nos experimentos para determinação da emissividade e registro da temperatura do ar durante todos os experimentos.

Informações principais: aceita todos os tipos de termopares. Faixa de temperatura depende do termopar e sonda utilizados. Figura 5.4 (ilustrativa).

- Termohigroanemometro Omega HHF7-P2

Objetivo: Determinação da temperatura e umidade relativas do ar.

Informações principais: medição de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar. Anemômetro de 1 in. Figura 5.4 (ilustrativa).

Calibração da câmera de infravermelho. A câmera foi instalada em frente ao calibrador de infravermelho (precisão 0,2 °C), sendo realizados 3 ensaios entre as temperaturas de -15 °C e +120 °C. A curva de calibração obtida foi $T_{real} = 1,09 * T_{medida} - 4,37$, com as temperaturas expressas em °C.

Calibração do conjunto logger e termopar. Foram comparadas as temperaturas do logger com um termômetro de vidro calibrado (precisão 0,1°C), ambos imersos em um corpo de água, sendo realizados 3 ensaios entre 5 °C e 40 °C. Não houve diferença entre as duas medições.

Geração dos Termogramas e Matriz Temperatura

(1) Aquisição de dados, após o posicionamento, foi realizada através do imageamento pela câmera S45/FLIR, permitindo avaliar a distribuição de temperatura da superfície medida e analisar como se comportaria a distribuição

durante este período. Nesses termogramas (Figura 5.5), as cores azul e roxa representam temperaturas relativamente baixas, as cores amarela e branca representam temperaturas relativamente altas, e a cor vermelha indica temperaturas intermediárias. Todos os registros fotográficos e de imageamento foram realizados no dia 10/12/2008.

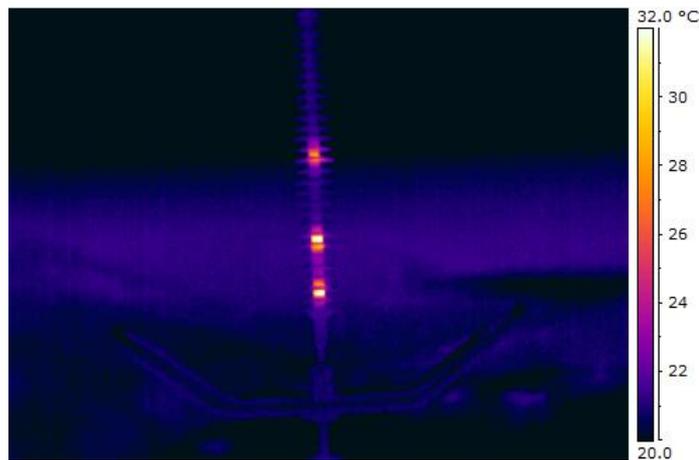
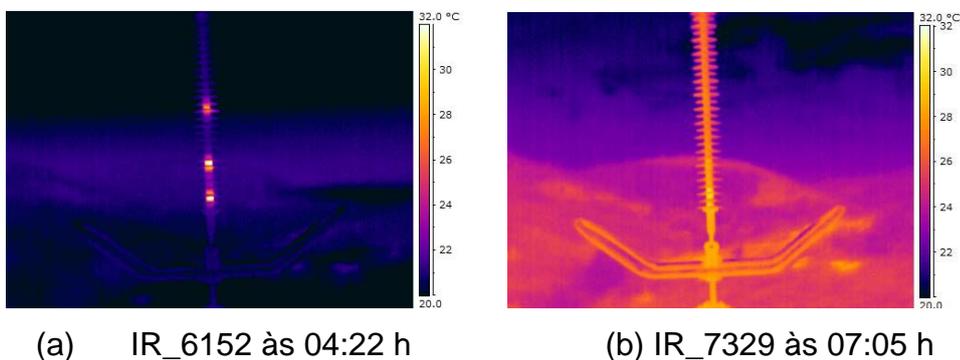


Figura 5.5 Termografias da amostra (IR_6152 às 04:22 h)

Os termogramas permitem analisar como se comporta a distribuição de temperatura durante o aquecimento do ambiente. Na Figura 5.6 (a) verificasse que a maioria das temperaturas de todas as superfícies da imagem está nas faixas mais baixas, já na Figura 5.6 (b) apresenta temperaturas nas faixas mais altas, caracterizando o aquecimento de todo o ambiente.



(a) IR_6152 às 04:22 h

(b) IR_7329 às 07:05 h

Figura 5.6 Termografias registrando o aquecimento atmosférico.

(2) *Processamento preliminar*, onde as imagens termais foram alteradas utilizando o aplicativo QuickReport 1.2 da FLIR (Figura 5.7), no dia 20/05/09, utilizando as diversas paletas disponíveis gerando imagens específicas com as mesmas temperaturas e também gerando uma planilha em Excel das temperaturas medidas em cada microbolômetro específico. Este processamento foi realizado para todas as termografias gravadas e apresentadas na Figura 5.8 e seguiu as etapas enumeradas abaixo:

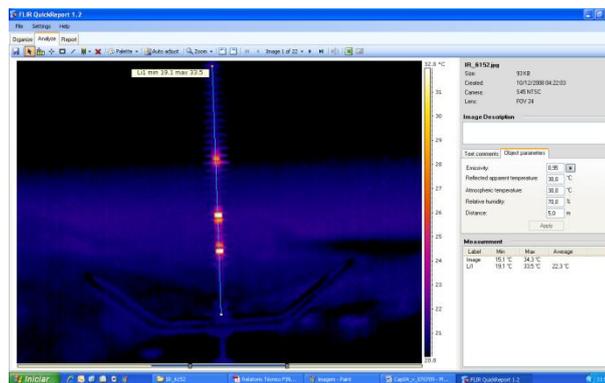


Figura 5.7 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2.

Etapa 1. Modificação das imagens utilizando as paletas disponíveis no menu palette (Figura 5.8). Esta etapa não modifica o registro das temperaturas, antes simplesmente modifica as cores utilizadas para representar as temperaturas da mesma. Ou seja, ela mexe no plano RGB da mesma.

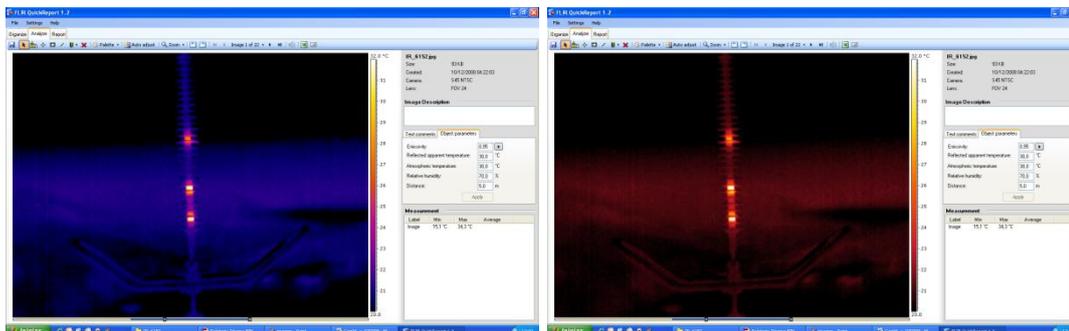


Figura 5.8 Tela do aplicativo FLIR QuickReport 1.2.

Etapa 2. Ajuste na faixa de exibição dos limites inferior e superior das temperaturas da imagem. Este ajuste permite que toda a faixa de temperatura

captada pela Câmera S45/FLIR, seja observada dentro da escala de cores que está sendo utilizada. Este procedimento também serve para gerar diversas binarizações da imagem (Figura 5.9). O aplicativo também pode ser utilizado para filtragens, mas foram utilizadas as rotinas do MATLAB.

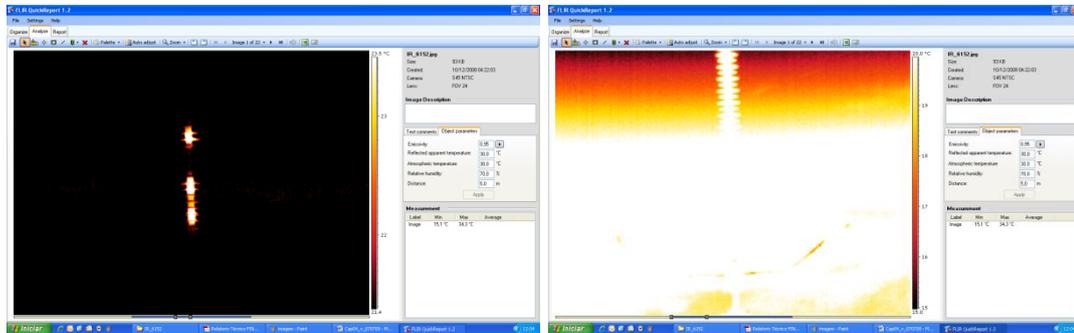


Figura 5.9 (a) e (b) Binarizações. (c) filtragem geradas pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2.

