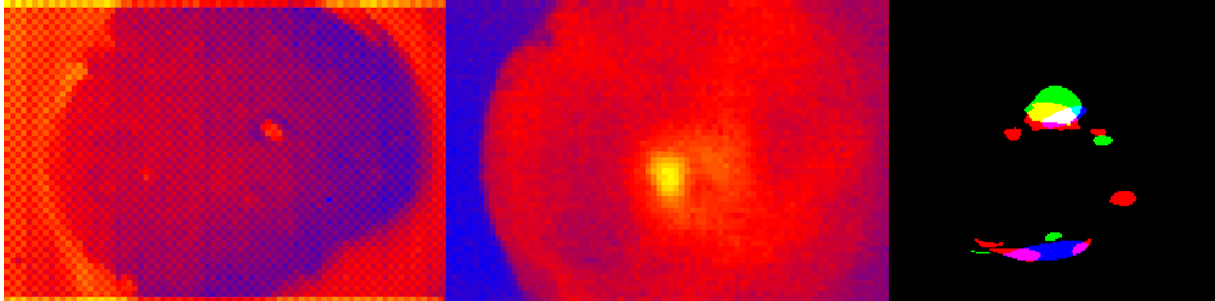




TÉCNICO
LISBOA



Técnicas de Pós-processamento de imagem para métodos experimentais em termografia

José Francisco Proença Mendes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Mário António da Silva Neves Ramalho
Prof. Ana Sofia Oliveira Henriques Moita

Júri

Presidente: Prof. Carlos Baptista Cardeira
Orientador: Prof. Mário António da Silva Neves Ramalho
Vogal: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Dezembro 2021

Agradecimentos

Quero agradecer aos meus orientadores pela orientação deste trabalho, à professora Ana Moita pela proposta do tema de dissertação e orientação relativa à parte térmica e ao professor Mário Ramalho pela orientação da parte relativa a sistemas.

Agradeço também ao Pedro Pontes pelo apoio dado durante este trabalho, em relação ao funcionamento da câmara, das instalações experimentais e esclarecimento de dúvidas.

Reconhecer também os colegas de laboratório que me ajudaram e mantiveram motivado durante este trabalho. Um agradecimento ao Pedro e ao David por me deixarem utilizar as suas instalações.

Resumo

A termografia permite adquirir termogramas, matrizes de valores de temperatura, de forma não invasiva e com elevada resolução temporal. Assim esta técnica adequa-se ao estudo de fenómenos de transferência de calor. No entanto de forma a obter termogramas com precisão é necessário utilizar uma metodologia adequada.

A metodologia proposta neste trabalho permite aferir os diferentes factores que afectam a precisão e exactidão dos valores obtidos: factor de forma, a emissividade do material, e a relação entre ADU e temperatura. Para além disso são analisados vários métodos de pós-processamento de termogramas, destacando-se os resultados do método NUC, utilizado na rotina de tratamento proposta. Para além do pós-processamento de termogramas, é proposta uma abordagem para o cálculo de fluxo de calor utilizando redes neuronais, destinada ao cálculo de fluxo de calor de ensaios de ebulição em piscina.

Os resultados experimentais obtidos com a rotina proposta são comparados aos resultados obtidos com a rotina utilizada presentemente no laboratório. Os termogramas obtidos com a nova rotina apresentam bons resultados, com uma menor não-uniformidade que os termogramas tratados com a rotina anterior. A abordagem de cálculo de fluxo de calor apresenta também valores com menos oscilação e uma maior fiabilidade no determinar o pico de fluxo provocado pelo destacamento de bolhas.

Palavras-chave: termografia, correcção não uniforme, redes neuronais, fluxo de calor, ebulição em piscina.

Abstract

Thermography allows for the capture of thermograms, matrices with the values of temperature, in a non-invasive way and with a high temporal resolution. This technique is adequate for the study of heat transfer phenomena. Nevertheless, in order to obtain thermograms with high accuracy, it is necessary to use an adequate methodology.

The methodology proposed in this work, allows the user to infer several parameters that affect the precision and accuracy of the measured values: the shape factor, the emissivity of the material and the relation between ADU and temperature. In addition to this a number of post-processing techniques for thermograms are analysed, emphasising the results of NUC, used for the proposed methodology. In addition to the post-processing of thermograms, an approach to the computation of heat flux using neural networks is proposed, intended to compute the heat flux in pool boiling experiments.

The experimental results obtained with the new methodology are compared with the ones obtained using the methodology currently in use in the laboratory. The new methodology's thermograms present good results, with a smaller nonuniformity than the thermograms treated with the previous methodology. The approach to the heat flux's computation also presents values with less oscillation and better reliability in determining the peak flux caused by the bubble detachment from the surface.

Keywords: Thermography, Non-uniformity correction, Neural networks, Heat flux, Pool boiling

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Símbolos	xvii
Glossário	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Estado da arte	2
1.3 Objectivos	4
1.4 Estrutura	5
2 Introdução teórica	7
2.1 Termografia	7
2.2 Relação entre temperatura e radiação infravermelha	8
2.2.1 Factor de forma	11
2.3 Câmara de infravermelhos	12
2.3.1 Comportamento dinâmico	14
2.3.2 Modelação do sensor	15
2.3.3 Calibração geométrica	16
2.3.4 Correção da não-uniformidade	19
2.3.5 Calibração térmica - Conversão de radiação para temperatura	24
2.3.6 Aferição do factor de forma	27
2.4 Transferência de calor	28
2.4.1 Diferenças finitas	28
3 Tratamentos de imagem	31
3.1 <i>Constant Statistics</i>	31
3.2 Redes neuronais com inibição lateral	33
3.3 Ajuste de superfícies	33

3.4	Comparação e custo computacional	35
4	Metodologia experimental	39
4.1	Metodologia anterior - PP16	39
4.2	Metodologia proposta - JM21	42
4.3	Configuração do ensaio experimental	42
4.3.1	Ebulição em piscina em superfície super-hidrofóbica	43
4.3.2	Microcanais	45
5	Processamento de dados	48
5.1	Emissividade experimental	48
5.2	Quantificação do erro da relação entre temperatura e ADU	49
5.3	Comparação de metodologias	51
5.3.1	Microcanais	51
5.3.2	Microcanais - geometria	54
5.3.3	Ebulição em piscina	57
5.4	Super resolução	59
5.5	Cálculo de fluxo de calor a partir de termogramas	61
5.5.1	Cálculo de diferenças finitas	62
5.5.2	Aplicação de filtro gaussiano	62
5.6	Ajuste de superfície com redes neuronais	64
5.6.1	Estrutura da rede neuronal	65
5.7	Cálculo de fluxo de calor com ajuste de superfície	68
6	Conclusões e trabalho futuro	76
6.1	Trabalho futuro	78
	Bibliografia	79
A	Ficha técnica da câmara Onca-MWIR-InSb-320	1
B	Ganho e viés do IRFPA	3
C	Imagens obtidas	5
D	Localização do padrão de calibração circular	7
E	Aquisição de imagens de referência	9
F	Imagens de referência de radiação uniforme	11
G	Validação do cálculo de fluxo	13

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades geométrica da câmara	19
2.2	Coeficientes dos polinómios e medidas de erro	27
2.3	Coeficientes dos polinómios e medidas de erro	28
3.1	Comparação dos tratamentos	36
4.1	Propriedades físicas do aço inoxidável AISI 304 [36]	43
5.1	Comparação de ajustes	49
G.1	Propriedades termofísicas da água, para a temperatura de saturação e à pressão atmosférica [36]	14

Lista de Figuras

1.1	Comparação entre imagem captada com uma câmara do espectro visível e uma câmara termográfica SWIR adaptada de [3] cortesia da NASA	2
2.1	Comparação entre imagens coloridas e imagens termográficas	7
2.2	Varição de cor e luminosidade de várias <i>lookup tables</i>	8
2.3	Radiação emitida por um corpo negro a diferentes temperaturas sendo a gama de radiação visível indicada pelo barra arco-íris à esquerda. Adaptado de [19, 20]	9
2.4	Transmissividade atmosférica adaptado de [21]	10
2.5	Balço de radiação entre dois elementos diferenciais adaptado de [23]	11
2.6	Factor de forma de duas placas coaxiais quadradas paralelas	12
2.7	Fluxo de informação entre a câmara e o computador	13
2.8	Valores de desvio-padrão	14
2.9	Funções teóricas de resposta dos sensores	15
2.10	Ruído não uniforme	15
2.11	Prevalência do ruído face à radiação uniforme de um corpo negro	16
2.12	Modelo de câmara estenoipeica	17
2.13	Comparação de imagens para a calibração geométrica	18
2.14	Distorção da lente em píxeis, padrão axadrezado	18
2.15	Distorção da lente em píxeis, padrão com orifícios	18
2.16	Esquema de implementação de correcção não uniforme adaptado de [8]	20
2.17	Perfis de calibração térmica	21
2.18	Valor de não-uniformidade para diferentes imagens de referência	22
2.19	Varição do ganho e viés médio face ao tempo de integração, obtidos com a configuração apresentada no anexo F	22
2.20	Valor de não-uniformidade para diferentes tempos de integração	23
2.21	Correcção de não-uniformidade para tempo de integração de $200 \mu s$	23
2.22	Relação de temperatura e valor dos sensores	24
2.23	Calibração térmica,	25
2.24	Histogramas das medidas de erro das curvas ajustadas	25
2.25	Constantes estandardizadas para diferentes tempos de integração, normalizadas	26
2.26	Relação entre o factor de forma e a distância	27

3.1	Tratamento de CS	32
3.2	Comparação de tratamento de CS	32
3.3	Tratamento com rede neuronal	33
3.4	Tratamento de iluminação com SF polinómio	34
3.5	Perfil de imagem termográfica tratada com SF envelope	34
3.6	Comparação de vários tratamentos, valores quantitativos	35
4.1	Tratamento de remoção de fundo para sinais teóricos	41
4.2	Tratamento de remoção de fundo aplicado a termogramas experimentais	41
4.3	Esquema da configuração experimental: (1) Câmara de infravermelhos, (2) Câmara de alta velocidade (3) Fenómeno em estudo (4) Resistência eléctrica (5) Controlador PID (6) Tanque (7) Panela de pressão (8) Estação de desgasificação (9) Resistência eléctrica (10) Recipiente para o condensado	44
4.4	Esquema da configuração experimental: (1) Câmara de infravermelhos, (2) Fonte de tensão (3) Seringa (4) Montagem do microcanal (5) Recipiente para o fluido	45
4.5	Esquema da configuração experimental: (1) Placa de acrílico (2) Resistência (3) Microcanal (4) Orifício para passagem do fluido	46
5.1	Emissividade experimental para o tempo de integração de $200 \mu s$	49
5.2	Erro da relação entre temperatura e ADU	50
5.3	Erro da relação entre ADU e temperatura para diferentes emissividades, para um tempo de integração de $200 \mu s$	50
5.4	Termograma do microcanal sem pós-processamento	51
5.5	Tratamento de remoção de fundo aplicado a termogramas experimentais	52
5.6	Não-uniformidade dos diferentes tratamentos	53
5.7	Efeito do tratamento nos píxeis menos sensíveis. Coluna esquerda JM21 NUC de um ponto, coluna direita metodologia PP16	54
5.8	Aquecimento do microcanal, progressão temporal da esquerda para a direita	55
5.9	Pormenor da parte em torno do canal	56
5.10	Pormenor de canais aquecidos	56
5.11	Gráfico 3D do pormenor do canal aquecido	57
5.12	Tratamento de sinal, rotina PP16	57
5.13	Tratamento de sinal, rotina JM21 NUC2	58
5.14	Tratamento de sinal, rotina JM21 NUC2, com defeito	58
5.15	Temperatura da bolha e nucleações	59
5.16	Comparação entre a resolução original, 19 por 19 píxeis, com a resolução aumentada, 57 por 57 píxeis	60
5.17	Comparação entre o aumento de resolução, com duplicação da resolução, com diferentes métodos de interpolação	60

5.18 Comparação do laplaciano, com duplicação da resolução, com diferentes métodos de interpolação	61
5.19 Sinal obtido após tratamento de não-uniformidade e conversão para temperatura	61
5.20 Diferenças finitas de primeira ordem, $\frac{\partial T}{\partial t}$	62
5.21 Balanço energético em função do desvio-padrão	63
5.22 Fluxo de calor para diferentes valores de desvio-padrão	64
5.23 Função de base radial	65
5.24 Estrutura da rede neuronal	65
5.25 Comparação das superfícies ajustadas por uma rede neural de 20 neurónios em imagens consecutivas	66
5.26 Comparação das superfícies ajustadas por uma rede neural de 20 neurónios em imagens consecutivas	67
5.27 Rede adaptada a diferentes áreas	67
5.28 Efeito da aplicação de diferentes densidades de dados na adaptação de redes neuronais	68
5.29 Regiões da bolha	68
5.30 Temperatura e fluxos de calor JM21 NUC2	70
5.31 Comparação da temperatura e fluxo de um ponto longe da bolha, região exterior figura 5.29	70
5.32 Comparação da temperatura e fluxo de um ponto da bolha, região da bolha, figura 5.29	71
5.33 Fluxo de calor de um ponto longe da bolha, região exterior, figura 5.29	71
5.34 Comparação da temperatura e potência dissipada de um ponto da bolha, bolha figura 5.29	72
5.35 Comparação da discretização do sinal face à tolerância e número de neurónios	72
5.36 Comparação do tempo de execução face à tolerância e número de neurónios	73
5.37 Área de fluxo menor que $-1 MWm^{-2}$	74
5.38 Regiões de picos de fluxo	74
B.1 Variação da amplitude em função do ganho e viés, tempo de integração de $200 \mu s$	4
C.1 Comparação de imagens obtidas via <i>Camera Link</i>	5
C.2 Comparação de imagens obtidas via <i>ethernet</i>	5
D.1 Fluxograma de algoritmo de detecção do padrão circular	7
D.2 Identificação do padrão na imagem	8
E.1 Montagem para obtenção de imagens de referência	9
E.2 Segmentação da imagem do corpo negro	10
E.3 Imagem de referência	10
F.1 Configuração da placa: (1) Termopar, (2) Suporte, (3) Placa metálica, (4) Resistência eléctrica (5) Fonte de tensão	11

G.1	Segmentação da bolha das imagens de alta velocidade	13
G.2	Evolução do balanço energético de uma nucleação	14

Lista de Símbolos

Símbolos gregos

α	Absorsividade	—
β	Ângulo	<i>radianos</i>
Δt	Intervalo de tempo	<i>s</i>
δ	Espessura da placa	<i>m</i>
γ	Reflectividade	—
λ	Comprimento de onda	<i>m</i>
\mathcal{E}	Emissividade	—
Φ	Fluxo de radiação	Wm^{-2}
ρ	Densidade	kgm^{-3}
σ	Desvio-padrão	—
τ	Transmissividade	—

Símbolos latinos

\vec{n}	Vector com direcção normal à superfície	—
A	Área	m^2
a_1, a_2, a_3	Coeficientes do polinómio $y = a_1 + a_2x + a_3x^2$	—
b	Viés de uniformização	<i>ADU</i>
c	Centro óptico, <i>optical center</i>	—
C_1	Primeira constante universal da radiação	$3,7418 \times 10^{-16} Wm^2$
C_2	Segunda constante universal da radiação	$1,4388 \times 10^{-2} mK$
C_3	Constante de <i>Stefan-Boltzmann</i>	$5,6704 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$
c_p	Calor específico	$Jkg^{-1}K^{-1}$

D	Discretização	—
d	Distância	m
E	Energia	J
f	Distância focal, <i>focal distance</i>	—
F_{1-2}	Factor de forma	—
G	Ganho do sensor	$ADUW^{-1}m^2$
$g(x)$	Função de x	—
h	Distância entre nós	—
h_{fg}	Calor latente da água	Kj/Kg
I	Radiância	Wm^{-3}
K	Ganho de uniformização	—
k	Condutividade térmica	$Wm^{-1}K^{-1}$
M	Dimensão longitudinal	—
m_y	Valor médio do valor medido	—
MG	Magnitude do gradiente	—
N	Dimensão latitudinal	—
p_1, p_2	Coefficientes de distorção tangencial	—
p_{ij}	Polinómio de grau i em função do tempo de integração e de grau j em função da amplitude	—
Q	Viés do sensor	ADU
q	Fluxo de calor	Wm^{-2}
q_0	Fluxo de calor imposto na placa	Wm^{-2}
r	Raio, distância ao centro	m
R, B, F, O	Constantes estandardizadas, <i>standardized constants</i>	—
S	Superfície	—
s_1, s_2, s_3	Coefficientes de distorção radial	—
s_y	Desvio padrão do valor medido	—
T	Temperatura	K

t	Tempo de integração	μs
UN	Nível de não-uniformidade	–
V	Resposta do sensor	ADU
W	Radiação	$W m^{-2}$
x,y	Coordenadas cartesianas	m
Y	Valor uniformizado	ADU

Subscritos

amb	Valor do ambiente
atm	Valor da atmosfera
$distorcido$	Sistema de coordenadas distorcido
exp	Valor experimental
ext	Valor exterior
$fundo$	Valor de fundo
int	Valor interior
$medido$	Valor medido
min	Valor mínimo
$teorico$	Valor teórico

Sobrescritos

\bar{x}	Valor médio de x
n	Corpo negro
$termopar$	Valor do termopar

Glossário

- ADU** Unidades de conversão de analógico para digital, *Analog to Digital Units*.
- NUC** Correção não uniforme, *Nonuniformity Correction*.
- SWIR** Infravermelho de comprimento de onda curto, *Short-Wavelength Infrared*.
- CS** Estatísticas constantes, *Constant Statistics*.
- SF** Ajuste de superfície, *Surface Fitting*.
- JM21** Metodologia proposta por José Mendes em 2021.
- PP16** Metodologia proposta por Pedro Pontes [1], em 2016.
- IRFPA** Sensor de infravermelhos do plano focal, *Infrared Focal Plane Array*.
- InSb** Composto cristalino de antimônio, *In* e índio, *Sb*.
- RoI** Região de interesse, *Region of Interest*.
- RBF** Função de base radial, *Radial Basis Function*.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A transmissão de calor é um fenómeno que ocorre na natureza e em várias aplicações industriais. Devido à sua complexidade e aplicações práticas, múltiplos estudos debruçam-se sobre os vários mecanismos de transferência de calor.

Como vários destes fenómenos têm uma elevada complexidade, quer ao nível do número de factores envolvidos, quer devido à velocidade dos mesmos são necessários métodos específicos para medir as várias grandezas associadas. É também desejável que as técnicas utilizadas sejam não invasivas de modo a manter a integridade do fenómeno a analisar.

A termografia, ao permitir obter medições bidimensionais no espaço e com uma frequência de amostragem acima de 500 Hz , é um dos métodos utilizados no estudo destes fenómenos. A termografia é utilizada em campos como a medicina, para medir a temperatura corporal, ou na inspecção de edifícios para a detecção de falhas no isolamento térmico, ou em câmaras de vigilância, para a detecção de pessoas, entre outros. A termografia é utilizada no estudo de fenómenos de transferência de calor no laboratório de combustão e termo-fluidos. No entanto a sua utilização carece de uma metodologia de aquisição e pós-processamento adequada. Como tal, a principal motivação deste trabalho é desenvolver uma metodologia para o tratamento de termogramas neste contexto.

Apesar de a termografia já ser utilizada neste âmbito, as técnicas de calibração e pós-processamento de imagens podem ser melhoradas de forma a aumentar a confiança nos resultados obtidos. Note-se que os fenómenos de transferência de calor são regidos por equações diferenciais. Uma vez que a derivada de um sinal amplifica o ruído existente no sinal original é necessário obter sinais com o mínimo de ruído, de modo a evitar o surgimento de picos e oscilações no fluxo de calor calculado.

1.2 Estado da arte

Após descrever a motivação para este trabalho na secção anterior, esta secção apresenta a evolução da termografia e um resumo do estado da arte. A descoberta da radiação infravermelha por William Herschel (1738-1822) ocorreu em 1800 quando este testava vidros de cores diferentes para reduzir a luminosidade em telescópios durante as observações solares. De modo a averiguar mais sistematicamente este efeito, Herschel repetiu a experiência de Newton de divisão de um feixe luminoso, mas analisando o aquecimento com um termómetro de mercúrio. Assim Herschel concluiu que existia um ponto fora do espectro de radiação visível onde o aquecimento era máximo [2] [1].

A criação de bolómetros em 1880, dispositivos que aquecem em função da radiação electromagnética incidente, surge como um passo importante para a termografia. Apesar de apenas detectar a temperatura num ponto do espaço, este será o ponto de partida para sensores de uma e duas dimensões.

Durante a Guerra Fria, a utilização de sensores infravermelhos permite a obtenção de imagens aéreas independentemente das condições meteorológicas. A figura 1.1 apresenta a mesma cena fotografada com duas técnicas diferentes: fotografia a preto e branco e o termograma de infravermelhos de comprimento de onda curto (*short-wavelength infrared* - SWIR).

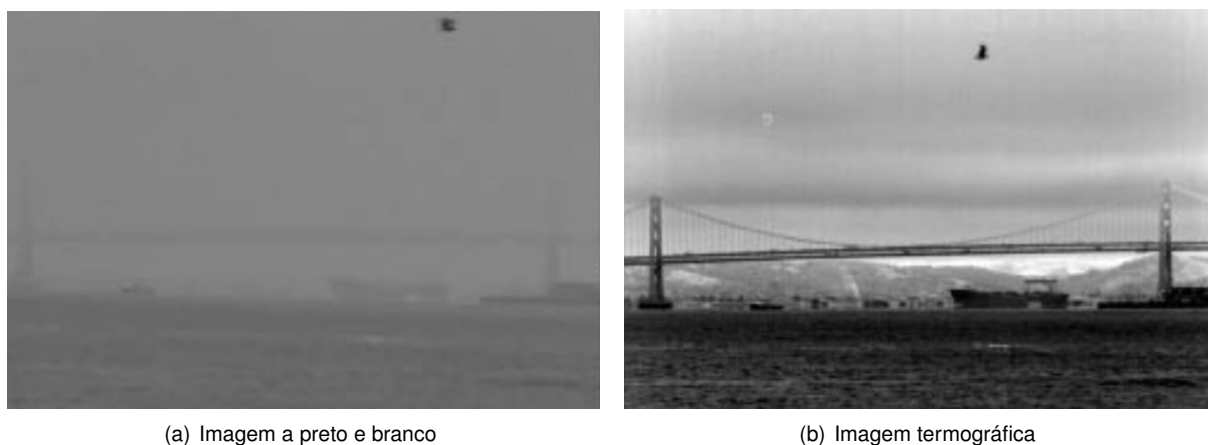


Figura 1.1: Comparação entre imagem captada com uma câmara do espectro visível e uma câmara termográfica SWIR adaptada de [3] cortesia da NASA

A partir da imagem termográfica, figura 1.1(b), captada com SWIR, é possível ver a ponte e os vários barcos cobertos por nuvens na figura 1.1(a). Isto ocorre uma vez que o comprimento de onda utilizado na termografia SWIR não é afectado pela absorção de radiação provocada pela água presente na atmosfera. Esta tecnologia serviu de base para as câmaras utilizadas pelos aviões de reconhecimento *U-2* [4].

As primeiras câmaras para fins comerciais são desenvolvidas nos anos 60 como resultado de programas militares, mas sem a precisão necessária para a quantificação da temperatura [5]. A crise energética dos anos 70, cria a necessidade de medidas de poupança de energia. Com esta motivação, as empresas suecas AGA e Bofors desenvolvem câmaras que utilizam apenas um sensor unidimensional. A imagem bidimensional é criada utilizando mecanismos com rotação de espelhos e prismas que

fazem o varrimento horizontal e vertical do campo de visão [5]. Estas câmaras utilizam como sensores bolómetros, arrefecidos com azoto líquido até temperaturas de $77 K$. Inicialmente, devido à utilização de apenas um sensor, a frequência de imagens obtida seria de apenas 15 a 30 Hz [5].

No meio académico, a utilização por Thomann and Frisk em 1968, da câmara *AGA thermovision 680SWB*, para a medição da distribuição de fluxo de calor em túneis de vento obteve resultados em concordância com os valores obtidos com outros métodos. Em 1972, Compton, nas instalações da NASA em Ames, automatiza a aquisição, processamento e armazenamento de dados permitindo a utilização de câmaras termográficas no seu estado actual [5].

A partir da década de 80, surgem detectores bidimensionais conhecidos por sensores de infravermelhos do plano focal (*infrared focal plane array* - IRFPA) capazes de uma maior frequência de amostragem entre 30 e 60 Hz . Este desenvolvimento é seguido na década de 90 com a utilização de microbolómetros que não necessitam de refrigeração levando a uma expansão na utilização de câmaras termográficas [5]. Em 2014 surge o primeiro acessório com câmara termográfica para telemóveis, seguindo-se em 2016 o primeiro telemóvel com uma câmara termográfica integrada, aumentando a disseminação e utilização da termografia [6].

Apesar dos avanços e desenvolvimentos das câmaras termográficas, os termogramas captados, como qualquer tipo de sinal, têm ruído inerente, o que dificulta a análise de resultados (ver figura 2.10). Para minorar este problema foram desenvolvidos vários métodos e técnicas de análise. No laboratório onde se realizou este trabalho a metodologia de aquisição e pós-processamento utilizada foi desenvolvida por Pontes em 2016 [1]. Esta metodologia utiliza várias opções integradas no *software* da câmara durante a aquisição dos vídeos. O pós-processamento consiste na normalização dos valores de temperatura com base numa referência térmica e a temperatura dessa referência. O funcionamento desta rotina é detalhado na secção 4.1.

Os métodos baseados na correcção não uniforme (*nonuniformity correction* - NUC) necessitam de imagens de referência para modelar o comportamento individual de cada píxel. Dentro destes métodos os modelos de cada sensor variam em complexidade podendo modelar o sensor como uma função: linear como referido por Perry e Dereniak em 1993 [7], linear por troços, um polinómio como referido por Sheng et al. em 2011 [8] ou uma função em S como referido por Shi et al. em 2005 [9]. A desvantagem destes métodos é a necessidade de uma calibração com imagens de referência a várias temperaturas. A calibração de deslocamento¹, pode ser considerada um NUC de um ponto como sugerido por Perry e Dereniak em 1993 [7], uma vez que é captada uma imagem de referência uniforme que é depois subtraída às imagens tratadas de modo a remover os padrões existentes, numa gama de temperaturas reduzida. Os fundamentos teóricos e a implementação destes métodos são analisados com mais detalhe na secção 2.3.4.

Os métodos baseados na uniformidade da imagem, como o proposto por Harris e Chiang em 1997 [10], baseiam-se na ideia de que todos os píxeis ao longo das várias imagens têm o mesmo valor médio e desvio-padrão, estatísticas constantes (*constant statistic* - CS). Assim a partir dos valores registados ao longo do tempo é possível calcular qual o ganho e viés de cada sensor, obtendo uma ima-

¹ *offset calibration*

gem com menos ruído. Estes métodos necessitam de uma cena que se altere e sem objectos fixos no tempo o que não é o caso das imagens captadas nos fenómenos de transferência de calor analisados no presente trabalho.

É também possível remover defeitos de diferenças de sensibilidade, como o caso de uma região do sensor ser mais sensível que as restantes provocando uma zona com intensidade diferente na imagem. A estimação da sensibilidade a corrigir efectua-se estimando uma superfície que cubra a imagem como referido por Reyes-Aldasoro em 2009 [11] ou ajustando um polinómio à imagem como referido por Tasdizen et al. em 2008 [12]. Ambos os algoritmos são utilizados na área de microscopia electrónica.

A utilização de redes neuronais é referida por Li et al. em 2021 [13] para tratar as imagens termográficas. No entanto na maioria dos casos apenas é conhecida a imagem com ruído, não existindo uma imagem de referência, limitando o treino de redes neuronais a experiências com ruído simulado [13].

Como a dimensão do sensor da câmara utilizada, 320 por 256 píxeis, e a resolução espacial são reduzidas, para obter medidas de comprimento mais precisas podem ser aplicados métodos de *sub pixel accuracy*. Estes métodos têm como objectivo localizar um ponto da imagem não num píxel, mas entre píxeis da imagem de modo a obter uma maior resolução. Para tal utilizam informação acerca do ponto a localizar e os valores dos píxeis em redor.

Kordelas et al. em 2014 [14] sugere um método para obter uma resolução inferior a um píxel para a reconstrução de uma superfície a partir de imagens. Utilizando uma função de custo para a posição de um ponto, são obtidos diferentes custos ao colocar o ponto nos píxeis vizinhos. Ajustando uma parábola aos valores de custos determinados obtém-se um valor mínimo que corresponde à posição do ponto com resolução inferior a um píxel.

Quine et al. em 2007 [15] sugere um método para a localização do centro de estrelas em imagens. Para tal as imagens obtidas são desfocadas pela câmara para que uma estrela ilumine vários píxeis. Ao ajustar uma função que modela a iluminação dos píxeis às imagens obtém-se posições para os centros com resoluções inferiores a um píxel.

1.3 Objectivos

Considerando a motivação e o estado da arte apresentados nos capítulos anteriores, esta secção define os objectivos deste trabalho.

O objectivo deste trabalho é desenvolver e avaliar técnicas de calibração, aquisição e pós-processamento de dados obtidos através de termografia.

Para tal é proposta uma calibração térmica de modo a corresponder os valores captados pela câmara a valores de temperatura dos fenómenos em análise. A rotina de aquisição e processamento de termogramas é analisada e comparada à rotina previamente existente.

Para além do tratamento de termogramas, é avaliada a abordagem de cálculo de fluxo de calor para os ensaios de ebulição em piscina, descritos na secção 4.3.1.

1.4 Estrutura

Tendo em consideração os objectivos apresentados na secção anterior, esta secção apresenta a estrutura deste trabalho.

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, sendo o capítulo inicial dedicado à motivação, estado da arte e objectivos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos necessários para compreender o trabalho, bem como as calibrações da câmara a utilizar.

A análise dos métodos de correcção de termogramas apresentados no estado da arte é apresentada no capítulo 3.

As configurações experimentais e rotinas de tratamento dos termogramas são apresentadas no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com as duas metodologias, comparando os termogramas obtidos para diferentes ensaios. Apresenta-se também uma abordagem para o cálculo de fluxo de calor utilizando redes neuronais e os seus resultados. Esta abordagem aplica-se apenas ao ensaio de ebulição em piscina, apresentado na secção 4.3.1.

As conclusões são apresentadas no capítulo 6 tal como o trabalho futuro.

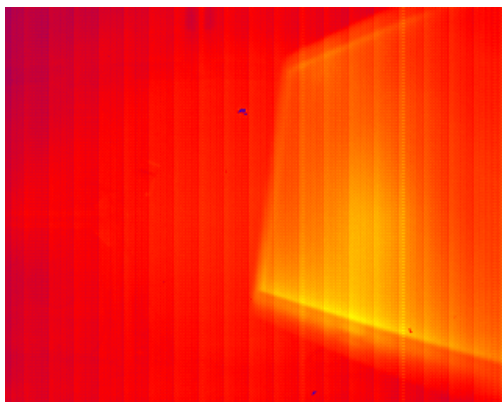
Capítulo 2

Introdução teórica

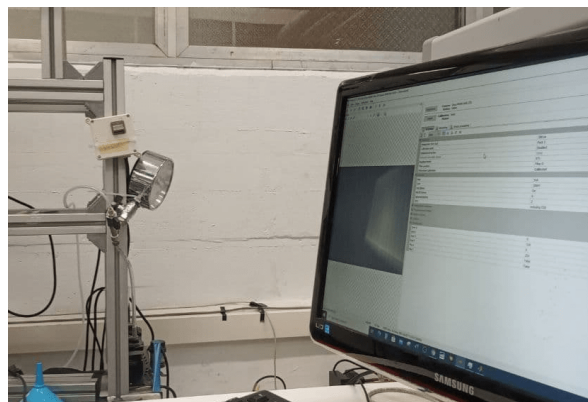
2.1 Termografia

A palavra termografia vem do grego, *term(o)*, que exprime calor, e do grego, *grafia*, que exprime escrita [16]. Esta técnica permite obter uma representação bidimensional de temperaturas a partir da radiação infravermelha. Comparativamente à fotografia, que capta radiação visível, a termografia permite obter imagens de uma cena, sendo que a imagem termográfica varia entre maior e menor radiação infravermelha que pode ser relacionada com o valor de temperatura.

A figura 2.1 mostra a mesma cena, fotografada com ambos os métodos. A maior parte dos elementos no fundo da imagem estão à mesma temperatura e têm emissividades semelhantes, logo não é possível distingui-los. O único objecto reconhecível na imagem termográfica é o ecrã do computador por estar a uma temperatura diferente da temperatura ambiente.



(a) Imagem termográfica ¹



(b) Imagem colorida

Figura 2.1: Comparação entre imagens coloridas e imagens termográficas

De modo a facilitar a compreensão do sinal, os valores de intensidade de cada píxel e a sua posição espacial podem ser representados por uma imagem ou uma superfície num gráfico de três dimensões. Como tal, a análise de uma imagem termográfica não se foca nas cores e contrastes apresentados nas imagens, mas nos valores quantitativos de cada píxel.

¹Note-se que a região com píxeis mais escuros na parte superior do termograma corresponde a um conjunto de píxeis com menor sensibilidade. Apesar da menor sensibilidade estes píxeis são sensíveis a variações do valor de radiação infravermelha. Como tal os tratamentos de termogramas propostos são eficazes para todos os píxeis do sensor.

Considerando a representação utilizando imagens, uma vez que os valores variam apenas numa componente, estas seriam monocromáticas. De forma a melhorar a percepção da informação são utilizadas *lookup tables*, que fazem a correspondência entre valores de intensidade e os valores da cor a aplicar. Ao utilizar uma *lookup table* com várias cores é possível aumentar o nível de contraste entre os valores apresentados, destacando os diferentes níveis de intensidade. No entanto como a percepção de contraste depende da intensidade luminosa, *lookup tables* com várias cores criam contrastes que não correspondem a diferenças significativas criando uma percepção errada da imagem [17]. A figura 2.2 compara várias *lookup tables* de cores e as respectivas variações de luminosidade. Apesar da *lookup table* arco-íris ter várias cores que se distinguem facilmente, a sua luminosidade não é proporcional ao valor quantitativo a representar, provocando uma interpretação errada das diferenças entre valores presentes nas imagens. Assim cores como o azul claro e escuro que tem grande contraste entre si, representam a mesma diferença de valores que o verde e o azul claro, com um contraste menor.

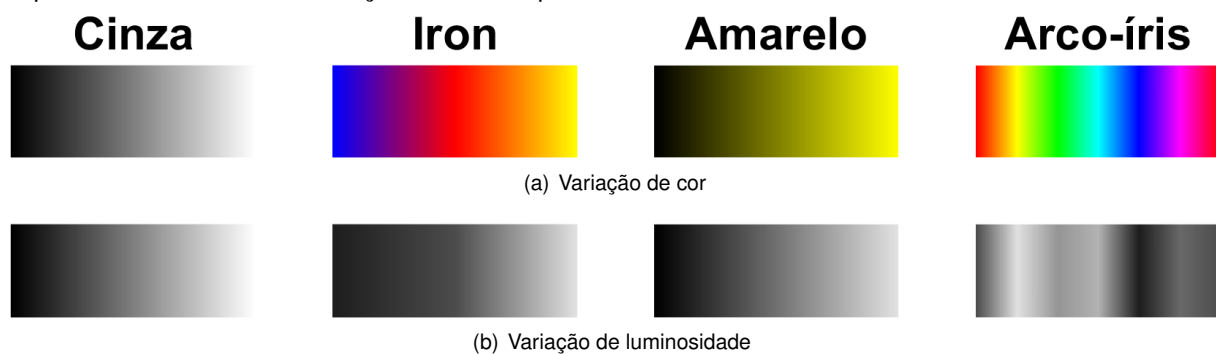


Figura 2.2: Variação de cor e luminosidade de várias *lookup tables*

Independentemente da escolha da *lookup table* é necessário ajustar os valores da gama de cores de modo a que não existam saturações ou eliminação do contraste. Para tal é necessário seleccionar os valores máximos e mínimos do sinal, escalando-os linearmente de forma a cobrir a gama de cores. Esta alteração é apenas cosmética, mas permite utilizar toda a gama de cores da *lookup table*. Como tal, as imagens termográficas serão acompanhadas de uma escala de modo a ser possível efectuar a correspondência entre os tons da imagem e o valor quantitativo representado.

2.2 Relação entre temperatura e radiação infravermelha

Todos os corpos a uma temperatura, T , acima de 0 K emitem radiação [18], com diferentes comprimentos de onda incluindo o espectro infravermelho. Como tal, é possível detectar os corpos através da radiação emitida. No entanto nem toda a radiação emitida por um corpo se deve à sua temperatura. A totalidade da radiação de um corpo divide-se nos seguintes componentes:

$$W = \alpha W + \gamma W + \tau W \quad (2.1)$$

Sendo W a radiação emitida pelo corpo, α a absorvidade correspondente à fracção de energia absorvida pelo corpo, γ reflectividade, a fracção de radiação reflectida e τ transmissividade, a fracção de radiação que atravessa o corpo.

Estes coeficientes variam entre 0 e 1, respeitando a seguinte igualdade:

$$1 = \alpha + \gamma + \tau \quad (2.2)$$

Quando $\alpha = 1$ e por consequência $\gamma = 0$ e $\tau = 0$, o corpo designa-se por corpo negro². Apesar de ser um caso idealizado, o corpo negro emite um valor de radiação sempre superior à de outro corpo com a mesma temperatura. A radiação emitida por um corpo para cada comprimento de onda é descrita pela lei *Planck* [18]:

$$I^n(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (2.3)$$

Com I^n a radiância do corpo negro, C_1 e C_2 a primeira e segunda constante universal de radiação, com os valores respectivos de $3,7418 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$ e $1,4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$ [18]. λ corresponde ao comprimento de onda em metros e T à temperatura absoluta. Tendo em conta a equação 2.3, uma porção significativa da radiação emitida por um corpo é radiação infravermelha [18], figura 2.3 onde as faixas verticais coloridas correspondem a radiação visível.

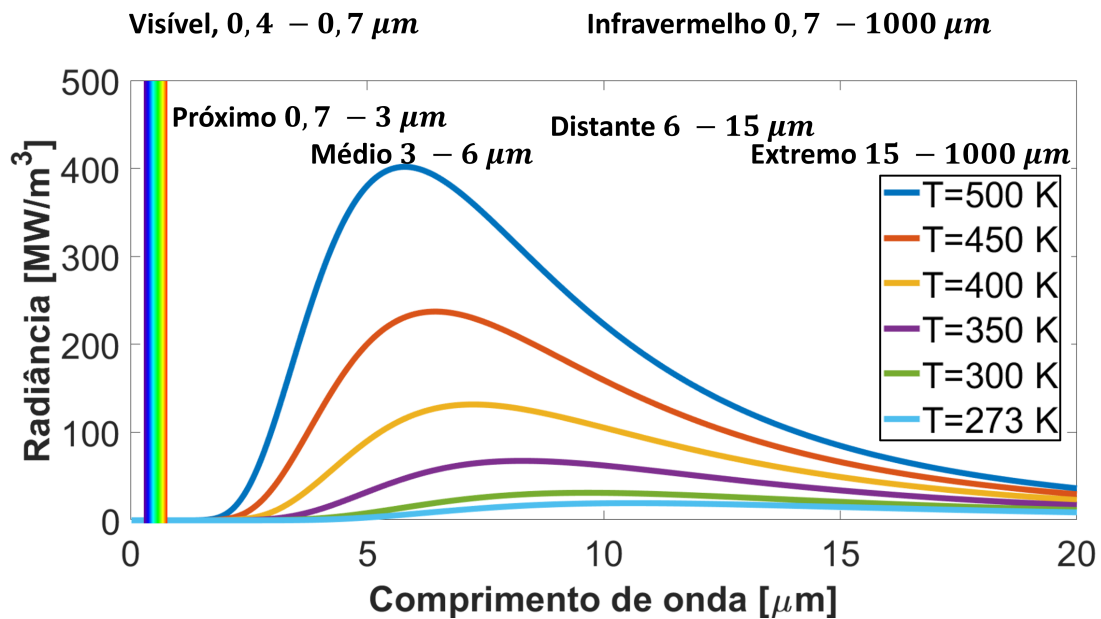


Figura 2.3: Radiação emitida por um corpo negro a diferentes temperaturas sendo a gama de radiação visível indicada pelo barra arco-íris à esquerda. Adaptado de [19, 20]

O espectro infravermelho pode ainda dividir-se em várias bandas com diferentes comprimentos de onda: infravermelho próximo³, $0,75 - 3 \mu\text{m}$, infravermelho médio⁴, $3 - 6 \mu\text{m}$, infravermelho distante⁵, $6 - 15 \mu\text{m}$ e infravermelho extremo⁶, $15 - 1000 \mu\text{m}$. A maioria das câmaras termográficas utiliza as bandas média e distante.