Etapa 3. Geração da planilha Excel contendo a matriz (dim: 320 X 240) com as temperaturas de cada microbolômetro (Figura 5.10). Esta matriz após ajustes no formato das células foi importada para o MATLAB para o processamento das temperaturas na ROI (Região de Interesse).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	15,38	15,18	15,31	15,2	15,41	15,43	15,52	15,41	15,22	15,27	15,47	15,16	15,3	15,29	15,29	15,44	15,2	15,26	15,45
2	15,45	15,52	15,53	15,16	15,14	15,42	15,44	15,27	15,27	15,24	15,59	15,18	15,29	15,22	15,21	15,56	15,2	15,17	15,12
3	15,53	15,46	15,52	15,38	15,45	15,34	15,43	15,2	15,39	15,33	15,66	15,51	15,45	15,31	15,47	15,21	15,26	15,49	15,26
4	15,61	15,61	15,49	15,51	15,24	15,44	15,39	15,49	15,38	15,49	15,58	15,48	15,57	15,38	15,64	15,33	15,71	15,46	15,42
5	15,73	15,44	15,62	15,49	15,59	15,54	15,65	15,69	15,44	15,53	15,45	15,61	15,54	15,52	15,49	15,45	15,55	15,47	15,5
6	15,65	15,57	15,74	15,61	15,78	15,72	15,67	15,58	15,64	15,75	15,85	15,44	15,69	15,78	15,56	15,7	15,64	15,49	15,5
7	15,92	15,58	15,54	15,63	15,8	15,69	15,59	15,76	15,36	15,75	15,82	15,7	15,67	15,49	15,78	15,45	15,72	15,63	15,56
8	15,84	15,88	15,78	15,85	15,86	15,76	15,77	15,64	15,56	15,61	15,97	15,92	15,8	15,67	15,72	15,61	15,7	15,8	15,55
9	15,9	15,99	15,79	15,95	15,82	15,95	15,8	15,73	15,95	15,72	16,1	15,88	15,95	15,68	15,78	15,87	15,7	15,84	15,73
10	16,11	16,01	15,82	15,91	15,78	15,98	15,7	15,99	15,92	15,97	15,89	15,73	15,96	15,95	15,8	15,73	15,88	15,67	15,84
11	16,11	16,2	16,04	16,01	15,78	15,83	15,95	16,07	15,86	16,05	16,1	15,96	15,99	15,88	16,22	15,89	15,89	16,02	15,94
12	16,1	16,07	16,12	16,1	16,1	15,93	16,02	15,96	15,89	16,2	16,23	15,84	16,01	16,12	16,12	15,91	15,84	15,95	15,81
13	15,92	16,1	16,05	16,11	16,01	15,99	16,2	15,83	16,14	16,23	16,02	15,88	16,13	15,89	16,1	16,12	15,96	16,12	15,97
14	16,34	16,26	16,39	16,12	16,03	16,29	16,02	16,24	16,06	16,12	16,21	16,23	16,19	15,97	16,24	16,11	16,12	16,06	15,95
15	16,16	16,12	16,14	15,98	16,24	16,23	16,23	16,07	16,23	16,14	16,25	16,13	16,12	16,18	16,31	16,06	16,19	16,15	16,12
16	16,48	16,26	16,2	16,27	16,17	16,33	15,97	16,44	16,12	16,12	16,24	16,17	16,3	16,26	16,34	16,35	16,38	16,06	16,14
17	16,39	16,03	16,29	16,13	16,3	16,2	16,43	16,45	16,31	16,44	16,54	16,33	16,22	16,06	16,45	16,39	16,37	16,34	16,19
18	16,46	16,35	16,43	16,28	16,39	16,35	16,16	16,33	16,22	16,46	16,4	16,26	16,22	16,31	16,28	16,23	16,22	16,22	16,34
19	16,56	16,34	16,39	16,48	16,51	16,66	16,24	16,33	16,45	16,56	16,49	16,47	16,54	16,21	16,59	16,51	16,27	16,35	16,26
20	16,54	16,44	16,39	16,38	16,43	16,52	16,44	16,43	16,46	16,5	16,5	16,41	16,53	16,36	16,45	16,55	16,42	16,55	16,5
21	16,77	16,5	16,7	16,72	16,49	16,7	16,51	16,6	16,6	16,58	16,48	16,58	16,63	16,47	16,72	16,58	16,52	16,61	16,64
22	16,59	16,69	16,63	16,71	16,57	16,61	16,59	16,5	16,5	16,55	16,88	16,52	16,61	16,5	16,66	16,58	16,49	16,61	16,62
23	16,65	16,66	16,58	16,61	16,63	16,69	16,76	16,71	16,68	16,87	16,74	16,58	16,85	16,67	16,74	16,56	16,74	16,45	16,71
24	16,8	16,7	16,68	16,98	16,79	16,63	16,67	16,73	16,72	16,71	16,82	16,67	16,85	16,69	16,79	16,46	16,61	16,75	16,76
25	16,9	16,69	16,68	16,77	16,93	16,86	16,87	16,55	16,71	16,75	16,89	16,74	16,87	16,74	16,83	16,71	16,77	16,77	16,64
26	16,84	16,79	16,78	16,95	16,87	16,77	16,87	16,81	16,85	16,82	16,84	16,93	16,83	16,63	16,82	16,57	16,7	16,82	16,61
27	16,91	16,88	16,77	16,95	17,08	17,16	17,1	16,95	16,89	16,95	16,96	16,75	17,03	16,81	16,85	16,91	17,03	16,89	16,87
28	16,99	16,94	17,06	17,07	17,08	16,99	17,05	16,9	16,89	17,13	16,77	16,91	17,11	16,74	17,05	17,15	16,77	16,79	16,87

Figura 5.10 Matriz temperatura em MS-Excel gerada pelo aplicativo FLIR QuickReport 1.2.

(3) Análise, que através do processamento digital das imagens termiais utilizando rotinas do desenvolvidas a partir do Toolbox (IPT) do software MATLAB, sugere um método de reconhecimento do isolador e posterior determinação de pontos com temperatura máxima e mínima.

Entre os dias 20 e 27 de maio de 2009, através de filtragens implementadas a partir de rotinas baseadas nas funções do toolbox, foram realizadas as análises das imagens. Apesar dos resultados não terem sido conseguido determinar a ROI e conseqüentemente separar os dados de temperatura registrados pela S45/FLIR, as rotinas filtraram as imagens de modo a destacar as bordas de nossa amostra.

Foi utilizado então para o plano de cores HSI e através da função-M rgb2hsi.m (adaptada do Gonzalez, Woods e Eddins, 2009 - detalhada no capítulo Anexos), é criada hsi que contém as imagens neste espaço de cores. A Figura 5.11 (a) abaixo mostra uma de nossas termografias no espaço RGB que foi convertida para o HSI, e também as componentes H (Figura 5.11- b), S (Figura 5.11 -c) e I (Figura 5.11- d). A componente intensidade (I), que em resumo é uma imagem em tons de cinza e representa as “intensidades” das cores da imagem em cada pixel, foi utilizada.

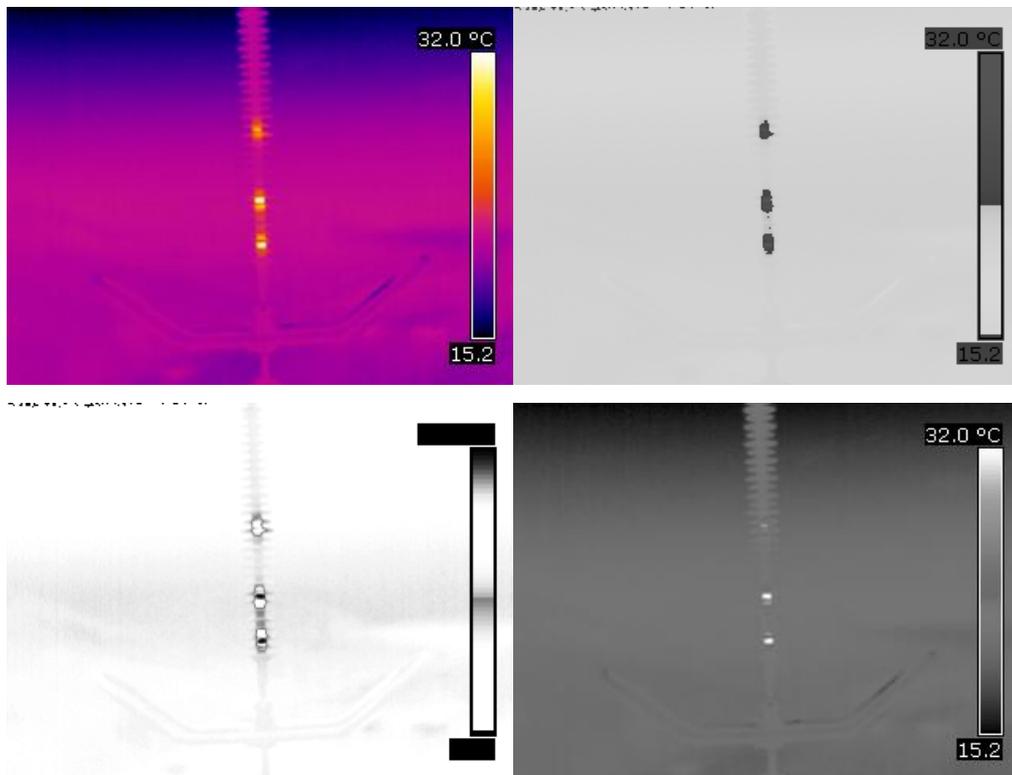


Figura 5.11 (a) Imagem IR_3961 (Realizada 28/05/08, 09:29 h). a b
c d

Após a mudança de plano de cores de RGB para HSI, a componente I da imagem e submetida aos diversos filtros para verificar qual deles melhor realçaria as bordas da amostra. Os filtros Laplacianos apresentaram os melhores resultados como mostrado abaixo. As funções do IPT do MATLAB utilizadas foram apresentadas no capítulo 2, ou seja,

```
w = fspecial('type', parameters)
g = imfilter(f, w, 'replicate')
```

Como mostrado no capítulo 2, as máscaras dos filtros Laplacianos negativos mais utilizadas são gerados pelos comandos abaixo:

```
>> w4 = fspecial('laplacian', 0);
```

Este comando é semelhante ao simples comando abaixo:

```
>> w4 = [0 1 0; 1 -4 1; 0 1 0];
```

A partir destas máscaras, a estrutura de filtros gerados automaticamente pelo comando `imfilter`. As transformações utilizadas nos filtros necessitam de um arquivo com imagem de entrada em formato `double`, assim foi utilizado o comando `im2double` antes destes filtros. Assim nossa rotina principal de filtragem teve a seguinte seqüência:

```
>> w4 = fspecial('laplacian', 0);
>> w8 = [1 1 1; 1 -8 1; 1 1 1];
>> f = im2double(f);
>> g4 = f - imfilter(f, w4, 'replicate');    % A subtração é utilizada nestes
                                             %comandos por causa
>> g8 = f - imfilter(f, w8, 'replicate');    % do Laplaciano ser negativo e por
                                             %tanto subtraímos
                                             % o resultado da imagem original f.
```

5.4 Resultados

A Figura 5.12 apresenta as termografias do isolador em vários momentos diferentes. Na legenda dessas figuras são registrados os valores medidos nos instrumentos auxiliares.

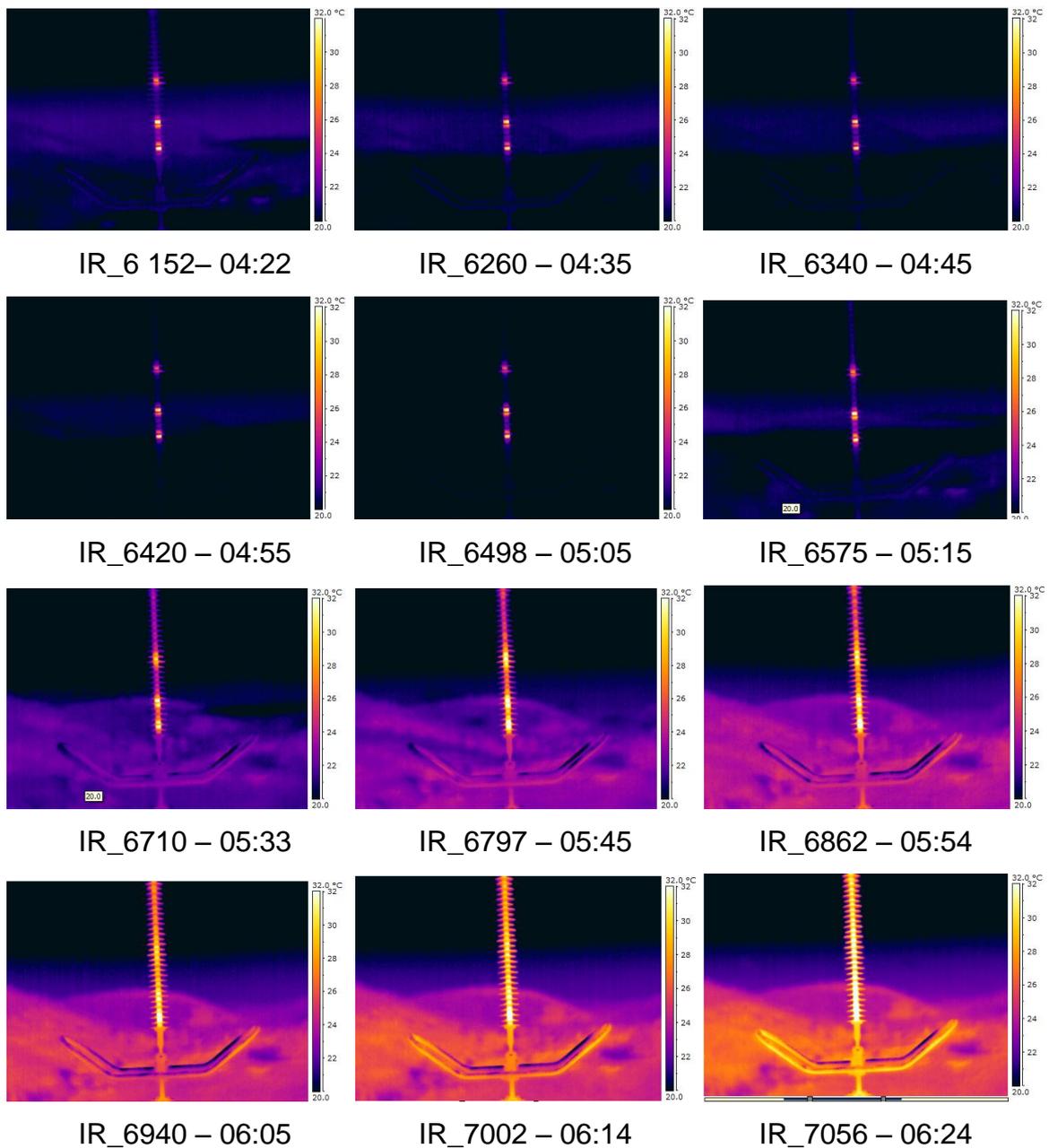
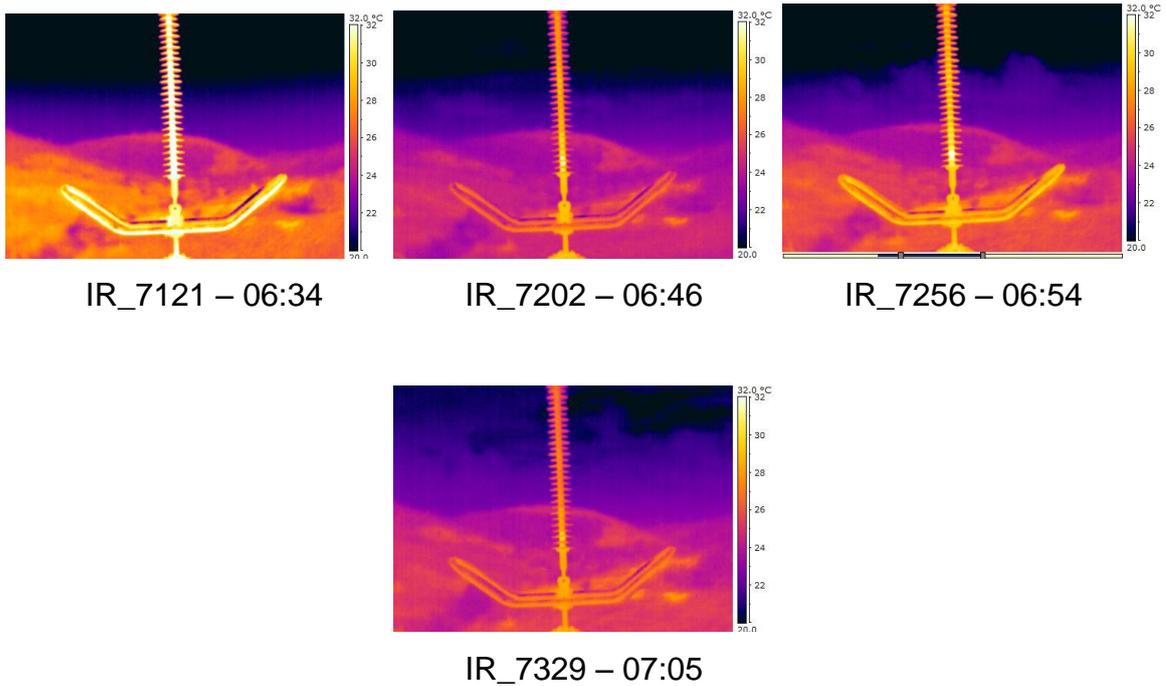