²black body

³near infrared

⁴middle infrared

⁵far or long infrared

⁶extreme infrared

Na maioria das situações a câmara encontra-se se uma distância da cena a captar. Como tal, a radiação atravessa parte da atmosfera, com uma transmissividade diferente para diferentes comprimentos de onda, como apresentado na figura 2.4. Caso a transmissividade seja de 100%, toda a radiação atravessa atmosfera, sem interferência na intensidade medida. Assim o sensor da câmara utilizada neste trabalho utiliza parte da gama média entre $3,6 - 4,9 \mu m$ (Anexo A) de modo medir radiação com o mínimo de interferência devido à transmissividade atmosférica [18].

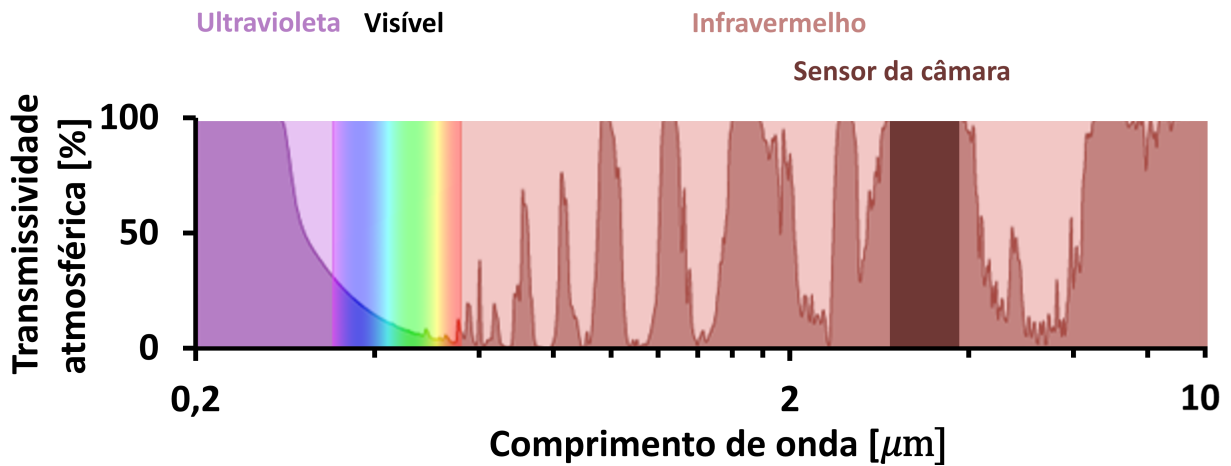


Figura 2.4: Transmissividade atmosférica adaptado de [21]

No caso do corpo negro, a radiação total emitida em função da temperatura é regida pela lei de *Stefan-Boltzmann*, que estabelece uma relação proporcional entre a radiação do corpo negro e a quarta potência da temperatura do corpo:

$$\Phi^n(T) = C_3 T^4 \quad (2.4)$$

Sendo Φ^n a potência radiante do corpo negro por unidade de área, C_3 a constante de *Stefan-Boltzmann* com o valor de $5,6704 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ e T a temperatura absoluta. Como as câmaras de infravermelhos apenas captam parte do espectro e como as cenas filmadas não correspondem a corpos negros, optou-se por utilizar uma função com a mesma forma que a lei de *Planck*, equação 2.3, como sugerido por Horny em 2003 [22]. A seguinte equação relaciona a potência radiante de um corpo com a sua temperatura:

$$\Phi(T) = \frac{R}{e^{B/T} - F} + O \quad (2.5)$$

Sendo T a temperatura absoluta e B , F , O e R constantes standardizadas⁷.

Uma vez que os corpos reais não emitem toda a radiação que emitiriam caso fossem um corpo negro, o rácio entre a radiação de um corpo negro e a radiação emitida por um corpo denominando-se por emissividade, \mathcal{E} .

⁷standardized constants

Tendo referido os princípios da radiação é possível efectuar o balanço da radiação que atinge o sensor da mesma forma que Horny em 2003 [22]:

$$\Phi_{medido} = \tau \mathcal{E} \Phi(T) + \tau(1 - \mathcal{E}) \Phi(T_{amb}) + (1 - \tau) \Phi(T_{atm}) \quad (2.6)$$

Sendo Φ_{medido} o fluxo de radiação medido pelo sensor. O primeiro termo, $\tau \mathcal{E} \Phi(T)$, corresponde à radiação do corpo que atravessa a atmosfera, o segundo termo, $\tau(1 - \mathcal{E}) \Phi(T_{amb})$, corresponde à radiação reflectida pelo meio envolvente, com T_{amb} a temperatura ambiente absoluta. O último termo, $(1 - \tau) \Phi(T_{atm})$ corresponde à radiação proveniente da atmosfera entre o sensor e o corpo a medir.

Utilizando a equação 2.5 e 2.6 é possível deduzir a equação da temperatura do corpo à semelhança de Horny em 2003 [22]:

$$T = \frac{B}{Ln \left(\frac{\Phi_{medido} - \tau(1 - \mathcal{E}) \Phi(T_{amb}) - (1 - \tau) \Phi(T_{atm})}{\mathcal{E} \tau} + F \right)} \quad (2.7)$$

Tendo em conta a equação 2.7, para calcular a temperatura é necessário determinar a emissividade do corpo, a transmissividade da atmosfera e as temperaturas da atmosfera e do meio envolvente.

2.2.1 Factor de forma

Previamente não foram consideradas as dimensões geométricas do corpo que emite radiação, nem a sua orientação e posição relativa ao sensor da câmara.

Como tal, é necessário considerar o factor de forma que quantifica a porção de radiação emitida por um corpo que atinge um outro corpo. Genericamente o factor de forma, F_{1-2} entre duas superfícies de dois elementos diferenciais, como os representados na figura 2.5 é calculado da seguinte forma[23]:

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi d^2} dA_1 dA_2 \quad (2.8)$$

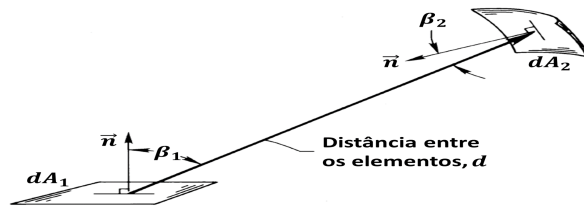


Figura 2.5: Balanço de radiação entre dois elementos diferenciais adaptado de [23]

Onde A se refere à área do elemento respectivo, β o ângulo entre a normal à superfície e a recta que liga ambos os elementos. d representa a distância entre ambos os elementos. Apesar da complexidade de formas possíveis, esta normalmente encontram-se tabeladas [23] não sendo necessário deduzir as fórmulas específicas.

Assumindo o sensor como uma placa quadrada que recebe radiação da cena, modelada como outra placa quadrada obtém-se o seguinte factor de forma [24]:

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi(w_1/H)^2} \left(\ln \frac{p}{q} + s - t \right) \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} p = ((w_1/H)^2 + (w_2/H)^2 + 2)^2 \\ q = (x^2 + 2)(y^2 + 2) \\ x = \frac{w_2 - w_1}{H} \\ y = \frac{w_2 + w_1}{H} \\ s = u \left(x \arctan \frac{x}{u} - y \arctan \frac{y}{u} \right) \\ t = v \left(x \arctan \frac{x}{v} - y \arctan \frac{y}{v} \right) \\ u = \sqrt{x^2 + 4} \\ v = \sqrt{y^2 + 4} \end{cases}$$

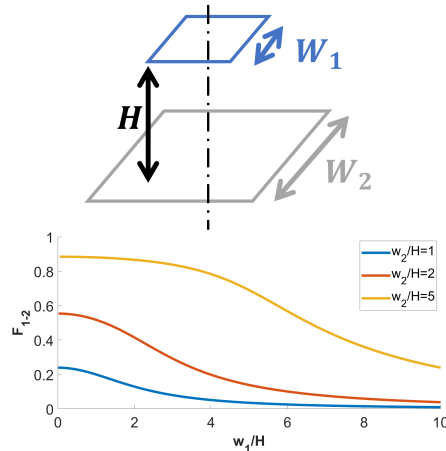


Figura 2.6: Factor de forma de duas placas coaxiais quadradas paralelas

Sendo w_1 a dimensão lateral do quadrado 1, w_2 a dimensão do segundo e H a distância entre as placas. A figura 2.6 apresenta o esquema da configuração e a evolução do factor de forma para diferentes rácios das várias dimensões.

Uma vez que vários destes parâmetros estão relacionados com a distância da cena à câmara e que a câmara não tem um sensor quadrangular, para este trabalho será registada a evolução do factor de forma em função da distância do corpo à câmara. Assim ao realizar medições o factor de forma poderá ser obtido a partir da distância e utilizando uma curva ajustada experimentalmente (ver secção 2.3.6).

2.3 Câmara de infravermelhos

Após descrever os princípios teóricos aplicáveis a diferentes câmaras termográficas, esta secção foca-se na sua aplicação à câmara *Onca-MWIR-InSb-320*, da *Xeneth* (Anexo A), utilizada neste trabalho.

O sensor da câmara tem uma resolução máxima de 320 por 256 píxeis, sendo que o IRFPA tem sensores de um composto cristalino de antimónio, *In* e índio, *Sb*⁸, (*InSb*). Devido ao material utilizado no sensor este necessita de ser arrefecido até baixas temperaturas, 80 K. Esta temperatura é atingida utilizando um motor Stirling⁹.

A resolução do conversor de analógico para digital é de 14 *bits*. No entanto para guardar as imagens é necessário utilizar 16 *bits*. O preenchimento dos dois *bits* em falta é efectuado de diferentes formas dependentes do software. No caso do *Matlab*, a imagem é convertida para 16 *bits* adicionando dois *bits* com o valor 0 na posição mais significativa. Desta forma a escala de valores possíveis varia entre 0 e $2^{14} - 1 = 16383$ unidades de conversão de analógico para digital (*analog to digital units* - ADU). O *software* da câmara, *Xeneth*, tem a opção de guardar o valor com os *bits* alinhados à esquerda ou à direita. Dependendo do método de ligação da câmara, os valores registados tem os dois *bits* adicionados em posições diferentes. Para converter entre os formatos diferentes basta dividir ou multiplicar por quatro.

⁸ Indium antimonide

⁹ Stirling engine

Um dos parâmetros ajustáveis da câmara é o tempo de integração¹⁰, análogo ao tempo de exposição de uma câmara fotográfica como referido por Horny em 2003 [22]. Ao aumentar o tempo de integração, a quantidade de radiação captada pelo sensor aumenta resultando num valor de ADU mais elevado. No entanto se este parâmetro for demasiado elevado os valores obtidos pelo sensor irão saturar, impedindo a análise da imagem. Para além do valor quantitativo, o tempo de exposição afecta a frequência de amostragem dos termogramas¹¹ a obter, visto que entre cada imagem tem de decorrer o tempo de integração. Como tal, o tempo de integração deve ser ajustado de forma a que os valores a obter não saturam os sensores e que possibilite a velocidade de filmagem desejada.

A câmara possui uma opção *anti-bloom*. O efeito de *bloom*, imagem queimada, ocorre quando uma área do sensor satura e provoca a saturação dos píxeis circundantes ao transbordar o valor saturado. Uma vez que esta opção altera os valores medidos utilizando um algoritmo desconhecido optou-se por desactiva-la para obter o sinal com um menor nível de processamento.

O sensor da câmara possui ainda um ganho e viés ajustáveis. Caso seja omitido os valores utilizados são de $3nA$ para o viés e $180nV$ para o ganho. A escolha e influência destes parâmetros são analisadas no anexo B.

É necessário ligar a câmara a um computador de modo a obter informação. A figura 2.7 ilustra o fluxo de informação entre as diferentes partes.

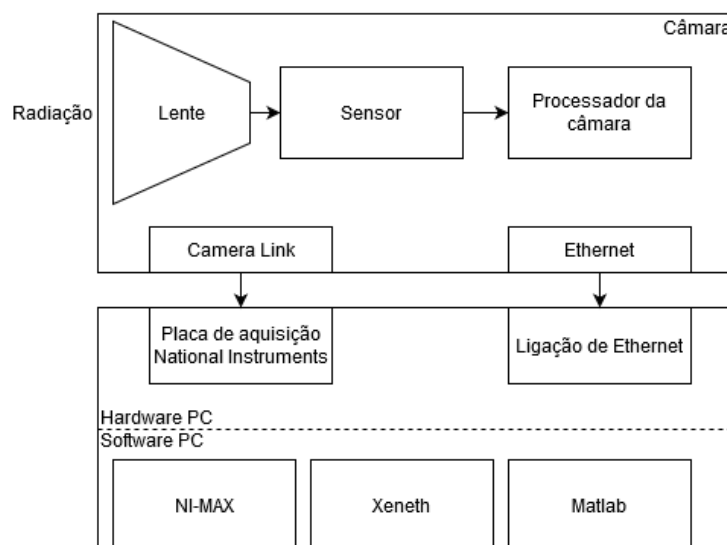


Figura 2.7: Fluxo de informação entre a câmara e o computador

A radiação utilizada pela câmara para gerar a imagem atravessa primeiro a lente sofrendo distorções (ver secção 2.3.3). Após o sensor existe uma conversão da intensidade da radiação para um valor numérico digital (Anexo B). A informação gerada é depois tratada pelo processador da câmara que consoante o pacote de calibração utilizado efectua um tratamento da informação do sensor gerando o termograma. As distorções da lente e a conversão de sinal analógico para digital, com uma profundidade dependente do modelo, ocorrem na maioria das câmaras. No entanto a aplicação do pacote de calibração depende do modelo da câmara bem como do *software* de ligação. No caso da câmara

¹⁰ integration time

¹¹ framerate

Onca-MWIR-InSb-320, o software *Xeneth* permite seleccionar um pacote de calibração, mas é também possível seleccionar um pacote sem informação, retirando assim parte do processamento. Os pacotes de calibração, criado pelo fabricante da câmara, permitem obter termogramas com menos ruído, sendo que cada pacote tem uma gama de temperaturas associadas.

A ligação ao computador pode ser efectuada de duas formas: *Camera link* ou com um cabo *ethernet*. No caso da ligação *Camera link*, a informação é ainda processada pela placa de aquisição *National Instruments* antes de ser enviada para o software.

É necessário conhecer estas camadas de processamento da câmara, pois cada camada pode criar alterações ao sinal. Uma vez que o sinal captado pelos vários softwares: *NI-MAX*, *Xeneth* e *Matlab* é idêntico (Anexo C) assume-se que os artefactos visuais presentes na imagem não são criados pelo software utilizado ou método de ligação.

2.3.1 Comportamento dinâmico

Para além de obter imagens, a câmara termográfica utilizada permite obter vídeos de alta velocidade. A frequência de amostragem varia consoante dois factores principais: o tempo de integração e a região de interesse (*region of interest* - RoI). Como referido na secção 2.3, o tempo de integração limita a frequência de amostragem por definir o tempo de exposição do sensor. Ao alterar a dimensão da região de interesse, varia também a quantidade de informação a transmitir entre a câmara e o dispositivo de aquisição, alterando a frequência de termogramas obtida.

Focando a análise no comportamento do sensor é necessário analisar o seu comportamento não apenas em função da radiação a que é exposto, mas também às variações em função do tempo. No caso de estas variações serem demasiado grandes o valor do sensor pode não ser de confiança. Para verificar este comportamento foi utilizada uma imagem de referência com um corpo negro em frente à lente de modo a que o sensor fosse exposto ao mesmo nível de radiação durante a medição. A figura 2.8 apresenta o valor do desvio-padrão do sensor com um tempo de integração de $280 \mu s$ sendo apresentada como uma superfície, figura 2.8(a), e como uma imagem, figura 2.8(b).

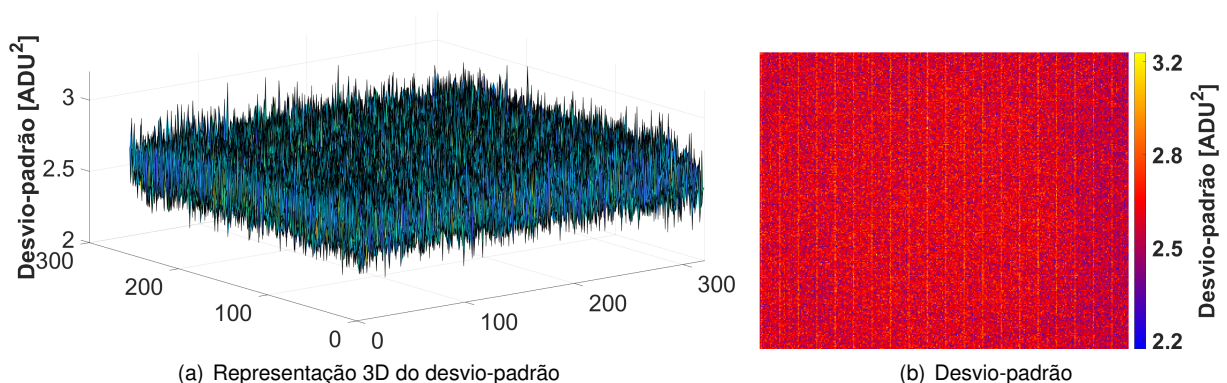


Figura 2.8: Valores de desvio-padrão

Uma vez que os valores obtidos nestas condições são da ordem de $10^3 ADU$, os valores de desvio-padrão são aceitáveis, considerando-se que o IRFPA não sofre desvios significativos quando exposto a valores constantes de radiação.

2.3.2 Modelação do sensor

Focando a análise do sensor ao nível de cada píxel, os sensores individuais recebem um fluxo luminoso e em função desse fluxo produzem uma diferença de potencial que é depois quantificada pelo processador da câmara. A função que modela este comportamento deve seguir duas propriedades referidas por Shi et al. em 2005 [9]:

- A função deve ser monótona crescente em relação à radiação incidente.
- A curva típica da função deverá ter a forma de S, figura 2.9(a), especialmente quando considerada uma grande gama de valores.

Uma vez que um modelo não linear pode ser computacionalmente pesado, é possível linearizar o modelo do sensor se a gama de valores considerados for suficientemente pequena. A figura 2.9(b) apresenta os diferentes tipos de sensores.

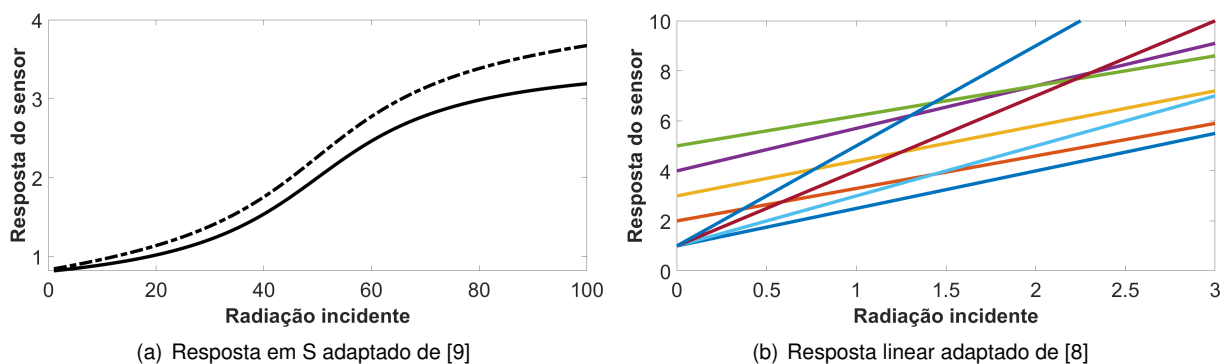


Figura 2.9: Funções teóricas de resposta dos sensores

Note-se que esta resposta não é uniforme ao longo dos vários píxeis. Como tal, é gerado um ruído com padrões¹² que pode ser minimizado com calibrações ou outras técnicas de análise de imagem. Apesar de não ser possível determinar a origem deste ruído, os modelos de sensores como o proposto por Perry e Dereniak em 1993 [7] assumem que para o mesmo nível de radiação a resposta de cada sensor é diferente. A figura 2.10 apresenta o ruído obtido com a câmara utilizada neste trabalho.

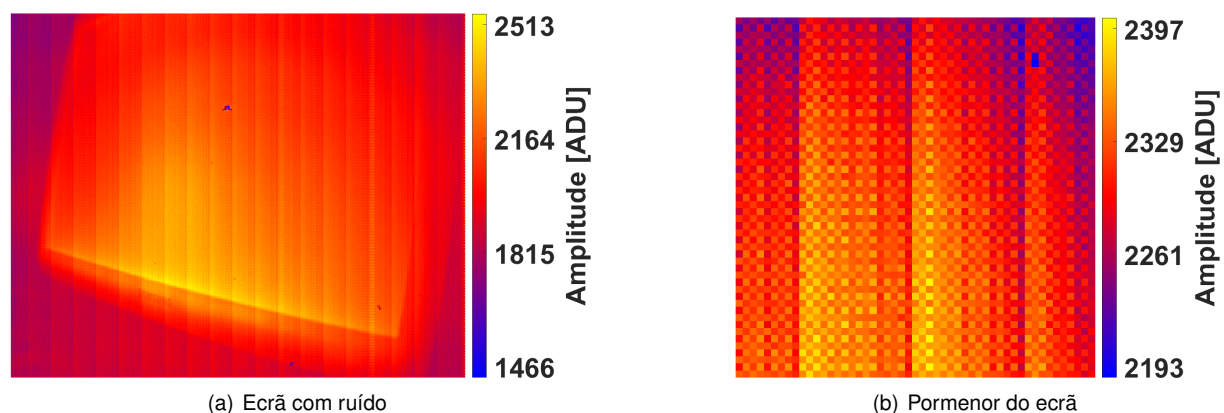


Figura 2.10: Ruído não uniforme

¹²*patterned noise*

Este ruído tem uma amplitude semelhante para diferentes níveis de radiação. Como tal, ao fazer medições com objectos com temperaturas próximas da temperatura ambiente e por consequência com valores de ADU mais reduzidos, figura 2.11(a), este será mais visível que para cenas onde os valores de ADU sejam mais elevados, 2.11(b).

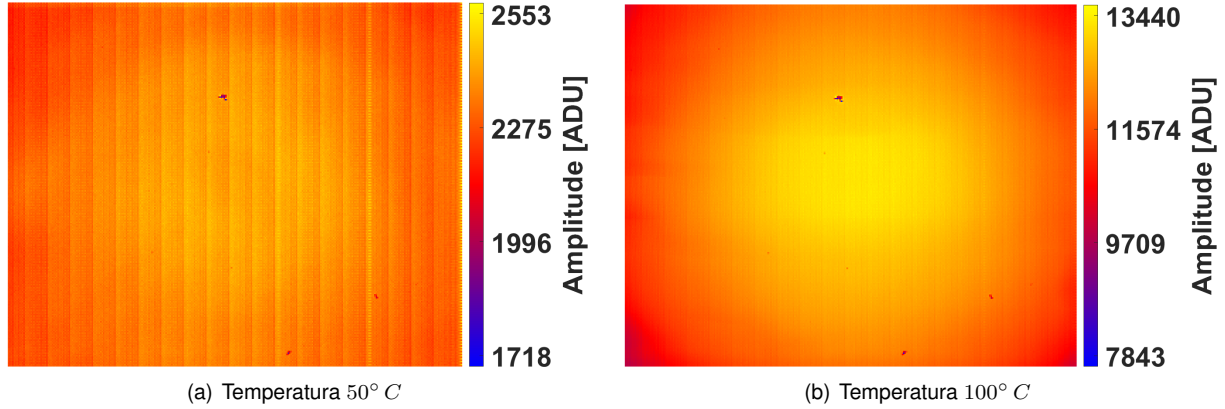


Figura 2.11: Prevalência do ruído face à radiação uniforme de um corpo negro

2.3.3 Calibração geométrica

A existência de uma lente na câmara provoca distorções na imagem. A calibração geométrica permite obter os parâmetros da câmara necessários para remover estas distorções obtendo a imagem corrigida.

Uma das componentes da distorção da lente é a distorção radial, equação 2.10, que varia em função da distância ao centro óptico da lente [25].

$$x_{distorcido} = x(1 + s_1r^2 + s_2r^4 + s_3r^6) \quad (2.10)$$

$$y_{distorcido} = y(1 + s_1r^2 + s_2r^4 + s_3r^6)$$

Sendo x e y as coordenadas normalizadas na imagem, ou seja com o referencial no centro óptico da imagem e divididas pela respectiva distância focal¹³ f_x ou f_y . r corresponde à distância ao centro dada por $\sqrt{x^2 + y^2}$. Os coeficientes s_1 , s_2 e s_3 correspondem aos coeficientes de distorção radial.

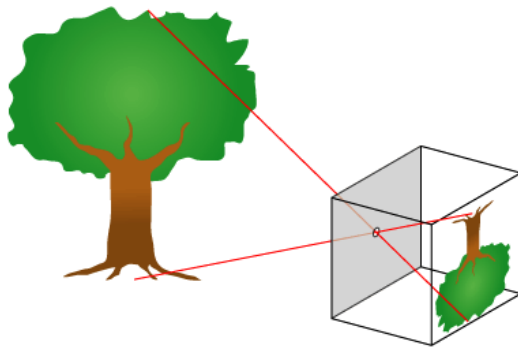
Para além desta distorção, a lente pode não estar paralela ao sensor provocando uma distorção tangencial, equação 2.11 [25].

$$x_{distorcido} = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + x^2)] \quad (2.11)$$

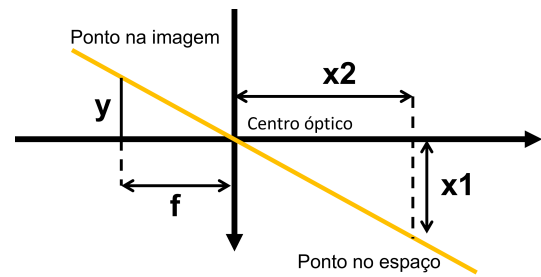
$$y_{distorcido} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy]$$

Onde p_1 e p_2 são os coeficientes de distorção tangencial.

¹³focal distance



(a) Modelo de câmara estenopeica retirado de [26]



(b) Distância focal adaptado de [27]

Figura 2.12: Modelo de câmara estenopeica

Após a luz atravessar a lente, a câmara em si pode ser modelada como uma câmara estenopeica¹⁴, como a representada na figura 2.12(a). Este modelo é caracterizado pelo centro óptico¹⁵, definido como a intersecção do eixo óptico¹⁶ com o plano da imagem. A sua localização pode ser expressa por duas coordenadas, c_x e c_y . Para além deste ponto existe um rácio, a distância focal, f de cada eixo, que relaciona a distância real, x_1 , a distância na imagem y e a distância do ponto ao centro óptico x_2 como esquematizado na figura 2.12(b), que respeita a seguinte equação [25]:

$$y = f \frac{x_1}{x_2} \quad (2.12)$$

Para a calibração geométrica foi utilizado um padrão axadrezado para distâncias de 40 cm , 60 cm e 80 cm , no qual os quadrados brancos são de uma material reflector e os quadrados pretos tem uma reflectividade menor. Assim colocando uma fonte de radiação a incidir sobre o padrão é possível obter o contraste necessário para calibrar a câmara. Os quadrados do padrão têm a mesma dimensão lateral de 18 mm . De modo a facilitar a identificação do padrão o número de quadrados nas duas dimensões é diferente, de acordo com as instruções de [29].

Para distâncias menores, de 5 cm e 10 cm foi utilizado uma placa com orifícios dispostos com a forma de um hexágono com a mesma distância entre eles. O contraste entre orifício e o objecto foi obtido colocando o objecto de calibração entre a câmara e uma placa aquecida. Todos os orifícios distam de $3,96\text{ mm}$ entre si, sendo o padrão definido pelos centros de cada orifício.

Devido ao ruído existente foi necessário aplicar uma calibração de deslocamento (secção 2.3.4) para detectar o padrão de calibração. Na figura 2.13 observa-se a diferença entre a imagem sem correcção, figura 2.13(a) e a imagem com correcção 2.13(b). Esta operação alterou os valores quantitativos da imagem, mas sem prejuízo para calibração geométrica, visto que apenas a localização dos pontos é relevante e não o seu valor.

Para obter as imagens de calibração foi utilizada a mesma distância entre o padrão e a câmara de forma a manter o padrão focado na imagem. As várias imagens incluem o padrão nas várias partes do ecrã de forma a obter uma calibração abrangente.

¹⁴Do grego *stenos*, estreito e *opé*, abertura[28]. Em inglês, *Pinhole model*

¹⁵*optical center*

¹⁶*optical axis*



Figura 2.13: Comparação de imagens para a calibração geométrica

Para obter os parâmetros da câmara utilizou-se a *camera calibration app*¹⁷ do *software Matlab*. Para o cálculo dos parâmetros o *software* detecta inicialmente os pontos do padrão axadrezado nas várias imagens. No caso do padrão com orifícios, a localização dos pontos utiliza um método de detecção de círculos ajustado ao padrão específico (anexo D). Depois assumindo um modelo da câmara estenopeica sem lente, calcula os parâmetros da câmara, o centro óptico e as distâncias focais. Após obter uma primeira aproximação dos parâmetros é utilizado o método dos mínimos quadrados não linear, com o algoritmo *Levenberg–Marquardt*, para obter o valor de todos os parâmetros incluindo a distorção da lente [29].

A calibração permite obter os parâmetros da tabela 2.1. As figuras 2.14 e 2.15 mostram o deslocamento em píxeis de cada ponto entre a imagem original e a imagem não corrigida. Note-se que foram utilizados cinco conjuntos de imagens com focagem e distância ao objecto de calibração diferentes, uma vez que a câmara é utilizada para cenas a distâncias diferentes.

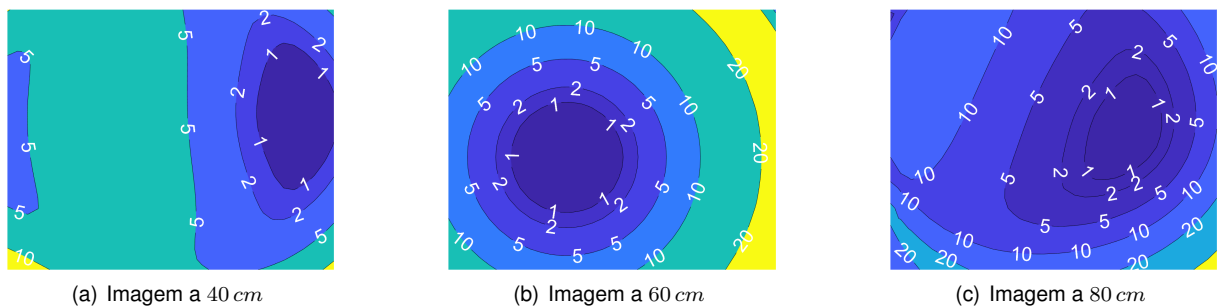


Figura 2.14: Distorção da lente em píxeis, padrão axadrezado



Figura 2.15: Distorção da lente em píxeis, padrão com orifícios

¹⁷Aplicação de calibração de câmara

Tabela 2.1: Propriedades geométrica da câmara

Distância [cm]	s_1	s_2	s_3	p_1	p_2	c_x	c_y	f_x	f_y
5	-0,4492	-1,946	8,613	-0,0129	0,0124	135	152	632	633
10	-0,6428	0,9330	-3,1983	0,0093	-0,0120	175	120	539	541
40	-0,344	-0,921	1,47	-0,0057	-0,1003	287	151	480	506
60	-0,6445	0,8377	-0,7810	-0,0406	-0,0520	226	151	372	359
80	-4,6	9,43	177	0,136	-0,307	234	135	1155	1096

2.3.4 Correção da não-uniformidade

A calibração térmica tem como objectivo aferir a relação entre os níveis de radiação recebidos pelo IRFPA e a temperatura do corpo que emite a radiação. Devido ao ruído observado é necessário uniformizar a resposta da câmara para que quando o sensor é exposto ao mesmo nível de radiação a resposta seja também uniforme. A correspondência entre o valor do sinal e o valor de temperatura será tratada na secção 2.3.5.

Para proceder à uniformização da imagem são necessárias imagens de referência. Para tal foram obtidas imagens de um corpo negro a uma temperatura uniforme e com um tempo de integração de $280 \mu s$ como descrito no anexo E.

Modelando o sensor com uma função linear obtém-se [8]:

$$V_{i,j}(\Phi) = G_{i,j}\Phi + Q_{i,j} \quad (2.13)$$

Sendo $V_{i,j}$ a resposta do sensor individual i, j em ADU de dimensões M por N . G o ganho do sensor individual e Q um viés constante independentes de Φ . Para obter uma leitura uniforme é necessário que a seguinte condição se verifique:

$$V_{i,j}(\Phi_k) = \bar{V}(\Phi_k) \quad (2.14)$$

Sendo o valor médio definido por:

$$\bar{V}(\Phi_1) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1, j=1}^{M, N} V_{i,j}(\Phi_1) \quad (2.15)$$

Utilizando uma correcção linear, os seus parâmetros são descritos por:

$$Y_{i,j} = K_{i,j}V_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.16)$$

Com $Y_{i,j}$ o valor corrigido, $K_{i,j}$ o ganho e $b_{i,j}$ o viés.

No caso de uma correcção de deslocamento, as equações 2.14 e 2.16 são aplicadas apenas a uma referência sendo que a correcção dada pela seguinte equação:

$$Y_{i,j}(V_{i,j}) = V_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.17)$$

Com o viés, $b_{i,j}$ dado por:

$$b_{i,j} = \bar{V}(\Phi_k) - V_{i,j}(\Phi_k) \quad (2.18)$$

Com k sendo o índice da referência escolhida. Este método permite obter uma calibração uniforme apenas para um valor de radiação, ao fazer passar todos os valores dos sensores pelo mesmo ponto, figura 2.16(a).

Para a correcção de dois pontos o princípio é o mesmo, mas aplicado a duas referências diferentes, figura 2.16(b). O sistema de equações obtido a partir das equações 2.14 e 2.16 é o seguinte:

$$\begin{cases} \bar{V}(\Phi_1) = Y_{i,j}(\Phi_1) = K_{i,j}V_{i,j}(\Phi_1) + b_{i,j} \\ \bar{V}(\Phi_2) = Y_{i,j}(\Phi_2) = K_{i,j}V_{i,j}(\Phi_2) + b_{i,j} \end{cases} \quad (2.19)$$

Resolvendo o sistema de equações obtém-se as seguintes constantes para cada sensor:

$$\begin{cases} K_{i,j} = \frac{\bar{V}(\Phi_2) - \bar{V}(\Phi_1)}{V_{i,j}(\Phi_2) - V_{i,j}(\Phi_1)} \\ b_{i,j} = \bar{V}(\Phi_2) - K_{i,j}V_{i,j}(\Phi_2) = \bar{V}(\Phi_2) - \frac{\bar{V}(\Phi_2) - \bar{V}(\Phi_1)}{V_{i,j}(\Phi_2) - V_{i,j}(\Phi_1)} V_{i,j}(\Phi_2) \end{cases} \quad (2.20)$$

Com esta correcção obtém-se um resultado uniforme para todos os pontos uma vez que os sensores são idealizados como lineares. Caso os sensores não sejam completamente lineares o resultado obtido será uniforme apenas para os pontos utilizados como referência, Φ_1 e Φ_2 .

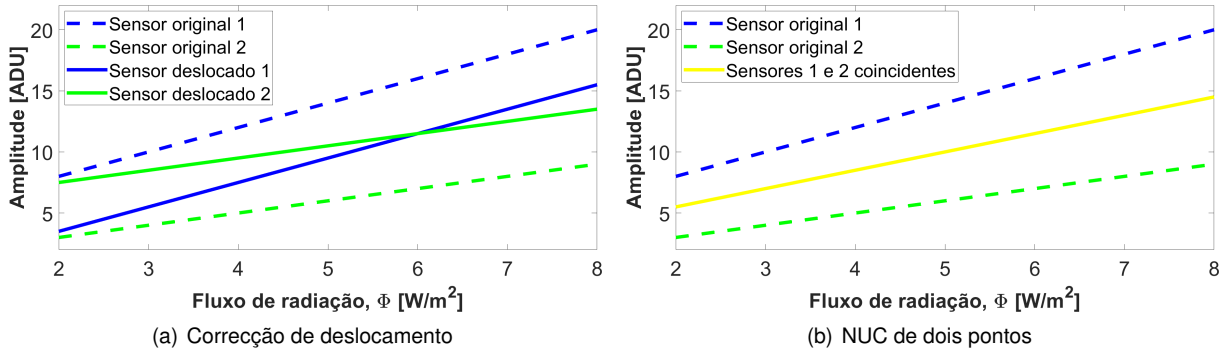


Figura 2.16: Esquema de implementação de correcção não uniforme adaptado de [8]

Utilizando o mesmo raciocínio que para a correcção de dois pontos é possível dividir o intervalo de valores em várias partes e utilizar correcções lineares para cada. Genericamente obtém-se:

$$\begin{cases} K_{i,j}^n = \frac{\bar{V}(\Phi_{n+1}) - \bar{V}(\Phi_n)}{V_{i,j}(\Phi_{n+1}) - V_{i,j}(\Phi_n)} \\ b_{i,j}^n = \bar{V}(\Phi_{n+1}) - K_{i,j}^n V_{i,j}(\Phi_{n+1}) \\ Y_{i,j}(\Phi) = K_{i,j}^n V_{i,j}(\Phi) + b_{i,j}^n, \Phi_n \leq \Phi \leq \Phi_{n+1} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$(2.22)$$

Utilizando as constantes determinadas anteriormente é possível aplicar os três tipos de NUC às várias imagens de calibração e comparar o desvio entre elas. Para simplificar a notação nas figuras seguintes, as correcções serão referidas por NUC1, NUC2 e NUC3, em função do número de referências utilizadas. A figura 2.17 apresenta os vários perfis longitudinais das várias imagens de referências com os vários tratamentos.

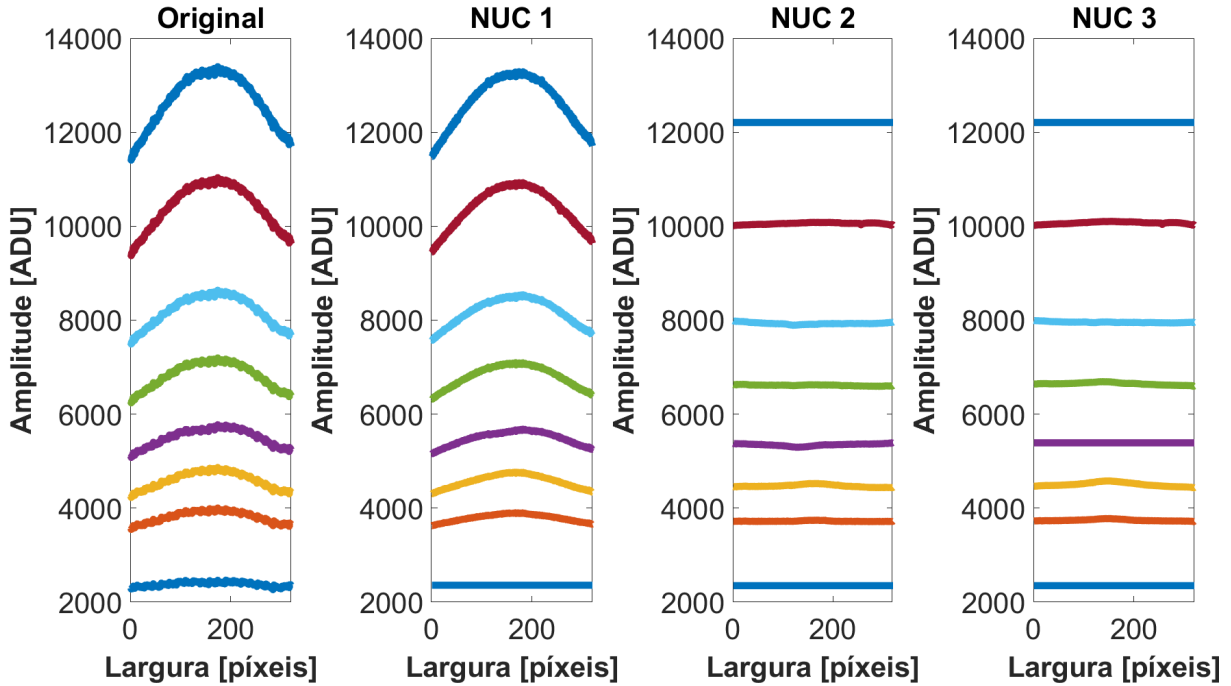


Figura 2.17: Perfis de calibração térmica

Como esperado as várias correcções obtêm perfis rectilíneos para as imagens utilizadas como referência. A correcção de deslocamento reduz a não-uniformidade nas temperaturas mais próximas da temperatura de calibração, $20^{\circ} C$, mas ao afastar-se da temperatura de referência a curvatura do perfil aumenta. As correcções com múltiplos pontos conseguem manter os perfis com pouca curvatura por utilizarem referências em ambos os extremos. $20^{\circ} C$ e $110^{\circ} C$ para a correcção de dois pontos e $20^{\circ} C$, $90^{\circ} C$ e $110^{\circ} C$ para a correcção de três pontos. Para complementar a análise visual utilizou-se o seguinte índice utilizado por Sheng et al. em 2011 [8]:

$$UN = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [y_{i,j} - \bar{y}_{i,j}]^2}{M \times N}} \quad (2.23)$$

Sendo UN a medida da não-uniformidade, que se pretende minimizar para reduzir a não-uniformidade.

A figura 2.18 apresenta a evolução deste índice para as várias referências de temperatura. Como esperado o comportamento deste índice reflecte a curvatura das imagens corrigidas. No caso da correcção de deslocamento existe uma melhoria face ao original, mas inferior à melhoria das outras correcções. Comparando as correcções de dois e três pontos, ambas têm valores semelhantes excepto para a referência central utilizada na correcção de três pontos onde o de não-uniformidade se anula. Uma vez que a correcção de dois pontos apresenta bons resultados e é mais simples que a correcção de três pontos, optou-se por utilizar esta correcção para os tratamentos seguintes.

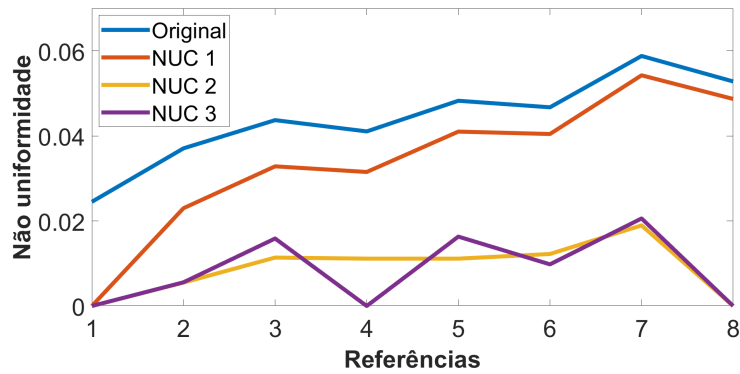


Figura 2.18: Valor de não-uniformidade para diferentes imagens de referência

Uma vez que a câmara termográfica utiliza diferentes tempos de integração que podem não corresponder aos tempos de integração utilizados para as imagens de referência, é necessário relacionar o ganho e viés do IRFPA com o tempo de integração. Para tal foram obtidas imagens de referência para vários tempos de integração a três temperaturas diferentes. Utilizaram-se imagens uniformes obtidas como descrito no anexo F, à temperatura de $20^{\circ}C$ e $70^{\circ}C$ para referências do NUC de dois pontos. A terceira referência obtida a $40^{\circ}C$ foi utilizada para avaliar a correcção.

Para simplificar a relação entre o ganho e viés, bidimensionais, com o tempo de integração, calculou-se o valor médio das grandezas bidimensionais e procedeu-se ao ajuste dos dados experimentais. A figura 2.19 apresenta os valores de referência de ganho médio, figura 2.19(a), e os valores de referência de viés médio, figura 2.19(b), bem como a recta ajustada aos dados experimentais.

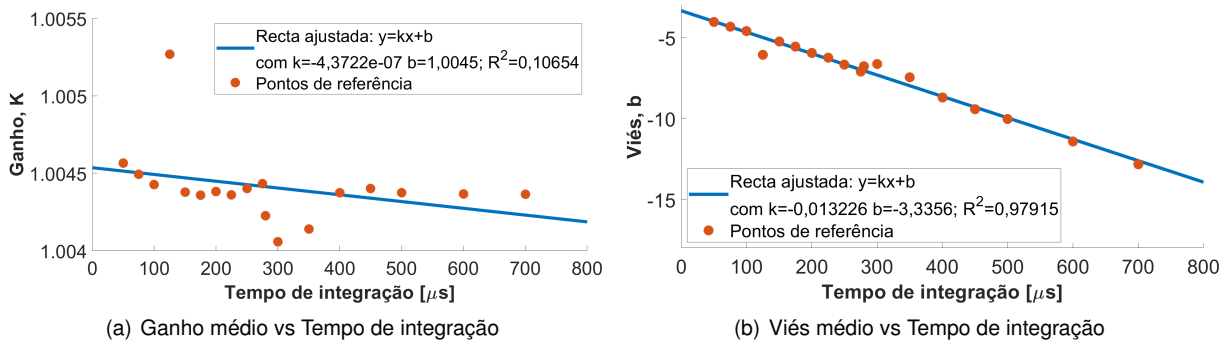


Figura 2.19: Variação do ganho e viés médio face ao tempo de integração, obtidos com a configuração apresentada no anexo F

Os valores de ganho tem uma variação inferior a 1% face ao tempo de integração. No entanto o viés varia linearmente com o tempo de integração. Como tal, é possível interpolar os valores de ganho e viés para os diferentes tempos de integração. Para averiguar a qualidade da interpolação foi calculada a não-uniformidade para cada imagem com os ganho e viés obtidos para o tempo de integração da imagem e com o ganho e viés obtidos através da interpolação. A figura 2.20 apresenta os valores de não-uniformidade, calculados com a equação 2.23, sendo o valor original a imagem não tratada, NUC2 o valor não interpolado, e NUC2 interpolação os valores obtidos com ganho e viés interpolados.

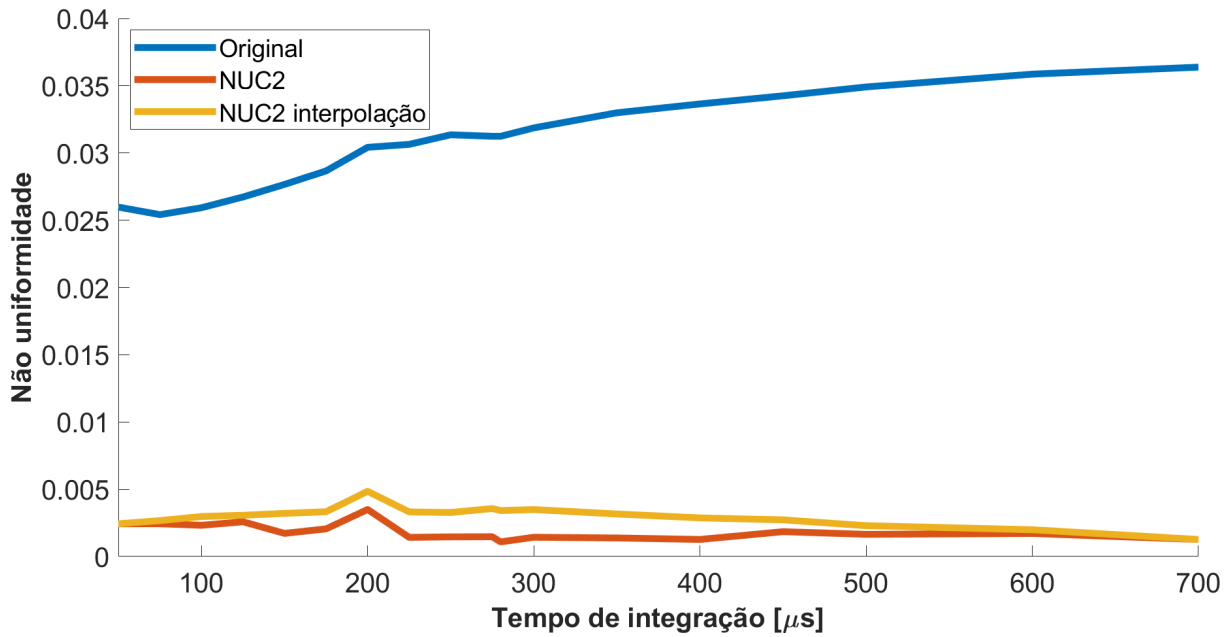


Figura 2.20: Valor de não-uniformidade para diferentes tempos de integração

Como esperado as imagens corrigidas apresentam valores de não-uniformidades inferiores, com a correcção obtida por interpolação com valores ligeiramente maiores. Isto deve-se ao facto de os ganhos e vieses interpolados não serem perfeitamente ajustados. No entanto os valores interpolados apresentam valores de não-uniformidade próximos dos valores obtidos com o NUC2. A figura 2.21(a) apresenta um gráfico de 3 dimensões onde é possível observar a não-uniformidade da imagem original, contrastando com as imagens tratadas que são representadas com uma superfície quase plana. A figura 2.21(b) apresenta apenas as imagens tratadas para permitir observar as diferenças entre os tratamentos. A parte central de ambas as imagens é semelhante, verificando-se diferenças no canto inferior esquerdo onde a intensidade na imagem tratada é ligeiramente superior à tratada sem interpolação.

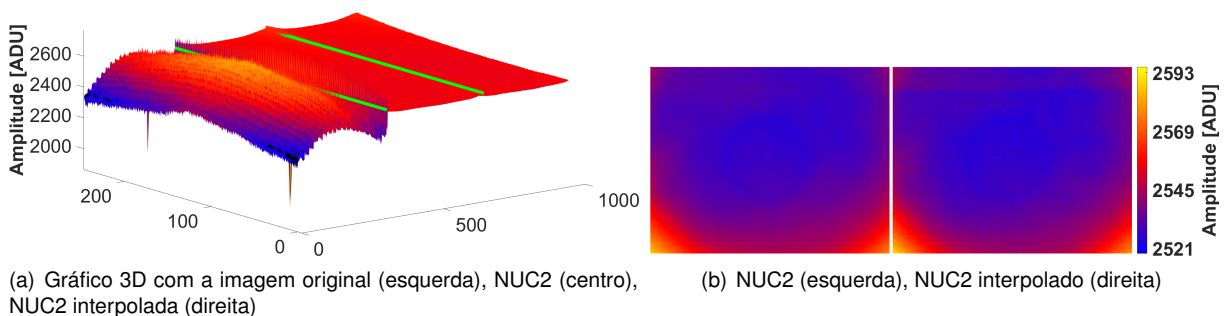


Figura 2.21: Correção de não-uniformidade para tempo de integração de 200 μs

Posto isto é possível efectuar a uniformização das imagens quer para os tempos de integração utilizados para as imagens de referência, quer para tempos de integração intermédios. Note-se que esta generalização é válida para valores sem saturação do sensor da câmara.

2.3.5 Calibração térmica - Conversão de radiação para temperatura

Após a uniformização os termogramas têm como unidades ADU. Como referido na secção 2.2 é necessário calcular as várias constantes estandardizadas utilizadas na equação 2.7 para obter valores de temperatura.

Como os valores de referência foram obtidos com um corpo semelhante a um corpo negro, a emissividade é por definição, $\varepsilon = 1$. Definida a distância entre o corpo negro e a câmara como a distância de referência têm-se que $\tau = 1$ [22]. Assim e substituindo Φ_{medido} pelo valor medido em ADU a equação 2.7 é simplificada para:

$$T = \frac{B}{\text{Ln} \left(\frac{R}{\Phi_{medido} - O} + F \right)} \quad (2.24)$$

Utilizando o método dos mínimos quadrados não linear para ajustar a equação aos dados experimentais obtém-se as seguintes constantes, com $R^2 = 0.9998$:

$$\begin{cases} B = 3451 \\ R = 8,616 \times 10^7 \\ O = 1639 \\ F = 1 \end{cases}$$

Note-se que se ajustou a função $\Phi = g(T) = \frac{R}{\exp(B/T-F)-O}$ em vez de $T = g(\Phi)$, para contornar o logaritmo de números negativos que interromperia a rotina de ajuste. Tal como em Horny em 2003 [22], assumiu-se que $F = 1$, de modo a reduzir o número de graus de liberdade. A figura 2.22 apresenta a curva obtida e os pontos utilizados para a calibração.

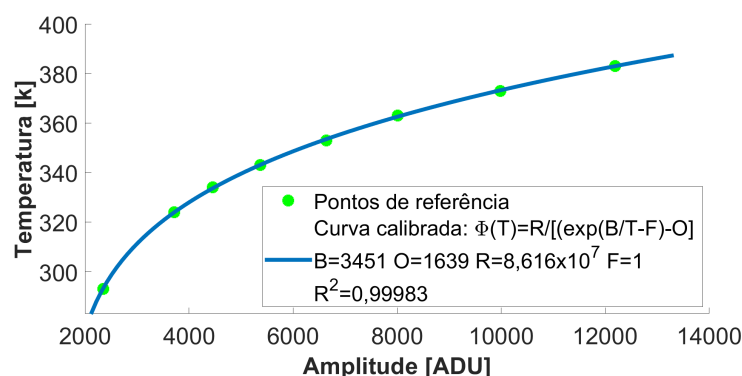


Figura 2.22: Relação de temperatura e valor dos sensores

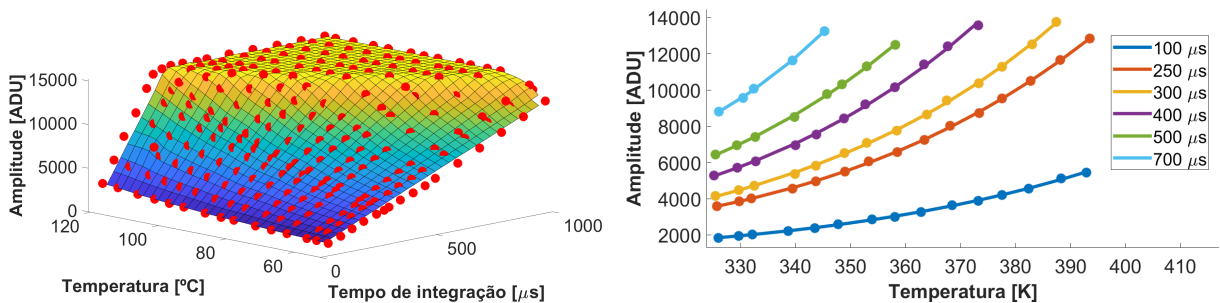
Note-se que esta calibração é apenas válida para o tempo de integração de $280 \mu s$.

Tendo obtido a relação entre radiação e temperatura para um tempo de integração específico, repetiu-se o processo para diferentes tempos de integração. De forma a agilizar o processo utilizou-se como referência o mesmo corpo negro, mas com uma posição fixa, sem cobrir todo o sensor. O corpo negro posicionou-se de forma a emitir radiação na região do sensor com ganho unitário (secção 2.3.4).

A segmentação das imagens procedeu-se de forma semelhante à descrita no anexo E, segmentando a imagem com base no valor de intensidade, seguida de erosão de modo a retirar as bordas do corpo negro.

Os pontos experimentais obtidos inserem-se numa gama de temperaturas entre $50^{\circ}C$ e $125^{\circ}C$ e tempos de integração entre $50\ \mu s$ e $1000\ \mu s$. Uma vez que para o mesmo valor de temperatura, o aumento do tempo de integração provoca um aumento do valor de ADU medido, a maioria dos valores para tempos de integração acima de $800\ \mu s$ encontram-se no valor de saturação do sensor. Como tal, não foi possível efectuar o ajuste experimental para estes tempos de integração.

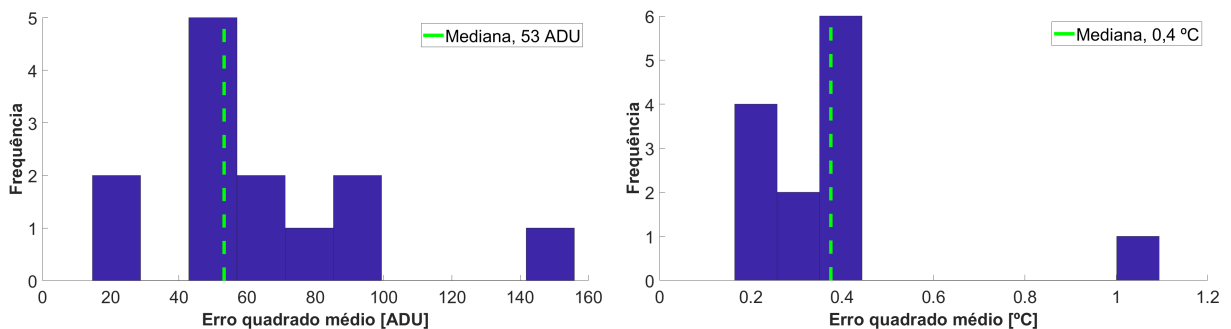
A figura 2.23(a) apresenta os pontos experimentais, com a amplitude do sinal em ADU em função da temperatura e tempo de integração. A superfície apresentada resulta de uma interpolação cúbica dos valores experimentais, assinalados a vermelho. Note-se que o patamar de valores máximo de ADU corresponde à saturação do sensor.



(a) Superfície ajustada aos pontos experimentais a vermelho, do valor de amplitude *vs* tempo de integração e temperatura (b) Perfis com diferentes tempos de integração e respectivas curvas ajustadas

Figura 2.23: Calibração térmica,

A figura 2.23(b) apresenta os vários perfis obtidos para cada tempo de integração. Devido ao número de tempos de integração utilizados, 15, apresentam-se apenas parte dos perfis obtidos. De forma a incluir a medida de erro de todos os ajustes, a figura 2.24 apresenta respectivos histogramas. O erro quadrado médio foi calculado quer em ADU, figura 2.24(a), quer em graus Celsius (utilizando a função inversa), figura 2.24(b), de forma a ser mais perceptível.



(a) Histograma dos valores de erro quadrado médio em ADU das curvas ajustadas (b) Histograma dos valores de erro quadrado médio em $^{\circ}C$ das curvas ajustadas

Figura 2.24: Histogramas das medidas de erro das curvas ajustadas

Tal como para o ajuste para um tempo de integração específico, os diferentes perfis tem funções com bom ajuste aos dados experimentais, com erros quadrados médios inferiores a $1^{\circ}C$ (especificação da câmara Anexo A).

No entanto as curvas ajustadas anteriormente, figura 2.23(b), não são generalizáveis para qualquer tempo de integração. Para tal seria necessário relacionar as constantes estandardizadas das várias curvas com o tempo de integração, mas estas não seguem uma tendência clara face ao tempo de integração como apresentado na figura 2.25. Mesmo condicionando o ajuste das várias curvas para utilizarem o mesmo ponto inicial e com restrições na variação das constantes a ajustar, os valores obtidos não seguem qualquer tendência clara. Como tal, não é possível relacionar as constantes estandardizadas com o tempo de integração.

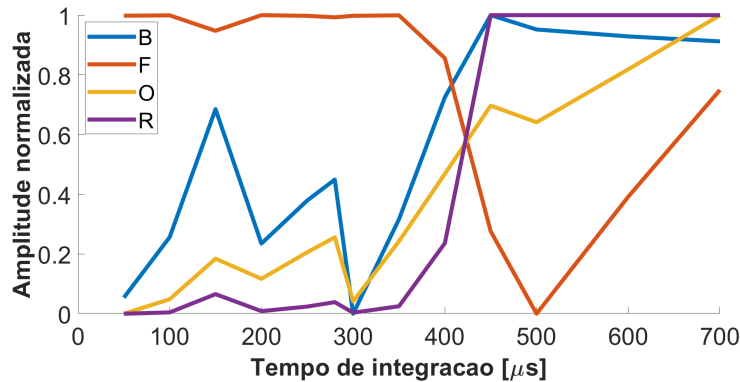


Figura 2.25: Constantes estandardizadas para diferentes tempos de integração, normalizadas

Outra possibilidade, tendo os valores de cada curva correspondente a um tempo de integração, seria a interpolação dos valores utilizando os perfis mais próximos. Sendo t_i um tempo de integração não tabelado e t_{i-1} e t_{i+1} os tempos de integração tabelados mais próximos, o valor de temperatura interpolar-se-ia da seguinte forma:

$$T(\Phi) = \frac{t_{i-1} - t_i}{t_{i-1} - t_{i+1}} g_{t_{i-1}}(\Phi) + \frac{t_{i+1} - t_i}{t_{i-1} - t_{i+1}} g_{t_{i+1}}(\Phi) \quad (2.25)$$

No entanto os valores obtidos por este método tem um erro médio acima do erro dos perfis não interpolados, cerca de $2^\circ C$, não sendo uma alternativa com o mesmo grau de confiança.

Não sendo possível generalizar a função com constantes generalizadas, optou-se pelo ajuste de uma superfície polinomial aos dados experimentais, semelhante ao proposto por Carvalho et al. em 2021 [30]. A tabela 2.2, apresenta os valores de erro para cada polinómio ajustado, seguindo a seguinte nomenclatura: p_{ij} , sendo i o grau do polinómio em função do tempo de integração e j o grau do polinómio em função da amplitude em ADU.

Como esperado, ao aumentar o número de parâmetros o erro do polinómio diminui. No entanto ao ajustar polinómios de maior grau para todos os pontos não melhora os resultados significativamente.

Assim para a conversão entre valores de ADU e temperatura optou-se por utilizar os diferentes perfis para cada tempo de integração, por terem um melhor ajuste.

Tabela 2.2: Coeficientes dos polinómios e medidas de erro

Polinómio	R^2	Erro quadrado médio [$^{\circ}C$]	Nº de parâmetros
p_{22}	0,921	5,7	4
p_{23}	0,963	3,9	5
p_{24}	0,981	2,9	6
p_{32}	0,969	3,6	5
p_{33}	0,971	3,5	6
p_{34}	0,988	2,3	7
p_{42}	0,988	2,3	6
p_{43}	0,990	2,1	7
p_{44}	0,990	2,1	8
p_{55}	0,997	1,2	10

2.3.6 Aferição do factor de forma

Para a aferição do factor de forma é necessário medir o fluxo de radiação para diferentes distâncias, de modo a obter uma relação entre a distância entre a cena e a câmara e o factor de forma (secção 2.2.1). Para tal foi utilizada uma placa com emissividade e temperatura uniforme, que emite radiação uniforme (Anexo F), ajustando a sua distância face à câmara termográfica. De modo a reduzir a influência da não-uniformidade dos sensores, optou-se por utilizar o valor médio de radiação de cada termograma, sempre com a placa a cobrir toda a área do IRFPA. Assim obtiveram-se vários pontos com a distância e o valor de radiação medido. Uma vez que:

$$\Phi(d) = F_{1-2}(d)\Phi_{emitido} \quad (2.26)$$

E assumindo que o valor mínimo de distância, d_{min} corresponde a $F_{1-2}(d_{min}) = 1\text{ cm}$ é possível rescrever o factor de forma como:

$$F_{1-2}(d) = \frac{\Phi(d)}{\Phi(d_{min})} \quad (2.27)$$

Ajustando os dados experimentais a polinómios de primeiro e segundo grau obtém-se curvas com os coeficientes presentes na tabela 2.3 e representadas na figura 2.26.

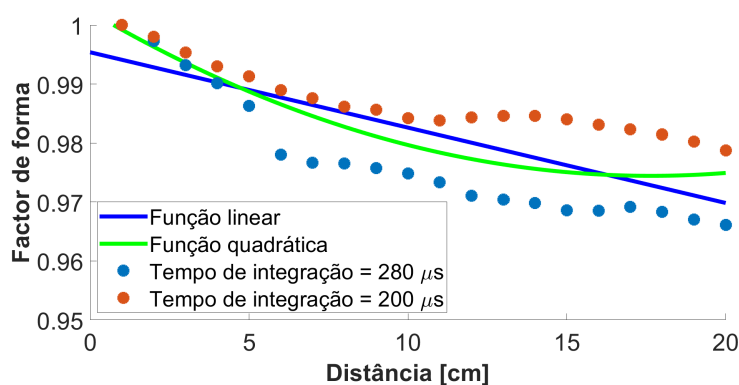


Figura 2.26: Relação entre o factor de forma e a distância

Tabela 2.3: Coeficientes dos polinômios e medidas de erro

Polinómio [$F_{1,2}(d) = a_1 + a_2d + a_3d^2$]	a_1	a_2	a_3	R^2	Erro quadrado médio
1º grau	0,99539	$-3,1548 \times 10^{-3}$	0	0,5835	0,0064
2º grau	1,0023	$-1,2777 \times 10^{-3}$	$8,9386 \times 10^{-5}$	0,6588	0,0059

Para ambos os tempos de integração, o fluxo que incide sobre o sensor tem uma tendência decrescente com a distância. Uma vez que o polinómio de segundo grau tem um valor de R^2 superior e um erro quadrado médio menor, optou-se por utilizar o polinómio de segundo grau para o cálculo do factor de forma. Nesta análise não foram incluídos polinómios de maior grau, por não terem desempenhos significativamente melhores e terem um sobre ajuste aos dados utilizados para a regressão.

Assim é possível obter a relação entre o valor medido em ADU e a temperatura do corpo utilizando a seguinte equação obtida a partir das equações 2.7 e 2.26 :

$$T = \frac{B}{\text{Ln} \left(\frac{R}{\frac{\Phi_{\text{medido}}}{\varepsilon F_{1-2}(d)} - O} + F \right)} \quad (2.28)$$

2.4 Transferência de calor

Os dados de temperatura obtidos com a câmara termográfica são utilizados no cálculo do fluxo de calor. No caso de uma placa aquecida, o fluxo de calor é dado pela seguinte equação como referido por Kenning D.B.R em 1996 [31], e posteriormente utilizada por Sielaff em 2014 [32] e por Pontes em 2016 [1]:

$$q = q_0 + k\delta \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho c_p \delta \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.29)$$

Sendo q o fluxo de calor, q_0 o fluxo de calor imposto na placa, k a condutividade térmica, δ a espessura da placa, ρ a densidade e c_p o calor específico do material. Note-se que as derivadas espaciais são de segunda ordem e a derivada temporal de primeira ordem.

2.4.1 Diferenças finitas

Como os valores obtidos são discretos, os valores de temperatura de cada píxel não formam uma superfície contínua. Assim o cálculo de derivadas aproxima-se utilizando diferenças finitas.

Uma vez que as distâncias entre cada píxel são iguais para todo o sensor e a frequência de amostragem é constante, os intervalos de distância e tempo entre cada ponto são fixos. Assim é possível criar malhas com nós equidistantes para todas as variáveis com derivadas a calcular. Seja h a distância entre os nós da variável a calcular, a derivada de primeira ordem pode aproximar-se da seguinte forma:

$$g'(x) \approx \frac{g(x+h) - g(x)}{h} \quad (2.30)$$

Esta aproximação utiliza apenas dois pontos, mas ao aumentar o número de pontos considerados no cálculo, obtém-se aproximações com maior exactidão. Caso a função a aproximar seja um polinómio, o aumento do número de pontos diminui o erro sendo possível eliminar o erro ao utilizar pontos suficientes.

Note-se também que os pontos a utilizar para o cálculo da diferença finita em x não tem de ser os pontos imediatamente seguintes $x + h$. Podem ser utilizados pontos anteriores, diferenças finitas para trás¹⁸, pontos em redor do ponto, diferenças finitas centrais¹⁹ e pontos seguintes, diferenças finitas à frente²⁰.

Os valores de coeficientes para os vários tipos de diferenças finitas encontram-se tabelados para as várias ordens de derivadas e com diferente número de pontos como descrito por Fornberg em 1988 [33].

¹⁸*backwards*

¹⁹*central*

²⁰*forward*

Capítulo 3

Tratamentos de imagem

Após apresentar os princípios teóricos da termografia e os parâmetros relativos à relação entre ADU e temperatura, este capítulo apresenta métodos de tratamento de termogramas para além do tratamento NUC, apresentado anteriormente na secção 2.3.4.

3.1 *Constant Statistics*

O algoritmo original proposto por Harris e Chiang em 1997 [10], assume que os sensores do IRFPA são lineares. Com o conceito de CS, assume também que o sinal a recuperar de cada píxel ao longo do tempo tem como valor médio 0, e um desvio-padrão unitário, transformando o sinal medido no sinal a recuperar da seguinte forma [10]:

$$x = \frac{y - m_y}{s_y} \quad (3.1)$$

Sendo x o sinal a recuperar, y o valor medido, e m_y e s_y o valor médio e o desvio-padrão. Como o sinal é discreto, os valores médios e desvio-padrão obtém-se com as seguintes equações [10]:

$$\hat{m}_y = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y(k) \quad (3.2)$$

$$\hat{s}_y = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y(k) - \hat{m}_y(k)| \quad (3.3)$$

Com n o número total de instantes considerados. Assim utilizando as equações 3.1, 3.2 e 3.3 corrige-se o sinal obtido sem imagens de calibração. Note-se também que as equações 3.2 e 3.3 podem ser escritas recursivamente reduzindo o custo computacional do tratamento [10]:

$$\hat{m}_y = \frac{y(n) - (n-1)\hat{m}_y(n-1)}{n} \quad (3.4)$$

$$\hat{s}_y = \frac{|y(n) - \hat{m}_y| + (n-1)\hat{s}_y(n-1)}{n} \quad (3.5)$$

A figura 3.1 apresenta o resultado para a décima imagem de um vídeo.

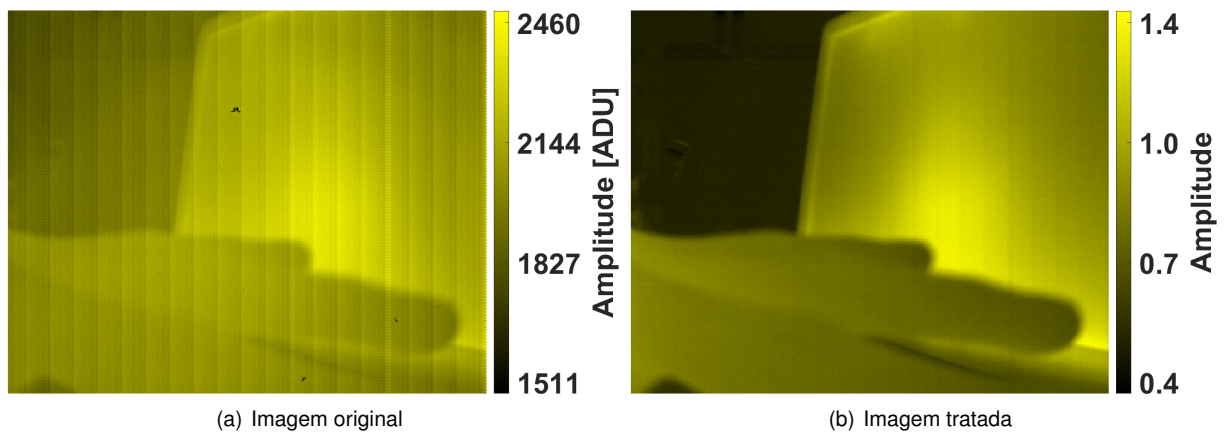


Figura 3.1: Tratamento de CS

Apesar de minorar as riscas verticais presentes na figura 3.1(a), a amplitude do sinal não se relaciona com o valor original de ADU, impossibilitando a conversão para valores quantitativos de temperatura.

Para além disso este método requer imagens com objectos em movimento, caso contrário os objectos imóveis fundem-se com o fundo da imagem, deixando uma marca quando se deslocarem de novo. Este fenómeno, *ghosting*, degrada a qualidade visual da imagem, mas pode ser reduzido ao utilizar o algoritmo de *de-ghosting* proposto por Harris e Chiang em 1998 [34].

A alteração proposta consiste em actualizar os parâmetros de média e desvio-padrão de cada píxel apenas quando a alteração ao sinal é superior a um limiar. Harris e Chiang em 1998 [34] propõem que o limiar seja uma alteração do sinal entre 10% e 25%. Nesta secção o algoritmo de *de-ghosting* utiliza um limiar de 20% a partir do qual actualiza os parâmetros de média e desvio-padrão. A figura 3.2 apresenta as diferenças entre os dois tratamentos.

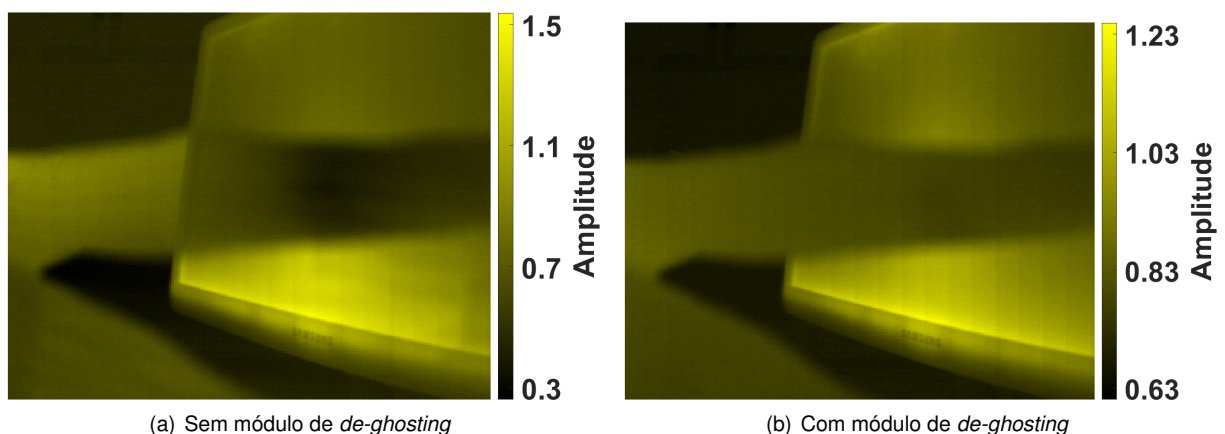


Figura 3.2: Comparação de tratamento de CS

A figura 3.2(a) apresenta uma diferença de amplitude na região do dedo em frente do ecrã, devido à marca do ecrã nas imagens anteriores. Com o algoritmo de *de-ghosting*, figura 3.2(b) o dedo apresenta a mesma amplitude como seria esperado.

3.2 Redes neuronais com inibição lateral

O algoritmo proposto por Dai et al. em 2015 [35] utiliza uma rede neuronal para reduzir o ruído de cada imagem. O valor atribuído a cada píxel tem em conta o valor dos píxeis adjacentes, atenuando os picos provocados pelo ruído. Este tratamento resulta numa imagem mais uniforme como a apresentada na figura 3.3.

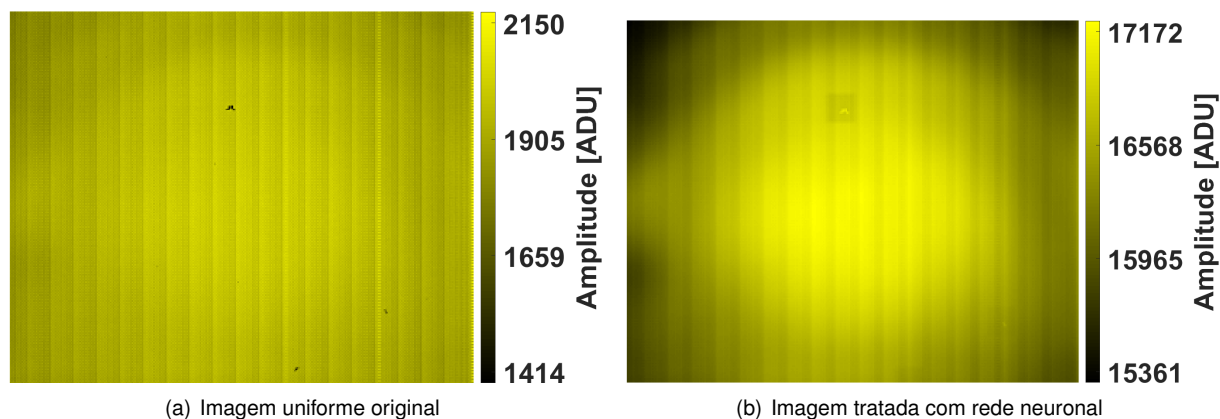


Figura 3.3: Tratamento com rede neuronal

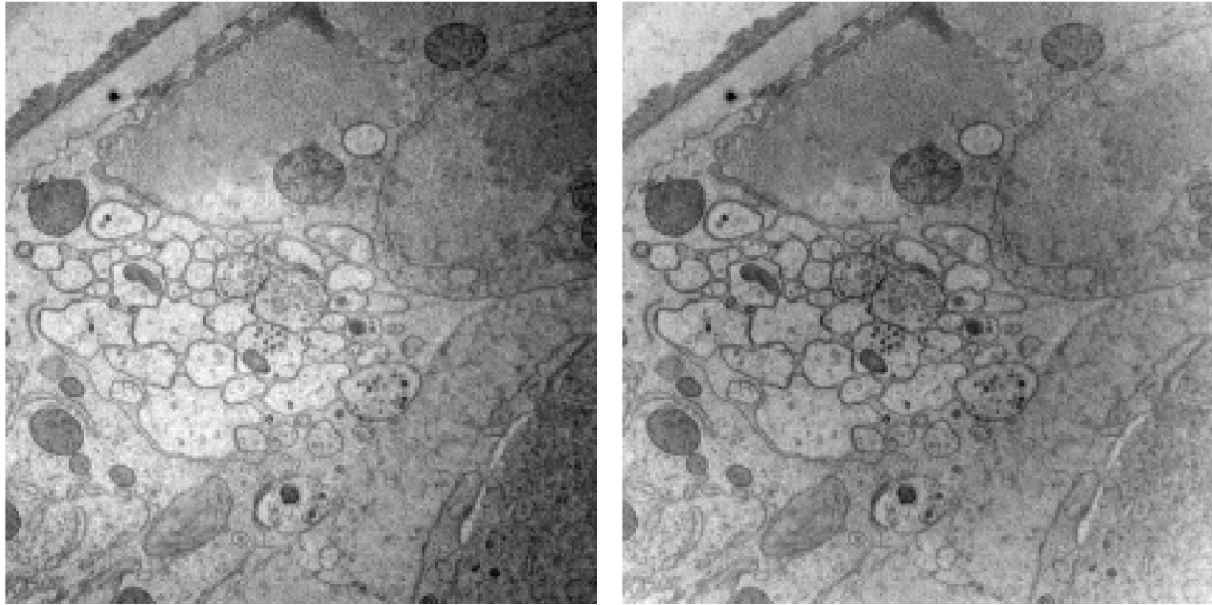
A figura 3.3(a) apresenta uma imagem de temperatura uniforme com riscas verticais correspondentes a ruído. A figura 3.3(b) apresenta o sinal tratado, sendo ainda visíveis as linhas verticais da imagem original. Para além de não remover as riscas, este tratamento intensifica o efeito de vinheta¹, ao diminuir o valor de intensidade dos píxeis longe do centro da imagem. Note-se também que os píxeis negros da figura 3.3(b) apresentam um valor próximo dos píxeis circundantes. No entanto o tratamento cria uma marca com a forma da rede neuronal, um núcleo rectangular, em torno desse ponto.