Figura 5.12 Imagens Termiais e horários dos imageamentos na experiência



Continuação da Figura 5.13 Imagens Termais e horários dos imageamentos na experiência

A Figura 5.13 apresenta um gráfico com a evolução da temperatura com o tempo. Nota-se uma queda após aproximadamente 140 minutos, causada pela diminuição da incidência solar. Essa diminuição pode ser conferida tanto na curva de iluminação da Figura 5.13, quanto com o aumento da nebulosidade durante o ensaio (conferir Figuras 5.14 a 5.16).

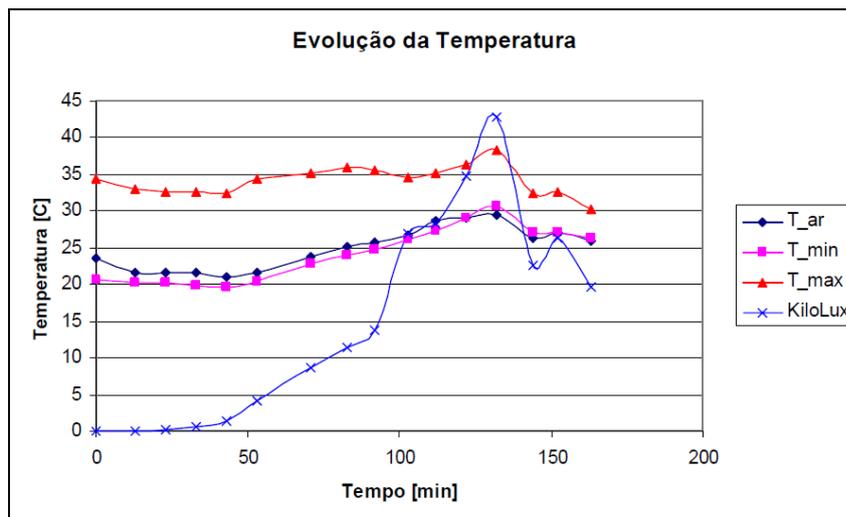


Figura 5.14 Evolução da temperatura com o tempo. Tempo 0 corresponde ao horário político local 04:22 h.



Figura 5.15 Céu às 04:29 h (Alvorada, antes do nascer do sol)



Figura 5.16 Céu às 05:15 h (próximo ao nascer do sol)



Figura 5.17 Céu às 06:41 h (Sol encoberto)

Foram visualizados pontos quentes durante o início do ensaio, mas a causa somente poderá ser determinada após a remoção do isolador para inspeção detalhada e ensaio de laboratório. Esses pontos quentes provavelmente são causados por modificações no material ou acúmulo não homogêneo de orvalho.

A rotinas do processamento das imagens termiais no MATLAB apresentadas acima foram implementadas no laboratório.

1. Como resultado da função-M `rgb2hsi.m` as componentes I e S (Figura 5.17) de nossas imagens passaram o diversos filtros implementados sempre pela funções-M (`imfilter`, `fspecial`, `edge`, etc...) do IPT. Os resultados mais interessantes estão listados e analisados e seguida.

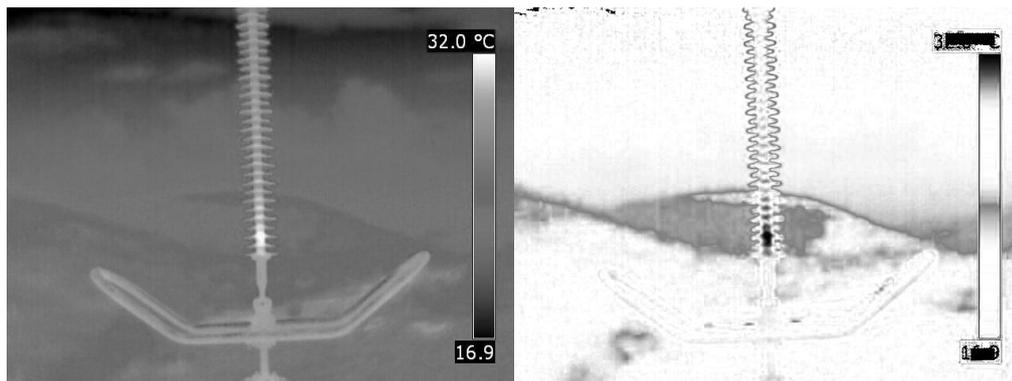


Figura 5.18 IR_7256 componente I e S do plano de cores HSI (Realizada 16/02/09, 12:12 h)

O primeiro filtro utilizado, como sugere a teoria adotada, foi o Laplaciano com máscara `w4` e `w8` criada a partir dos comandos

```
>> w4 = fspecial('laplacian', 0);  
>> g4 = f - imfilter(f, w4, 'replicate');  
>> w8 = [1 1 1; 1 -8 1; 1 1 1];  
>> g8 = f - imfilter(f, w8, 'replicate');
```

gerando a imagem intermediária apresentada na Figura 5.18 (a).

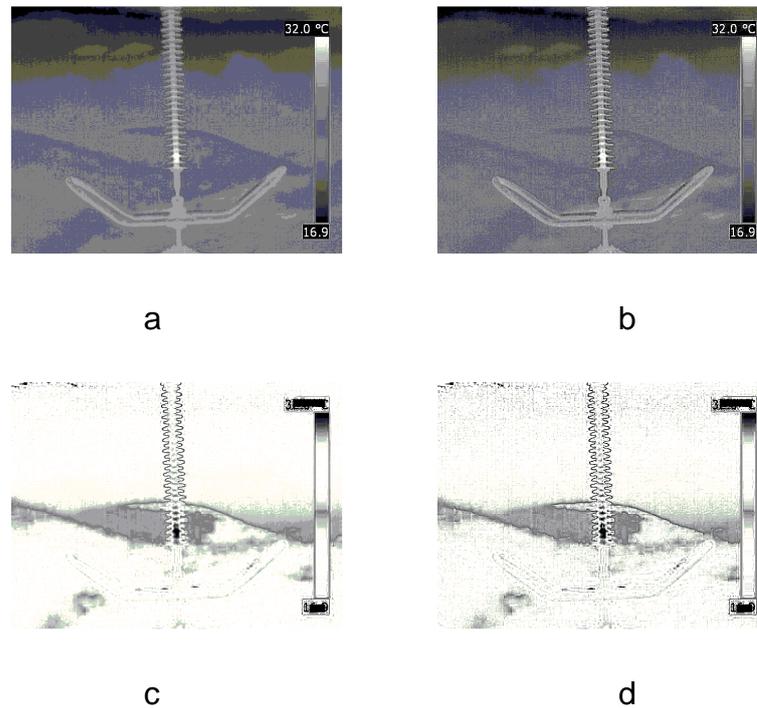


Figura 5.19 (a)IR_7256_I(g4). (b) g8. (c) IR_7256_S(g4). (d) g8

Posteriormente, esta imagem foi submetida novamente a este mesmo filtro e passou pelo detector de borda através da função `edge` com o detector de borda sobel com diversos fatores de limiar (threshold).

```
g = edge(g8, 'sobel', T);
```

O detector de borda Sobel usa as seguintes máscaras:

z1	z2	z3
z4	z5	z6
z7	z8	z9

Vizinhança da imagem

-1	-2	-1
0	0	0

1	2	1
---	---	---

$$Gx = (z7 + 2z8 + z9) - (z1 + 2z2 + z3)$$

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

$$Gx = (z3 + 2z6 + z9) - (z1 + 2z4 + z7)$$

Assim foram geradas as seguintes imagens intermediárias através da função edge, detector de borda sobel, fatores de limiar 0,04 (Figura 5.19(a)) e na componente S (Figura 5.19(b)).

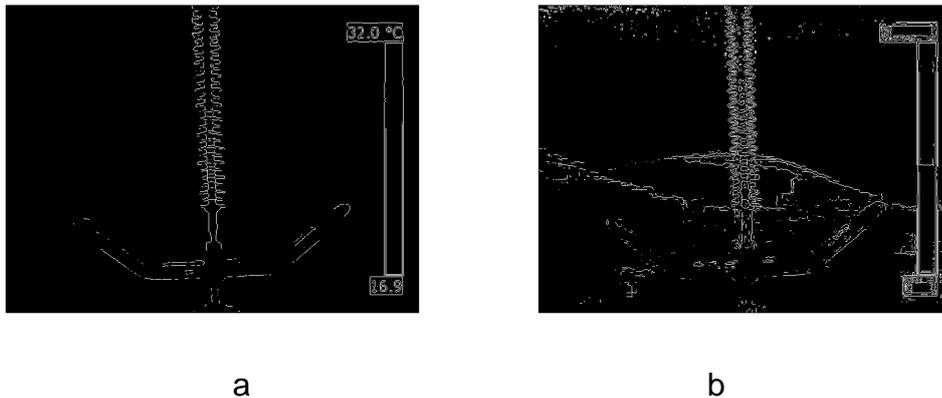


Figura 5.20 (a) IR_7256_I(g4). (b) g8. (c) IR_7256_S(g4). (b) g8

Neste estágio do processamento foi verificado que as imagens não tinham resolução suficiente para que o método fosse aplicado. Devido à relação da distância e as dimensões do objeto, que para a atual lente usada na S45/FLIR é muito grande. Este fato gerou imagens termais onde no objeto foi representado por apenas alguns pixels. A inviabilidade do uso de nosso método para determinação da ROI pode ser provada com o uso de uma binarização simples através da imagem IR_7256 e sua matriz temperatura.

Analisando a IR_7256 verificou-se que o objeto estava descartado quase completamente nas temperaturas mais altas, o que favorece o método de binarização (Figura 5.20). Assim utilizando-se uma rotina simples abaixo:

```
>clear
>clc

>M=dlmread('C:\DocumentsandSettings\Luiz\Meusdocumentos\IR_7256ready.tx
t');
max = max(max(M));
M1 = ones(240,320);
for m = 1:240
    for n = 1:320
        if M(m,n)>25
            if M(m,n)< 33 M1(m,n)=M(m,n);
            end
        else M1(m,n) = 0 ;
        end
    end
end

figure
imshow(M)

figure
imshow(M1)

C = M .* M1;
figure
imshow(C)
```

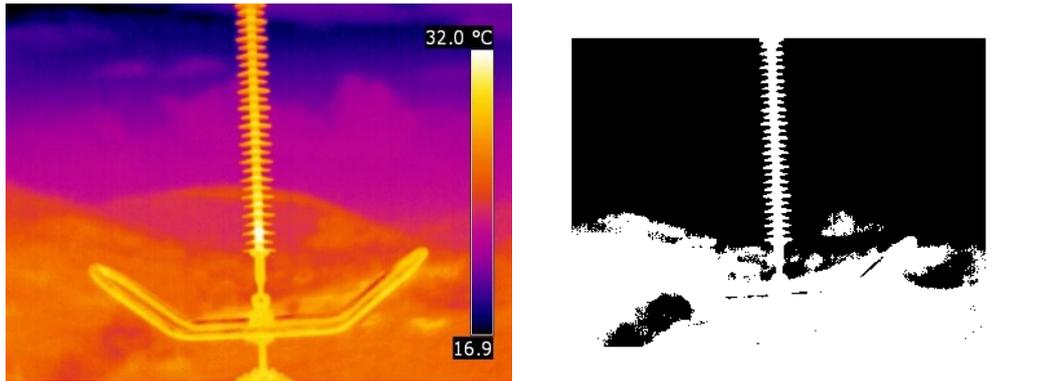


Figura 5.21 IR_7256 e Máscara binarizada pela temperatura (ROI)

Uma máscara gerada a partir da binarização da ROI é utilizada através de uma simples multiplicação com a matriz temperatura, gerada pelo software Quick Report, para determinar as temperaturas de interesse.

A matriz com as temperaturas (dim: 320 X 240) de cada microbolômetros gerada pelo Quick Report e importada para uma planilha Excel. Esta matriz após ajustes no formato das células foi importada para o MATLAB para o processamento das temperaturas na ROI (Região de Interesse). Este processamento utiliza a binarização para zerar as temperaturas fora da ROI, preservando as temperaturas de interesse. Esta matriz apresenta o formato característico da amostra, como pode ser visualizado nas Figuras 5.21 e 5.22.

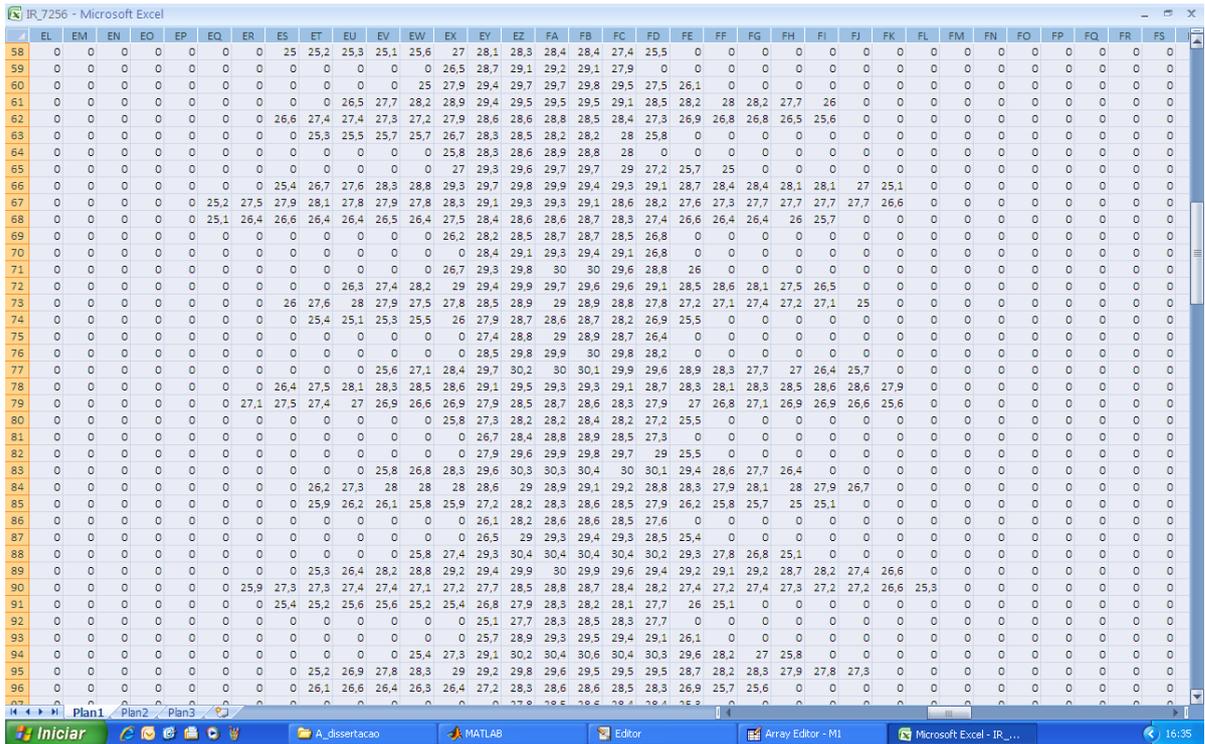


Figura 5.22 Tela do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador).