3.3 Ajuste de superfícies

Os métodos de ajuste de superfície, (*surface fitting* - SF) apresentados são aplicados na área de microscopia electrónica. A figura 3.4 apresenta a imagem tratada com o método apresentado por Tasdizen et al. em 2008 [12], designado por SF polinómico.

Ambas as figuras, 3.4(a) e 3.4(b), não apresentam escala por não representarem valores quantitativos, mas valores de iluminação. Apesar de os elementos da imagem apresentarem uma diferença constante em relação ao fundo da imagem, o modelo da iluminação é uma função polinomial o que limita a sua adaptabilidade às imagens termográficas. Para além disso, os componentes preservados correspondem às altas frequências que no caso das imagens em estudo correspondem ao ruído da imagem.

¹Em fotografia o efeito de vinheta é uma redução da luminosidade na direcção da periferia face ao centro da imagem, provocada pela sombra da lente circular nos cantos rectangulares da imagem. No caso da termografia os termogramas apresentam valores com maior intensidade no centro face às bordas do termograma.



(a) Imagem original, retirada de [12]

(b) Imagem com iluminação corrigida

Figura 3.4: Tratamento de iluminação com SF polinômio

Em seguida apresentam-se os resultados de outro método apresentado por Reyes-Aldasoro em 2009 [11], designado por SF envelope, onde são criadas duas superfícies que envolvem o sinal, como um envelope. O valor da superfície em cada píxel é dado pelo valor máximo ou mínimo dos píxeis circundantes, dependendo se é a superfície superior ou inferior. A área de píxeis circundantes considerados aumenta a cada iteração, utilizando como critério de paragem a diminuição da magnitude do gradiente dada por [11]:

$$MG = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y}\right)^2} \quad (3.6)$$

Sendo S a superfície e MG a magnitude do gradiente. A figura 3.5 apresenta os perfis das superfícies obtidas e do sinal original de uma imagem termográfica.

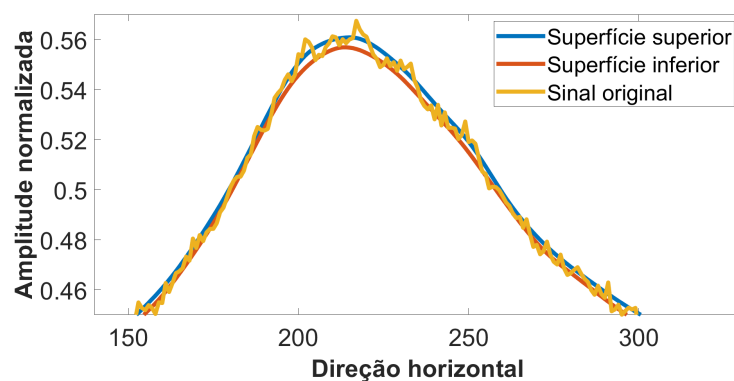


Figura 3.5: Perfil de imagem termográfica tratada com SF envelope

Como se pode observar na figura 3.5, ambas as superfícies adaptam-se ao sinal original mas com um perfil mais suave. No entanto o resultado é semelhante ao de um filtro gaussiano, mas com um custo computacional mais elevado.

3.4 Comparação e custo computacional

De forma a comparar os diferentes métodos, estes foram aplicados ao mesmo termograma do ensaio descrito na secção 4.3.1. Neste ensaio deve ser visível uma região circular correspondente ao furo, e dentro desta uma região com sinal (proporcional à temperatura) ligeiramente superior correspondente à bolha. Para além dos tratamentos descritos nesta secção, é incluído o tratamento NUC de dois pontos descrito na secção 2.3.4.

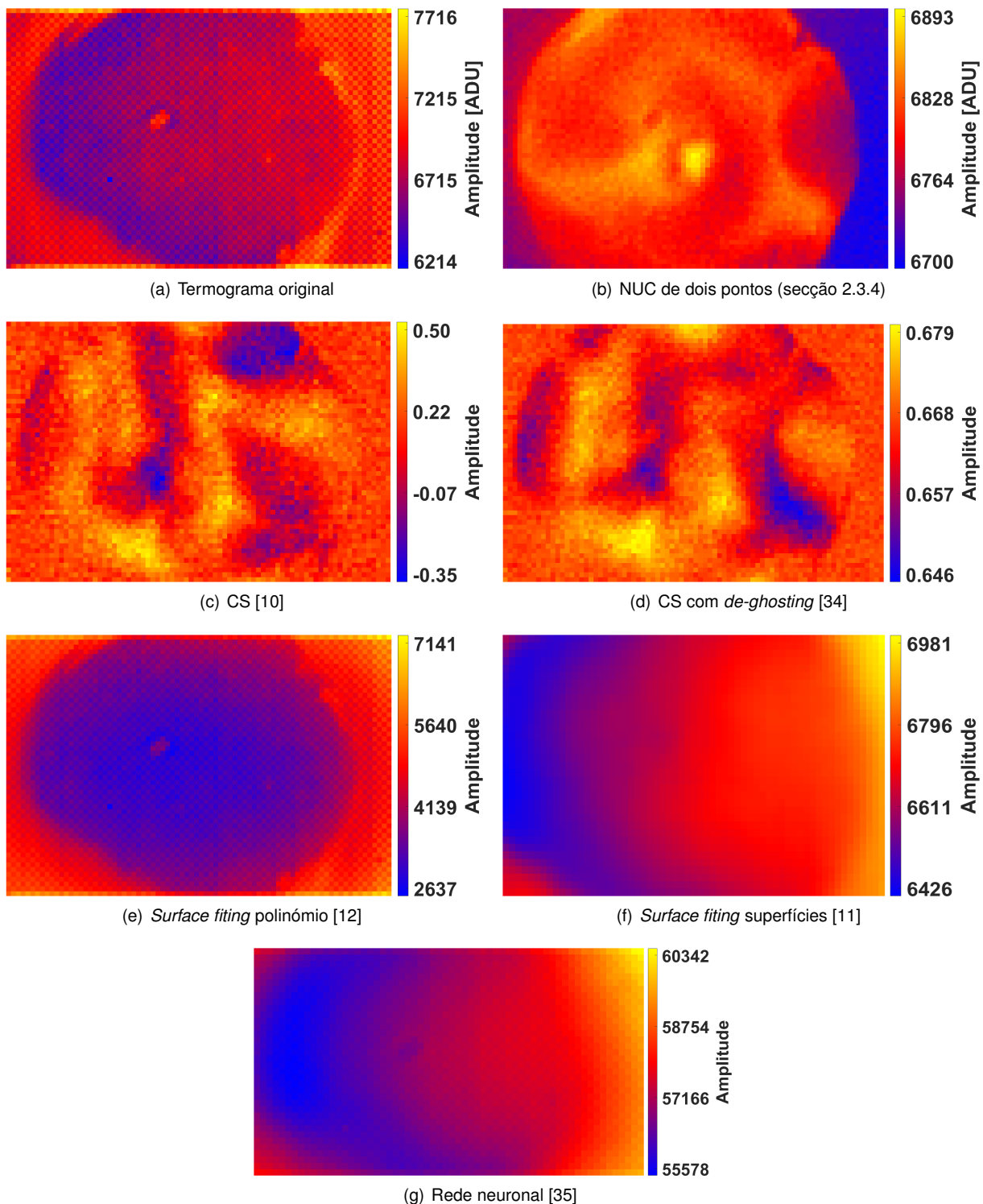


Figura 3.6: Comparação de vários tratamentos, valores quantitativos

No termograma original, figura 3.6(a), destaca-se uma área mais escura no centro da imagem, correspondente ao orifício, é também visível uma imperfeição da superfície que interrompe o padrão axadrezado. A figura 3.6(b), apresenta o tratamento de NUC removendo o padrão axadrezado da imagem original. No centro do orifício é visível uma zona de maior intensidade correspondente à bolha. As restantes variações de intensidade na região do orifício devem-se às movimentações de água no interior do tanque.

As figuras 3.6(c) e 3.6(d) com tratamento de CS também eliminam parte significativa do padrão axadrezado. Ao perder a amplitude do sinal este tratamento não é indicado para a análise quantitativa dos vídeos captados. No entanto ambos os métodos apresentam uma zona com intensidade superior correspondente à bolha e variações de amplitude no orifício correspondentes aos deslocamentos de água. Como tal, este método pode ser utilizado para a visualização em tempo real por não necessitar de medições auxiliares. Note-se também que o sinal fora do orifício tem uma amplitude aproximadamente constante sendo possível retirar o contorno do orifício da imagem.

Os métodos de ajuste de superfície e rede neuronal apresentam resultados significativamente piores, por não terem como objectivo melhorar os resultados quantitativos, mas por tentarem aumentar o contraste de forma a melhorar a qualidade de imagem. Assim a figura 3.6(e) apresenta um valor de amplitude mais uniforme no orifício, apesar de o padrão axadrezado continuar visível. As superfícies ajustadas na figura 3.6(f) e obtida com a rede neuronal, figura 3.6(g), apresentam uma superfície com uma área central aproximadamente uniforme, correspondente ao orifício, mas com perda de informação não sendo tratamentos aceitáveis.

De modo a comparar o custo computacional dos vários tratamentos, estes foram aplicados a um vídeo de 54 por 80 píxeis com 500 termogramas para cronometrar o tempo de execução. A tabela 3.1 apresenta os tempos de execução de cada tratamento e se preservam os valores de amplitude dos dados originais.

Tabela 3.1: Comparação dos tratamentos

Tratamento	Tempo de execução [ms]	Amplitude em ADU
Original	-	Sim
NUC (secção 2.3.4)	13	Sim
CS [10]	40	Não
CS <i>de-ghosting</i> [34]	57	Não
LIN [35]	7150	Não
SF polinómio [12]	4080	Sim
SF envelope [11]	15047	Sim

Tendo em conta os tempos de execução, apesar de os ajustes de superfície e redes neuronais terem um tempo de execução duas ordens de grandeza mais elevado, o tempo de execução é aceitável para pós-processamento. No entanto para aplicar os tratamentos e ter uma visualização em tempo real, estes não seriam viáveis.

Com base nos resultados apresentados na figura 3.6 e nos dados da tabela 3.1, o tratamento de NUC apresenta os melhores resultados sendo por isso utilizado no tratamento aplicado pela metodologia proposta, secção 4.2. O tratamento de CS apresenta resultados piores que o NUC, mas aplicáveis em tempo real o que permite melhorar a visualização dos resultados no decorrer da experiência. Os restantes tratamentos apresentam um tempo de execução mais elevado e resultados visualmente piores.

Assim com base na introdução teórica, secção 2, e na comparação dos diferentes métodos de tratamento de termogramas da presente secção, a secção seguinte, secção 4, apresenta as metodologias para a aquisição e tratamento de termogramas e as configurações dos ensaios experimentais.

Capítulo 4

Metodologia experimental

Esta secção descreve as metodologias experimentais utilizadas neste trabalho. Analisa-se a metodologia e rotina de processamento desenvolvida por Pedro Pontes em 2016 [1], secção 4.1, tal como a desenvolvida para este trabalho, secção 4.2. Para além disso a secção 4.3 apresenta as configurações dos ensaios experimentais.

4.1 Metodologia anterior - PP16

Esta metodologia proposta por Pedro Pontes em 2016 [1] (PP16), utiliza a câmara *Onca-MWIR-InSb-320*, ligada através de *Camera link* e utilizando o *software* de ligação da *Xeneth*. É utilizado um pacote de calibração que minora alguns dos problemas de aquisição. Este pacote define alguns dos píxeis como píxeis mortos¹, devido a discrepâncias de valor quer no domínio espacial, por comparação a píxeis vizinhos quando exposto ao mesmo nível de radiação, quer no domínio temporal, caso o píxel registre um desvio temporal demasiado elevado. Caso existam píxeis mortos na região de interesse o *software* substitui o valor do píxel morto pelo valor de um píxel adjacente. Uma vez que a relação entre o valor de ADU e temperatura foi apenas aferida para um tempo de integração esta metodologia requer um tempo de integração de 200 μs .

Para a aquisição de vídeo é necessário utilizar o *software* com o *pack* de calibração. Para além disso após seleccionar a região de interesse e focar a imagem, é necessário efectuar uma correcção de deslocamento no *software Xeneth*. Após esta correcção a câmara está pronta a ser utilizada. Note-se que ao definir uma região de interesse, a correcção de deslocamento da câmara provoca o aparecimento de riscas na imagem.

Para além de adquirir o vídeo do fenómeno em estudo, é também necessário um vídeo auxiliar da cena sem variações de temperatura, para ser utilizado na rotina de pós-processamento.

Os vídeos são guardados no formato nativo do *software*, *.xvi* com uma profundidade de 14 *bits*. Antes de serem utilizados por outros programas os vídeos tem ser convertidos para o formato *.avi*. Nesta conversão aplica-se uma paleta de cores cinza onde os canais das três cores, vermelho, verde e azul,

¹ *dead pixels*

têm a mesma intensidade. Assim apesar de cada canal ter uma profundidade de 8 *bits*, possibilitando um total de 24 *bits* de profundidade, o vídeo em tons de cinzento tem uma profundidade de apenas 8 *bits* sofrendo uma perda de informação.

Tendo convertidos os vídeos para o formato *.avi* utiliza-se o *software Matlab* para o processamento de dados. Os vídeos são carregados a partir dos ficheiros *.avi*, sendo necessário efectuar a conversão entre intensidade do tom de cinza para ADU. Após esta conversão o vídeo é convertido para valores de fluxo de radiação, Φ , utilizando um polinómio de quarto grau do tipo [1]:

$$a_1 \times \Phi_{medido}^3 + a_2 \times \Phi_{medido}^2 + a_3 \times \Phi_{medido} + a_4 = ADU \quad (4.1)$$

A relação entre o fluxo e a temperatura é dada através de uma fórmula semelhante à equação 2.6, utilizando os valores de emissividade da cena e a temperatura ambiente.

Após a conversão para valores de temperatura, o vídeo tem um tratamento de remoção do fundo, onde é utilizado o vídeo auxiliar. Este tratamento utiliza os valores temporais médios do vídeo auxiliar de modo a corrigir discrepâncias nos ganhos de cada píxel.

O tratamento de remoção de fundo tem como objectivo remover problemas relacionados com a uniformidade da imagem e uniformizar a temperatura [1]. Este tratamento foi pensado para o trabalho desenvolvido por Pontes em 2016 [1], no qual as imagens correspondiam a uma placa com temperatura uniforme onde era colocada uma gota provocando variações de temperatura na superfície. No entanto devido ao efeito de vinheta, a intensidade obtida no centro da imagem era superior à dos cantos, resultando numa imagem de temperatura não uniforme antes de ser colocada a bolha. De modo a rectificar o campo de temperatura a seguinte transformação é utilizada para cada píxel:

$$T(x, y, t) = \left(\frac{T_{medida}(x, y, t)}{T_{fundo}(x, y)} \right) T_{fundo}^{termopar} \quad (4.2)$$

Sendo T a temperatura obtida com o tratamento, x e y as coordenadas espaciais do píxel e t o instante. T_{medida} e T_{fundo} correspondem aos valores de temperatura medidos com a câmara termográfica, sendo $T_{fundo}^{termopar}$ a temperatura obtida independentemente através de um termopar para rectificar os resultados. Para exemplificar o efeito do tratamento a figura 4.1 apresenta os perfis de três sinais: o sinal de fundo, e dois sinais alterados: o primeiro incrementando um valor constante e o segundo correspondendo a um múltiplo do sinal de fundo.

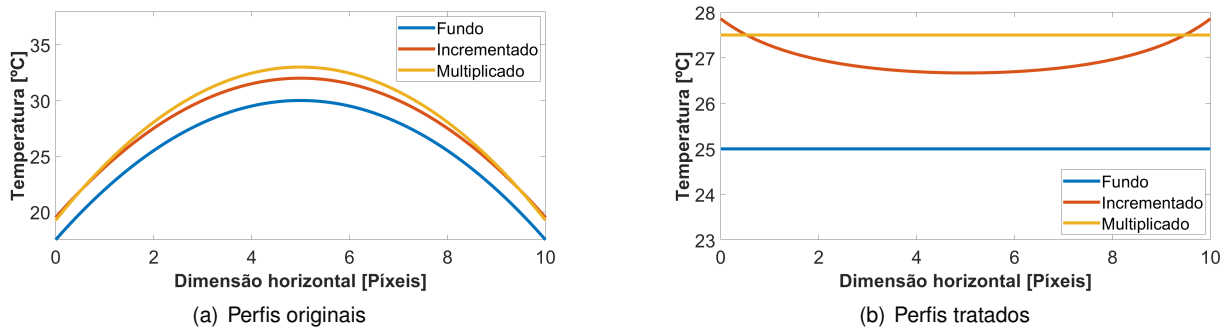


Figura 4.1: Tratamento de remoção de fundo para sinais teóricos

Ambos os perfis por tratar, figura 4.1(a) apresentam uma forma semelhante, com uma temperatura superior à do sinal de fundo. Ao aplicar o tratamento, a temperatura é mais uniforme. Para os perfis de fundo e múltiplo do sinal de fundo o tratamento resulta num sinal completamente uniforme. No entanto o sinal com um incremento apresenta alguma variação apesar de ser muito inferior à do sinal original. Assim este tratamento elimina a não-uniformidade do sinal caso este seja múltiplo do sinal de fundo. Caso o sinal seja corrompido por um ruído aditivo face ao sinal de fundo este tratamento é menos eficaz.

A figura 4.2 apresenta os termogramas de fundo. A figura 4.2(b) apresenta o termograma de fundo, a figura 4.2(c) o termograma de fundo original e a figura 4.2(d) o termograma tratado. Os perfis apresentados na figura 4.2(a) correspondem ao sinal das linhas verticais verdes das figuras 4.2(b), 4.2(c) e 4.2(d).

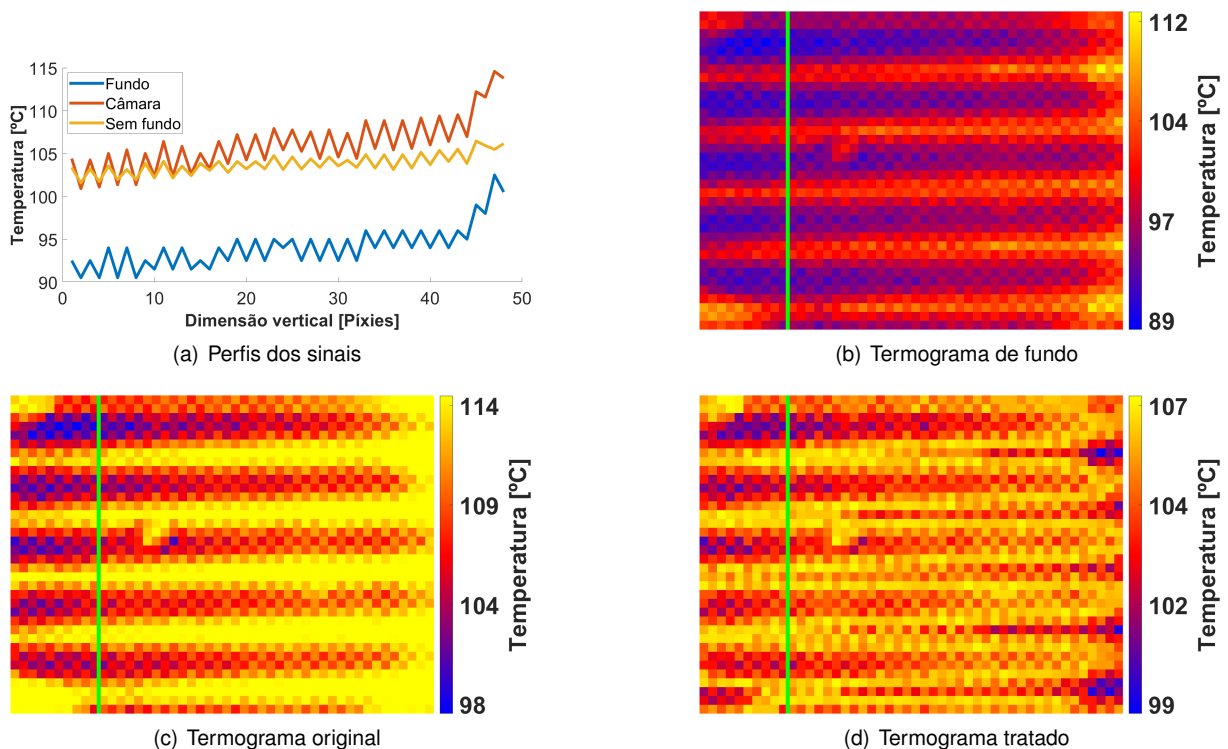


Figura 4.2: Tratamento de remoção de fundo aplicado a termogramas experimentais

Apesar de a redução de fundo reduzir a intensidade das riscas horizontais, estas permanecem visíveis nos termogramas. Após este tratamento é ainda aplicado um filtro gaussiano no domínio espacial de forma a suavizar cada termograma.

4.2 Metodologia proposta - JM21

A metodologia proposta neste trabalho (JM21) utiliza a mesma câmara, ligada através de *Camera Link*, mas utiliza o *Matlab* para efectuar a aquisição de vídeos. No entanto necessita de utilizar o *software Xeneth* para alterar e registar os seguintes parâmetros:

- Alterar o pacote de calibração seleccionado para: "none"
- Desactivar a opção de "Anti-Bloom"
- Definir o valor de ganho como 180 mV
- Definir o valor de viés como 3 nA
- Ajustar a região de interesse e registar os seus limites
- Definir e registar o tempo de integração

Após a configuração inicial a câmara pode ser utilizada com o *software Matlab*. Tal como a metodologia PP16, apresentada na secção 4.1, para além do vídeo do fenómeno em estudo é necessário captar pelo menos um vídeo auxiliar. Este vídeo pode ser captado antes ou depois da experiência, necessitando apenas de uma cena a temperatura constante. Caso possível devem ser captados dois vídeos auxiliares, a duas temperaturas diferentes, próximas da temperatura da experiência. Note-se que as condições de todos os vídeos têm de ser as mesmas, com a mesma distância à cena e região de interesse.

A rotina de pós-processamento a efectuar divide-se em duas partes: o tratamento de não-uniformidade e a conversão de ADU para temperatura.

O tratamento de não-uniformidade efectua um NUC de um ou dois pontos consoante os vídeos auxiliares disponíveis. A correcção aplicada segue o método descrito na secção 2.3.4, utilizando as médias temporais dos vídeos auxiliares como referências, para efectuar o NUC. Os vídeos auxiliares são utilizados em vez das imagens de referência captadas na secção 2.3.4, porque ao definir a região de interesse, esta desalinha-se ligeiramente das imagens de referência impossibilitando a sua utilização.

A conversão de ADU para temperatura efectua-se como descrita nas secções 2.3.5 e 2.2.1, utilizando a equação 2.28, que para além das constantes estandardizadas tem em consideração a emissividade e o factor de forma. Note-se que na equação 2.28 o factor de forma e a emissividade multiplicam-se. Como tal, caso a distância entre a câmara e a cena seja sempre a mesma entre os vários ensaios, o factor de forma pode ser considerado unitário sendo apenas necessário determinar a emissividade experimental.

4.3 Configuração do ensaio experimental

O ensaio experimental varia consoante o fenómeno em estudo, mas de modo a permitir a aquisição de dados com a câmara termográfica necessita-se que o fenómeno ocorra sobre uma placa de metal fina. Esta placa tem de ser suficientemente fina para permitir que as mudanças de temperatura do lado onde ocorre o fenómeno sejam visíveis do lado oposto. Assim é possível filmar o fenómeno ao filmar a experiência do lado de fora.

4.3.1 Ebulição em piscina em superfície super-hidrofóbica

Este ensaio tem como objectivo caracterizar o gradiente de temperatura e fluxos de calor durante a formação e destacamento de bolhas no processo de ebulição de uma piscina de líquido sobre uma superfície aquecida. Neste caso a superfície não é uniforme, apresentando uma região superhidrofóbica (repelente de água) que facilita o início da formação da bolha para baixos fluxos térmicos e sobre-aquecimento definido como a diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura de saturação do líquido para a pressão de trabalho, neste caso pressão atmosférica.

A superfície aquecida é uma placa metálica fina, de aço inoxidável AISI 304, com as propriedades apresentadas na tabela 4.1, retiradas de [36].

Tabela 4.1: Propriedades físicas do aço inoxidável AISI 304 [36]

Propriedade	Valor
Condutividade térmica ($W m^{-1} K^{-1}$), k	14,9
Densidade ($kg m^{-3}$), ρ	7900
Calor específico ($J kg^{-1} K^{-1}$), c_p	477

A placa com $20\mu m$ de espessura permite observar os gradientes de temperatura, com a câmara termográfica, a partir da superfície exterior da placa como referido anteriormente. A placa é aquecida por efeito de Joule. Esta configuração permite obter termogramas com a resolução espacial e temporal desejadas como referido por Teodori et al. em 2018 [37] e Sielaff em 2014 [32]. A superfície da placa virada para a câmara termográfica é coberta por uma tinta preta mate, de alta emissividade, de modo a evitar reflexos da superfície.

Para além da câmara de infravermelhos, a experiência é filmada com uma câmara de alta velocidade, Phantom v4.2. A câmara de alta velocidade utiliza uma janela do tanque de forma a captar a formação e destacamento da bolha sobre a placa. Apesar de as duas câmaras filmarem com frequência de amostragem diferentes, o início das gravações é sincronizado, de forma a ser possível efectuar a correspondência entre as imagens de ambas as câmaras.

A figura 4.3 apresenta o esquema dos vários componentes da instalação, semelhante ao apresentado por Cautela em 2019 [38].

O aquecimento e desgasificação da água destilada efectua-se na panela de pressão, (figura 4.3, índice 7). A panela colocada sobre uma resistência eléctrica, (figura 4.3, índice 9) aquece e desgaseifica a água antes de a enviar para o tanque. A desgasificação remove os gases dissolvidos no líquido de forma a que as bolhas formadas sejam devido a ebulição e não alterem as propriedades do líquido [38]. O reservatório principal alimenta o tanque (figura 4.3, índice 6) com água aquecida e desgaseificada. Ambos os reservatórios encontram-se ligados a um reservatório auxiliar para recolher o condensado gerado (figura 4.3, índice 10).

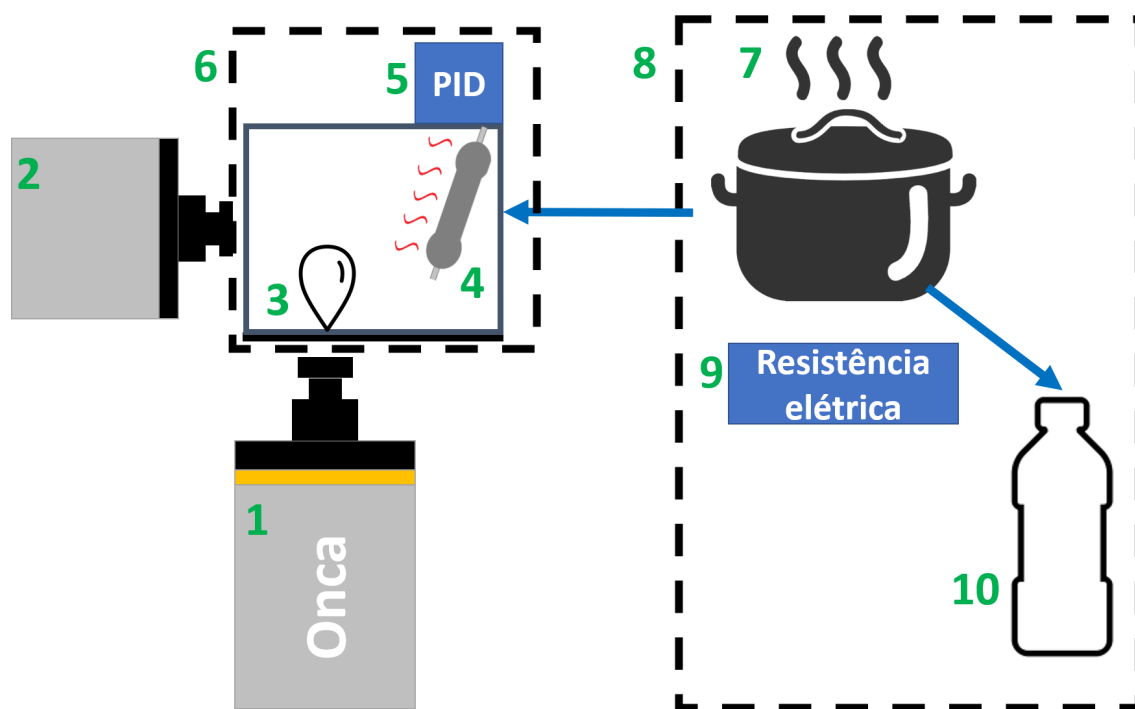


Figura 4.3: Esquema da configuração experimental: (1) Câmara de infravermelhos, (2) Câmara de alta velocidade (3) Fenómeno em estudo (4) Resistência eléctrica (5) Controlador PID (6) Tanque (7) Painel de pressão (8) Estação de degasificação (9) Resistência eléctrica (10) Recipiente para o condensado

Como a ligação entre o tanque e o reservatório não se encontra completamente isolada termicamente é necessário reaquecer a água até à temperatura de saturação utilizando resistências eléctricas inseridas no tanque (figura 4.3, índice 4), com a sua alimentação controlada por um controlador do tipo *PID*, *Pixsys ART121*, (figura 4.3, índice 5). O sinal com a temperatura do tanque é dado por um termopar de submersão tipo K, situado na base do tanque, próximo do fenómeno em estudo (figura 4.3, índice 3). O sinal do termopar é lido por uma placa de aquisição DAQ, *Data Translation DT9828*, o sinal é registado no computador com o *software QuickDAQ*.

As faces laterais do tanque têm vidros térmicos [38], de modo a reduzir as perdas de calor e permitir a visualização do interior. A base é amovível para que seja possível alterar a superfície em estudo entre os vários ensaios. O tanque possui uma tomada atmosférica de modo a manter a pressão constante durante o ensaio. A câmara termográfica (figura 4.3, índice 1) encontra-se de baixo do tanque, apontada para a superfície, de modo a filmar a radiação emitida pela placa metálica. A câmara de alta velocidade (figura 4.3, índice 2) filma o fenómeno em estudo através da janela do tanque. Os vídeos são captados com o *software Phantom 640* e guardados no formato do *software .cin* sendo posteriormente convertidos para o formato *.avi* sem perda de qualidade.

Com este ensaio não é possível obter uma temperatura constante da cena acima da temperatura da experiência, realizada à temperatura de saturação da água. Como tal, os vídeos auxiliares a obter para a metodologia JM21 proposta na secção 4.2, são registados após a experiência, desligando a resistência do tanque e aguardando que a temperatura decresça o suficiente para obter cenas de temperatura uniforme, sem correntes de convecção.

4.3.2 Microcanais

A instalação utilizada para este ensaio tem como objectivo utilizar um sistema de microcanais de forma a arrefecer uma folha de aço sujeita a um fluxo de calor constante, como descrito por Martins em 2020 [39]. O efeito da geometria do canal é avaliado medindo a temperatura e pressão do fluido de trabalho à entrada e saída do sistema, bem como o caudal inserido no sistema. A câmara termográfica é utilizada para medir a temperatura da folha de aço que age como resistência da mesma forma que na configuração anterior.

A configuração de componentes apresentada na figura 4.4 é igual para os diferentes fluidos, microcanais e condições utilizadas. A instalação permite a utilização de dois fluidos: água destilada e HFE².

Uma vez que a utilização desta configuração teve como objectivo obter termogramas do mesmo fenómeno com diferentes metodologias, foram efectuados ensaios com a folha à temperatura ambiente e o fluido aquecido, de forma a visualizar a geometria do microcanal com a câmara termográfica. Os dados de pressão e caudal do fluido não foram registados, por não serem necessários para a análise realizada neste trabalho. Como tal, os respectivos dispositivos de medição e aquisição de dados não são incluídos nesta descrição. A figura 4.4 apresenta a configuração experimental deste ensaio.

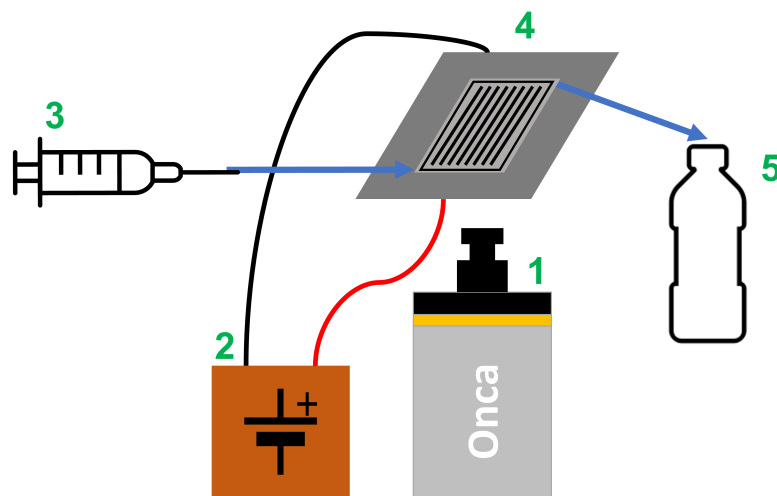


Figura 4.4: Esquema da configuração experimental: (1) Câmara de infravermelhos, (2) Fonte de tensão (3) Seringa (4) Montagem do microcanal (5) Recipiente para o fluido

A seringa, Harvard Apparatus modelo 22, (figura 4.4, índice 3) injecta o fluido de trabalho no sistema. Esta possui uma resistência, que permite aumentar a temperatura do fluido a entrar no microcanal. O controlo da temperatura do fluido no interior da seringa é efectuado pelo controlador heater-kit-1LG. A montagem do microcanal (figura 4.4, índice 4) situa-se por cima da câmara de infravermelhos (figura 4.4, índice 1) para captar a temperatura da superfície inferior do microcanal. A alimentação da resistência do microcanal efectua-se através de uma fonte de tensão, HP 6274B, (figura 4.4, índice 2). Após percorrer o microcanal o fluido acumula-se num recipiente (figura 4.4, índice 5).

²hidrofluoreter

A figura 4.5 apresenta a duas configurações do sistema de microcanal.

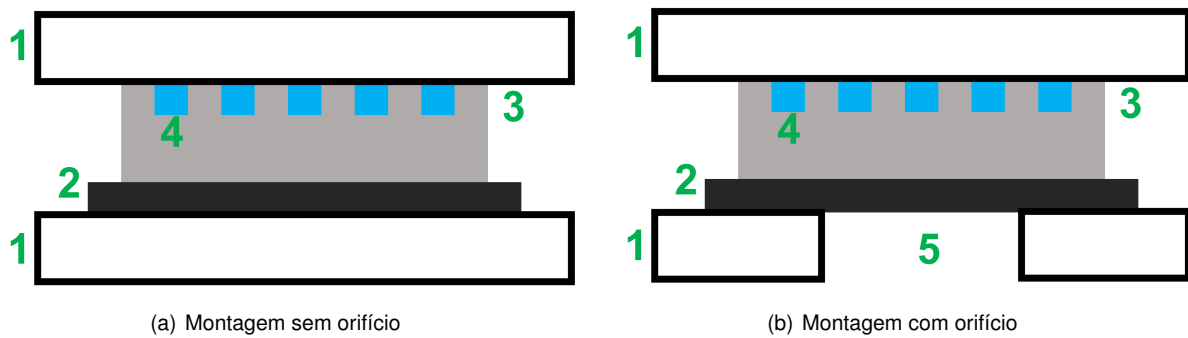


Figura 4.5: Esquema da configuração experimental: (1) Placa de acrílico (2) Resistência (3) Microcanal (4) Orifício para passagem do fluido

Em ambos os casos o microcanal (figura 4.5, índice 3) fixa-se com duas placas de acrílico (figura 4.5, índice 1). As placas são pressionadas, de forma a que o fluido de trabalho (figura 4.5, índice 4) percorra o microcanal sem sair do sistema. A resistência (figura 4.5, índice 2) situa-se na parte inferior, com a superfície virada para a câmara coberta com uma tinta de alta emissividade.

A montagem inicial, figura 4.5(a), devido à espessura do acrílico, não permitia a distinção da geometria do canal, sendo apenas visível uma mancha de temperatura uniforme. De modo a obter imagens com a distinção da geometria do canal, criou-se uma cópia da instalação com um orifício inferior de modo a que a passagem de fluido no canal seja visível com a câmara termográfica.

Capítulo 5

Processamento de dados

Esta secção apresenta os diferentes resultados experimentais. A secção 5.1 apresenta o método de determinação da emissividade experimental. O erro da relação entre ADU e temperatura é apresentado na secção 5.2. A secção 5.3 apresenta o resultado do tratamento de termogramas para ambas as metodologias e para os diferentes ensaios experimentais.

Após a apresentação do tratamento de termogramas, a secção 5.4 apresenta o método de super resolução utilizado para o aumento de definição de imagem. O efeito do cálculo de diferenças finitas e filtro gaussiano no cálculo de fluxo de calor é apresentado na secção 5.5.

Focando a análise nos ensaios com ebulição de piscina, configuração apresentada na secção 4.3.1, a secção 5.6 apresenta a abordagem de cálculo de fluxo de calor utilizando redes neuronais. Os resultados desta abordagem são apresentados na secção 5.7.