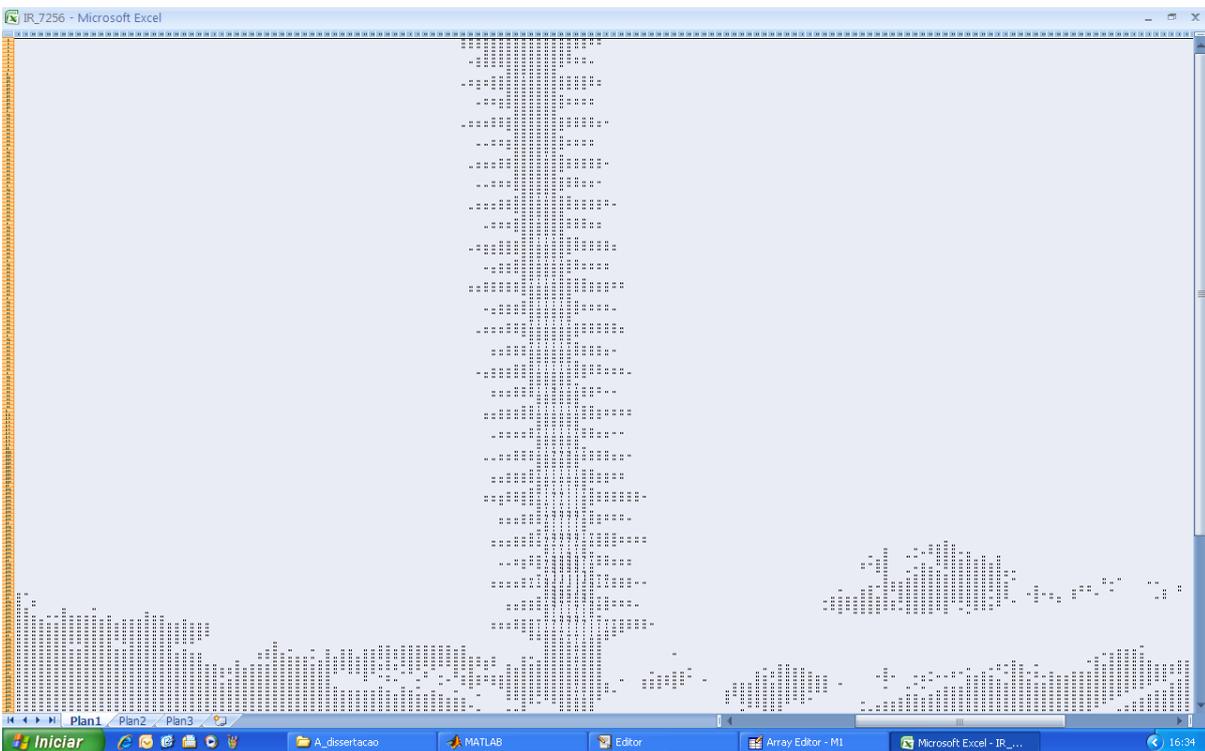


Figura 5.23 Telas do Excel destacando o formato do objeto (segmento de isolador).

A análise desta matriz já nos mostra que o isolador em suas extremidades ocupa de dez a vinte pixels apenas, para uma matriz (320X240) esta quantidade de pixels é muito pequena, ou seja, a resolução da imagem é muito pequena comparada com os detalhes da amostra.

$\min = \min(\min(M1));$

$\max = \max(\max(M));$

5.5 Discussão

Apesar da grande sensibilidade das câmeras de imageamento termal modernas, devido à relativa baixa precisão a maioria dos estudos e aplicações que utilizam estes instrumentos é de análise qualitativa. As experiências analisadas neste capítulo demonstram que as informações de temperatura dos termogramas também podem ser usadas em análises quantitativas, mas as configurações da S45/FLIR e a entrada dos valores corretos dos parâmetros solicitados pelo equipamento são essenciais para a determinação da temperatura a partir de suas termografias, pois estes dados são utilizados para estudos matemáticos e simulações posteriores com uso de modelos.

5.6 Conclusão

As grandezas medidas e os parâmetros do objeto estudado através das análises propostas pela teoria do infravermelho permitem a aquisição de dados seja bem próxima da realidade e uma manipulação dos resultados obtidos com maior precisão. A relação distância de foco/dimensão do isolador não foi compatível com as lentes utilizadas, ou seja, a distância da câmera ao isolador foi da ordem de 6 metros, o que está muito acima do limite da focagem da lente utilizada. Este resultado, que é bastante relevante do ponto de técnico-científico, serviu para indicar o modelo de lente necessário para aquisição de dados térmicos em campo obtidos através de câmera de termovisão.

Como recomendação as imagens geradas nesta experiência poderão ser utilizadas para análises mais complexas e que poderão apresentar resultados mais refinados. Outras lentes que o Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE está adquirindo através do FINEP e poderão ser utilizadas para novos ensaios, pois seus diferentes parâmetros podem viabilizar a utilização da relação distância/parâmetros das amostras.

Um banco de imagens foi criado e está sobre a guarda do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE e DECART. Este banco contém muitas imagens geradas nesta experiência que poderão ser utilizadas para análises do resfriamento e também para comparação de modelos matemáticos mais complexos que utilizem o formato dos isoladores. Os pontos quentes encontrados nas termografias desta experiência provavelmente são causados por modificações no material ou acúmulo não homogêneo de orvalho. Estes trechos precisam ser estudados em ensaios de laboratório para confirmar as causas reais.

6. CONCLUSÃO

O imageamento termal disponibiliza as imagens térmicas de superfícies. Apesar da grande sensibilidade das câmeras de imageamento termal modernas, à relativa baixa precisão, a maioria dos estudos e aplicações é de análise qualitativa. As experiências mostram que as informações de temperatura dos termogramas também podem ser usadas em análises quantitativas.

Para as análises quantitativas o tratamento matemático na simulação numérica desta dissertação está embasado na suposição de que os sistemas de referência (Instrumento, Objeto e Superior) pré-definidos corretamente, uma vez que sem esta suposição não seria possível comparação alguma das medidas realizadas na termografia e o modelo matemático desenvolvido, pois não existe referencial de base confiável para uma comparação satisfatória.

A configuração da TermoCam FLIR S45[®] e a entrada dos valores dos parâmetros solicitados pelo equipamento de forma correta, sem problemas operacionais e minimizando os erros de operação e sistemáticos para a determinação da temperatura a partir de termografia, pois estes dados são utilizados em todos os estudos matemáticos e simulações posteriores. As grandezas e os parâmetros do objeto estudado e a teoria do infravermelho, permitem a aquisição de dados bem próxima da realidade e uma manipulação dos resultados obtidos com maior precisão. As situações difíceis de medições quando há fontes de radiação perturbadoras ou a emissividade do objeto é baixa, portanto, o operador da câmera e o inspetor termográfico devem reconhecer estas situações e garantir a qualidade da aquisição de dados.

As experiências mostraram que de uma simples visualização de fenômenos básicos até a determinação de parâmetros termofísicos e geométricos podem ser feitos através das aplicações da termografia, que tem a grande vantagem de ser um ensaio não-destrutivo.

Apesar da simplicidade e do uso restrito das ferramentas de PDI, os resultados alcançados nestas experiências foram satisfatórios e atingiram os

objetivos das mesmas, que era o reconhecimento automático de isolador ou segmentos dele e resistores inclusos. Este processo permite o processamento matemático propostos de forma satisfatória e os objetivos foram atingidos.

Na determinação dos contornos foram utilizados diversos filtros derivativos (Laplacianos, Sobel, Canny, Prewitt etc.). Os processamentos mostraram que os estimadores do tipo Sobel apresentaram os melhores resultados para os limiares entre 0,03 e 0,08. Em limiares acima de 0,08 ocorreu a perda dos dados, pois o filtro atenuava toda a informação contida na imagem. Para limiares abaixo de 0,03 houve um exagero de contornos. Nas experiências com os limiares adequados ($0,03 < Li < 0,08$) foram determinadas, com razoável precisão, as regiões de interesse (ROI), as temperaturas das amostras e os parâmetros geométricos do segmento de isolador polimérico utilizado como uma das amostras, bem como de um resistor incluso nas amostras de gesso.