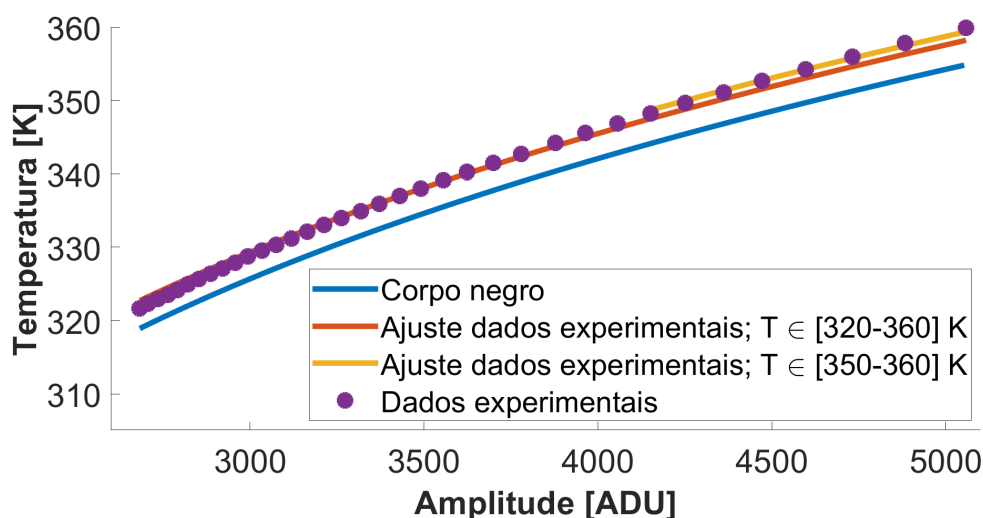
5.1 Emissividade experimental

Como mencionado na secção 4.2 é necessário determinar o valor de emissividade experimentalmente para converter os valores de ADU em valores de temperatura. Para tal são necessários os valores de temperatura da superfície e o respectivo valor de ADU. Esta recolha de dados deve incluir a gama de temperaturas utilizada na instalação de modo a obter melhores resultados. Os resultados apresentados nesta secção correspondem aos valores obtidos com a instalação apresentada na secção 4.3.1. Ao filmar o lado exterior da placa, registaram-se os valores de temperatura. Com esta configuração é possível variar temperatura da água e por consequência da placa a filmar, entre a temperatura ambiente e a temperatura de ebulição da água.

Utilizando a função inversa da equação 2.28, $\Phi = g(T)$ para evitar os problemas de domínio da função logaritmo, ajustou-se a função aos pontos experimentais utilizando as constantes estandardizadas do respectivo tempo de integração determinando assim a emissividade experimental. Como a distância entre a superfície e a câmara termográfica é igual para os vários ensaios com esta configuração considerou-se o factor de forma unitário. A figura 5.1 apresenta as curvas ajustadas aos dados experimentais e a curva obtida para os valores de um corpo negro para o tempo de integração de $200 \mu s$. A tabela 5.1 apresenta os valores de emissividade, R^2 e o erro dos ajustes efectuados.

Tabela 5.1: Comparação de ajustes

Gama de temperaturas [K]	Emissividade	R^2	Raiz do erro quadrado médio [K]
[320 – 360]	0,9399	0,9953	0,7744
[350 – 360]	0,9198	0,9919	0,3667

Figura 5.1: Emissividade experimental para o tempo de integração de $200 \mu s$

Como o tanque arrefece mais rapidamente a temperaturas mais elevadas e os pontos experimentais foram registados com uma frequência de amostragem fixa, a maioria dos valores experimentais concentra-se em valores de temperaturas próximos de $60^\circ C$.

Uma vez que a selecção dos pontos experimentais a ajustar altera o valor de emissividade, é aconselhável escolher pontos na gama de temperaturas do fenómeno em estudo para obter um valor de emissividade adequado às medições a efectuar. Note-se também que a selecção de uma menor gama de valores de temperatura, resulta numa curva com melhor valor de R^2 e um erro menor, tabela 5.1.

O impacto do valor de emissividade no erro da conversão de ADU para temperatura é analisado na secção 5.2.

5.2 Quantificação do erro da relação entre temperatura e ADU

De forma a quantificar o erro da relação de ADU e temperatura, utilizou-se a instalação descrita na secção 4.3.1, para obter termogramas da superfície e o valor da temperatura com o termopar. Foram obtidos termogramas correspondentes a diferentes tempos de integração.

A figura 5.2 apresenta os erros de temperatura dos dados experimentais, para uma emissividade de 0,94 determinada utilizando os pontos de toda a gama de temperaturas. A figura 5.2(a) apresenta um histograma com a distribuição do erro de todos os pontos experimentais. A figura 5.2(b) apresenta erros dos pontos de tempos de integração específicos.

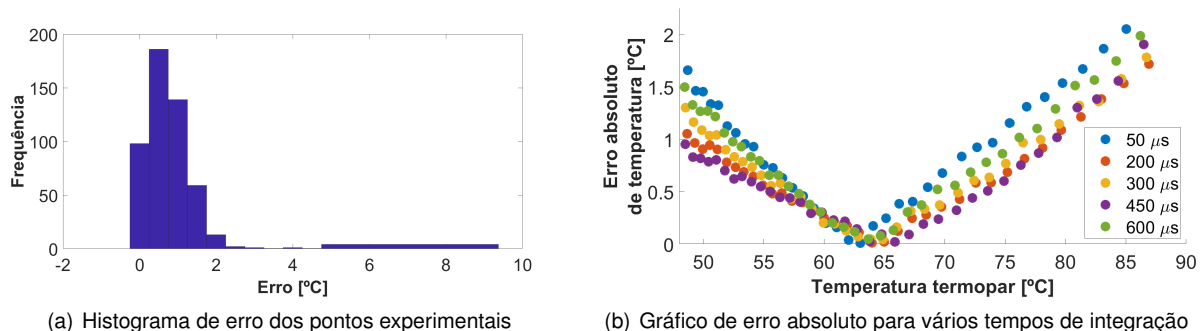


Figura 5.2: Erro da relação entre temperatura e ADU

Note-se que a maioria dos valores tem um erro inferior a $2^{\circ} C$. Os pontos com erros superiores correspondem aos valores saturados, fora do domínio da função. Focando a análise na figura 5.2(b), apesar de o menor tempo de integração $50 \mu s$, apresentar o maior erro absoluto, os dados para o tempo de integração $650 \mu s$ apresentam um erro semelhante. Como tal, não é possível relacionar o erro da relação térmica com o tempo de integração. O erro da relação é menor para as temperaturas próximas de $65^{\circ} C$. Este mínimo deve-se aos pontos experimentais seleccionados para determinar a emissividade utilizada. A figura 5.3 apresenta o erro absoluto da relação de ADU e temperatura, utilizando as duas emissividades experimentais determinadas na secção 5.1.

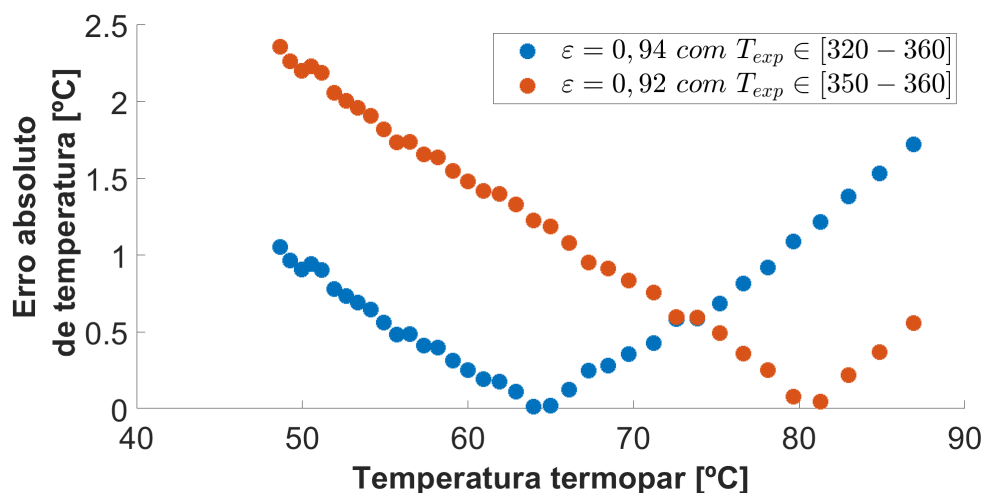


Figura 5.3: Erro da relação entre ADU e temperatura para diferentes emissividades, para um tempo de integração de $200 \mu s$

Os valores de erro apresentados na figura 5.3 variam de forma semelhante, atingindo o valor mínimo para diferentes temperaturas. Este mínimo é determinado pelos pontos experimentais utilizados na determinação da emissividade, situando-se aproximadamente a meio do intervalo de valores utilizado. Como tal, o valor de emissividade escolhido deve ter em conta a gama de valores do termograma a avaliar de modo a obter os resultados com menor valor de erro.

O erro absoluto é inferior a $2^{\circ} C$, próximo do valor especificado pelo fabricante ($\pm 1^{\circ} C$, Anexo A) para a gama de temperaturas avaliadas e para os diferentes tempos de integração. Como tal, considera-se a calibração efectuada na secção 2.3.5 como válida.

5.3 Comparação de metodologias

Após a análise da exactidão da conversão de ADU para valores de temperatura na secção anterior, esta secção analisa as duas metodologias apresentadas nas secções 4.1 e 4.2. Para tal foram realizados vários ensaios experimentais com ambas as metodologias.

A secção 5.3.1 analisa a uniformidade dos termogramas obtidos e os efeitos dos tratamentos na gama de valores de cada termograma.

As secções 5.3.2 e 5.3.3 focam-se na análise qualitativa do termograma. São analisados os efeitos das metodologias na remoção das riscas presentes nos termogramas originais e na rectificação de valores de píxeis com sensibilidades diferentes dos restantes. Para além disso a secção 5.3.3 analisa a evolução temporal da temperatura, relacionando a com o fenómeno em estudo, neste caso a formação e destacamento da bolha.

5.3.1 Microcanaís

Os termogramas apresentados nesta secção correspondem aos ensaios realizados com a configuração apresentada na secção 4.3.2. O ensaio realizado consiste em aquecer a folha metálica por efeito de Joule, utilizando o fluido que percorre o microcanal para arrefecer o sistema até atingir o equilíbrio térmico. A montagem utilizada não tem um orifício na placa de acrílico, pelo que apenas é visível um círculo de temperatura uniforme, sem se distinguir a geometria do microcanal. Dada a repetibilidade do ensaio foi possível obter termogramas do mesmo fenómeno com as diferentes metodologias, sendo possível comparar directamente os termogramas. A figura 5.4 apresenta os termogramas originais obtidos com a câmara a diferentes temperaturas.

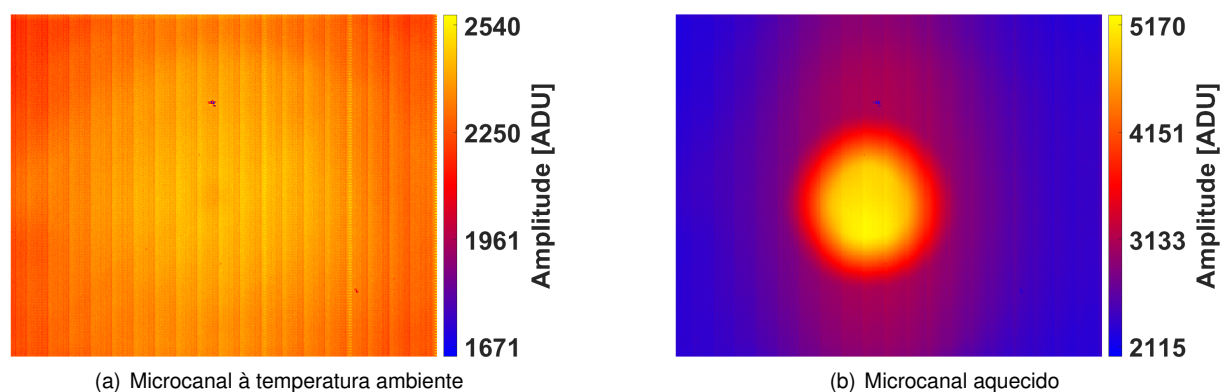


Figura 5.4: Termograma do microcanal sem pós-processamento

Caso o microcanal se encontre próximo da temperatura ambiente, figura 5.4(a), não são visíveis as diferenças de materiais, apresentando riscas verticais na imagem não correspondendo a nenhum fenómeno térmico específico. Ao aquecer a resistência e o microcanal, 5.4(b), o orifício permite observar a mudança de temperatura da folha metálica numa região circular. Uma vez que o fenómeno em estudo é suficientemente lento, a temperatura da região circular é uniforme, apesar de apresentar um valor de ADU não uniforme. A faixa vertical com um valor mais elevado de ADU corresponde à resistência que quando é aquecida se distingue do fundo da imagem.

De modo a comparar o tratamento de ambas as metodologias, os termogramas apresentados exprimem os valores de ADU, sem conversão para valores de temperatura. Como tal, a equação 4.2, foi alterada para a seguinte equação de forma a que os valores de temperatura correspondam a valores de ADU:

$$ADU(x, y, t) = \left(\frac{ADU_{medido}(x, y, t)}{ADU_{fundo}(x, y)} \right) \overline{ADU}_{fundo}^{termopar} \quad (5.1)$$

Sendo $ADU(x, y, t)$ o valor de amplitude de um píxel na posição x, y instante t , ADU_{medido} o valor do termograma original, ADU_{fundo} o valor do termograma fundo e $ADU_{fundo}^{termopar}$ o valor de um termograma obtido à temperatura ambiente.

Os tratamentos de NUC necessitam de referências a temperatura uniforme. Uma vez que a experiência se inicia com a instalação à temperatura ambiente, antes de se ligar a resistência, é sempre possível obter uma referência de toda a imagem com uma temperatura uniforme. No entanto ao aquecer a resistência apenas a região circular do termograma aquece de forma uniforme. Assim é possível utilizar o NUC de deslocamento para a totalidade da imagem, mas a correcção de dois pontos apenas pode ser efectuada na região circular. A figura 5.5 apresenta o termograma original e os termogramas tratados.

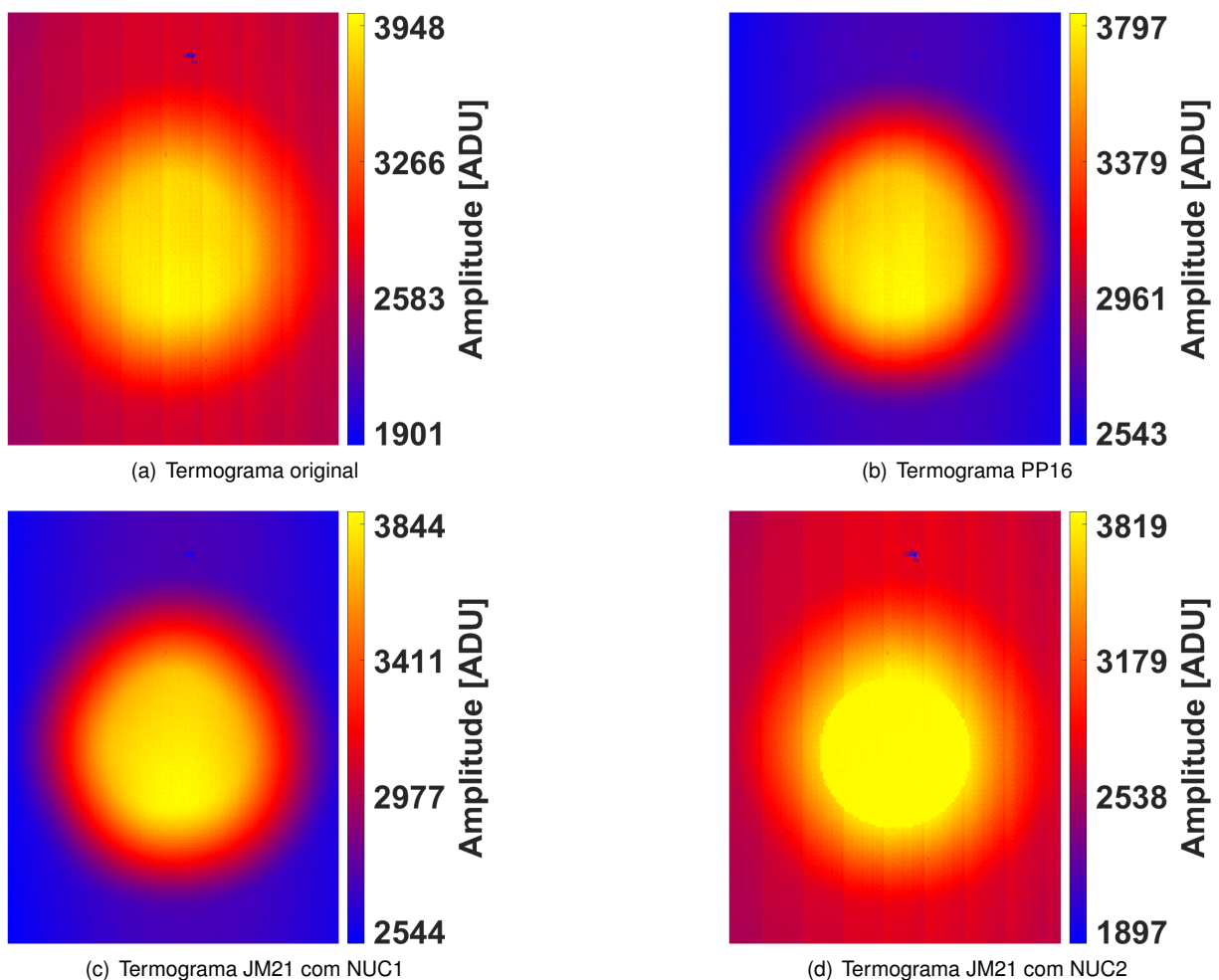


Figura 5.5: Tratamento de remoção de fundo aplicado a termogramas experimentais

O termograma original, figura 5.5(a), apresenta riscas verticais, para além deste defeito são visíveis alguns píxeis menos sensíveis acima da região circular. Os tratamentos da rotina PP16, figura 5.5(b), e de JM21 com NUC de um ponto, figura 5.5(c), removem as riscas verticais da região de menor intensidade dos termogramas. No entanto como o valor de ADU do termograma de referência à temperatura ambiente de ambos, 2500 ADU , é significativamente diferente face ao valor do termograma com a instalação aquecida, de 3600 ADU . Como tal, estes tratamentos não são capazes de eliminar as riscas verticais, apesar de as minorarem. Esta situação é semelhante à apresentada na secção 4.1, figura 4.2, no caso da rotina anterior PP16 e na secção 2.3.4, figura 2.17 no caso do JM21 NUC de um ponto. O tratamento de NUC de dois pontos, apesar de ser aplicado apenas na região circular, é claramente visível por criar um círculo uniforme que contrasta com a imagem não tratada em redor.

De modo a comparar mais objectivamente os diferentes tratamentos, a figura 5.6(a) apresenta a evolução da não-uniformidade (equação 2.23) da região circular para diferentes valores de ADU. A gama de temperaturas analisadas corresponde às temperaturas utilizadas pela instalação, entre a temperatura ambiente de 25° C e uma temperatura máxima de 80° C .

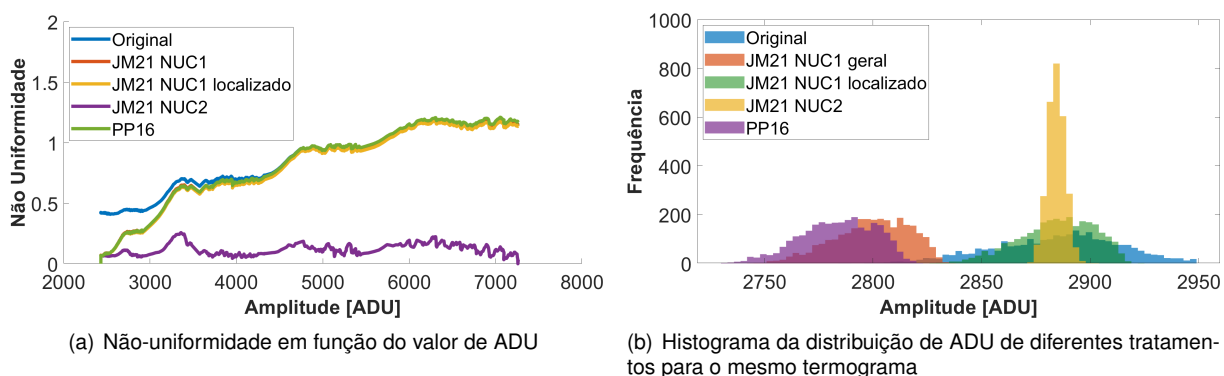


Figura 5.6: Não-uniformidade dos diferentes tratamentos

Como referido na secção 2.3.4, para os valores utilizados como referência, a não-uniformidade é nula. Todos os tratamentos anulam a não-uniformidade para uma intensidade de cerca de 2500 ADU por utilizarem esse termograma como referência. Ao utilizar uma segunda referência com uma intensidade de 7300 ADU, o NUC de dois pontos também anula a não-uniformidade nesse ponto. Como referido na secção 2.3.4, o tratamento com duas referências obtém valores de não-uniformidade menores que os tratamentos que utilizam apenas uma referência. Para além disso tanto a rotina anterior PP16, como o JM21 NUC de um ponto são menos eficazes em reduzir a não-uniformidade quando afastados da referência, enquanto que o JM21 NUC de dois pontos mantém um baixo nível de não-uniformidade em toda a gama de ADU considerada.

A figura 5.6(b) apresenta os histogramas da distribuição dos valores de ADU na região circular tratada. Para além dos tratamentos apresentados na figura 5.5, apresenta-se na figura 5.6(b) o histograma de um JM21 NUC de 1 ponto localizado. Como esperado os vários tratamentos concentram os histogramas face ao original. O NUC de um ponto altera o valor médio da região, porque o deslocamento aplicado tem valor médio nulo quando considerada toda a área do termograma, mas neste histograma é considerado apenas a região circular, com um valor médio não nulo. Ao aplicar o tratamento de des-

locamento apenas à região considerada, a média do deslocamento é nula, mantendo o valor médio da distribuição de ADU, para o NUC de deslocamento localizado. O tratamento de NUC de dois pontos destaca-se dos restantes por ter uma maior concentração de valores, obtendo uma superfície mais homogênea. A figura 5.7 apresenta os efeitos do tratamento na região com píxeis menos sensíveis.

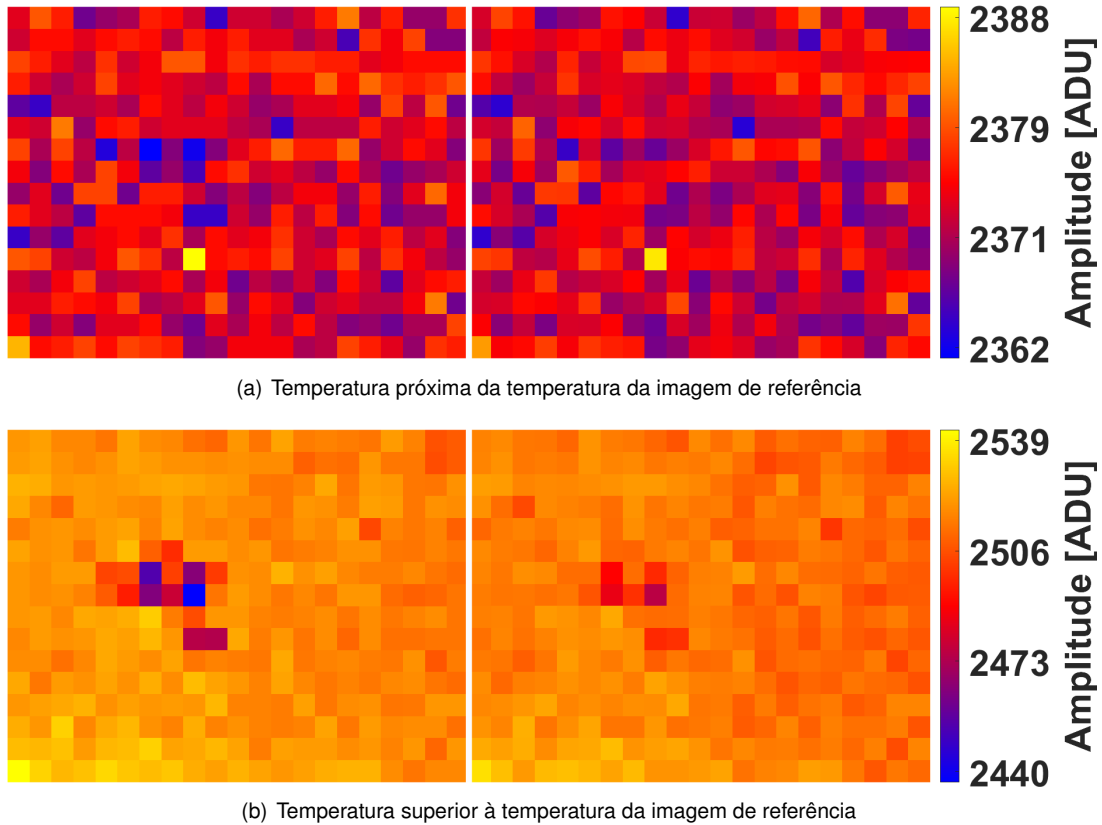


Figura 5.7: Efeito do tratamento nos píxeis menos sensíveis. Coluna esquerda JM21 NUC de um ponto, coluna direita metodologia PP16

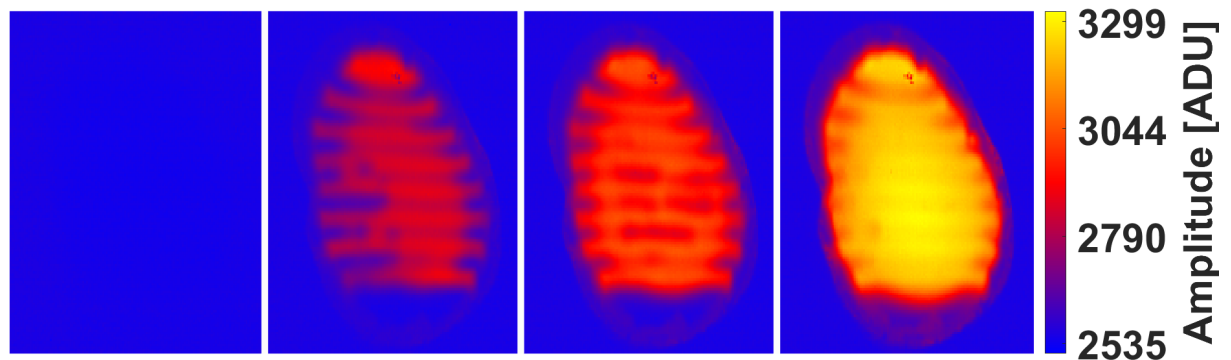
Para temperaturas próximas da utilizada para o vídeo de referência de ambos os tratamentos, as imagens são semelhantes. Como tal, ambos os tratamentos são eficazes em remover os píxeis menos sensíveis que sobressaem no termograma, figura 5.7(a). Esta imagem tem uma rugosidade aparente uma vez que utiliza toda a escala de cores, apesar de a diferença máxima entre píxeis ser de menos de 30 ADU. Ao aplicar o tratamento a um termograma a uma temperatura superior, a referência utilizada não permite fazer uma rectificação correcta dos píxeis menos sensíveis, figura 5.7(b). Apesar de utilizarem a mesma referência, o tratamento de JM21 NUC de deslocamento é menos eficaz que a rotina PP16 a remover os píxeis menos sensíveis com o aumento de temperatura.

5.3.2 Microcanais - geometria

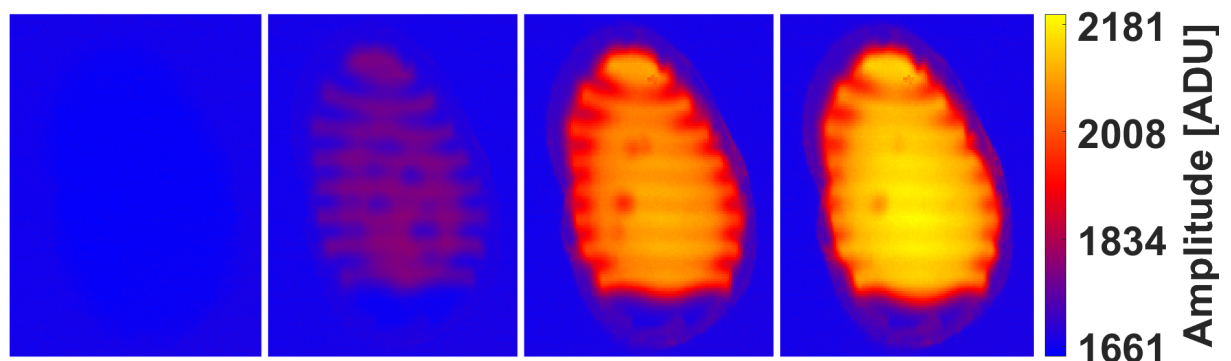
De forma a avaliar a qualidade dos termogramas captados com as diferentes metodologias, utilizou-se a configuração apresentada na secção 4.3.2, com um orifício no acrílico de forma a que a geometria do canal seja visível nos termogramas. Nestes ensaios, optou-se por não aquecer a placa metálica, inicialmente à temperatura ambiente. Assim o aumento de temperatura deve-se à injeção do fluido

de trabalho, água destilada aquecida. Desta forma ao inserir o fluido este destaca-se das paredes do canal à temperatura ambiente. Como o fluido inserido se encontra a uma temperatura superior à do canal passado uns instantes este aquece, impedindo a distinção entre as paredes do microcanal e o canal percorrido pelo fluido.

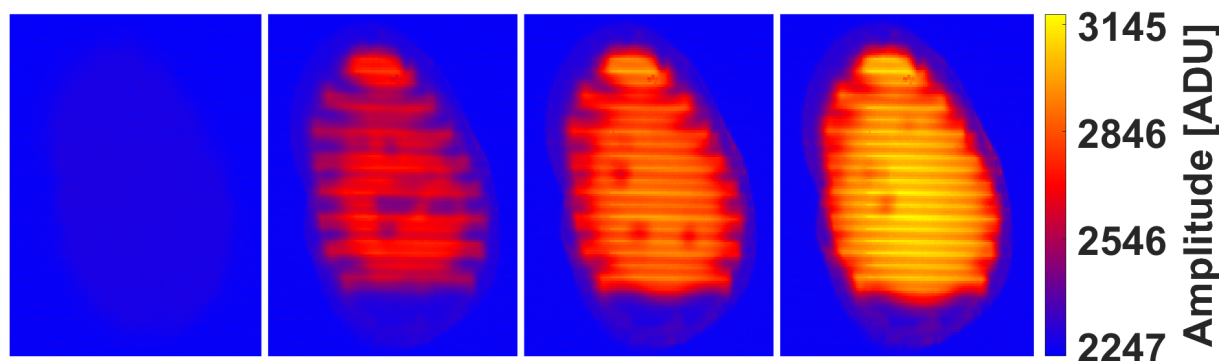
A figura 5.8 apresenta a progressão temporal do microcanal ao fazer atravessar o fluido de trabalho. Inicialmente o orifício é quase indistinguível da restante superfície, primeira coluna, mas ao fazer circular o fluido quente, este rapidamente aquece os canais, segunda coluna, acabando por aquecer todo os canais e as paredes dos mesmos, quarta coluna.



(a) JM21 NUC de um ponto



(b) Rotina PP16 sem redução de RoI



(c) Rotina PP16 com redução de RoI

Figura 5.8: Aquecimento do microcanal, progressão temporal da esquerda para a direita

Como neste caso existe apenas uma referência térmica uniforme disponível, a instalação à temperatura ambiente, apenas foi utilizado o tratamento JM21 NUC de deslocamento. A rotina PP16 foi também aplicada, com a região de interesse completa seleccionada e com apenas parte da região de interesse seleccionada de modo a provocar os efeitos que esta definição tem nos termogramas captados, apesar de o aumento da frequência de amostragem resultante não ser necessário para este ensaio.

O fenómeno analisado é semelhante entre os vários testes, mas devido às diferenças entre o caudal e temperatura do fluido inserido, existem discrepâncias entre as várias imagens. Apesar disso as figuras apresentam instantes em condições semelhantes. As figuras 5.8(a) e 5.8(b) são semelhantes apesar das rotinas serem diferentes. A figura 5.8(c) apresenta as maiores diferenças, tendo riscas horizontais na imagem, mais visíveis na figura da quarta coluna. Estas riscas não correspondem à geometria do microcanal.

As figuras 5.9 e 5.10 apresentam pormenores dos termogramas apresentados na figura 5.8. Para além do termograma tratado apresentam também o termograma antes do respectivo tratamento na mesma escala de cores.

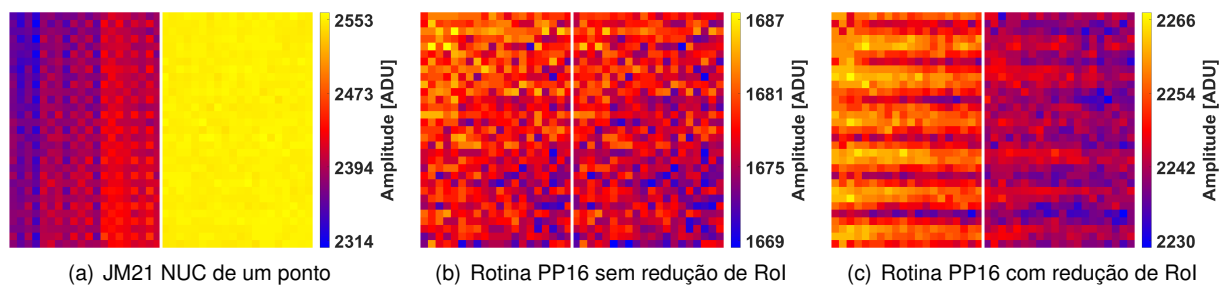


Figura 5.9: Pormenor da parte em torno do canal

Uma vez que o JM21 NUC de um ponto utiliza a câmara sem utilizar nenhum tratamento, o seu termograma original tem uma amplitude de valores de ADU muito superior à tratada que tem uma cor homogénea, figura 5.9(a). Os termogramas obtidos com a rotina PP16, figuras 5.9(b) e 5.9(c), utilizam a correcção integrada da câmara e como tal, a gama de ADU quer dos termogramas originais quer dos termogramas tratados é menor. No entanto ao reduzir a região de interesse, figura 5.9(c), a imagem original apresenta um padrão de riscas horizontais. Uma vez que este padrão tem uma amplitude semelhante ao utilizado como imagem de referência, o tratamento consegue esbater o padrão apesar das riscas horizontais se manterem visíveis no termograma tratado. A figura 5.10 apresenta o pormenor dos canais quando inicialmente percorridos pelo fluido aquecido.

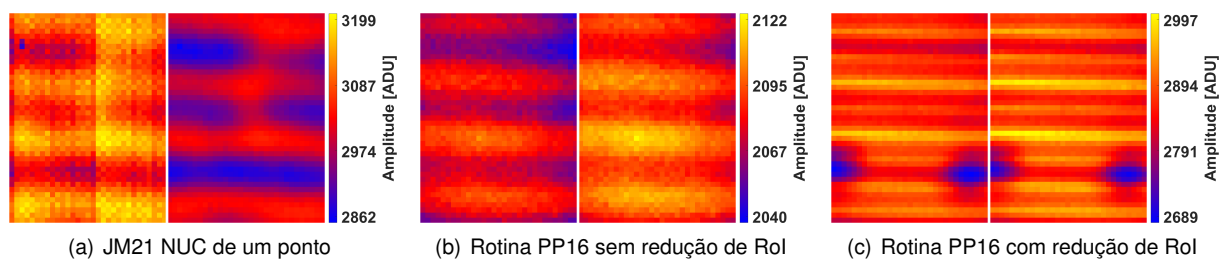


Figura 5.10: Pormenor de canais aquecidos

Como na figura 5.8(a), o tratamento JM21 NUC permite distinguir os canais presentes na figura 5.10(a). Para além disso a divisão vertical de intensidades presente no original desaparece com o tratamento, com os canais a apresentarem uma intensidade uniforme ao longo do seu comprimento. A rotina PP16 sem redução de Rol, figura 5.10(b), mantém os canais visíveis após o tratamento, apresentando uma ligeira mudança de amplitude do sinal. No entanto o tratamento produz uma imagem

menos suave que a obtida com o NUC de um ponto. Ao efectuar a redução da região de interesse, aparecem riscas horizontais, figura 5.10(c), que não desaparecem com o tratamento. Note-se que estas riscas não correspondem aos microcanais, uma vez as bolhas de ar frio presentes no termograma, têm a mesma dimensão que os canais, que difere do tamanho das riscas. Neste caso é impossível identificar a geometria do canal utilizando apenas o termograma. A figura 5.11 apresenta os gráficos em três dimensões de parte dos termogramas.

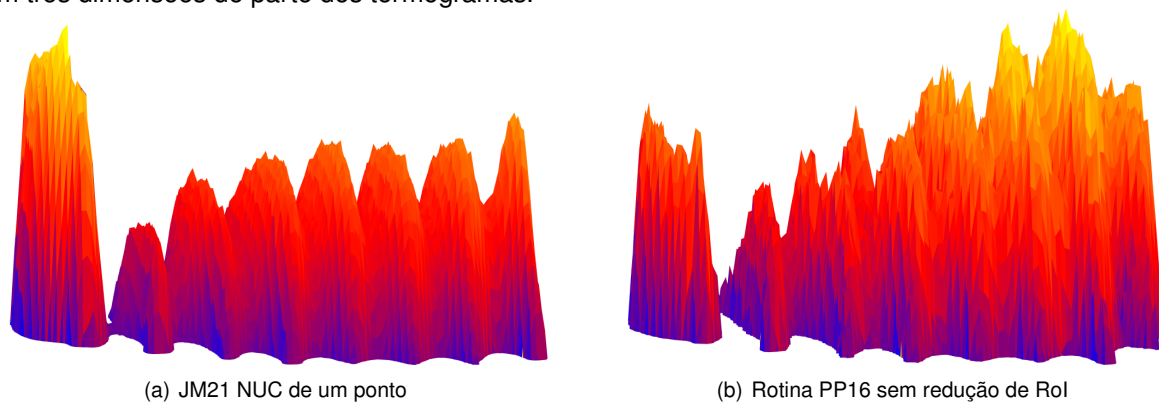


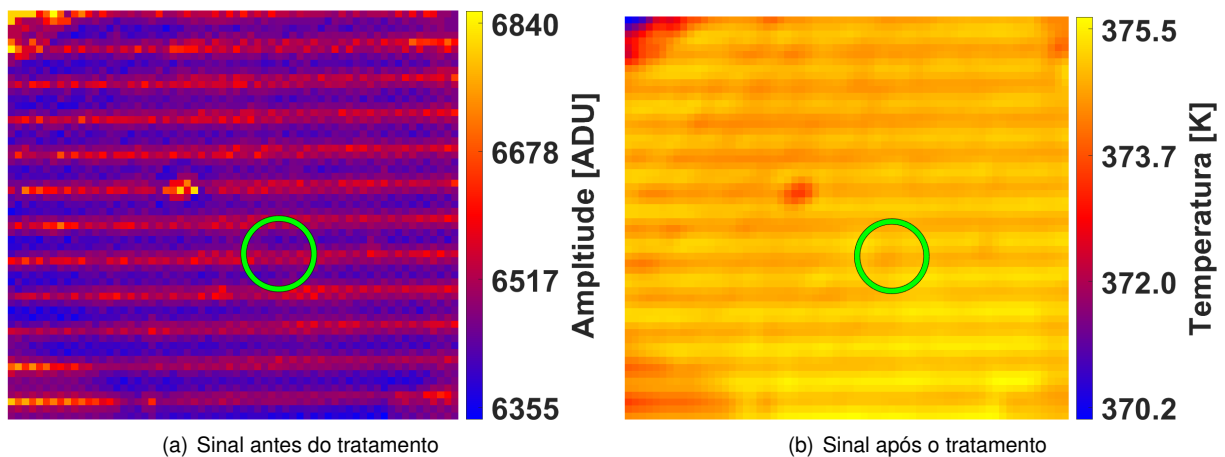
Figura 5.11: Gráfico 3D do pormenor do canal aquecido

Como é visível nos termogramas de microcanais desta secção, a figura 5.11, apresenta sulcos elevados correspondentes aos canais onde circula fluido aquecido. Focando a análise nos picos de ambos os gráficos é visível que termograma obtido com o tratamento JM21 NUC, figura 5.11(a), tem picos menos irregulares que os presentes no termograma tratado com a rotina PP16, 5.11(b).

5.3.3 Ebulição em piscina

De forma a continuar a análise apresentada nas secções anteriores, realizaram-se ensaios com a configuração apresentada na secção 4.3.1. Apesar dos termogramas não corresponderem ao mesmo ensaio, o fenómeno em estudo, a formação e destacamento da bolha, ocorre de forma semelhante sendo possível comparar os termogramas.

A figura 5.12 apresenta o tratamento de sinal da rotina PP16. As figuras 5.13 e 5.14 apresentam o tratamento de sinal com a rotina JM21 de dois ensaios distintos. Note-se que o círculo verde foi adicionado à imagem posteriormente para sinalizar a posição da bolha.



(a) Sinal antes do tratamento (b) Sinal após o tratamento

Figura 5.12: Tratamento de sinal, rotina PP16

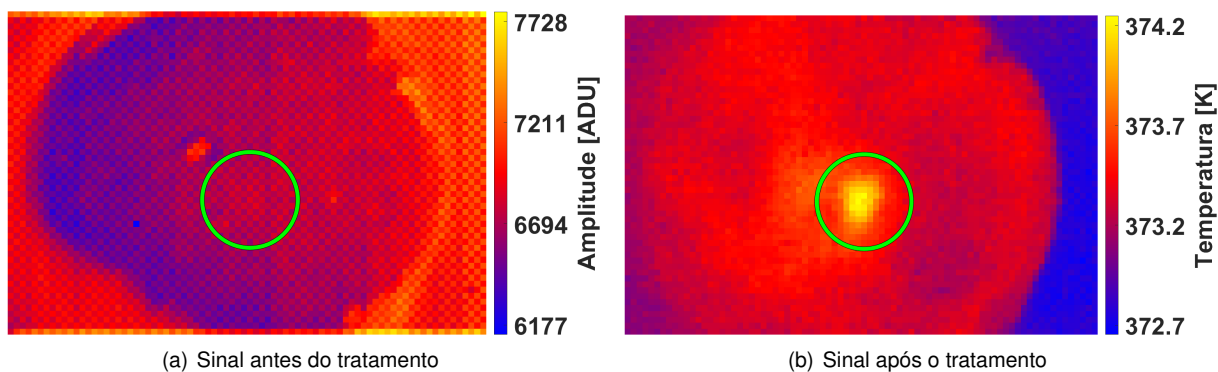


Figura 5.13: Tratamento de sinal, rotina JM21 NUC2

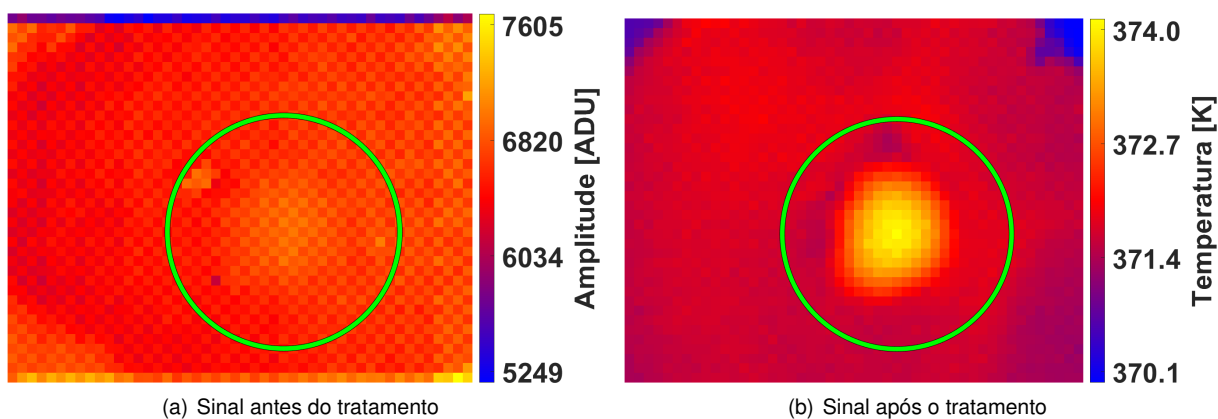


Figura 5.14: Tratamento de sinal, rotina JM21 NUC2, com defeito

O termograma presente na figura 5.12(a) apresenta as maiores diferenças face aos outros termogramas originais apresentados nas figuras 5.13(a) e 5.14(a). Isto deve-se ao facto de parte do processamento ser efectuado pela câmara, nomeadamente o *pack* de calibração utilizado e a correcção de deslocamento aplicada. A combinação destas duas operações leva a que o termograma apresente uma gama menor de valores de ADU, mas provoca o aparecimento de riscas horizontais na imagem. Apesar do tratamento efectuado, a imagem tratada apresenta as mesmas riscas, mas com uma intensidade menor. No entanto a permanência das riscas deteriora a imagem, dificultando a identificação da bolha, que se pode facilmente confundir com o defeito presente na superfície.

Os termogramas originais obtidos com a rotina JM21, figura 5.13(a) e 5.14(a), apresentam um padrão axadrezado atribuído ao ruído do sinal. Após o tratamento, ambos os termogramas apresentam uma gama de temperaturas reduzida, que permite analisar o fenómeno em estudo. No caso do termograma da figura 5.13(b), o ruído visível não apresenta um padrão aparente, tendo sido eficazmente atenuado pelo tratamento. No entanto partes do ruído visível no termograma da figura 5.14(b) apresentam um padrão axadrezado. Como o tratamento que elimina este ruído é sensível à localização da câmara face à cena, basta que a posição da câmara se tenha alterado ligeiramente entre a filmagem do fenómeno e a captura dos vídeos auxiliares para que o tratamento não seja tão eficaz como o apresentado na figura 5.13.

Para além de avaliar a temperatura em cada termograma, é possível avaliar a variação de temperatura de cada píxel. Para tal foi efectuado o mesmo ensaio com a nucleação de bolhas, mas com uma duração temporal maior de forma a captar várias nucleações com a câmara de infravermelhos e a câmara de alta velocidade. Utilizando os vídeos da câmara de alta velocidade é possível determinar os instantes em que ocorrem as nucleações. A figura 5.15 apresenta a temperatura da bolha e os instantes das nucleações assinalados com linhas verticais.

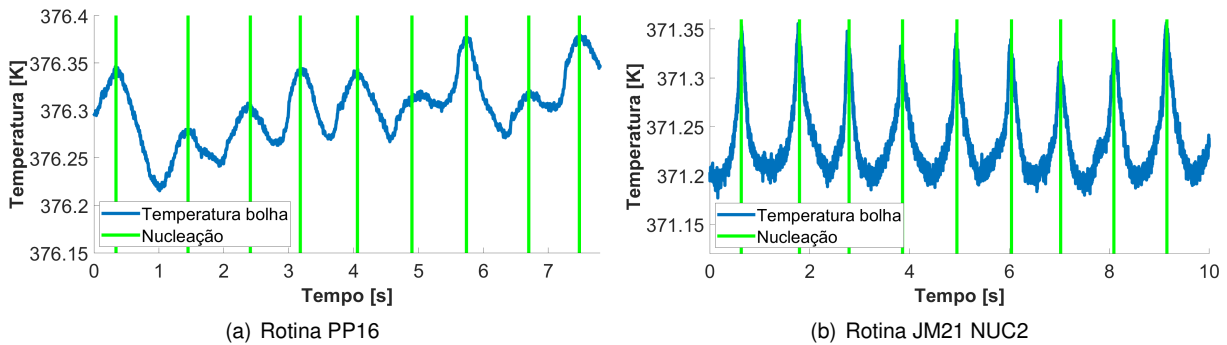


Figura 5.15: Temperatura da bolha e nucleações

Como esperado as variações de temperatura são cíclicas com um pico correspondente à nucleação. Após a nucleação o deslocamento de líquido em redor da bolha arrefece a superfície, aumentando de novo com a formação da bolha. Os picos de temperatura alinham-se com os instantes de nucleação captados com a câmara de alta velocidade, figura 5.15(a), coerentes com os resultados apresentados por Cautela em 2020 [40]. O mesmo ocorre para os dados processados com a rotina JM21, figura 5.15(b). Note-se que apesar de o fenómeno em estudo ser o mesmo, no ensaio com a metodologia anterior PP16 ocorreram movimentações de líquido no interior do tanque que interferiram com a temperatura na região da bolha. Assim apesar de as nucleações serem cíclicas, a variação de temperatura é menos regular que no ensaio com a metodologia JM21, figura 5.15(b).

Após comparar os termogramas captados com diferentes metodologias, as secções 5.4 e 5.5, focam-se na aplicação de técnicas de super resolução e a aplicação do filtro gaussiano respectivamente. Em ambos os casos os termogramas utilizados correspondem aos termogramas obtidos com nova metodologia JM21, secção 4.2, devido ao melhoramento face aos termogramas obtidos com a metodologia anterior PP16, secção 4.1.

5.4 Super resolução

Como a bolha ocupa uma região reduzida da imagem, um quadrado com cerca de 19 píxeis de lado, torna-se necessário aumentar a resolução para extrair informação útil. Para tal utilizou-se a interpolação cúbica nas duas componentes espaciais aumentando a resolução de cada termograma. A figura 5.16 apresenta o mesmo termograma com diferentes resoluções. Esta técnica é aplicada após a utilização de um filtro gaussiano ao sinal original.

Como se trata de uma interpolação, os valores originais do sinal estão presentes no termograma aumentado, sendo apenas interpolados os valores intermédios. Note-se que os valores da escala são os mesmos para os dois termogramas, figura 5.16.

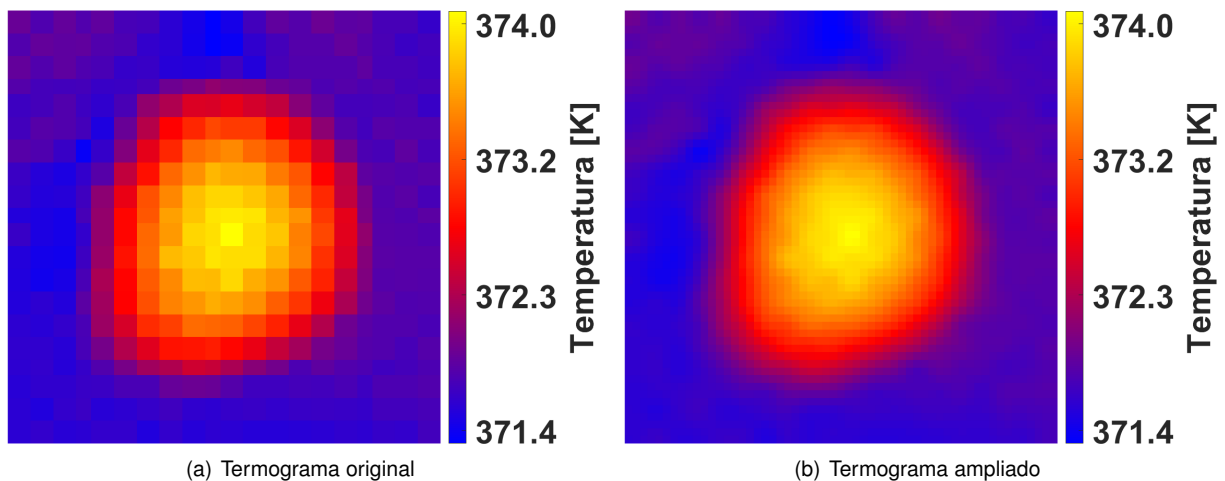


Figura 5.16: Comparação entre a resolução original, 19 por 19 píxeis, com a resolução aumentada, 57 por 57 píxeis

Apesar de escala ser apenas aumentada por um factor de três, a memória ocupada pelos dados aumenta $3^2 = 9$ vezes devido à interpolação em duas componentes. Este aumento de tamanho é significativo, obrigando a que este aumento de resolução não seja utilizado indiscriminadamente.

Existem vários métodos de interpolação para o aumento de resolução, como a interpolação linear, figura 5.17(a), ou a interpolação cúbica, figura 5.17(b). No entanto apesar dos resultados da interpolação serem semelhantes, figura 5.17, o cálculo de derivadas a partir de termogramas com valores interpolados pode gerar artefactos visuais.

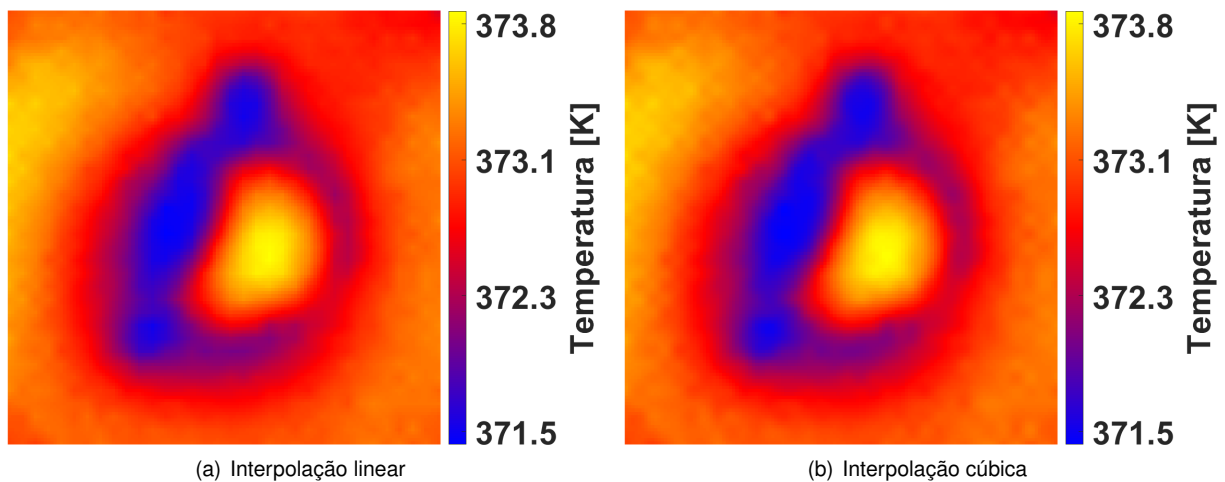


Figura 5.17: Comparação entre o aumento de resolução, com duplicação da resolução, com diferentes métodos de interpolação

A figura 5.18 apresenta o laplaciano dos termogramas apresentados na figura 5.17. Uma vez que a interpolação efectuada não resulta numa ampliação completamente suave, o resultado do laplaciano diverge do esperado. No caso da interpolação linear, figura 5.18(a), os valores não nulos estão dispostos numa grelha, sem uma variação suave ao longo do termograma. No caso da interpolação cúbica, figura 5.18(b), os valores de laplaciano são mais realistas, sendo identificável o contorno da bolha visível no termograma, figura 5.17(b). No entanto são visíveis artefactos visuais, gerando um padrão axadrezado.

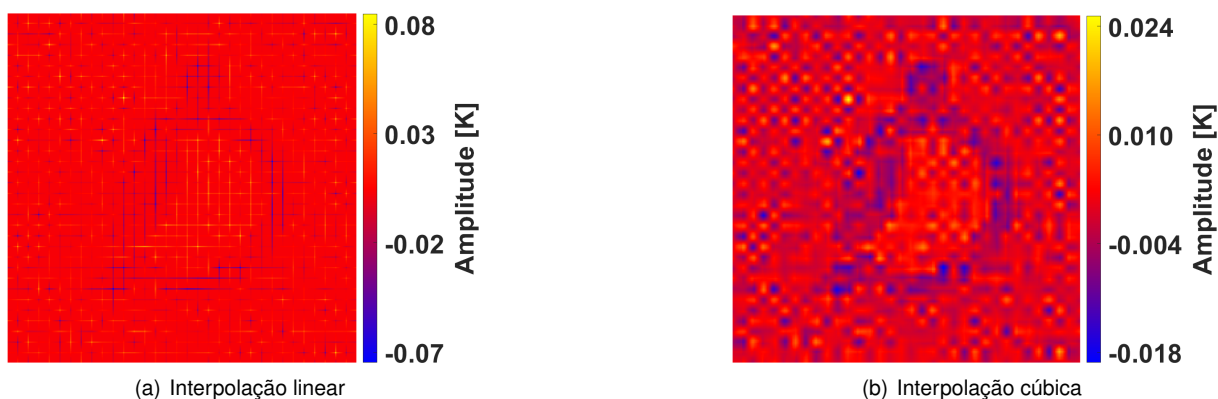


Figura 5.18: Comparação do laplaciano, com duplicação da resolução, com diferentes métodos de interpolação

Devido a estes artefactos o aumento de resolução não pode ser utilizado indiscriminadamente. Caso o termograma seja utilizado para o cálculo de fluxo, que requer o cálculo de derivadas espaciais e temporais, não é possível aumentar a resolução do termograma antes do cálculo de fluxo. No entanto após o cálculo de fluxo é possível aplicar as técnicas de aumento de resolução sem o aparecimento de artefactos indesejados.

Uma vez que o aumento de resolução pode ser aplicado a dados bidimensionais, nas secções seguintes estes serão utilizados, quer para valores de temperatura, quer para valores de fluxo, sendo identificado o factor de escala utilizado.

5.5 Cálculo de fluxo de calor a partir de termogramas

Nesta secção apresentam-se os resultados do cálculo de fluxo de calor utilizando os termogramas obtidos com a nova metodologia JM21, secção 4.2, utilizando a equação 2.29. Os efeitos do número de pontos utilizado cálculo de diferenças finitas é analisado na secção 5.5.1. A secção 5.5.2 analisa o impacto do filtro gaussiano nos resultados obtidos.

Apesar de o tratamento dos termogramas com a nova rotina JM21, obter termogramas com menor não-uniformidade, o sinal apresenta um nível de ruído significativo em todas as componentes, como apresentado na figura 5.19.

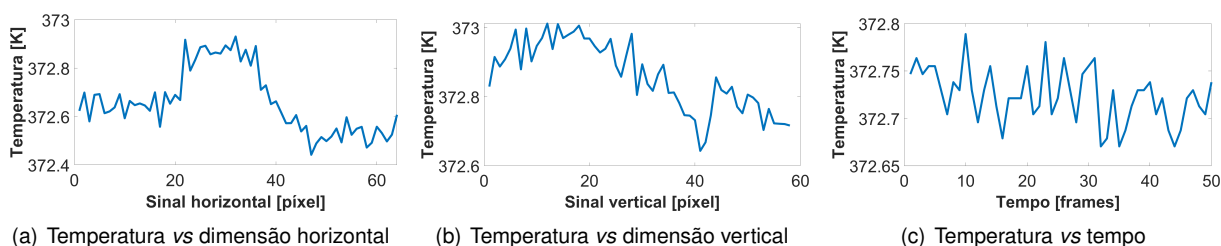


Figura 5.19: Sinal obtido após tratamento de não-uniformidade e conversão para temperatura

Apesar dos termogramas apresentados na secção 5.3, com as figuras a aparentarem ter pouco ruído, a análise dos perfis das várias componentes torna claro a existência de ruído. Este é amplificado devido às derivadas do cálculo de fluxo de calor.

5.5.1 Cálculo de diferenças finitas

Como referido anteriormente, secção 2.4.1, o cálculo de diferenças finitas pode ter em conta diferentes números de pontos, diminuindo o erro da aproximação. Como tal, calcularam-se as diferenças finitas centrais de primeira ordem para o sinal de temperatura em função do tempo, figura 5.19(c), com diferentes números de pontos considerados, apresentados na figura 5.20.

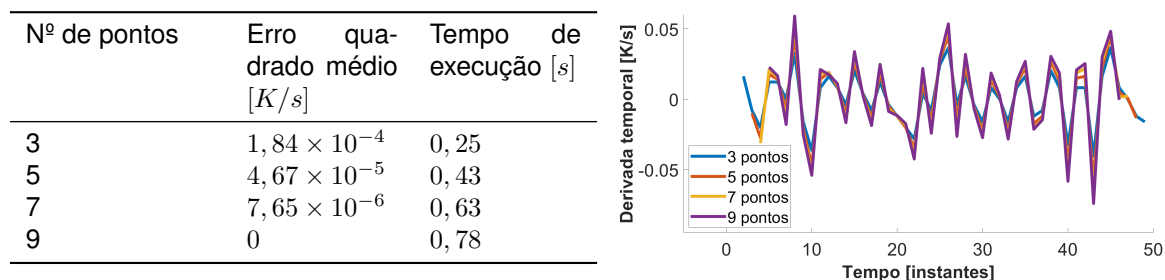


Figura 5.20: Diferenças finitas de primeira ordem, $\frac{\partial T}{\partial t}$

Para obter os valores de erro apresentados na figura 5.20 assumiram-se como correctos os valores da diferença finita de 9 pontos. Os tempos de execução foram obtidos repetindo o cálculo da diferença finita de um sinal original com 50 pontos, repetindo o cálculo um milhão de vezes para cada diferença finita.

Ao aumentar o número de pontos, o valor de erro decresce, fazendo com que os valores das diferenças com mais pontos convirjam para o mesmo valor. No entanto a utilização de mais pontos não contribui para o atenuar o ruído aparente do sinal, continuando a existir uma ampliação do ruído no cálculo da derivada do sinal. Note-se que ao utilizar mais pontos, o sinal resultante é truncado nas pontas, resultando num sinal com dimensão menor.

Assim optou-se pela utilização da diferença finita com menor número de pontos, 3, uma vez que esta gera um sinal com uma dimensão mais semelhante ao sinal original, facilitando a correspondência entre os pontos do termograma e os pontos do fluxo de calor calculado.

5.5.2 Aplicação de filtro gaussiano

De forma a remover o ruído presente no sinal, utilizou-se um filtro gaussiano. O filtro aplicado altera o sinal nas três componentes, x , y e t suavizando os resultados de todas as componentes.

O parâmetro com maior influência no filtro gaussiano é o desvio-padrão, σ . O filtro utilizado tem a forma de um cubo, com o lado do *kernel* de dimensões proporcionais ao desvio-padrão, σ , dadas por:

$$2 \times \lceil 2\sigma \rceil + 1 \tag{5.2}$$

Onde $\lceil 2\sigma \rceil$, representa a função tecto de 2σ . O filtro gaussiano altera o valor do sinal e como tal, deve ser utilizado o mínimo de vezes necessário para manter a integridade dos dados. Assim o filtro pode ser aplicado em duas fases diferentes do processo.

Aplicado ao sinal de temperatura antes do cálculo de fluxo:

$$q(g_{gauss}(T)) \quad (5.3)$$

Ou após o cálculo de fluxo:

$$g_{gauss}(q(T)) \quad (5.4)$$

Onde T representa o sinal de temperatura, g_{gauss} o filtro gaussiano e q o fluxo de calor.

Uma vez que não é possível conhecer os valores reais de fluxo de calor, efectuou-se o balanço energético seguinte de forma a avaliar o efeito do filtro gaussiano nos resultados. O ensaio analisado corresponde à ebulição em piscina com a configuração apresentada na secção 4.3.1.

$$E = \int_A \int_{\Delta t} q dA dt \quad (5.5)$$

Considerando A toda a região captada nos termogramas (semelhantes aos apresentados na figura 5.13(b) e figura 5.14(b)) e t o intervalo de tempo captado no vídeo, que corresponde à formação e destacamento de três bolhas. Considerou-se o fluxo de calor, q , equação 2.29, assumindo, q_0 , o fluxo imposto pela resistência, como nulo de forma a analisar apenas o balanço energético da bolha. Assim obtém-se os seguintes balanços energéticos para diferentes valores de desvio-padrão do filtro gaussiano, apresentados na figura 5.21(b)

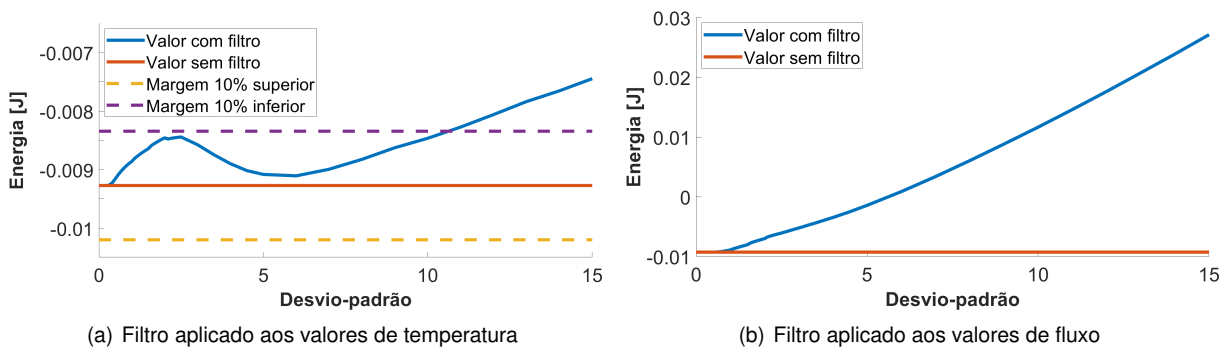


Figura 5.21: Balanço energético em função do desvio-padrão

Os valores obtidos quando o filtro é aplicado após o cálculo do fluxo de calor, figura 5.21(b), aumentam com o valor de desvio-padrão, cruzando a origem. Os valores obtidos com o filtro antes do cálculo de fluxo obtém balanços energéticos com menores variações, cerca de 10% até um desvio-padrão de 10, figura 5.21(a). Note-se que em ambos os casos o aumento do desvio-padrão provoca o afastamento dos valores face aos valores sem filtro. Como o balanço energético obtido filtrando os valores de temperatura tem variações menores, optou-se por implementar o filtro gaussiano ao sinal de temperatura e calcular o fluxo de calor após este tratamento. Apesar de não ser possível obter os valores reais de fluxo, os valores obtidos neste trabalho têm a ordem de grandeza expectável (anexo G).

Apesar de o balanço energético da figura 5.21(a) não ser muito influenciado pela variação do desvio-padrão, esta afecta a superfície de cada termograma. A figura 5.22 apresenta os perfis de fluxo de calor da bolha suavizados com filtros gaussianos com diferentes desvios-padrão.

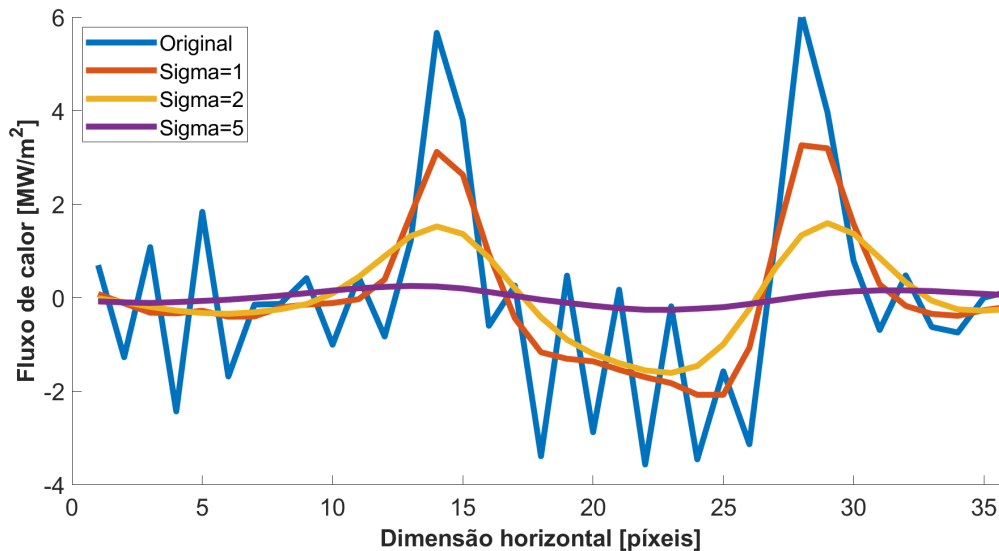


Figura 5.22: Fluxo de calor para diferentes valores de desvio-padrão

Como esperado ao aumentar o desvio-padrão os valores de temperatura variam mais suavemente resultando em perfis de fluxos também mais suaves, figura 5.22. No entanto a amplitude deste perfis varia significativamente com o aumento do desvio-padrão distorcendo os valores a obter a partir dos dados.

5.6 Ajuste de superfície com redes neuronais

De forma a obter resultados com valores de fluxo com menos oscilações, mas mantendo as variações de fluxo de cada ponto, optou-se por utilizar redes neuronais. Cada rede corresponde a uma superfície adaptada a cada termograma. Como as redes se ajustam aos dados, os valores de temperatura variam de forma mais suave, obtendo também valores de fluxo com menos oscilações. Apesar desta atenuação das variações dos dados, os picos de fluxo continuam visíveis nos resultados.

Devido à estrutura da rede, apresentada na secção seguinte, esta forma de cálculo de fluxo de calor aplica-se apenas aos ensaios de ebulição em piscina, apresentado na secção 4.3.1. A influência dos diferentes parâmetros das redes neuronais nos resultados é apresentada na secção 5.7.

5.6.1 Estrutura da rede neuronal

A rede neuronal utiliza como função de activação a função de base radial (*radial basis function* - RBF) que varia apenas com a distância ao centro. A figura 5.23 apresenta a fórmula da função e a sua representação gráfica.

$$g(x) = \exp(-x^2)$$

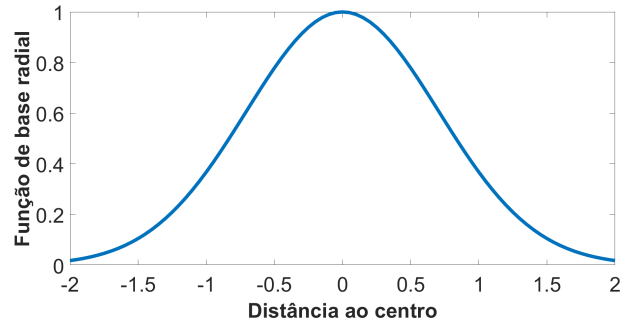


Figura 5.23: Função de base radial

A rede utilizada é constituída por duas camadas: a camada radial, e a camada linear, figura 5.24.

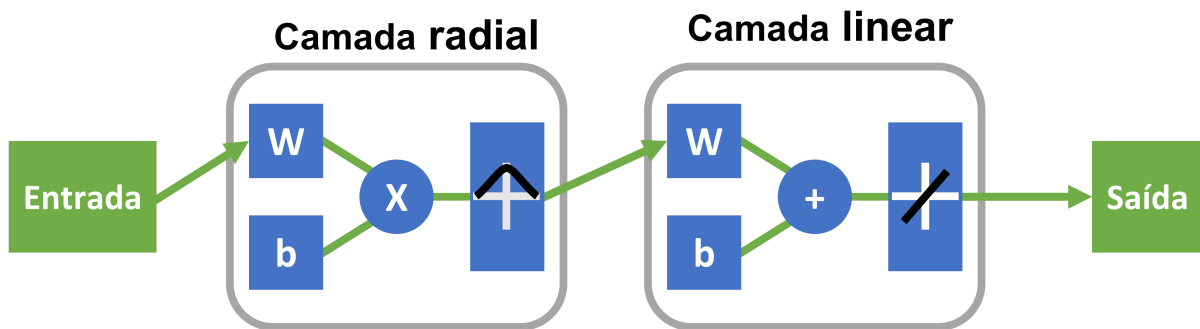


Figura 5.24: Estrutura da rede neuronal

Assim o resultado dos neurónios da primeira camada é combinado pela camada linear. Desta forma cada neurónio da camada radial corresponde a uma cúpula da superfície que quando combinadas aproximam a superfície de cada termograma. As redes utilizadas têm uma arquitectura com prealimentação¹ e são treinadas com o algoritmo de Levenberg–Marquardt.

Para além da arquitectura da rede é necessário definir o número de neurónios de cada camada, bem como o erro aceitável para o treino das redes.

O número de neurónios da primeira camada influencia a complexidade da superfície, facilitando o seu ajuste aos dados. No caso extremo, de um neurónio por píxel, a superfície seria reproduzida sem erro, incluindo o ruído de cada termograma. A segunda camada necessita apenas de um neurónio, visto que efectua a ponderação das várias cúpulas para obter a superfície final.

O erro aceitável é um dos parâmetros que define o critério de paragem para o treino da rede. Ao atingir o valor de erro finaliza-se o treino da rede. Assim este pode ser entendido como uma tolerância, ou ajuste da rede aos dados, uma vez que um menor valor de erro obriga a que a rede seja mais próxima da superfície original.

¹ feedforward

O ajuste das redes neuronais efectua-se de duas formas: adicionando um neurónio na primeira camada em cada iteração, de forma a melhorar a superfície e atingir o valor de ajuste necessário ou ao treinar a rede com todos os neurónios até que o erro máximo seja atingido. Caso a superfície possa ser descrita por menos neurónios que os especificados, a primeira opção é mais rápida, uma vez que adiciona os neurónios gradualmente. No entanto, como os neurónios são colocados de raiz não é possível assegurar a continuidade entre os vários instantes. Ao treinar a rede com todos os neurónios, os pesos das várias camadas podem ser inicializados com os valores da rede anterior garantindo uma maior continuidade entre os diferentes instantes.

No caso de a continuidade não ser assegurada, ocorrem mudanças bruscas entre as redes adaptadas aos termogramas, que provocam variações abruptas dos valores de temperatura e por consequência do valor de fluxo calculado. A figura 5.25 apresenta duas superfícies ajustadas com recurso a uma rede neuronal de 20 neurónios. Apesar dos valores apresentados serem semelhantes, o erro quadrado médio entre cada termograma é de $1,7 \times 10^{-2} K$, significativamente maior que o erro entre os termogramas originais de $1,2 \times 10^{-5} K$.

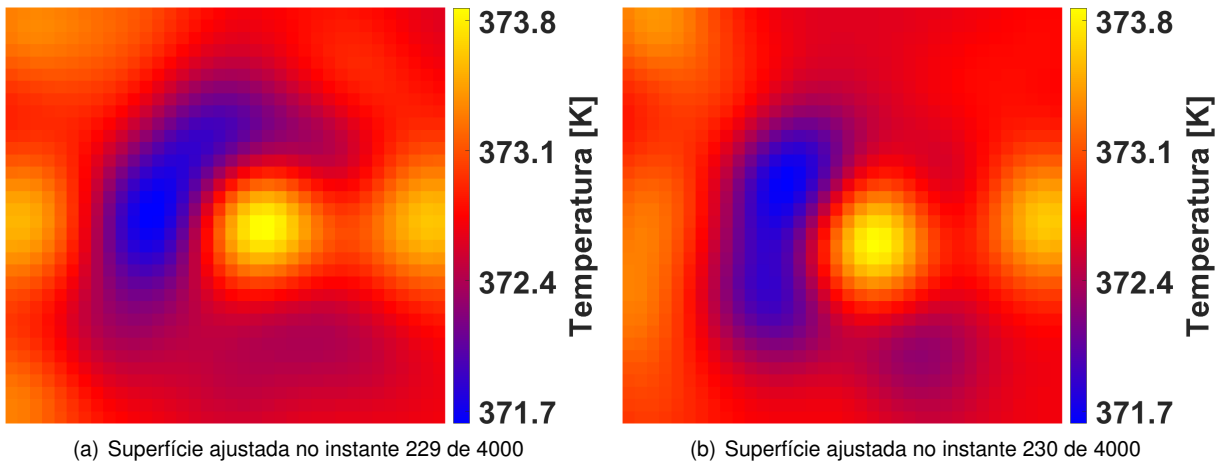
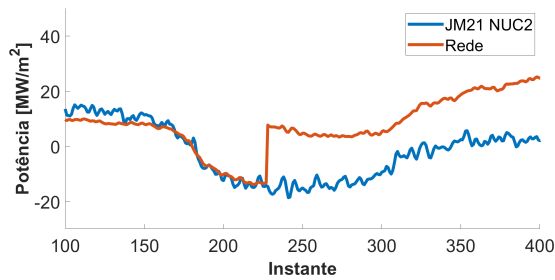


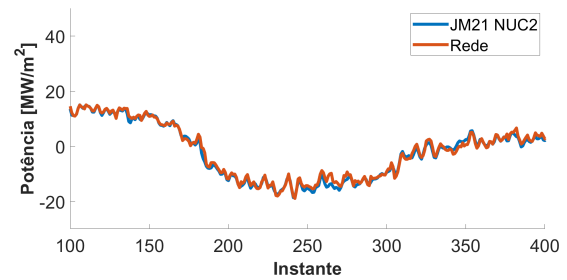
Figura 5.25: Comparação das superfícies ajustadas por uma rede neural de 20 neurónios em imagens consecutivas

De forma a evidenciar o surgimento de descontinuidades a figura 5.26 apresenta a potência dissipada com os valores originais e de duas redes neuronais: uma com apenas 20 neurónios, figura 5.26(a) e a outra com 150 neurónios, figura 5.26(b), com o mesmo valor de ajuste. Optou-se por apresentar a potência dissipada (integrando o fluxo de calor, considerando q_0 nulo, em toda a área do termograma), por apresentar uma evolução mais estável que os valores de fluxo de um píxel. Desta forma a descontinuidade destaca-se face às oscilações do valor de fluxo, o que não ocorre analisando um píxel individual. A potência designada como original corresponde à potência calculada a partir dos termogramas não tratados, obtidos com a nova rotina JM21 com NUC2, secção 4.2.

Como esperado, devido ao número de neurónios, a potência calculada com a rede com 150 neurónios, figura 5.26(b) apresenta valores que seguem oscilações dos valores originais. A potência calculada com a rede com 20 neurónios, figura 5.26(a) também segue as variações de valores de fluxo, mas com menos oscilações. No entanto como a superfície é mais simples é também mais susceptível às descontinuidades, apresentando uma descontinuidade no instante 230.



(a) Potência dissipada original e de rede neuronal com 20 neurónios



(b) Potência dissipada original e de rede neuronal com 150 neurónios

Figura 5.26: Comparação das superfícies ajustadas por uma rede neural de 20 neurónios em imagens consecutivas

Apesar de esta descontinuidade ser facilmente identificável, e por consequência ser possível rectificar os valores calculados, ao longo dos vários instantes surgem mais descontinuidades que não são facilmente distinguíveis das oscilações reais. Como tal, optou-se por implementar o ajuste de redes neuronais inicializando o treino de cada rede com os valores obtidos para a rede do termograma anterior.

Apesar de a resolução dos termogramas obtidos ser reduzida, os dados utilizados no treino das redes neuronais devem cingir-se ao fenómeno em estudo. Ao reduzir a área da superfície, a sua complexidade reduz-se sendo possível obter uma melhor aproximação com a rede neuronal e garantir que a informação relevante é preservada.

A figura 5.27 apresenta a influência da selecção da região utilizada para o treino das redes neuronais.

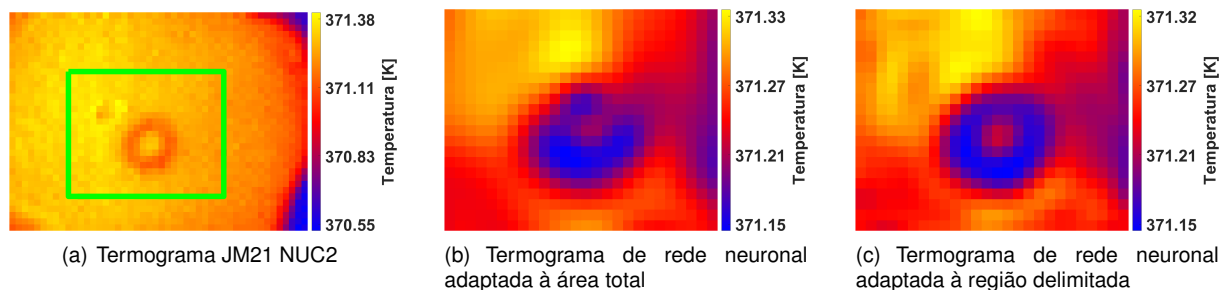


Figura 5.27: Rede adaptada a diferentes áreas

A figura 5.27(a) apresenta a totalidade do termograma. Ao treinar a rede neuronal com os dados do termograma completo, a rede não preserva a informação na região da bolha. Observando o pormenor da região assinalada a verde, figura 5.27(b), a região da bolha apresenta apenas uma região com menor temperatura sem o pico de temperatura central. Ao adaptar a rede apenas à área seleccionada, obtém-se um maior detalhe do fenómeno em estudo, figura 5.27(c), preservando o pico de temperatura.