Infelizmente, na experiência em campo só foi possível a análise qualitativa, pois a relação distância de foco/dimensão do isolador não foi compatível com as lentes utilizadas, ou seja, a distância da câmera ao isolador foi da ordem de 6 metros, o que está muito acima do limite da focagem da lente utilizada. Este resultado, que é bastante relevante do ponto de técnico-científico, serviu para indicar o modelo de lente necessário para aquisição de dados térmicos em campo obtidos através de câmera de termovisão. Outro resultado qualitativo demonstrado foi o “efeito aleta” que os terminais do resistor provocam no processo de resfriamento.

Novas lentes estão sendo adquiridas via FINEP e poderão ser utilizadas para a avaliação com diferentes parâmetros (distância focal D, HFOV, VFOV, f, IFOV, limites de focagem, etc.).

Um banco de imagens foi criado e está sobre a guarda do Laboratório de Sensoriamento Remoto do DEPARTAMENTO/UFPE e uma cópia no grupo GET do DEMEC/UFPE. Este banco contém muitas imagens geradas nesta experiência que poderão ser utilizadas para análises do resfriamento e também para

comparação entre os resultados experimentais e as simulações com os modelos matemáticos mais complexos que utilizem o formato dos isoladores.

O “Efeito Aleta” nesta pesquisa foi apenas observado. Os registros realizados aqui podem ser entrada para um estudo mais completo e conclusivo.

O registro do processo de resfriamento das placas neste trabalho foi prejudicado por causa das falhas na realização dos registros, mas as diversas imagens termais poderão ser objeto de estudo posterior. Esta base de dados está armazenada.

Considerando a semelhante geométrica das termografias na experiência *Exp3* do capítulo 4, os processamentos analíticos foram realizados apenas utilizando apenas uma termografia, a IR_3715. Um estudo mais complexo e detalhado; com uma metodologia de comparação mais precisa poderá apresentar conhecimentos válidos para a ciência.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AL-KASSIR, A. R.; FERNANDEZ, J.; TINAUT, F. V.; CASTRO, F. . *Thermographic study of energetic installations*. Applied Thermal Engineering, v. 25, p. 183–190, 2005.

ALMEIDA, C. H. T. ; SILVA, N. A. ; MICHALEWICZ, J. S. ; MAGNANI, F. S. ; GUERRERO, J. R. H. . *Visualização Da Chama Do Gás Natural Em Queimador Utilizando Termografia E Adição De Particulados*. In: Conem 2006 - Iv Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2006, Recife. Anais Do Conem 2006, 2006.

ARAÚJO, M. C.; LIMA, R. C. F.; MAGNANI, F. S.; SANTOS, F. G. S.; DA SILVA, R. N. T. *Uma Investigação Preliminar da Possibilidade de Utilização de Câmera de Infravermelho para Detecção de Diferentes Patologias em Clima Tropical*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 20, 2006. São Pedro-SP: Anais do CBEB 2006.

BECK, J.V. ; BLACKWELL B. ; CLAIR JR., C.R. ST. *Inverse Heat Conduction - Ill-Posed Problems*, Wiley-Interscience (1985)

BEJAN, A. . *Convection Heat Transfer*, Wiley-Interscience, 2 edition (1994)

BEZERRA, L. A. ; DA SILVA, R. N. T. ; GUERRERO, J. R. H. ; MAGNANI, F. S. . *Estudo Da Influência De Parâmetros Na Medição Por Termografia*. In: Conem 2006 - Iv Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2006, Recife. Anais Do Conem 2006.

BÜYÜKÖZTÜRK, O. *Imaging of Concrete Structures*. NDT&E International, v. 31, n. 4, p. 233-243, 1998.

CARSLAW, H. S. & JAEGER, J. C. .*Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, USA; 2 edition (1986)

CASTELLETTI, C. E. M. ; MAGNANI, F. S. ; PERES, S. ; DUTRA, J. C. C. ; GUERRERO, J. R. H. . *Análise Energética Experimental De Um Grupo Gerador De 30 Kwe A Gás Natural Em Diferentes Níveis E Tipos De Cargas Elétricas*. In: Conem 2006 - Iv Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2006, Recife. Anais Do Conem 2006, 2006.

CLARK, M. R.; McCANN, D. M.; FORDE, M. C. *Application of Infrared Thermography to the Non-destructive Testing of Concrete and Masonry Bridges*. NDT&E International, v. 36, p. 265-275, 2003.

CLIMA TEMPO, <www.climatempo.com.br>, acesso em 28 de novembro de 2008. (2008)

DA SILVA, R. N. T. . *Estudo Da Termografia Por Infravermelho: Aplicações Na Engenharia E Determinação De Parâmetros Termofísicos e Geométricos De Materia*. Tese De Mestrado em Engenharia Mecânica, UFPE, 2007.

DA SILVA, R. N. T. ; LIRA JUNIOR, J. C. ; MAGNANI, F. S. ; GUERRERO, J. R. H. . *Análise Energética Global De Um Forno De Aquecimento De Tarugos Com Auxílio De Termografia*. In: Conem 2006 - Iv Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2006, Recife. Anais Do Conem 2006, 2006.

DA SILVA, R. N. T. & MAGNANI, F. S. . *Detecção De Inclusões Metálicas Em Placas De Gesso Através De Termografia Ativa*. In: Conem 2006 - Iv Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2006, Recife. Anais Do Conem 2006, 2006.

DA SILVA, R. N. T. ; MAGNANI, F. S. ; LIMA, R. C. F. . *Algumas Aplicações Do Uso Da Termografia Na Detecção De Falhas*. In: Conem 2006 - Iv Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2006, Recife. Anais Do Conem 2006, 2006.

DATTOMA, V.; MARCUCCIO, R.; PAPPALLETTERE, C.; SMITH, G. M. . *Thermographic Investigation of Sandwich Structure made of Composite Material*. NDT&E International, v. 34 , p. 515-520, 2001.

DE SEIXAS, A. *Objektrekonstruktion mittels Gitterlinien-verfahren*.. 128f. Tese (Doutorado em Geodésia aplicada à engenharia). Instituto de geofísica e geodésia aplicada. Departamento de geodésia aplicada à engenharia. Universidade Técnica de Viena, Austria, 2001. apud de SEIXAS A.; SILVA, T. F.; ROMÃO, V. C., BOTELHO, F.. *Definição de Sistemas de Referência no Controle de Qualidade de Edificações*, Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2003.

DE SEIXAS A.; SILVA, T. F.; ROMÃO, V. C., BOTELHO, F.. *Definição de Sistemas de Referência no Controle de Qualidade de Edificações*, Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2003.

DERENIAK, E. L. & BOREMAN , G. D. . *Infrared Detectors and Systems*, Wiley-Interscience, 1996.

DUFFIE, J. A. & BACKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley; 3 edition, 2006.

FLIR <www.flir.com> acesso em: 15 mar. 2009.

FLIR Quick Report *Data Sheet* <www.flir.com> acesso em: 15 mar. 2009.

GONZALEZ, R. C.; E WOODS, R. E.. *Digital Image Processing*. - Prentice Hall (3rd ed) - 2009.

GONZALEZ, R. C.; E WOODS, R. E.; S. L. EDDINS.. *Digital Image Processing Using MATLAB* Prentice Hall (2nd ed) - 2009

GONZÁLEZ, D. A.; MADRUGA, F. J.;QUINTELA, M. A.; LÓPEZ-HIGUERA, J.M. . *Defect Assessment on Radiant Heaters using Infrared Thermography*. NDT&E International, v. 38, p. 428–432, 2005.

GUERRERO, I. C.; OCAÑA, S. M.; REQUENA, I. G. *Thermal–physical Aspects of Materials used for the Construction of Rural Buildings in Soria (Spain)*. Construction and Building Materials, v. 19, p . 197–211, 2005.

HOLMAN, J. P.. *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, 7 edition (2000)

HOLST, G. C.. *Common Sense Approach to Thermal Imaging*, SPIE Publications (2000)

HYPERPHYSICS, *Interaction of Radiation with Matter*, <http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/mod3.html>, acesso em 20 dez. 2008. (2008)

HUDSON Jr., R. D., *Infrared System Engineering*. John Wiley and Sons Inc., 1969. Disponível em: <www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/espectro.htm>. Acesso em 07 out. 2008.

IBARRA-CASTANEDO, C.; GONZÁLEZ, D.; KLEIN, M.; PILLA, M.; VALLERAND, S.; MALDAGUE, X. . *Infrared Image Processing and Data Analysis*. Infrared Physics & Technology, v. 46, p. 75–83, 2004.

INCROPERA, F. P. & DeWITT, D. P. *Introduction to Heat Transfer*. Second Edition. Singapore: John Wiley & Sons, Inc.,1990.

INFRARED SOLUTIONS. Disponível em: <www.infraredsolutions.com>. Acesso em: 10 nov. 2008

IPEM-SP: Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo. <http://www.ipem.sp.gov.br/5mt/unidade.asp?vpro=eletrica>, consultado em 30/06/09, às 11:00 h, 2009.

KAPLAN, H. . *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*, SPIE Publications (1999)

KOTLARCHYK, M. *Electromagnetic Radiation and Interactions with Matter*, in Encyclopedia of Imaging Science and Technology, J. Hornak, ed, Wiley-Interscience (2002)

LEGRAND, A. –C.; MERIAUDEAU, F.; GORRIA, P. . *Active infrared non-destructive testing for glue occlusion detection within plastic lids*. NDT&E International, v. 35, p. 177- 187, 2002.

LIMA, R. C. F.; MAGNANI, F. S.; DA SILVA, R. N. T.. *Detecção de Falhas em Monumentos Históricos de Olinda através de Imagens por Infravermelho – Uma Análise Preliminar*. SIMPÓSIO DE TÉCNICAS AVANÇADAS EM PRESERVAÇÃO DE BENS CULTURAIS, 3, 2005. Olinda-PE: ARC- Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação.

MAGNANI, F. S. & DA SILVA, R. N. T. *Infrared Thermography Applied to the Quantitative Determination of Spatial and Thermophysical Parameters of Hidden Included Objects*. Applied Thermal Engineering. Published by Elsevier Ltd., V. 27, P. 2378-2384, (2007) disponível no site www.sciencedirect.com, acesso em: 15 dez. 2007.

MAGNANI, F. S.; GUERRERO, J. R. H.; LIMA, R. C. F.; DA SILVA, R. N. T. *Studies of the Applicability of Infrared Imaging of Thermal Processes in Tropical Regions*. INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 18, 2005. Ouro Preto-MG: Anais do COBEM 2005.

MALDAGUE, X. P. V., *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, Wiley-Interscience (2001)

MALISKA, C. R.. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, LTC (2004)

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G. M.; GIORLEO, L. *The Use of Infrared Thermography for Materials Characterization*. Journal of Materials Processing Technology, v. 155-156, p. 1132-1137, 2004.

MODEST, M. . *Radiative Heat Transfer*, Academic Press; 2 edition (2003)

OZISIK, M. N.. *Heat Conduction*, Wiley-Interscience; 2 edition (1993)

OZISIK, M. N. & ORLANDE, H. R. B. . *Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications*, Taylor & Francis (2000)

PANSINI, A. J.. *Guide to Electrical Power Distribution Systems*, CRC (2005)

RAINIERI, S. & PAGLIARINI, G. *Data Filtering Applied to Infrared Thermographic Measurements Intended for the Estimation of Local Heat Transfer Coefficient*. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 26, p. 109-114, 2002.

ROHSENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; CHO, Y. I. . *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill Professional; 3 edition (1998)

ROSENFELD, R. & KAK, A. C. . *Digital Picture Processing*, 2nd ed., vols. 1 & 2, Academic Press, NY. (1982) apud GONZALEZ, R. C.; E WOODS, R. E.. *Digital Image Processing*. - Prentice Hall (3rd ed) - 2009.

SIEGEL, R. & HOWELL, J. . *Thermal Radiation Heat Transfer*, Taylor & Francis; 4 edition (2001)

SOLAR POSITION CALCULATOR, <www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/azel.html>, acesso em 20 de Nov. de 2008. (2008)

TALER, J. & DUDA, P. . *Solving Direct and Inverse Heat Conduction Problems*, Springer, (2006)

TANNAHILL, J. C.; ANDERSON, D. A.; PLETCHER, R. H.. *Computational Fluid Mechanics And Heat Transfer*, Taylor & Francis (1997)

THE MATHWORKS, Inc, *What Is MATLAB the Language of Technical Computing - Getting Start*. Version 6.0.0.88 Release 12. September 22, 2000. www.themathworks.com, acesso em 24 nov. 2008.

THE MATHWORKS, Inc. Image Processing Toolbox User's Guide . COPYRIGHT 1993 - 2004.

VIANA, M. J. A. ; MARQUES, D. ; GUERRERO, J. R. H. ; MAGNANI, F. S. . *Avaliação Experimental Do Uso De Luxímetro Na Estimativa De Radiação Solar*. In: Conem 2006 – Iv Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2006, Recife. Anais Do Conem 2006, 2006.

ANEXOS

```

% *****
% ***** PROGRAMA DE MESTRADO *****
% *** ***
% *** ***
% **** UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO ***
% *** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA ***
% *** ***
% *** ***
% *****
% *****
%
% A função hsi = rgb2hsi(rgb) converte a imagem rgb para o plano de cores HSI
%

```

```
function hsi = rgb2hsi(rgb)
```

```
a = rgb;
```

```
rgb = im2double(rgb);
```

```
r = rgb (:,:,1);
```

```
g = rgb (:,:,2);
```

```
b = rgb (:,:,3);
```

```
num = 0.5*((r-g)-(r-b));
```

```
den = sqrt((r-g).^2+(r-b).*(g-b));
```

```
theta = acos(num./(den+eps));
```

```
H = theta;
```

```
H(b>g) = 2*pi - H(b>g);
```

```
H = H/(2*pi);
```

num = min(min(r,g),b);

den = r + g + b;

S = 1 - 3.*num./den;

H(S==0) = 0;

I = (r + g + b)/3;

hsi = cat(3, H, S, I);

```
% *****
% ***                                     ***
% ***          LUIZ HENRIQUE NEVES RODRIGUES    ***
% ***          SEMESTRE 2009.1                 ***
% ***                                     ***
% *****
```

```
% *****
% *****          TESE DE MESTRADO          *****
% ***                                     ***
% ***                                     ***
% ***          UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO    ***
% ***          DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA    ***
% ***                                     ***
% ***                                     ***
% *****
% *****
```

%

%

% A função *colorgrad* transforma a imagem f em RGB em uma imagem de

% tons de cinza

%

%

```
function [VG, A, PPG] = colorgrad (f,T)

if (ndims(f) ~= 3) | (size(f,3) ~= 3)
    error ('imagem de entrada deve ser RGB');
end

sh = fspecial ('sobel');
sv = sh';
Rx = imfilter (double(f(:, :, 1)), sh, 'replicate');
Ry = imfilter (double(f(:, :, 1)), sv, 'replicate');
Gx = imfilter (double(f(:, :, 2)), sh, 'replicate');
Gy = imfilter (double(f(:, :, 2)), sv, 'replicate');
Bx = imfilter (double(f(:, :, 3)), sh, 'replicate');
By = imfilter (double(f(:, :, 3)), sv, 'replicate');

gxx = Rx.^2 + Gx.^2 + Bx.^2;
gyy = Ry.^2 + Gy.^2 + By.^2;
gxy = Rx.*Ry + Gx.*Gy + Bx.*By;

A = 0.5*(atan(2*gxy./(gxx - gyy + eps)));
G1 = 0.5*((gxx + gyy) + (gxx - gyy).*cos(2*A) + 2*gxy.*sin(2*A));

A = A + pi/2;
G2 = 0.5*((gxx + gyy) + (gxx - gyy).*cos(2*A) + 2*gxy.*sin(2*A));
G1 = G1.^0.5;
G2 = G2.^0.5;

VG = mat2gray(max(G1,G2));

RG = sqrt(Rx.^2 + Ry.^2);
```

```
GG = sqrt(Gx.^2 + Gy.^2);
```

```
BG = sqrt(Bx.^2 + By.^2);
```

```
PPG = mat2gray (RG+GG+BG);
```

```
if nargin ==2
```

```
    VG =(VG>T).*VG;
```

```
    PPG = (PPG >T).*PPG;
```

```
end
```

```
% *****  
% ***                                     ***  
% ***          LUIZ HENRIQUE NEVES RODRIGUES          ***  
% ***          SEMESTRE 2009.1                        ***  
% ***                                     ***  
% *****  
% *****
```