Apesar da selecção de uma região para a adaptação da rede preservar a informação da região seleccionada, pode ser necessário manter a área total do termograma para o treino da rede neuronal. Para tal aplica-se um aumento de resolução, secção 5.4, na região da bolha, de forma a que os dados de treino tenham uma maior densidade nessa região. Assim o termograma adaptado cobre todo o termograma e mantém a informação da bolha, figura 5.28.

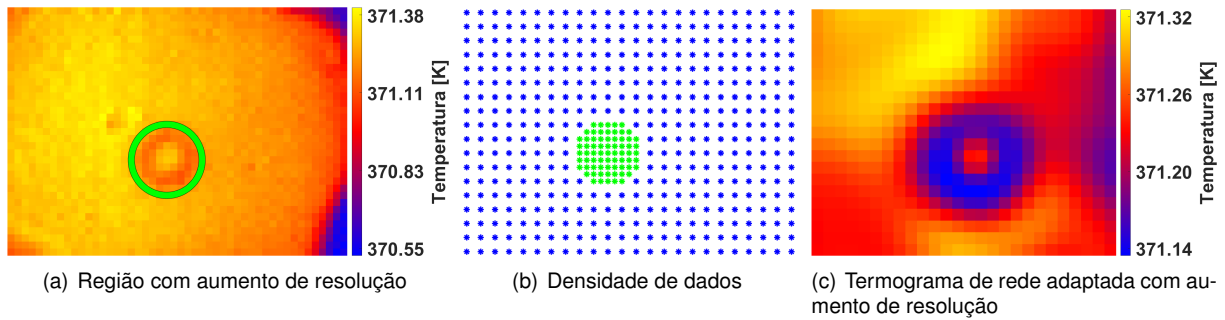


Figura 5.28: Efeito da aplicação de diferentes densidades de dados na adaptação de redes neurais

A figura 5.28(a) apresenta um círculo em torno da região com aumento de resolução. Neste caso as redes neurais treinadas representam a totalidade do termograma, mas a rede treinada com os dados sem aumento de resolução, igual à apresentada na figura 5.27(b), não preserva o pico na região da bolha, enquanto que a rede treinada com uma maior densidade de pontos, figura 5.28(c) mantém o pico de temperatura central. A figura 5.28(b) apresenta a malha de pontos utilizados para o treino da rede. Os pontos azuis correspondem aos pontos sem aumento de resolução e os verdes aos pontos interpolados, para aumentar o peso desta região no treino da rede neuronal.

5.7 Cálculo de fluxo de calor com ajuste de superfície

Tendo definido a estrutura das redes neurais e os parâmetros a ajustar, esta secção compara os resultados de fluxo de calor calculados a partir dos vídeos de temperatura com o tratamento da rotina JM21 NUC2, e os vídeos obtidos ao ajustar redes neurais aos dados de temperatura com o tratamento de JM21 NUC2. A influência dos parâmetros apresentados na secção 5.6 nos resultados de fluxo de calor é analisada de forma a ajustar os parâmetros ao ensaio em estudo, ebulição em piscina, secção 4.3.1. Uma vez que os vídeos obtidos com a rotina JM21, secção 4.2, são utilizados como base para o ajuste de redes neurais, estes são referidos pelo nome da metodologia, sendo os termogramas obtidos por ajuste referidos como rede ou designando o número específico de neurónios.

A figura 5.29 apresenta a vista lateral da bolha, captada com a câmara de alta velocidade, figura 5.29(a) e a vista inferior correspondente, captada com a câmara termográfica, figura 5.29(b).

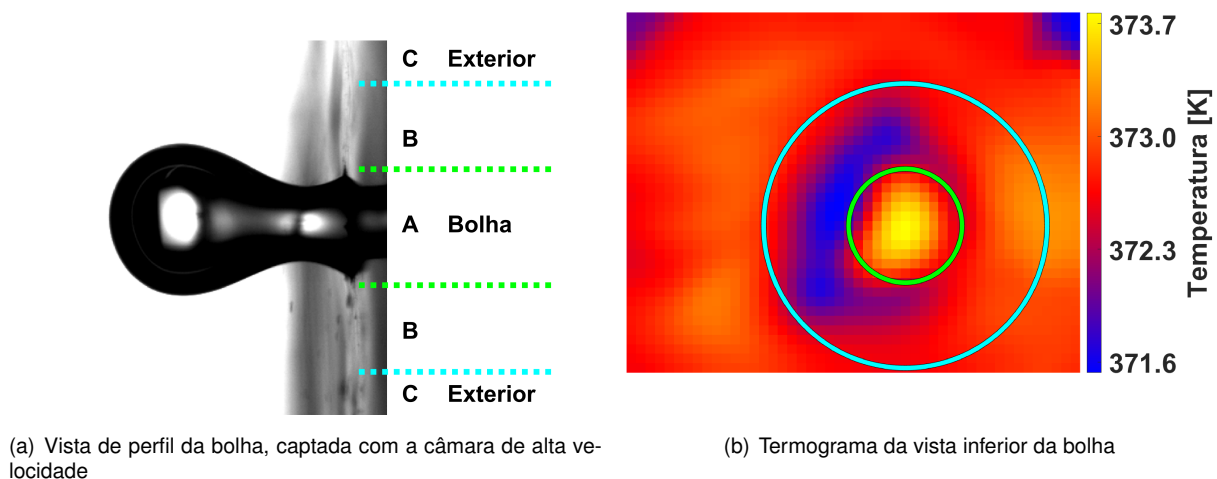


Figura 5.29: Regiões da bolha

Com estas duas vistas é possível definir as diferentes regiões do termograma: a região A, a bolha, a região B e a região C, a região exterior. Note-se que as linhas presentes na figura 5.29(a) correspondem aos limites dos círculos da figura 5.29(b). A região da bolha é directamente influenciada pela formação e destacamento da bolha, situada entre as linhas verdes, figura 5.29(a) e no interior do círculo verde, figura 5.29(b). A região B entre as linhas verdes e as azuis da figura 5.29(a) e entre os círculos verde e azul da figura 5.29(b), ainda é influenciada pela dinâmica da bolha, apresentando oscilações nos valores de fluxo de calor. A região exterior, situa-se para além das linhas azuis da figura 5.29(a) e no exterior do círculo azul, figura 5.29(b). Como esta região não é afectada pela dinâmica da bolha, o seu fluxo de calor é apenas afectado pelas correntes de convecção dentro do tanque, tendo assim um valor aproximadamente constante durante os ensaios. As duas regiões com menor valor de temperatura situadas nos cantos superiores da imagem correspondem ao limite do orifício circular através do qual é filmada a folha metálica. Como tal, os valores de fluxo na região limite do orifício apresentam um valor elevado, mas não são relevantes para a análise do fenómeno em estudo.

Os resultados apresentados nesta secção são generalizáveis aos diferentes ensaios realizados em condições semelhantes. No entanto os resultados apresentados correspondem ao mesmo ensaio, de forma a manter continuidade entre os termogramas analisados. O vídeo com aproximadamente 4 segundos, com 4052 termogramas tem uma dimensão de 38 por 48 píxeis. A bolha, o fenómeno em estudo neste ensaio ocupa a maior parte da área do termograma, figura 5.30, não sendo necessário alterar a densidade de pontos na região da bolha, região A da figura 5.29, como apresentado na secção 5.6.1.

De forma a simplificar os resultados apresentados optou-se por anular o termo de fluxo de calor imposto, q_0 , para que os valores de fluxo nas regiões mais distantes da bolha sejam próximos de zero servindo como referencial. Note-se que o fluxo imposto varia entre cada ensaio, mas é constante em cada instante e em cada píxel, alterando apenas os valores de fluxo numa constante. O valor do erro de temperatura dos termogramas, analisado na secção 5.2, é constante no tempo e no espaço. Assim apesar das superfícies não apresentarem valores iguais ou superior ao de ebulição da água, $373 K$, em toda a sua área, este facto não afecta o cálculo de fluxo de calor uma vez que este utiliza o valor das derivadas de temperatura.

Note-se que os valores de temperatura são suaves ao longo da imagem quer no termograma médio, figura 5.30(a), quer no termograma de um instante específico, figura 5.30(b). Os valores de fluxo, figuras 5.30(c) e 5.30(d), são menos semelhantes, em especial na região longe da bolha, onde como a temperatura é aproximadamente constante o fluxo deveria ser nulo. No entanto devido a pequenas variações de temperatura o fluxo nesta região varia entre cada instante apesar de o valor médio ser próximo de zero.

Inicialmente optou-se por ajustar redes com 50 e 100 neurónios e uma tolerância de $0,005 K$. Para comparar os resultados apresentam-se as evoluções de temperatura em dois pontos: um ponto longe da bolha, região exterior figura 5.31 e um ponto da bolha, região bolha figura 5.32. Estas regiões encontram-se assinaladas na figura 5.29.

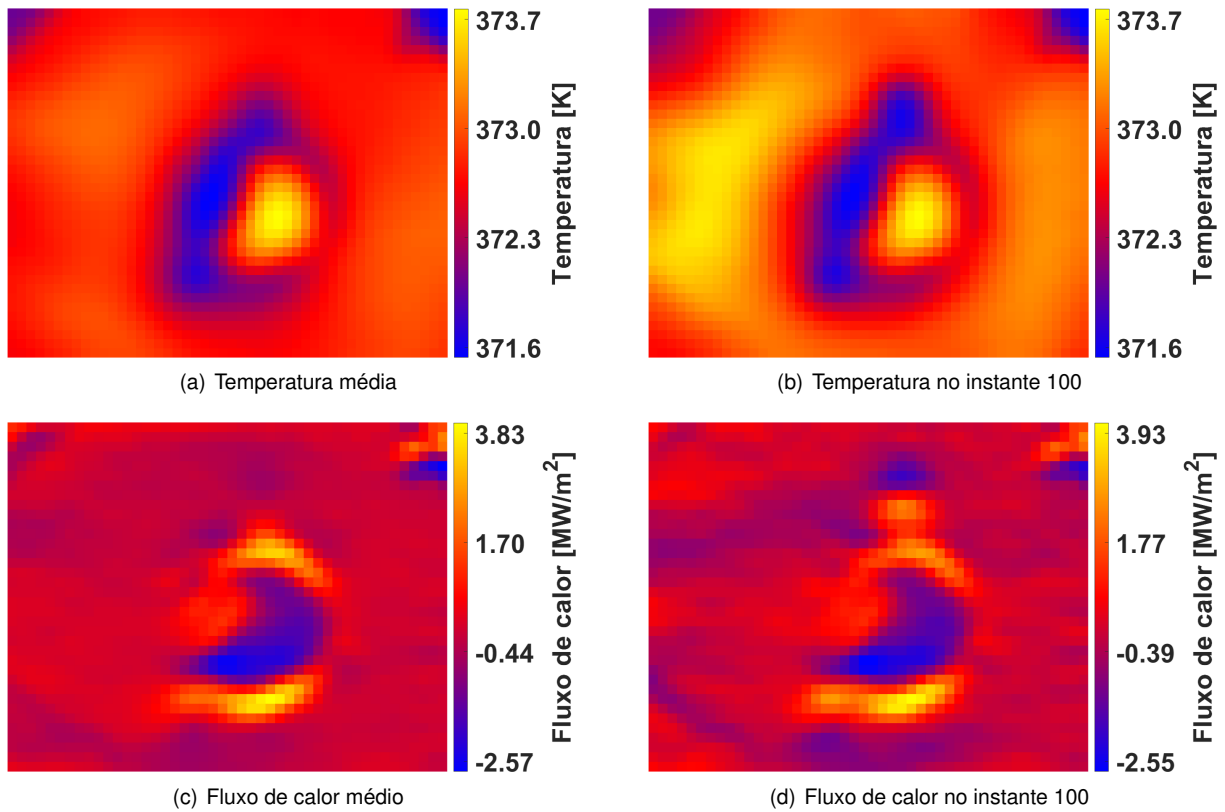
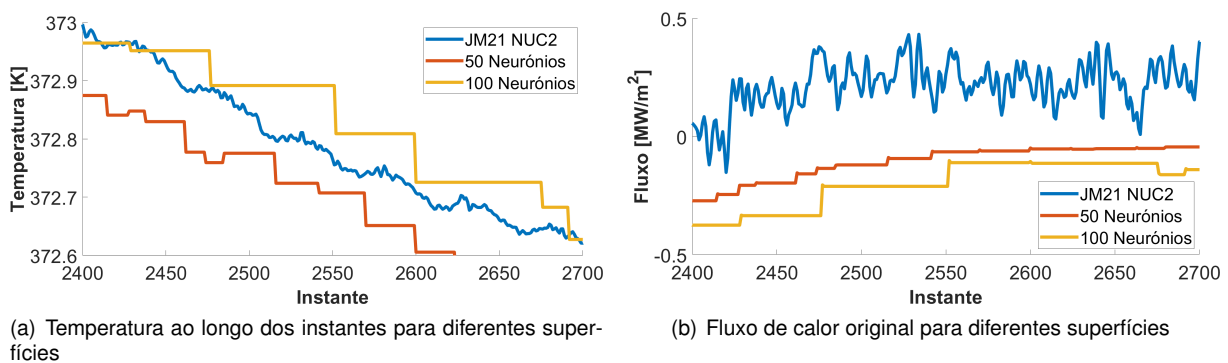


Figura 5.30: Temperatura e fluxos de calor JM21 NUC2



(a) Temperatura ao longo dos instantes para diferentes superfícies

(b) Fluxo de calor original para diferentes superfícies

Figura 5.31: Comparação da temperatura e fluxo de um ponto longe da bolha, região exterior figura 5.29

Como esperado a temperatura do ponto longe da bolha, figura 5.31(a), não é influenciada pelo número de neurónios tendo uma variação de temperatura reduzida, $0,3^{\circ}C$, no período apresentado, correspondente a $0,1s$. Como a variação de temperatura deste ponto é também próxima da temperatura da vizinhança o fluxo de calor, figura 5.31(b), é próximo de zero.

A diferença entre os valores calculados com recurso a redes neuronais é também facilmente visível face aos valores da rotina JM21. Quer para a temperatura, quer para o fluxo, os valores são mais estáveis existindo vários instantes consecutivos sem variação. Isto ocorre porque variação entre termogramas é suficiente pequena para que a rede de um termograma cumpra o critério de erro nos termogramas seguintes, não sendo necessário fazer ajustes aos pesos da rede. Como tal, é evidente que a tolerância de $0,005K$ não é suficientemente apertada para garantir uma adaptação das superfícies a cada termograma. A figura 5.32 apresenta os valores de temperatura e fluxo para um ponto da bolha, região da bolha, figura 5.29.

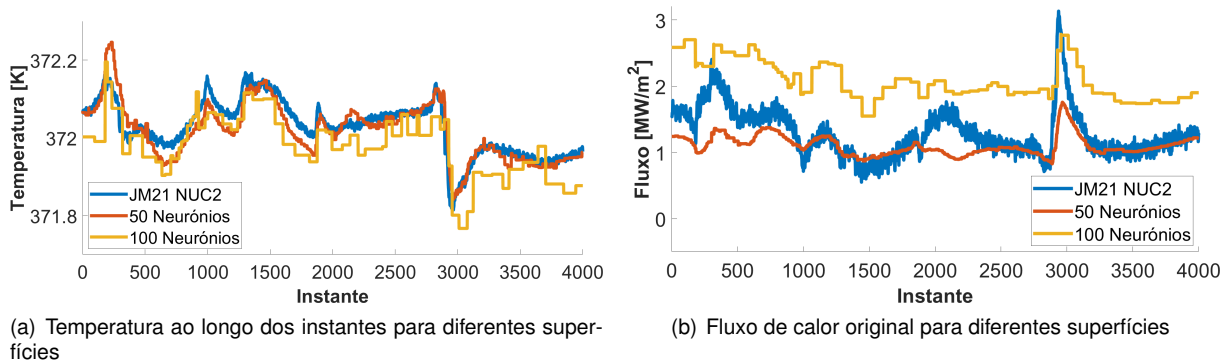


Figura 5.32: Comparação da temperatura e fluxo de um ponto da bolha, região da bolha, figura 5.29

Note-se que no instante 3000 ocorre uma nucleação visível pela queda abrupta da temperatura e um pico do valor de fluxo. Para os valores de temperatura não é visível a diminuição das oscilações com a rede, nem os patamares dos valores de temperatura da rede com menos neurónios. Na figura de fluxo esta melhoria é visível uma vez que os valores calculados com as redes são uma linha fina e não uma oscilação constante de valores como o fluxo calculado sem redes neuronais.

As discrepâncias de valores verificadas devem-se à tolerância dada no ajuste da superfície. Note-se também que o valor de fluxo máximo na bolha difere com os métodos de cálculo apesar de a evolução utilizando a rede ser mais estável.

De modo a obter resultados mais próximos entre ambas as redes diminuiu-se a tolerância do erro para 0,0005 K. A figura 5.33 apresenta os resultados de valores de fluxo de um ponto da região exterior, figura 5.29.

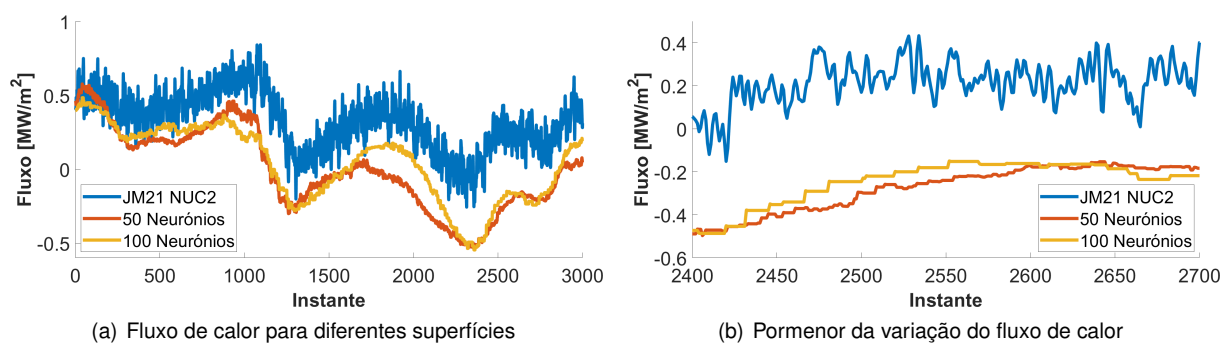


Figura 5.33: Fluxo de calor de um ponto longe da bolha, região exterior, figura 5.29

Tal como na figura 5.31, os resultados da figura 5.33 obtidos com as superfícies tratadas têm menos oscilações. Com a redução do valor da tolerância, as superfícies são ajustadas mais frequentemente, resultando em menos patamares. No caso da superfície com 100 neurónios ainda são visíveis patamares que cobrem vários instantes, mas com variações menores do que os da figura 5.31(b). Focando a análise na variação de fluxo durante o ensaio, figura 5.33(b), não são visíveis os patamares nos valores da superfície ajustada com 50 neurónios. Os valores de fluxo das superfícies são próximos entre si com alguma discrepância face aos valores de JM21. No entanto estes seguem a mesma tendência que os valores de JM21. A figura 5.34 apresenta os valores de fluxo num ponto da bolha, figura 5.29.

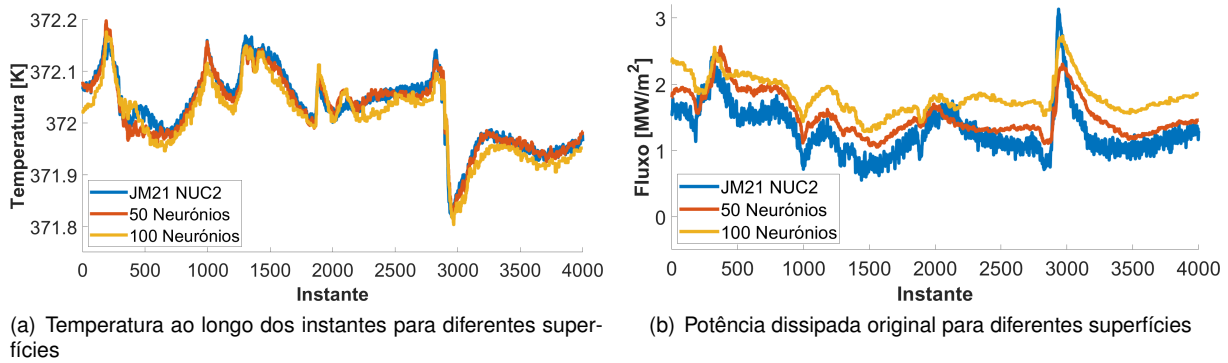


Figura 5.34: Comparação da temperatura e potência dissipada de um ponto da bolha, bolha figura 5.29

Tal como para a região exterior, figura 5.29, devido à diminuição da tolerância, não são visíveis patamares quer nos valores de temperatura, figura 5.34(a), quer nos valores de fluxo, figura 5.34(b). O aumento de fluxo correspondente à nucleação apresenta discrepâncias face ao valor de JM21, apesar de pela sua forma ser claramente identificável o instante da nucleação.

De modo a comparar mais objectivamente os resultados utilizou-se a seguinte métrica para medir a discretização dos dados:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n l \left(\left. \frac{\partial q_{i,j}}{\partial t} \right|_{t=k} = 0 \right)}{MNn} \quad (5.6)$$

Sendo $l(X = 0)$ a ocorrência de $X = 0$, com $\left. \frac{\partial q_{i,j}}{\partial t} \right|_{t=k} = 0$ a repetição do valor do píxel i, j no instante k . Os somatórios englobam as duas dimensões espaciais do termograma, M por N e a dimensão temporal, com n instantes. Esta métrica varia entre 0 e 1, sendo os extremos 0 o valor quando o fluxo de calor varia em todos os instantes, e 1 quando não existe variação entre nenhum dos instantes. A figura 5.35 apresenta a evolução dos valores de discretização do fluxo calculado com diferente número de neurónios e diferentes tolerâncias.

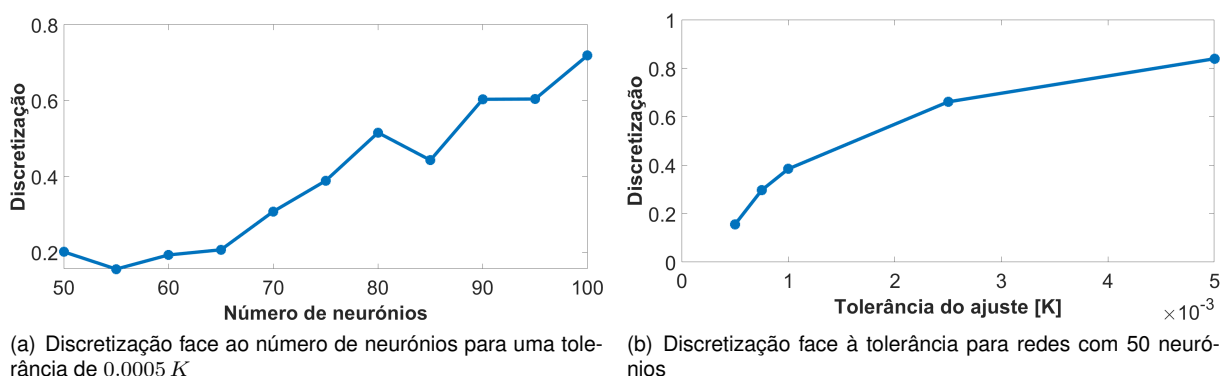


Figura 5.35: Comparação da discretização do sinal face à tolerância e número de neurónios

Tal como verificado ao comparar os resultados anteriores, quer o número de neurónios, quer a tolerância influenciam a discretização. No caso do número de neurónios, a discretização diminui com o seu número uma vez que menos neurónios obrigaram a que a superfície seja adaptada em todos os instantes. No caso da tolerância, ao reduzir o seu valor, a discretização diminui, uma vez que um ajuste mais apertado também leva a uma actualização mais frequente das superfícies.

Para referência os valores dos vídeos capturados não têm píxeis com valores de temperatura consecutivos iguais, tendo uma discretização nula. No entanto como o objectivo da utilização de redes neuronais é também suavizar os resultados, o patamar de 0,2 visível na figura 5.35(a) é um valor adequado para os objectivos.

Para além do desempenho da rede é necessário ter em conta o tempo de execução em função dos parâmetros. A figura 5.36 apresenta a variação do tempo de execução do ajuste de redes neuronais a um vídeo.

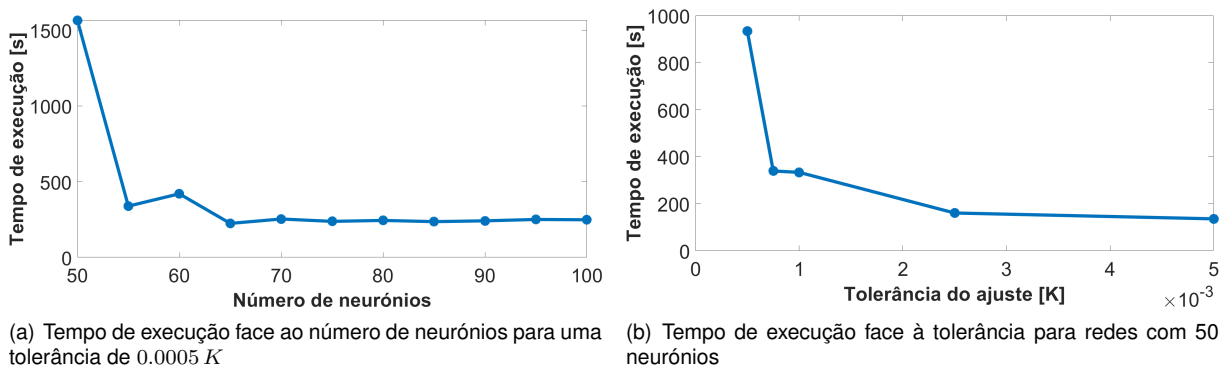


Figura 5.36: Comparação do tempo de execução face à tolerância e número de neurónios

Como esperado ao diminuir a tolerância o tempo de execução aumenta, levando a uma maior frequência de actualização da rede. O número de neurónios influencia também o tempo de execução, mas de forma inversa. Isto deve-se ao facto de um maior número de neurónios permitir reproduzir com maior facilidade a superfície, não necessitando de tantas iterações para obter o resultado com um valor de erro satisfatório.

Assim é necessário garantir que existe um número de neurónios suficiente para reproduzir a superfície de forma correcta e que sejam suficientes para a superfície se adaptar e cumprir o valor de erro sem demasiadas alterações, mantendo um custo computacional razoável.

Após o ajuste das redes é necessário simular cada rede para obter os valores de cada termograma. Esta operação tem um custo computacional, mas sem uma tendência clara, aparentando ser independente do número de neurónios da rede.

Com a utilização de redes neuronais, a malha de pontos de temperatura pode ter a dimensão desejada. Assim é possível aumentar a resolução das imagens e obter contornos de áreas menos pixelizadas. A figura 5.37 apresenta a área da superfície com valores médios temporais de fluxo inferiores a $-1 MWm^{-2}$.

Em todas as figuras a mancha localiza-se na mesma região. No entanto a sua forma é diferente nas figuras 5.37(b) e 5.37(c) devido à utilização de redes neuronais para suavização dos termogramas. O aumento de resolução permite obter um contorno mais suave, devido ao maior número de píxeis.

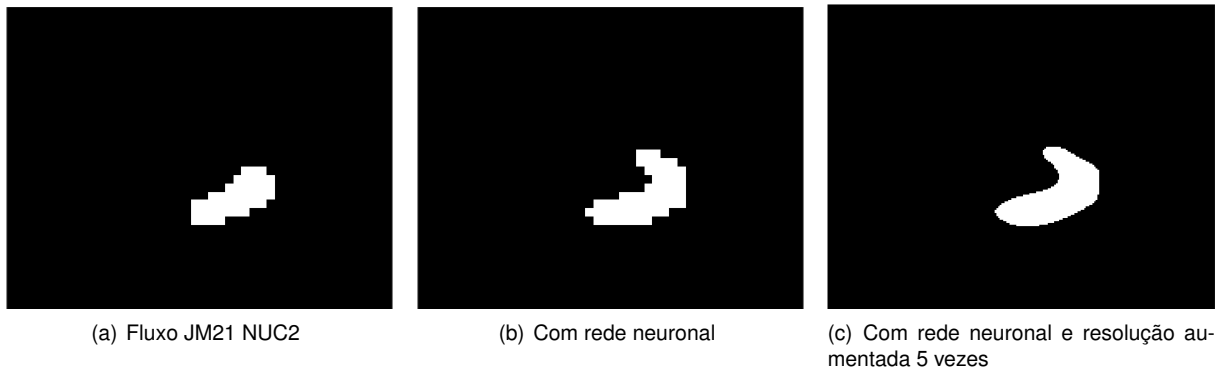


Figura 5.37: Área de fluxo menor que $-1 MWm^{-2}$

No momento de nucleação da bolha, os pontos da interface tem um pico do valor de fluxo. Para obter o valor de pico de fluxo é necessário localizar estes pontos correctamente em cada nucleação. Para tal registaram-se os instantes de cada nucleação analisando os vídeos captados com a câmara de alta velocidade. Para cada nucleação, calculou-se o aumento de fluxo de cada píxel, seleccionando a área com o maior aumento de fluxo e valor médio positivo. A figura 5.38 apresenta as regiões com os picos das três nucleações. Os pontos com uma nucleação estão assinalados a verde, azul-escuro e vermelho, os pontos com duas nucleações a amarelo, rosa e azul claro e os pontos com três nucleações a branco.

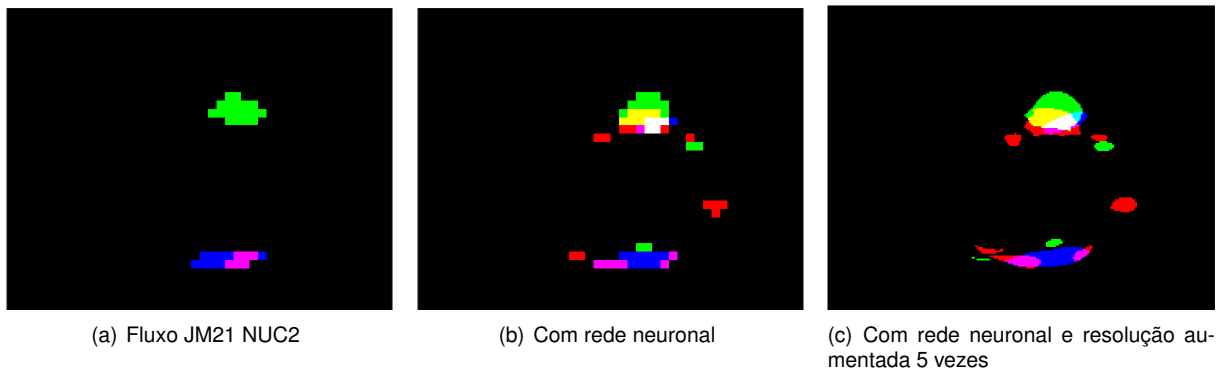


Figura 5.38: Regiões de picos de fluxo

Utilizando os valores de fluxo JM21 NUC2, são detectáveis apenas duas das nucleações, assinaladas a verde e azul-escuro. No entanto ao calcular o fluxo utilizando as redes neuronais, os pontos com picos de fluxo de uma terceira nucleação ficam visíveis, pontos assinalados vermelho. O aumento de resolução, figura 5.38(c) permite obter contornos menos pixelizados e distinguir claramente as regiões onde se localizam as diferentes nucleações. Como esperado estes pontos localizam-se em torno da bolha, na região B da figura 5.29, sendo este contorno mais evidente nos resultados tratados com redes neuronais.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

No decorrer deste trabalho foram analisadas metodologias para a aquisição de dados com a câmara termográfica *Onca-MWIR-InSb-320*, rotinas de tratamento de dados de temperatura e cálculo de fluxo de calor. Este capítulo apresenta as conclusões resultantes deste trabalho e propostas de trabalho futuro. O parágrafo seguinte resume o trabalho efectuado no desenvolvimento da metodologia proposta JM21, seguido pela análise das conclusões obtidas na análise de resultados.

Utilizando os princípios teóricos apresentados na secção 2 e os tratamentos de imagens termográficas apresentados na secção 3 foi implementada a rotina de processamento dos termogramas, JM21 apresentada na secção 4.2. Esta rotina consiste no tratamento de NUC, utilizando a relação entre ADU e temperatura obtida na secção 2.3.5. No entanto esta rotina necessita de determinar uma emissividade experimental, como descrito na secção 5.1. Devido a constrangimentos na definição da Rol, a rotina proposta JM21 necessita de obter pelo menos uma, idealmente duas, imagens da cena a temperatura constante, de forma a efectuar o NUC correctamente. Note-se que a metodologia proposta JM21 utiliza o NUC, devido aos resultados promissores apresentados na secção 3. O método de CS também apresenta bons resultados, em relação ao tratamento de imagem e custo computacional, mas ao não obter valores quantitativos não é compatível com as necessidades deste trabalho.

Com a utilização das configurações experimentais apresentadas, secção 4.3, obtiveram-se termogramas com ambas as rotinas de modo a comparar os seus resultados. Face aos resultados experimentais de temperatura, a nova rotina JM21 obtém termogramas com maior precisão de valores, corroborados pelos resultados de cenas com temperatura uniforme, secção 5.3.1. A rotina JM21 remove mais eficazmente o ruído existente nos termogramas devido à não-uniformidade, facilitando a correcta identificação do fenómeno em estudo, permitindo no caso de a figura 5.13 distinguir um defeito da superfície do ponto de nucleação. Para além da maior exactidão, a rotina JM21 não requer a utilização de um termopar auxiliar para a conversão dos valores de ADU para temperatura durante a realização dos ensaios. Esta particularidade permite uma maior flexibilidade nas montagens experi-

mentais que não necessitam de acomodar um termopar próximo do fenómeno em estudo, utilizando a vantagem de a termografia ser uma técnica não intrusiva. A não-utilização de uma temperatura de referência permite à rotina JM21 não depender da temperatura do termopar que pode ser afectada por não aderir correctamente à superfície em estudo, ou estar numa posição ligeiramente diferentes entre os ensaios, reportando valores de temperatura com erro. No caso de ser possível obter duas referências, a rotina JM21 com NUC de dois pontos apresenta melhores resultados de não-uniformidade, mantendo o valor médio do termograma, figura 5.6. Caso seja possível obter apenas uma referência, NUC de deslocamento, os valores de não-uniformidade são semelhantes aos obtidos com a rotina PP16 (caso não exista selecção da Rol), no entanto a não-dependência do termopar torna esta rotina mais vantajosa.

Face à exactidão dos valores de temperatura, a rotina JM21 obtém um valor de erro absoluto inferior a $2^{\circ} C$ utilizando uma emissividade determinada para uma gama de temperaturas $50^{\circ} C$, obtendo-se um erro inferior a $1^{\circ} C$ quando utilizada uma emissividade determinada para uma gama inferior a $10^{\circ} C$, secção 5.2. Uma vez que estes valores são próximos do valor de erro especificado pelo fabricante, ($\pm 1^{\circ} C$, Anexo A), esta rotina não aumenta o valor de erro da câmara. Em conjunto com a menor gama de valores de ADU obtida nos termogramas tratados com a rotina JM21, os vídeos de temperatura obtidos apresentam uma melhoria face aos vídeos obtidos com a rotina PP16.

Para o cálculo do fluxo de calor, foram analisados os efeitos do aumento de resolução da imagem e aplicação do filtro gaussiano. O aumento de resolução deve ter em conta a fase do processo onde é aplicado. Caso o cálculo de derivadas seja directamente aplicado ao termograma aumentado poderão surgir artefactos visuais, sendo preferível aumentar a resolução apenas após o cálculo de fluxo. O filtro gaussiano deve também ser aplicado aos valores de temperatura antes do cálculo de fluxo de forma a não distorcer os valores quantitativos obtidos.

A abordagem proposta para o cálculo do fluxo de calor, aplicada ao cálculo de fluxo nos ensaios de ebulição em piscina, com o aumento de resolução, secção 5.4, e adaptação de superfícies com redes neuronais aos termogramas, secção 5.6, permitiu reduzir o ruído presente nos dados experimentais sem eliminar os valores de picos presentes nos dados de fluxo. A influência dos principais parâmetros deste ajuste, o número de neurónios de cada rede e a tolerância do ajuste, foram analisados, sendo que este último necessita de ser minimizando de modo a manter a fiabilidade dos dados. No caso do número de neurónios este deve ser reduzido ao mínimo de modo a evitar o surgimento de patamares nos valores ao longo do tempo, mas mantendo o tempo de execução da rotina dentro do razoável.

A abordagem proposta permite identificar os picos de fluxo correspondentes ao destacamento da bolha com maior frequência, figura 5.38. Juntamente com o aumento de resolução, esta abordagem permite a obtenção de imagens menos pixelizadas e com maior definição do fenómeno em estudo. Esta abordagem detecta mais frequentemente as nucleações, utilizando o mesmo critério, sendo por isso mais fiável.

6.1 Trabalho futuro

Esta secção apresenta propostas de trabalho futuro, enquadradas nos objectivos atingidos neste trabalho.

Durante este trabalho os vários vídeos foram captados com o *software Matlab* e os parâmetros da câmara foram configurados com o *software* próprio da câmara. De modo a simplificar a captura de vídeos, a criação de um *software* que agregue as funções de captura e configuração da câmara simplificaria o processo de aquisição de dados. Uma vez que o fabricante da câmara *Xeneth*, disponibiliza um *pack* de desenvolvimento, na linguagem C, recomenda-se a utilização desta linguagem para a criação do *software*. Uma funcionalidade importante deste *software* seria a visualização da imagem em tempo real, uma vez que o *software* utilizado para a captura de imagem, o *Matlab*, apenas permite visualizar a imagem com uma frequência máxima de 10 imagens por segundo, o que dificulta a focagem da câmara.

A criação de uma interface gráfica para o tratamento de termogramas, a partir do código já existente permitiria uma maior facilidade na sua utilização, nomeadamente na definição da área aplicar o tratamento, com a criação de uma ferramenta de selecção.

Como a definição da região de interesse altera o alinhamento dos ganho e viés para o tratamento de NUC, a determinação desse desvio e consequente rectificação, permitiria utilizar imagens de referência de uma cena genérica. Assim os ensaios não necessitariam de vídeos auxiliares para o tratamento de imagem aumentando a flexibilidade das configurações experimentais.

As configurações experimentais apresentadas neste trabalho, colocam a superfície em estudo de frente para a câmara. Devido a constrangimentos da montagem pode ser necessário inclinar a superfície face à câmara alterando o factor de forma. Este efeito pode ser estudado de forma a flexibilizar a posição da câmara.

O efeito de Narciso, o reflexo do sensor arrefecido na lente, não foi encontrado nas montagens experimentais utilizadas. No entanto este deve ter tido em consideração para montagens e tratamentos futuros.

A abordagem com redes neuronais apresentada apenas foi aplicada a ensaios de ebulição em piscina. A aplicação desta abordagem a outros ensaios com as adaptações necessárias a nível dos diferentes parâmetros, função de activação, número de neurónios, pode obter resultados de fluxo com menos oscilações.

No entanto a abordagem de redes neuronais aplicada aos ensaios de ebulição em piscina pode ser melhorada. Fazendo uso de características da bolha, simetria em torno do eixo vertical, pode se adaptar a rede a um perfil, com distância ao centro e altura, obtendo a evolução do perfil da bolha ao longo do tempo. Para além disso, o ajuste da rede a cada termograma não tem em consideração o termograma anterior. Ao utilizar um ajuste que considere os termogramas anteriores pode-se obter valores mais estáveis no tempo.

Bibliografia

- [1] P. Pontes. Thermographical analysis of interface heat transfer mechanisms, with high temporal resolution. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2016.
- [2] N. Gromicko e J. McKenna. The history of infrared thermography. International association of certified home inspectors, 2016. Acedido a 24/09/2021 em <https://www.nachi.org/history-ir.htm>.
- [3] J. Chouinard. What can the new low cost avt goldeye short wave infrared (swir) camera do for you? 1stvision, 2016. Acedido a 24/09/2021 em <https://www.1stvision.com/machine-vision-solutions/2016/02/what-can-new-low-cost-avt-goldeye-short.html>.
- [4] Swir and the u-2. Sensors unlimited, 2009. Acedido a 24/09/2021 em <https://www.sensorsinc.com/technology/swir-and-the-u-2/>.
- [5] G. Cardone e G. M. Carlomagno. Infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Experiments in Fluids*, 2010.
- [6] A. Kharpal. 'world's first' thermal camera smartphone launched. CNBC, 2016. Acedido a 24/09/2021 em <https://www.cnn.com/2016/02/18/worlds-first-thermal-camera-image-smartphone-launched-bullitt-mobile-world-congress.html>.
- [7] D. L. Perry e E. L. Dereniak. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors. *Optical Engineering*, 1993.
- [8] M. Sheng, J. Xie, e Z. Fu. Calibration-based NUC method in real-time based on irfpa. *Physics Procedia*, 2011.
- [9] Y. Shi, T. Zhang, Z. Cao, e L. Hui. A feasible approach for nonuniformity correction in IRFPA with nonlinear response. *Infrared Physics & Technology*, 2005.
- [10] J. G. Harris e Y.-M. Chiang. Nonuniformity correction using the constant-statistics constraint: Analog and digital implementations. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1997.
- [11] C. C. Reyes-Aldasoro. Retrospective shading correction algorithm based on signal envelope estimation. *Electronics Letters*, 2009.

- [12] T. Tasdizen, J. Elizabeth, e R. T. Whitaker. Non-uniform illumination correction in transmission electron microscopy. In *in MICCAI Workshop on Microscopic Image Analysis with Applications in Biology*, 2008.
- [13] Z. Li, G. Xu, Y. Cheng, Z. Wang, Q. Wu, e F. Yan. A structure prior weighted hybrid ℓ_2 - ℓ_p variational model for single infrared image intensity nonuniformity correction. *Optik*, 2021.
- [14] G. Kordelas, P. Daras, P. Klavdianos, e E. Izquierdo. Accurate stereo 3d point cloud generation suitable for multi-view stereo reconstruction. In *Visual Communications and Image Processing*, 2014.
- [15] B. M. Quine, V. Tarasyuk, H. Mebrahtu, e R. Hornsey. Determining star-image location: A new sub-pixel interpolation technique to process image centroids. *Computer Physics Communications*, 2007.
- [16] P. P. Editora. termografia. Dicionário infopédia da Língua Portuguesa, 2021. Acedido a 06/05/2021 em <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/termografia>.
- [17] G. Tattersall. Choosing the appropriate colour palette for thermal imaging in animals. Publicado em Ramphastos Ramblings, 2014. Acedido a 22/04/2021 em <http://ramphastosramblings.blogspot.com/2014/03/choosing-appropriate-colour-palette-for.html>.
- [18] G. Carlomagno. Infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Exp Fluids*, 2010.
- [19] D. Kule. Black body. Em domínio público, 2010. Acedido a 22/04/2021 em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_body.svg.
- [20] Y. Khmou. planck's law. MATLAB Central File Exchange, 2012. Acedido a 22/04/2021 em <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/37600-planck-s-law>.
- [21] K. Roberatory. Atmospheric opacity. Keith's Thoughts, 2016. Acedido a 21/09/2021 em <https://keith.robertory.com/?p=1173>.
- [22] N. Horny. FPA camera standardisation. *Infrared Physics & Technology*, 2003.
- [23] J. H. Lienhard IV e J. H. Lienhard V. A heat transfer textbook. Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 3ª edição edition, 2008.
- [24] J. R. Howell. A catalog of radiation heat transfer configuration factors, 2021. Acedido a 27/04/2021 em <http://www.thermalradiation.net/tablecon.html>.
- [25] What is camera calibration?, 2021. Acedido a 09/04/2021 em <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>.
- [26] DrBob. Pinhole-camera. Publicado em English-language Wikipedia, 2008. Acedido a 09/04/2021 em <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pinhole-camera.png>.

- [27] Pinhole camera model. Em domínio público, 2007. Acedido a 09/04/2021 em <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pinhole2.svg>.
- [28] P. P. Editora. estenopeia. Dicionário infopédia da Língua Portuguesa, 2021. Acedido a 23/04/2021 em <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/estenopeia>.
- [29] MathWorks. Single camera calibrator app. MathWorks help center, 2021. Acedido a 23/04/2021 em <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html>.
- [30] D. Carvalho, J. Abreu, e P. Gonçalves. Calibration of a thermographic camera for microscale experiments. Technical report, Instituto Superior Técnico, 2021.
- [31] Y. Y. Kenning D.B.R. Pool boiling heat transfer on a thin plate: features revealed by liquid crystal thermography. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996.
- [32] A. Sielaff. Experimental investigation of single bubbles and bubble interactions in nucleate boiling. Dissertação de Mestrado, Darmstadt, Technische Universität, 2014.
- [33] B. Fornberg. Generation of finite difference formulas on arbitrarily spaced grids. *Mathematics of Computation*, 1988.
- [34] J. G. Harris e Y.-M. Chiang. Minimizing the "ghosting" artifact in scene-based nonuniformity correction. In *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing IX*, 1998.
- [35] S. Dai, Q. Liu, P. Li, J. Liu, e H. Xiang. Study on infrared image detail enhancement algorithm based on adaptive lateral inhibition network. *Infrared Physics & Technology*, 2015.
- [36] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, e A. S. Lavine. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, 8ª edição edition, 2020.
- [37] E. Teodori, P. Pontes, A. Moita, e A. Moreira. Thermographic analysis of interfacial heat transfer mechanisms on droplet/wall interactions with high temporal and spatial resolution. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018.
- [38] R. Cautela. Descrição dos mecanismos de ebulição em meio quiescente usando superfícies bifílicas. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2019.
- [39] L. Martins. Sistema de refrigeração por microcanais com escoamento multifásico para painéis solares de alta concentração. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2020.
- [40] R. Cautela. Effect of pattern geometry on bubble dynamics and heat transfer on biphilic surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020.
- [41] MathWorks. imfindcircles. MathWorks help center, 2021. Acedido a 28/06/2021 em <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imfindcircles.html>.

Anexo A

Ficha técnica da câmara

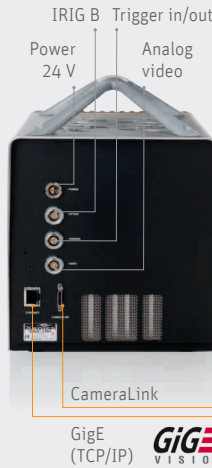
Onca-MWIR-InSb-320

Broad range of accessories available to simplify your research

▶ Lens & filter options



▶ Inputs



▶ Software



- Xeneth advanced
- Xeneth SDK
- Xeneth Radiometric (optional)
- Thermography Studio (optional)

▶ Outputs

▣ Specifications

Array specifications	Onca-MWIR-InSb-320	Onca-MWIR-InSb-640
Array type	InSb	
Spectral band	3.6 to 4.9 μm (optional: 1.0 - 5.5 μm)	
# pixels	320 x 256	640 x 512
Pixel pitch	30 μm	15 μm
Array cooling	Stirling cooled	
Sensitivity (NETD)	< 17 mK	< 20 mK
Pixel operability	> 99.5%	
Camera Specifications	Onca-MWIR-InSb-320	Onca-MWIR-InSb-640
Lens (included)		
Focal length	25 mm	
Optical interface	Bayonet	
Imaging performance		
Frame rate: Video rate	60 Hz	30 Hz
High speed	460 Hz	100 Hz
Window of interest	32 x 32	16 x 4
Exposure time range	>1 μs adjustable to full range	
A to D conversion resolution	14 bit	
Interfaces		
Camera control	GigE (GigE Vision or Xeneth API) Serial channel CameraLink (XSP)	
Image acquisition	GigE Vision: 14 bit full frame rate CameraLink: 14 bit full frame rate Analog: PAL or NTSC	
Trigger	Trigger in and out; LVCMOS; pre and post trigger	
Power requirements		
Power consumption	< 40 Watt at room temperature	
Power supply	24 V	
Physical characteristics		
Camera cooling	Forced convection cooling	
Ambient operating temperature	0 °C to 50°C	
Dimensions	170 W x 190 H x 250 L mm	
Weight camera head	5 kg (Lens not included)	
Hardware specifications		
Filter wheel options	Start – stop mode	
# filters	Up to 5 filters, 25.4 mm diameter, 1.0 mm thickness	

▣ Product selector guide

Part number	# Pixels	Wavelength range (μm)	Frame rate (Hz)
XEN-000178	320 x 256	3.6 to 4.9	60
XEN-000179			488
XEN-000180		1.0 to 5.5	60
XEN-000181			488
XEN-000190	640 x 512	3.6 to 4.9	30
XEN-000191			120
XEN-000192		1.0 to 5.5	30
XEN-000193			120

Thermography Options

Option 1	-20°C to 120°C
Option 2	50°C to 400°C
Option 3	300°C to 1200°C
Option 4	- to 2000°C

Anexo B

Ganho e viés do IRFPA

O IRFPA possui a possibilidade de alterar o ganho e viés do sensor internamente, permitindo fazer condicionamento de sinal. Este condicionamento permite que para a mesma gama de radiação, a gama de ADU resultante seja diferente. O condicionamento é aplicado antes do sinal chegar ao processador da câmara, visto que as unidades utilizadas para este ganho e viés são mV e nA . O efeito do ganho e viés do IRFPA é descrito pela seguinte equação:

$$V(\Phi) = G_{IRFPA}(\Phi + Q_{IRFPA}) \quad (B.1)$$

Sendo V a resposta do sensor em ADU, G_{IRFPA} o ganho do sensor e Q_{IRFPA} o viés. Esta equação utiliza as mesmas variáveis que a equação 2.13, mas aplica-se ao sinal de todos os píxeis de forma uniforme. Note-se também que o viés é multiplicado pelo ganho o que não acontecia na equação 2.13. Esta diferença não tem impacto na correcção de não-uniformidade, mas permite obter modelo fiel aos valores obtidos pela câmara.

Como os valores de ganho e viés possíveis não são contínuos, mas apenas os disponíveis numa lista, torna-se possível testar exhaustivamente as combinações possíveis para a mesma cena com o mesmo tempo de integração. A figura B.1 apresenta os valores médios de uma imagem termográfica de uma cena uniforme, para os diferentes valores de ganho e viés. A amplitude apresenta-se dividida pelo ganho de forma a facilitar a comparação dos valores.

Apesar de normalizados, os vários pontos com o mesmo viés apresentam uma discrepância de cerca de $1 \text{ ADU}/mV$ que ao multiplicar pelo ganho resulta num valor entre 100 e 700 ADU. Assim apesar de as linhas com o mesmo ganho terem o mesmo perfil não é possível converter imagens obtidas com ganhos diferentes sem introduzir erros significativos. O mesmo ocorre para as diferenças de viés que para valores de ganho diferentes são ligeiramente diferentes, resultando em erros significativos. Assim é necessário escolher um ganho e viés padrão que permitam fazer um condicionamento de sinal sem perda de informação. Note-se que o valor máximo de viés, 3000 nA , não aumenta a amplitude do sinal como esperado. Esta discrepância mantém-se, mesmo variando o tempo de integração, a intensidade da radiação incidente para os vários valores de ganho. Assim concluí-se esta discrepância não se deve a uma saturação dos valores, mas a uma situação de *overflow*.

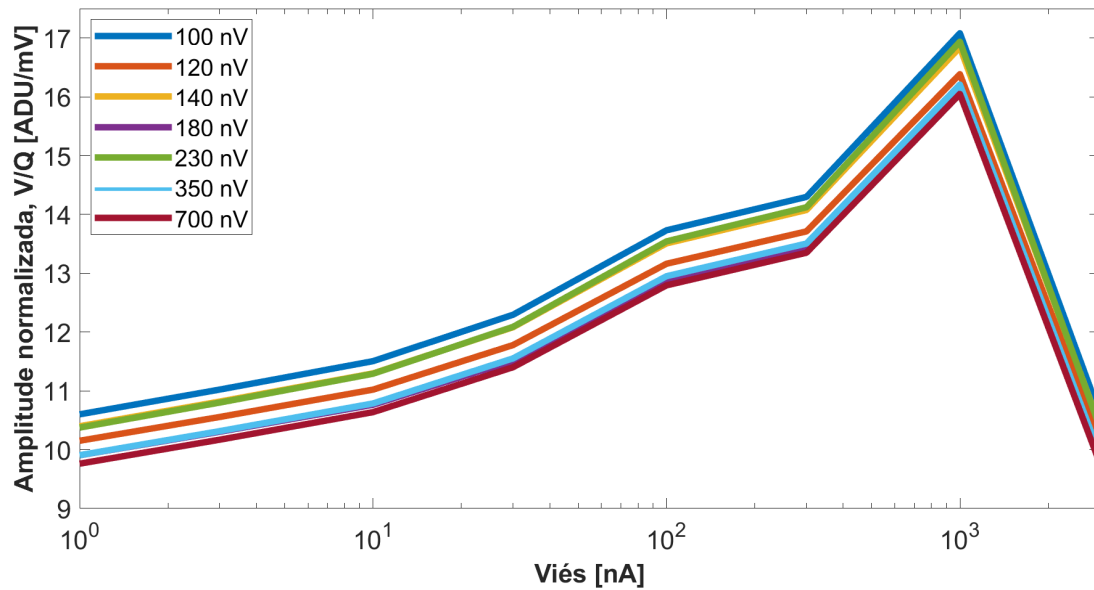


Figura B.1: Variação da amplitude em função do ganho e viés, tempo de integração de $200 \mu s$

Quanto maior o valor do viés, maior a amplitude do sinal. Uma vez que o sinal tem um limite superior de saturação é desejável que o viés seja reduzido de forma a evitar a saturação. Assim optou-se por manter o valor padrão de $3 nA$. O valor do ganho possibilita um aumento da profundidade do sinal. No entanto devido à gama de valores para que a câmara foi desenhada, o ganho máximo satura a temperaturas reduzidas (com tempo de integração de $400 ms$ satura para temperaturas acima de $50^\circ C$). Assim optou-se por manter o valor padrão de $180 mV$ que permite analisar fenómenos com a temperatura do ponto de ebulição da água, mas mantendo o máximo de profundidade de imagem.

Anexo C

Imagens obtidas

Neste anexo são apresentadas as várias imagens obtidas pelos diferentes métodos de ligação e diferentes softwares.

Na figura C.1 são apresentadas as imagens capturadas com os diferentes *softwares* utilizando a ligação *Camera Link*

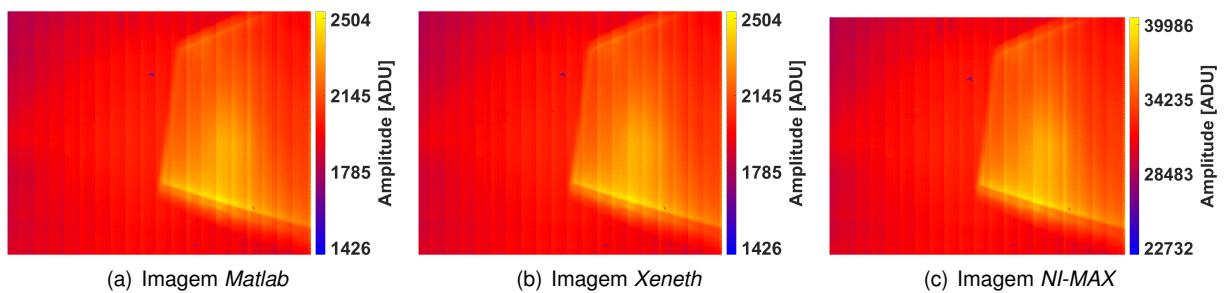


Figura C.1: Comparação de imagens obtidas via *Camera Link*

Na figura C.2 são apresentadas as imagens capturadas a com diferentes *softwares* utilizando a ligação *ethernet*



Figura C.2: Comparação de imagens obtidas via *ethernet*

Anexo D

Localização do padrão de calibração circular

Como a detecção do padrão utilizado não está implementada no *software Matlab*, foi necessário implementar um algoritmo para obter a localização dos pontos do padrão em cada imagem. O algoritmo utilizado é apresentado no fluxograma da figura D.1.

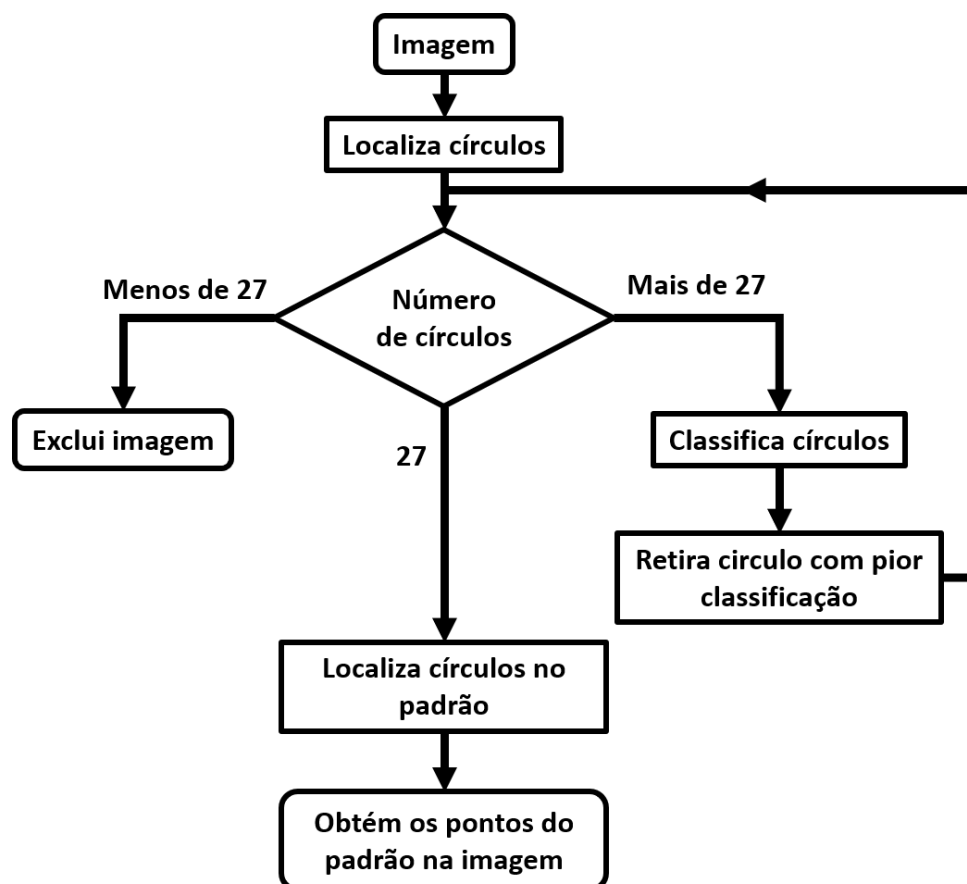


Figura D.1: Fluxograma de algoritmo de detecção do padrão circular

Após receber a imagem com o tratamento de não uniformização, são localizados os círculos da imagem. Para tal é utilizada função *imfindcircles* que utilizando um algoritmo baseado na transformada de *Hough* [41] localiza os círculos da imagem.

No entanto devido à existência de forma para além do padrão na imagem, o número de círculos detectados nem sempre corresponde aos 27 círculos presentes no padrão. No caso de não serem detectados círculos suficientes a imagem é descartada por falta de pontos.

No caso de existirem círculos em excesso estes são removidos deixando apenas os círculos do padrão. Para tal todos os círculos são classificados com base na distância média aos cinco círculos mais próximos. Após a classificação, o círculo com pior classificação (distância média maior) é retirado da selecção. Esta classificação é efectuada círculo a círculo, uma vez que um aglomerado de falsos positivos teria uma classificação global boa o suficiente para não ser eliminado enquanto que os círculos do padrão seriam eliminados. A figura D.2 apresenta os círculos identificados inicialmente, figura D.2(a), e os círculos correspondentes ao padrão após a aplicação do algoritmo, figura D.2(b).

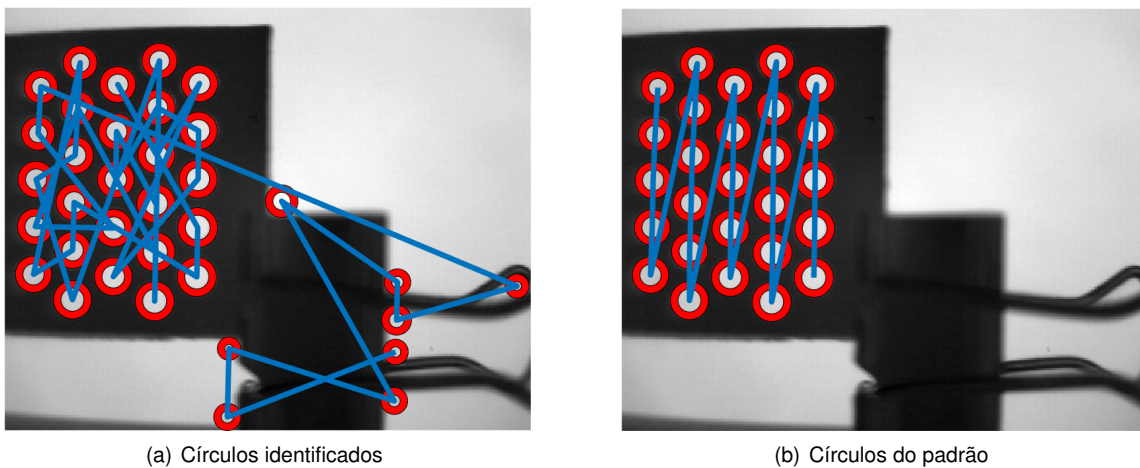


Figura D.2: Identificação do padrão na imagem

Após identificar correctamente os círculos correspondentes ao padrão é necessário fazer corresponder a ordenação dos círculos. Para tal as imagens do padrão tem sempre a mesma orientação. Assim os pontos são ordenados por distância na horizontal e divididos nas respectivas colunas. Em seguida os pontos de cada coluna são ordenados por distância na vertical obtendo-se a ordenação do padrão. Os pontos reais utilizados para calcular a distorção são inseridos com a mesma ordem.

Anexo E

Aquisição de imagens de referência

Para obter imagens com radiação uniforme utilizou-se um dispositivo que simula um corpo negro da marca Infrared Systems Development, modelo 546/201. Este dispositivo é composto por uma cavidade com material em redor para aumentar a inércia térmica. Este material é por sua vez aquecido de forma a manter a temperatura do corpo constante. Visto que o indicador de temperatura do corpo negro não corresponde ao valor real, foi introduzido um termopar tipo K na cavidade de modo a obter a temperatura durante as medições. O sinal do termopar foi lido por uma placa de aquisição DAQ, *Data Translation DT9828*, ligada ao computador com o *software QuickDAQ*.

Visto que a radiação emitida pelo corpo negro não cobre a totalidade do IRFPA é necessário obter imagens de referência do corpo negro em várias partes do sensor separadamente e depois juntar para obter uma imagem uniforme na totalidade do sensor. Para tal optou-se por fazer com que a câmara se deslocasse no sentido perpendicular ao da radiação emitida pelo corpo negro de forma a obter a referência numa faixa do ecrã. Ao repetir este procedimento com a cavidade a alturas diferentes foi possível cobrir a totalidade do ecrã. A figura E.1 apresenta a localização dos vários componentes.

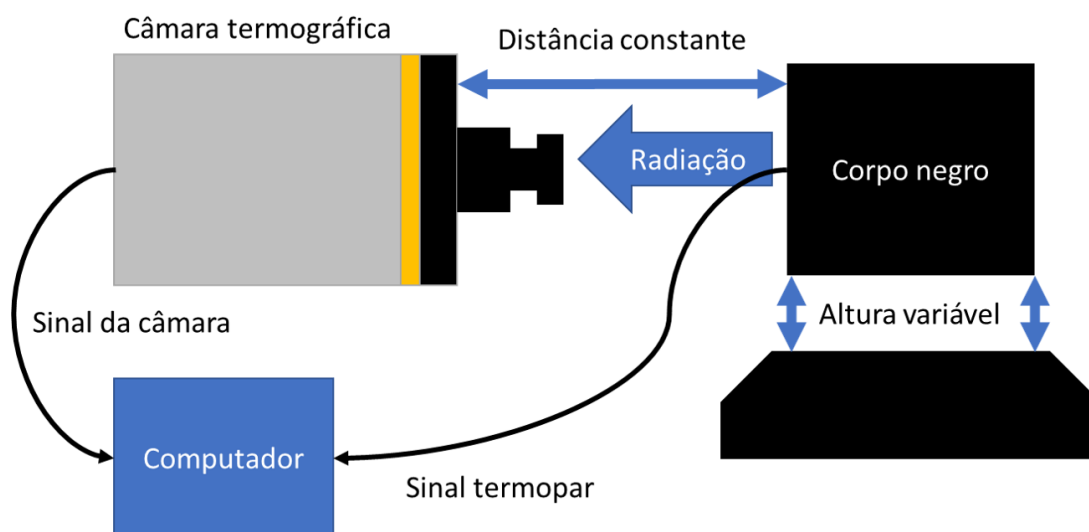


Figura E.1: Montagem para obtenção de imagens de referência

A selecção dos píxeis cobertos pelo corpo negro em cada imagem, foi efectuada com recurso às seguintes operações morfológicas: binarização da imagem com base num valor mínimo ajustado à radiação do corpo negro, seguida de uma operação de *closing* utilizando um elemento estrutural circular de raio reduzido para eliminar pequenos defeitos na binarização seguida de uma operação de *opening* de forma a retirar a bordas do corpo negro incluídas pela binarização. Na figura E.2 pode ser observada a comparação entre a imagem original, E.2(a) e a imagem segmentada, figura E.2(b).

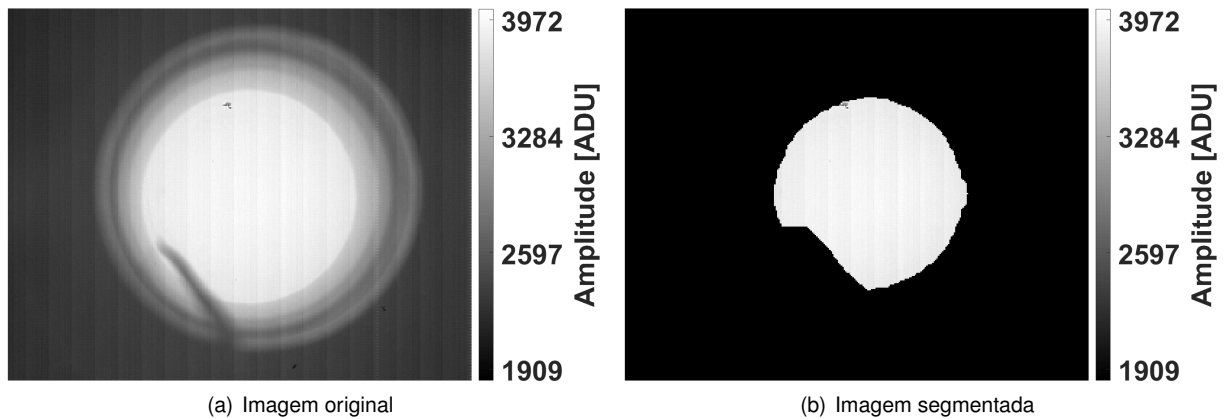


Figura E.2: Segmentação da imagem do corpo negro

Após segmentar as imagens verifica-se que todos os píxeis têm vários instantes de exposição ao corpo negro. Para criar a referência foi calculado o valor médio de cada píxel obtendo termogramas semelhantes ao apresentado na figura E.3 com valores médios para a totalidade do IRFPA.

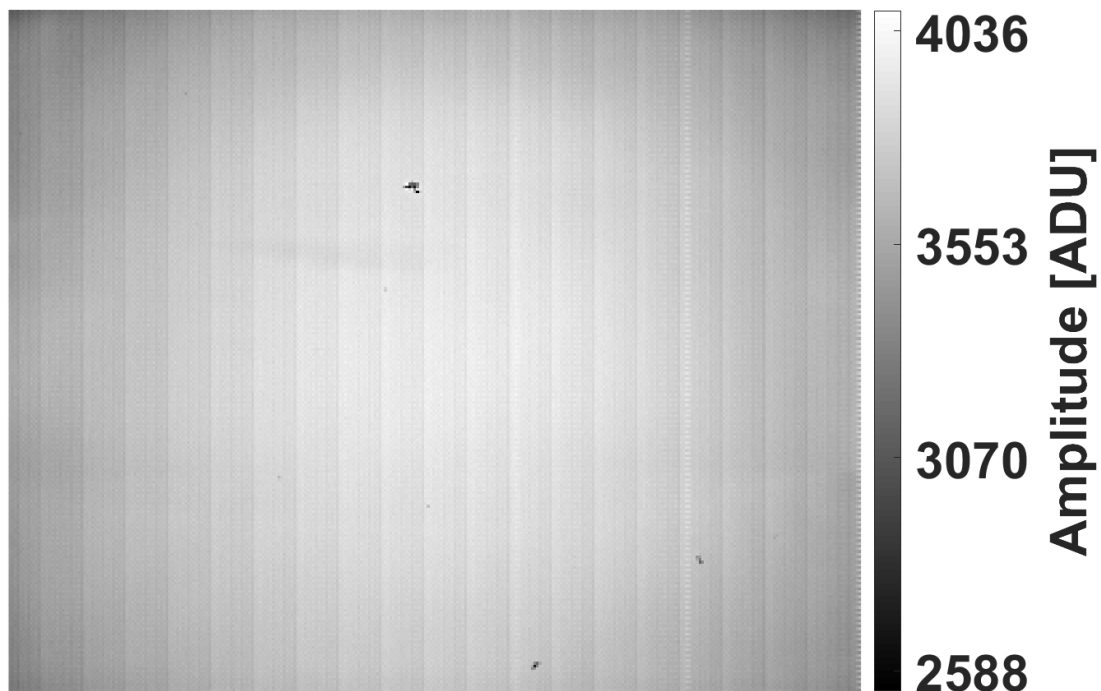


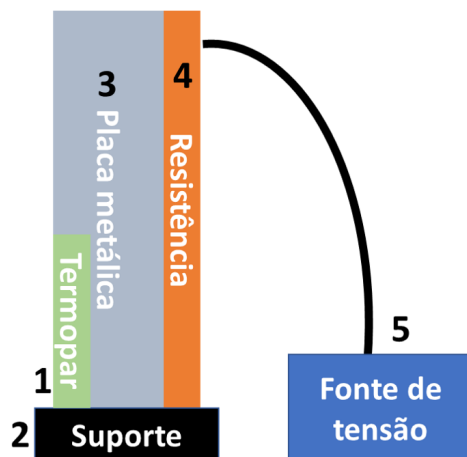
Figura E.3: Imagem de referência

Anexo F

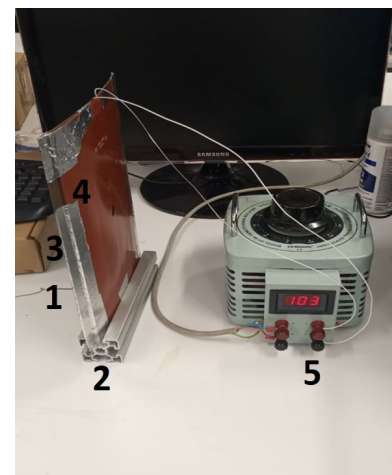
Imagens de referência de radiação uniforme

Para efectuar a correcção de não-uniformidade foram utilizadas imagens de uma cena com radiação uniforme. Como não é necessário conhecer o valor de radiação emitida pelo corpo, a configuração para obter as imagens pode ser simplificada em relação à apresentada no anexo E.

A figura F.1 apresenta a localização dos componentes utilizados.



(a) Esquema da montagem



(b) Configuração experimental

Figura F.1: Configuração da placa: (1) Termopar, (2) Suporte, (3) Placa metálica, (4) Resistência eléctrica (5) Fonte de tensão

A placa utilizada é composta por uma placa metálica encostada a uma resistência eléctrica plana. Apesar de o filamento da resistência aquecer mais rapidamente, a temperatura da placa é uniforme, porque a energia se dissipa pela placa. O lado da placa sem a resistência, foi coberto com uma tinta preta mate de alta emissividade para uniformizar a emissividade da área exposta.

A resistência é alimentada por uma fonte de tensão regulável com um valor de tensão ajustado em função da temperatura desejada. O termopar mede a temperatura da placa, permitindo verificar se a temperatura estabilizou.

Anexo G

Validação do cálculo de fluxo

Este anexo apresenta os cálculos efectuados para a comparação dos valores teóricos de energia de formação da bolha com os valores obtidos com recurso à câmara termográfica.

Para o cálculo de energia teórica foi utilizada a seguinte equação:

$$E_t = \Delta h_{fg} \rho V \quad (\text{G.1})$$

Sendo E_t a energia teórica, h_{fg} o calor latente da água, ρ a densidade do vapor de água e V o volume da bolha. Note-se que a densidade considerada é a densidade do vapor de água, uma vez o volume da bolha corresponde a uma massa de água no estado gasoso.

O cálculo do volume efectuou-se com base nas imagens da câmara de alta velocidade. Para tal assumiu-se que a bolha é axisimétrica, com cada píxel da imagem correspondente a um anel com um volume dado por:

$$V_p = \frac{\pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)drdy}{2} \quad (\text{G.2})$$

Com V_p o volume correspondente a um píxel, r_{ext} o raio exterior do píxel, r_{int} o raio interior, dr a dimensão horizontal de um píxel e dy a altura de um píxel da câmara de alta velocidade.

A segmentação dos píxeis correspondentes à bolha efectuou-se como apresentado na figura G.1.

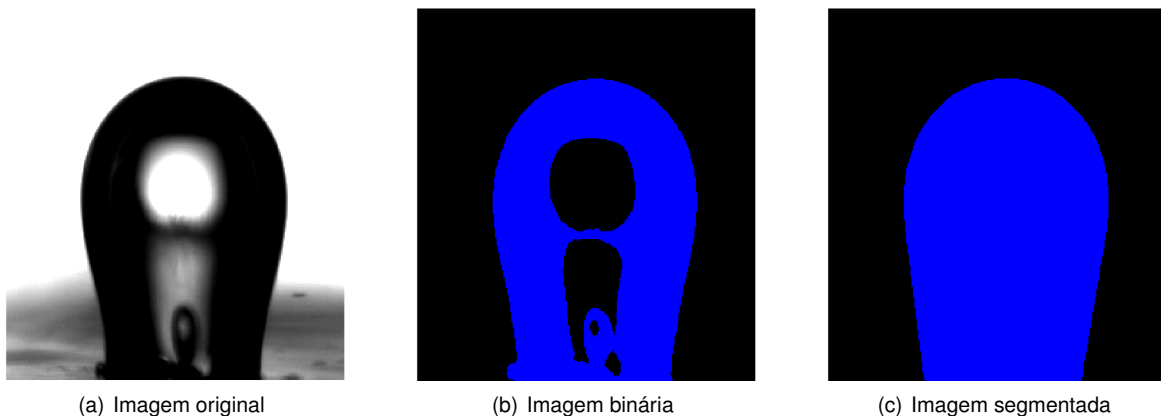


Figura G.1: Segmentação da bolha das imagens de alta velocidade

A imagem da câmara de alta velocidade, figura G.1(a), é monocromática, com a bolha a apresentar valores de luminosidade reduzidos, excepto a parte interior onde a luz é reflectida. Assim a segmentação binária com base num patamar obtém uma imagem onde o contorno da bolha se encontra definido, figura G.1(b). Os pontos segmentados, correspondentes a partes do fundo da imagem, mas que não pertencem à bolha são retirados ao efectuar uma operação de *opening*, de forma a eliminar os pontos dispersos e manter o contorno da bolha. A operação de fecho convexo¹, figura G.1(c), é efectuada de forma a que o interior da bolha seja incluído.

O volume da bolha é determinado somando os volumes de todos os píxeis da máscara, calculados com a equação G.2. A tabela G.1 apresenta as constantes termofísicas utilizadas, retiradas de [36].

Tabela G.1: Propriedades termofísicas da água, para a temperatura de saturação e à pressão atmosférica [36]

Propriedade	Valor
Calor latente (kJ/kg), h_{fg}	2257
Densidade do vapor de água (kg/m^3), ρ	0,5863

Assim utilizando a equação G.1 e os valores da tabela G.1, o volume estimado foi de $4,9 \times 10^{-8} m^3$ e a energia de $0,0645 J$ para uma nucleação específica.

O cálculo do valor experimental utiliza apenas os termogramas captados com a rotina JM21. A equação 2.29 é utilizada para o cálculo do fluxo em cada píxel e instante, com $q_0 = 0 Wm^{-2}$ de forma a contabilizar apenas a influência da bolha. A energia experimental é obtida ao integrar o fluxo da bolha no espaço e no tempo:

$$E_{exp} = \int_t \int_A q(x, y, t) dA dt \quad (G.3)$$

Onde q corresponde ao fluxo da bolha, A a área registada no termograma e t o intervalo de tempo da nucleação. Assim o valor experimental determinado foi de $0,0594 J$ para a mesma nucleação.

Para além da comparação dos valores finais, a figura G.2 apresenta a evolução dos valores de energia ao longo do tempo para a nucleação analisada.

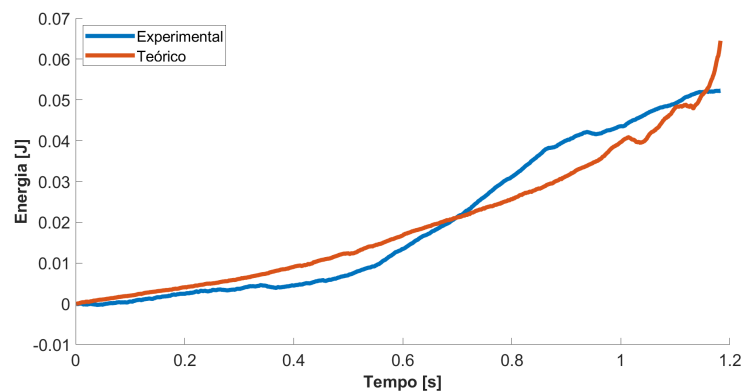


Figura G.2: Evolução do balanço energético de uma nucleação

¹convex hull

Assim para além dos valores finais do balanço serem valores com a mesma ordem de grandeza, a evolução temporal dos mesmos é semelhante, quer para os valores calculados com os dados da câmara termográfica, quer para os calculados com a informação da câmara de alta velocidade.

Assim considera-se que os valores de fluxo obtidos com a utilização da equação 2.29 e os vídeos da câmara termográfica obtidos com a nova metodologia JM21 são válidos.

